МАШИНОСТРОЕНИЕ

ЭНЦИКЛОПЕДИЯ

MECHANICAL ENGINEERING

Encyclopaedia

Главный редактор академик РАН
К.В. Фролов

МАШИНОСТРОЕНИЕ

ЭНЦИКЛОПЕДИЯ
В СОРОКА ТОМАХ

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

ФРОЛОВ К.В.
Председатель редакционного совета

Члены совета:

Белянин П.Н. (зам. Председателя редсовета и главного редактора), Колесников К.С. (зам. Председателя редсовета и главного редактора), Адамов Е.О., Анфимов Н.А., Асташов В.К., Бессонов А.П., Бюшгенс Г.С., Васильев В.В., Васильев В.П., Воронин Г.П., Глебов И.А., Долбенко Е.Т., Жесткова И.Н., Кирпичников М.П., Клюев В.В., Коптев Ю.Н., Ксеневич И.П., Мартынов И.А., Митенков Ф.М., Новожилов Г.В., Носов В.Б., Образцов И.Ф., Панин В.Е., Паничев Н.А., Патон Б.Е., Пашин В.М., Платонов В.Ф., Пугин Н.А., Румянцева О.Н., Силаев И.С., Туполев А.А., Федосов Е.А., Фортов В.Е., Черный Г.Г., Шемякин Е.И.

МОСКВА "МАШИНОСТРОЕНИЕ" 2001

Раздел III
ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА МАШИН

Том III-7

ИЗМЕРЕНИЯ, КОНТРОЛЬ, ИСПЫТАНИЯ И ДИАГНОСТИКА

Издание второе, исправленное и дополненное

Редактор-составитель чл.-корр. РАН,
д-р техн. наук **В.В. Клюев**

Ответственный редактор – чл.-корр. РАН,
П.Н. Белянин

Редакторы тома: чл.-корр. РАН, д-р техн. наук
В.В. Клюев (Испытания. Диагностика),
д-р техн. наук **Ф.Р. Соснин** (Контроль. Сертификация),
д-р техн. наук **В.Н. Филинов** (Измерения)

МОСКВА "МАШИНОСТРОЕНИЕ" 2001

УДК 621.01/.03
ББК 34.44
М38

Авторы: **В.В. Клюев, Ф.Р. Соснин, В.Н. Филинов, Н.П. Валуев, Э.С. Горкунов, И.В. Егоров, И.Н. Ермолов, В.Г. Запускалов, А.А. Кеткович, В.Н. Ковальский, Н.А. Колтовой, В.Н. Кольцов, С.В. Клюев, А.А. Кудинов, Ю.В. Ланге, Р.А. Макаров, В.С. Миротворский, В.Ф. Мужицкий, Е.Г. Нахапетян, Л.А. Хватов, Ю.А. Шачнев, В.Е. Щербинин**

Рецензенты: **С.Ф. Лазарев, О.И. Стеклов, В.Е. Шатерников**

Бюро редакционного совета: **К.С. Колесников, В.К. Асташов, П.Н. Белянин, А.П. Бессонов, В.В. Васильев, Н.Н. Боброва, Г.В. Москвитин, Е.Т. Долбенко, И.Н. Жесткова**

Машиностроение. Энциклопедия / Ред. совет: К.В. Фролов (пред.) и др. – М.: Машиностроение.
М38 **Измерения, контроль, испытания и диагностика.** Т. III-7 / В.В. Клюев, Ф.Р. Соснин, В.Н. Филинов и др.; Под общ. ред. В.В. Клюева, – 2-е изд., перераб. и доп. – 464 с., ил.
ISBN 5-217-01949-2
ISBN 5-217-02845-9 (Т. III-7)

Рассмотрены качество и технические измерения, широкий спектр параметров, подлежащих измерению, и технологии их измерения, метрологическое обеспечение измерений, анализ обработки измерительной информации; испытания, виды внешних воздействий, технология механических испытаний на растяжение, сжатие, удар, вибрацию, твердость и т.д.; испытания на акустический шум, герметичность и т.д., климатические испытания; классификация методов контроля, дефекты металлоизделий, технологии и средства выполнения методов контроля, основные направления и перспективы развития контроля; техническая диагностика, методы и средства диагностирования в разных отраслях промышленности; аккредитация испытательных лабораторий, сертификация персонала.

Во 2-м издании (1-е издание вышло в 1996 г.) полностью переработан раздел 5 в соответствии со стандартом ИСО 9000 в версии 2000 года; внесены изменения в п. 3.4.4 по стандарту EN 584-1.

УДК 621.01/.03
ББК 34.44

ISBN 5-217-01949-2
ISBN 5-217-02845-9 (Т. III-7)

© Издательство "Машиностроение", 1996
© Издательство "Машиностроение", 2001

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ 9

Раздел 1. ИЗМЕРЕНИЯ 11

Глава 1.1. **КАЧЕСТВО И ТЕХНИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ** . . . 11

1.1.1. Основные термины и определения (*В.В. Клюев*) . . . 11

1.1.2. Погрешности измерения (*В.Н. Филинов*) 15

Глава 1.2. **ИЗМЕРЯЕМЫЕ ПАРАМЕТРЫ** 17

Глава 1.3. **ИЗМЕРЕНИЕ РАЗМЕРОВ** (*Ю.А. Шачнев*) 18

1.3.1. Системы отсчета отклонений и нормальные условия измерения 18

1.3.2. Виды и методы измерения размеров 19

1.3.3. Технология измерения отклонений от плоскостности 20

1.3.4. Технология измерения отклонений от прямолинейности 25

1.3.5. Технология измерения отклонений от круглости (*А.А. Кудинов*) 25

1.3.6. Измерения на координатно-измерительных машинах (*В.С. Миротворский*) . . . 25

Глава 1.4. **ИЗМЕРЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ** (*В.Н. Филинов*) 35

1.4.1. Общие сведения 35

1.4.2. Средства измерения 36

1.4.3. Методы измерения 36

Глава 1.5. **ИЗМЕРЕНИЕ МАГНИТНЫХ ПАРАМЕТРОВ** 41

1.5.1. Общие сведения (*В.Ф. Мужицкий*) 41

1.5.2. Методы измерения (*В.Ф. Мужицкий*) 47

1.5.3. Магнитные преобразователи (*Э.С. Горкунов*) 47

Глава 1.6. **ИЗМЕРЕНИЕ ОПТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ** (*А.А. Кеткович*) 55

1.6.1. Общие сведения 55

1.6.2. Фотометрическая аппаратура 60

1.6.3. Методы измерения 62

Глава 1.7. **ИЗМЕРЕНИЕ МАССЫ** . . . 71

1.7.1. Общие сведения (*В.В. Клюев*) 71

1.7.2. Приборы и способы измерения массы (*В.Н. Филинов*) 74

Глава 1.8. **ИЗМЕРЕНИЕ ВРЕМЕНИ** (*В.Н. Филинов*) 77

1.8.1. Общие сведения 77

1.8.2. Системы хранения и передачи единицы времени . . . 78

1.8.3. Методы и приборы для измерения времени 79

Глава 1.9. **ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ** (*А.А. Кеткович*) . . . 84

1.9.1. Общие сведения 84

1.9.2. Методы измерения температуры 85

Глава 1.10. **ИЗМЕРЕНИЕ ДАВЛЕНИЯ** (*А.А. Кеткович*) 96

1.10.1. Общие сведения 96

1.10.2. Приборы измерения давления 96

Глава 1.11. **ИЗМЕРЕНИЕ УРОВНЯ И РАСХОДА** (*В.Н. Кольцов*) . . . 100

1.11.1. Методы и устройства измерения уровня 100

1.11.2. Методы и устройства измерения расходов 105

Глава 1.12. **ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ НАБЛЮДЕНИЙ** (*Ю.А. Шачнев*) 112

1.12.1. Обработка результатов наблюдений при прямых измерениях 112

1.12.2. Проверка гипотез о законе распределения 119
1.12.3. Обработка результатов наблюдений при косвенных измерениях 120
1.12.4. Обработка результатов измерений процессов .. 121
1.12.5. Обработка результатов измерений при восстановлении динамических моделей 124
1.12.6. Обработка результатов измерения случайных процессов (*В.Н. Филинов*) 125
1.12.7. Обработка данных при измерении качества 126
Глава 1.13. **МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИЗМЕРЕНИЙ** 128
1.13.1. Физические величины и анализ размерностей (*Ю.А. Шачнев*) 128
1.13.2. Единицы физических величин и их эталоны (*Ю.А. Шачнев*) 129
1.13.3. Погрешности измерений. Классификация (*Ю.А. Шачнев*) 132
1.13.4. Показатели точности и форма представления результатов измерений (*В.Г. Запускалов*) 133
1.13.5. Нормируемые метрологические характеристики (*В.Н. Филинов*) 133
1.13.6. Метрологическая аттестация средств и методов измерения (*В.Н. Филинов*) 134
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ 134
Раздел 2. ИСПЫТАНИЯ 136
Глава 2.1. **ОСНОВНЫЕ ТЕРМИНЫ** (*В.В. Клюев*) 136
Глава 2.2. **ВИДЫ ВНЕШНИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ** (*В.В. Клюев*) 138
Глава 2.3. **МЕХАНИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ** 142
2.3.1. Испытания на растяжение (*В.В. Клюев*) 143
2.3.2. Испытания на сжатие (*В.В. Клюев*) 146
2.3.3. Испытания на усталость (*В.В. Клюев*) 149
2.3.4. Испытания на удар (*В.В. Клюев*) 154
2.3.5. Испытания на изгиб (*В.В. Клюев*) 159
2.3.6. Испытания на кручение (*В.В. Клюев*) 160
2.3.7. Испытания на твердость ... 163
2.3.7.1. Общие сведения (*Е.Г. Нахапетян*) 163
2.3.7.2. Испытания на твердость по Бринеллю (*Е.Г. Нахапетян*) 165
2.3.7.3. Испытания на твердость по Роквеллу (*В.Н. Филинов*) 167
2.3.7.4. Испытания на твердость по Виккерсу (*В.Н. Филинов*) 171
2.3.7.5. Испытания на твердость методом ударного отпечатка (*В.Н. Филинов*) 172
2.3.7.6. Другие методы испытаний на твердость (*Е.Г. Нахапетян*) 173
2.3.8. Испытания на вибрацию .. 174
2.3.8.1. Основные сведения (*В.В. Клюев*) 174
2.3.8.2. Методы вибрационных испытаний 175
2.3.8.3. Виброиспытательные системы (*В.Н. Ковальский*) 179
2.3.9. Испытания на трение и износ (*Е.Г. Нахапетян*) ... 187
2.3.9.1. Основные сведения ... 187
2.3.9.2. Методы испытаний ... 188
Глава 2.4. **ИСПЫТАНИЯ НА АКУСТИЧЕСКИЙ ШУМ И ГЕРМЕТИЧНОСТЬ** (*В.Н. Филинов*) 194
2.4.1. Испытания на акустический шум 194
2.4.2. Испытания на герметичность 200
Глава 2.5. **КЛИМАТИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ** (*А.А. Кеткович*) 202
2.5.1. Основные климатические факторы 202
2.5.2. Испытания на теплоустойчивость 206
2.5.2.1. Общие сведения 206
2.5.2.2. Средства измерения температуры воздуха в камерах 209
2.5.2.3. Методы испытаний на воздействие повышенной температуры 209

2.5.3. Испытания на воздействие изменения температуры 211
2.5.3.1. Условия испытаний и применяемое оборудование 211
2.5.3.2. Методы испытаний . . 214
2.5.4. Испытания на холодоустойчивость 216
2.5.4.1. Условия испытаний и применяемое оборудование 216
2.5.4.2. Методы испытаний . . . 218
2.5.5. Испытания на воздействие влажности 219
2.5.5.1. Условия испытаний и применяемое оборудование 219
2.5.5.2. Методы испытаний . . . 224
2.5.6. Испытания на воздействие пыли 227
2.5.6.1. Условия испытаний и применяемое оборудование 227
2.5.6.2. Методы испытаний . . . 229
2.5.7. Испытания на воздействие солнечного излучения, атмосферного давления, плесневых грибов 230
2.5.7.1. Испытания на воздействие солнечного излучения 230
2.5.7.2. Испытания на воздействие пониженного атмосферного давления 235
2.5.7.3. Испытания на воздействие плесневых грибов 239
2.5.8. Испытания на воздействие специальных сред 241
2.5.9. Испытания на воздействие электромагнитного излучения и электростатического поля (*В.Н. Филинов*) 244
2.5.10 Испытания на воздействие ионизирующих излучений (*В.Н. Филинов*) 246
2.5.10.1. Общие сведения 246
2.5.10.2. Методы испытаний . . . 249
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ 253
Раздел 3. КОНТРОЛЬ 255
Глава 3.1. **ОСНОВНЫЕ ТЕРМИНЫ** (*Ф.Р. Соснин*) 255
3.2. **ДЕФЕКТЫ МЕТАЛЛОИЗДЕЛИЙ** (*Ф.Р. Соснин*) . . . 255
3.2.1. Металлургические дефекты 257
3.2.2. Дефекты технологического происхождения (дефекты обработки) 267
3.2.3. Эксплуатационные дефекты 276
3.2.3.1. Эксплуатационные дефекты в условиях воздействия статических нагрузок 276
3.2.3.2. Эксплуатационные дефекты в условиях воздействия переменных нагрузок 280
3.2.3.3. Растрескивание под действием термических напряжений 283
3.2.3.4. Радиационные повреждения 283
Глава 3.3. **КЛАССИФИКАЦИЯ МЕТОДОВ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ** (*Ф.Р. Соснин*) 284
Глава 3.4. **РАДИОГРАФИЯ** (*Ф.Р. Соснин*) 288
3.4.1. Общие сведения 288
3.4.2.. Схемы просвечивания . . . 290
3.4.3. Выбор энергии источников фотонного излучения 294
3.4.4. Рентгеновские пленки и химико-фотографическая их обработка 296
3.4.5. Выбор фокусного расстояния 301
3.4.6. Диафрагмы, коллиматоры, фильтры и компенсаторы ионизирующего излучения 303
3.4.7. Режимы просвечивания ОК рентгеновским излучением 305
3.4.8. Расшифровка радиографических снимков 308
3.4.9. Документальное оформление результатов радиографического контроля 311
Глава 3.5. **АКУСТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ 312**
3.5.1. Общие сведения (*И.Н. Ермолов*) 312
3.5.2. Классификация акустических методов (*Ю.В. Ланге*) 319
3.5.3. Методики контроля металлов 325
3.5.4. Методика контроля неметаллических материалов и многослойных конструкций (*Ю.В. Ланге*) 328

Глава 3.6. МАГНИТНЫЕ МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ 330
3.6.1. Основные сведения (*В.Ф. Мужицкий*) 330
3.6.2. Магнитные преобразователи (*В.Е. Щербинин*) 332
3.6.3. Магнитопорошковые дефектоскопы (*В.Ф. Мужицкий*) 336
Глава 3.7. КАПИЛЛЯРНЫЕ МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ (*В.В. Клюев*) 343
3.7.1. Основные сведения 343
3.7.2. Дефектоскопические материалы 344
3.7.2.1. Общие сведения 344
3.7.2.2. Наборы дефектоскопических материалов 345
3.7.2.3. Люминесцентные материалы 348
3.7.2.4. Рекомендации по контролю качества материалов 349
3.7.3. Проведение капиллярного контроля 352
3.7.3.1. Основные операции 352
3.7.3.2. Чувствительность и оценка результатов контроля 354
Глава 3.8. ТОМОГРАФИЯ 355
3.8.1. Общие сведения (*В.В. Клюев*) 355
3.8.2. Радиационная томография (*В.Н. Филинов*) 355
3.8.2.1. Выбор алгоритма реконструкции томографического изображения 358
3.8.2.2. Основные системы радиационных томографов 364
3.8.2.3. Универсальные промышленные компьютерные томографы 369
3.8.3. Ультразвуковая вычислительная томография (УВТ) (*В.В. Клюев*) 373
3.8.3.1. Общие сведения 373
3.8.3.2. Трансмиссионная УВТ 373
3.8.3.3. Отражательная УВТ 375
3.8.4. СВЧ-томография (*В.Н. Филинов*) 377
3.8.5. Томография на основе ядерного магнитного резонанса (ЯМР) (*В.Н. Филинов*) 379
Глава 3.9. ДРУГИЕ МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ (*Ф.Р. Соснин*) 381
3.9.1. Визуально-оптический метод 381
3.9.2. Течеискание 381
3.9.3. Вихретоковый метод 382
3.9.4. Радиоволновый метод 382
3.9.5. Нейтронная радиография 383
3.9.6. Электрический метод 384
3.9.7. Тепловые методы 384
3.9.8. Химико-аналитические методы 385
3.9.9. Методы анализа изображений (*Н.П. Валуев*) 387
3.9.10. Характеристики методов средств неразрушающего контроля 400
Глава 3.10. ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ КОНТРОЛЯ И ТЕХНИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ (*В.В. Клюев*) 400
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ 402
Раздел 4. ТЕХНИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА (*В.В. Клюев*) 404
Глава 4.1. ОСНОВНЫЕ ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ 404
Глава 4.2. ВИБРОДИАГНОСТИКА 406
4.2.1. Общие сведения 406
4.2.2. Методы вибродиагностики 410
4.2.3. Акустический шум 413
Глава 4.3. ДИАГНОСТИКА В УСЛОВИЯХ АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОИЗВОДСТВА (*Н.А. Колтовой*) 414
4.3.1. Общие сведения 414
4.3.2. Основные методы и средства диагностирования 419
Глава 4.4. МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ (*И.В. Егоров*) 424
4.4.1. Общие сведения 424
4.4.2. Средства и методы диагностирования 425
Глава 4.5. МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ГАЗОНЕФТЕПРОВОДОВ (*Л.А. Хватов*) 427
Глава 4.6. МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ДИАГНОСТИРОВАНИЯ АВТОМОБИЛЬНОГО ТРАНСПОРТА (*Р.А. Макаров*) 430
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ 433
Раздел 5. СЕРТИФИКАЦИЯ (*Ф.Р. Соснин*) 434
Глава 5.1. ОСНОВНЫЕ ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ 434
Глава 5.2. ОСОБЕННОСТИ СЕРТИФИКАЦИИ СИСТЕМ МЕНЕДЖМЕНТА КАЧЕСТВА ПО ТРЕБОВАНИЯМ СТАНДАРТА ИСО 9001 ВЕРСИИ 2000 ГОДА 441
Глава 5.3. ОБЩИЕ ТРЕБОВАНИЯ К КОМПЕТЕНТНОСТИ ИСПЫТАТЕЛЬНЫХ И КАЛИБРОВОЧНЫХ ЛАБОРАТОРИЙ 443
Глава 5.4. АККРЕДИТАЦИЯ И АТТЕСТАЦИЯ В СИСТЕМЕ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ГОСГОРТЕХНАДЗОРА РОССИИ 446
Глава 5.5. СЕРТИФИКАЦИЯ ПЕРСОНАЛА (*С.В. Клюев*) 447
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ 454
ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ 455

ПРЕДИСЛОВИЕ

Настоящий том энциклопедического справочника по машиностроению рассматривает основополагающие вопросы современной теории и практики **измерений, испытаний, неразрушающего контроля, диагностики и сертификации продукции (ИИНКДС).** Впервые основные приборостроительные направления обеспечения качества и безопасности машиностроения представлены в одной книге вместе, дополняя друг друга, но никоим образом не исключая целесообразность применения каждого направления для решения соответствующих задач.

Хорошо известно, что одной из главных проблем предупреждения всех технических аварий, равно как и колоссальных потерь от природных катастроф (таких, как землетрясения, цунами, смерчи и т.п.), является отсутствие необходимого уровня обеспечения методами и средствами ИИНКДС. Именно этим объясняется тот факт, что все промышленно-развитые страны мира теряют не менее 10 % своего национального дохода из-за недостаточного уровня качества машин и механизмов. Именно поэтому непрерывно растут расходы на встраивание в крупные технические объекты средств ИИНКДС, которые достигают 30 % и более от затрат на сооружение этих объектов.

Понятна аксиома, что чем больше времени работает машина, тем более опасной и трудоемкой становится ее эксплуатация, тем более точно и строго надо определять срок прекращения ее работы. Для этого применяется весь спектр ИИНКДС, охватывающий более 3 000 типов приборов и установок различного принципа действия.

Как известно, для машиностроения характерен наиболее широкий спектр параметров, подлежащих измерению: размеры, масса, время, температура и т.п. Это, в свою очередь, приводит к необходимости применения соответствующих и весьма разнообразных методов измерений, основанных на использовании средств микроэлектроники. Вопросы измерения и анализа обработки измерительной информации даются в первом разделе тома. Обращается внимание на метрологическое обеспечение измерений.

Для рационального ведения и автоматизации технологических процессов получения исходных заготовок литьем, обработкой давлением, резанием, сваркой и т.д., процессов нанесения покрытий и термической обработки и т.п. необходимо осуществлять испытание материалов на всех стадиях технологической цепочки. Во втором разделе "Испытания" рассматриваются все виды внешних воздействий и основных механических испытаний на растяжение, сжатие, усталость, удар, изгиб, кручение, твердость, вибрацию, трение и износ; дается справочная информация по испытаниям на акустический шум и герметичность, а также по климатическим испытаниям (на теплоустойчивость, изменение температуры, холодоустойчивость, влажность, пыль, солнечное излучение, атмосферное давление, плесневые грибы, ионизирующие и электромагнитные излучения и поля).

Третий раздел "Контроль" содержит материал по дефектам металлоизделий и основным методам неразрушающего контроля (радиографический, акустический, магнитный, капиллярный, вихревых токов, томография и др.). Такой контроль в настоящее время является естественной составной частью всего технологического процесса изготовления полуфабрикатов или изделий, а сами процессы контроля рационально включаются в технологические цепочки на возможно ранней стадии

изготовления изделий. В этом разделе впервые показаны экономические перспективы развития средств неразрушающего контроля.

В четвертом разделе "Техническая диагностика" представлена информация по вибродиагностике, диагностике в условиях автоматизации производства, методам и средствам диагностики газотурбинных двигателей летательных аппаратов, газонефтепроводов, автомобильного транспорта. Подчеркивается, что при эксплуатационном контроле агрегатов, за которыми предусмотрен технический надзор, применяют преимущественно методы неразрушающего контроля.

Пятый раздел "Сертификация" дает представление о сертификации продукции, персонала и аккредитации лабораторий.

Как и подобает справочному изданию, для удобства читателя все разделы начинаются со сведений об основных терминах.

Вследствие обширного объема излагаемых в этом томе сведений достаточно трудно было дать детальное описание всех способов измерений, испытаний, контроля и диагностики и возможностей их применения. Для более подробной информации отсылаем читателя к соответствующей литературе, списки которой приведены в конце каждого раздела, а также к стандартам.

Одной из особенностей тома является большое количество блок-схем, графиков и других иллюстраций.

Данный том будет полезен для инженерно-технических работников, ответственных за обеспечение качества и безопасность машин, для сотрудников служб контроля качества, студентов и преподавателей высших технических учебных заведений, специалистов в области измерений, испытаний, контроля, диагностики и сертификации.

РАЗДЕЛ 1

ИЗМЕРЕНИЯ

Глава 1.1

КАЧЕСТВО И ТЕХНИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

1.1.1. ОСНОВНЫЕ ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Качество продукции - это совокупность свойств продукции, обусловливающих ее способность удовлетворять определенные потребности в соответствии с ее назначением. Это определение является общим для различных видов продукции. Дополняющим к качеству понятием является надежность.

Надежность - свойство объекта сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность выполнять требуемые функции в заданных режимах в условиях применения, технического обслуживания, ремонта, хранения и транспортирования. В понятие надежность входит безотказность, долговечность, ремонтопригодность и сохраняемость в зависимости от назначения изделия и условий эксплуатации. Связь надежности и качества очевидна. Нельзя обеспечивать высокую надежность изделия без соответствующего качества.

Качество продукции характеризуется многочисленными параметрами, которые оценивают через измерения, поэтому измерительная техника должна быть неотъемлемой составной частью любого производственного процесса. Номенклатура показателей качества устанавливается стандартами или техническими условиями. В зависимости от характеризуемых свойств продукции установлено 11 групп показателей качества. Для конкретной продукции может быть использована часть этих групп. Например, повышение качества машин и агрегатов требует усиления контроля отливок, объем которых в современных машинах составляет около 50 %. Для оценки качества отливок общего назначения можно использовать пять групп показателей:

- классификационные (марка сплава, масса отливки, класс точности, группа сложности);
- показатели назначения (временное сопротивление, предел текучести, относительное удлинение и сужение, ударная вязкость, твердость, микроструктура);
- показатели технологичности и экономного использования металла (припуски на механическую обработку, допуски на необрабатываемые размеры отливки);
- показатели качества поверхности (шероховатость поверхности);
- экономические показатели (экономический эффект, себестоимость).

Номенклатура показателей может быть расширена в зависимости от конкретного применения, например в особо ответственных отливках возможен контроль ударной вязкости при пониженных температурах, стабильности геометрических размеров во времени, склонности к трещинообразованию, герметичности и т.п. В зависимости от назначения и конкретного применения номенклатура показателей качества может изменяться. Например, отливки из конструкционных нелегированных и легированных сталей делятся на три группы - общего, ответственного и особо ответственного назначения. Для группы отливок общего назначения перечень контролируемых показателей включает внешний вид, размеры, химический состав; для группы отливок ответственного назначения - внешний вид, размеры, химический состав, механические свойства (предел текучести или временное сопротивление, относительное удлинение); для группы отливок особо ответственного назначения - внешний вид, размеры, химический состав, механические свойства (предел текучести, временное сопротивление, относительное удлинение, ударная вязкость).

Каждое отдельное несоответствие продукции установленным требованиям называется **дефектом**. Имеется также понятие неисправность. **Неисправность** - состояние изделия, при котором оно непригодно к использованию. Понятие "неисправность" и "дефект" неидентичны.

Дефекты разделяют на явные и скрытые. Первые обнаруживают при внешнем осмотре или при помощи инструментальных средств и методик, имеющихся в нормативной документации. Визуально не обнаруживаемый дефект, который безусловно обнаружат при использовании соответствующих методик, относят к явным. Скрытый дефект не обнаруживается при осмотре и не выявляется предусмотренной методикой и аппаратурой.

Дефекты также разделяют на критические, которые делают использование продукции невозможным; значительные, которые оказывают существенное влияние на возможность или долговечность использования продукции; малозначительные, а также на неустранимые и устранимые.

Многообразие дефектов можно проиллюстрировать на примере возможных нарушений сплошности металла, которые являются следствием несовершенства его структуры и возникают на различных стадиях технологического процесса. К дефектам тонкой структуры относят дислокации - зоны искажений атомной решетки. Микроскопические трещины размером в несколько микрометров образуются при обработке детали и резко снижают ее прочность. Наиболее грубые макроскопические дефекты различают по размерам и расположению, а также по природе и происхождению. Они могут образоваться в процессе плавки и литья (раковины, поры, рыхлости, включения, ликвационные зоны, неслитины и т.д.), обработки давлением (внутренние и поверхностные трещины, расслоения, пресс-утяжины, рванины, закаты, плены, флокены и т.д.), термической и химико-термической обработки (зоны грубозернистой структуры, перегрева, пережога, термические трещины, несоответствие толщины закаленного, цементованного, азотированного и других слоев, несоответствие толщины слоя гальванического покрытия и т.д.), обработки резанием (шлифовочные трещины, прижоги), сварки, пайки, склеивания (непровар, трещины, непропай, непроклей), хранения и эксплуатации (коррозия, усталостные трещины, ползучесть и т.д.).

Метрологические термины. *Метрология* - наука об измерениях, методах и средствах обеспечения их единства и способах достижения требуемой точности.

Измерение - нахождение физической величины опытным путем с помощью специальных технических средств.

Единство измерений - такое состояние измерений, при котором их результаты выражены в узаконенных единицах и погрешности измерений известны с заданной вероятностью. Без единства измерений невозможно сопоставление результатов измерений, выполненных в разных местах, в разное время, с использованием разных методов и средств измерений.

Точность измерений - качество измерений, отражающее близость их результатов к истинному значению измеряемой величины.

Погрешность измерения - отклонение результата измерения от истинного значения измеряемой величины. Абсолютная погрешность измерения

$$\Delta x = x_{\text{изм}} - x,$$

где $x_{\text{изм}}$ - значение, полученное при измерении; x - истинное значение измеряемой величины.

По условиям, определяющим точность результата, измерения подразделяют на три класса: эталонные и специальные измерения максимально возможной точности; контрольно-проверочные измерения, выполняемые государственными и заводскими измерительными лабораториями; технические измерения, выполняемые в процессе производства на машиностроительных предприятиях. При технических измерениях погрешность результата определяется характеристиками средств измерений.

Измерения осуществляют с помощь технических средств, к которым относят меры, измерительные приборы, измерительные преобразователи, измерительные установки и измерительные системы. Их определения даны в табл. 1.1.1.

Средство измерений - техническое средство, используемое при измерениях и имеющее нормированные метрологические свойства.

Меры, воспроизводящие физические величины лишь одного размера, называют *однозначными. Многозначная* мера - мера, воспроизводящая ряд одноименных величин различного размера.

1.1.1. Классификация средств измерений

Средство измерений	Определение	Примеры
Мера	Средство измерений, предназначенное для воспроизведения физической величины заданного размера	Плоскопараллельные концевые меры длины. Угловые меры
Измерительный прибор	Средство измерений, предназначенное для выработки сигнала измерительной информации в форме, доступной для непосредственного восприятия наблюдателем	Микрометр. Инструментальный микроскоп

Продолжение табл. 1.1.1

Измерительный преобразователь	Средство измерений, предназначенное для выработки сигнала измерительной информации в форме, удобной для передачи, дальнейшего преобразования, обработки и (или) хранения, но не поддающейся непосредственному восприятию наблюдателем	Индуктивный преобразователь измерительного прибора
Измерительная установка	Совокупность функционально объединенных средств измерений (мер, измерительных приборов, измерительных преобразователей) и вспомогательных устройств, предназначенная для выработки сигналов измерительной информации в форме, удобной для непосредственного восприятия наблюдателем, и расположенная в одном месте	Установка для проверки плоскопараллельных концевых мер длины
Измерительная система	Совокупность средств измерений, соединенных между собой каналами связи, предназначенная для выработки сигналов измерительной информации в форме, удобной для автоматической обработки, передачи и (или) использования в автоматических системах управления	Трехкоординатная измерительная машина

Измерительные приборы по способу отсчета значений измеряемых величин подразделяют на показывающие, в том числе на аналоговые и цифровые, и на регистрирующие.

Аналоговый прибор - прибор, показания которого являются непрерывной функцией изменений измеряемой величины. Отсчетные устройства этих приборов состоят из двух элементов - шкалы и указателя, причем шкала связана с корпусом, а указатель - с подвижной системой прибора.

Цифровой прибор - прибор, автоматически вырабатывающий дискретные сигналы измерительной информации, показания которого представлены в цифровой форме. *Регистрирующий* прибор - прибор с записью показаний в форме диаграмм или с печатанием показаний в цифровой форме.

По способу определения значения измеряемой величины измерительные приборы подразделяют на две группы: приборы прямого действия и приборы сравнения. Наибольшее распространение получили приборы первой группы.

Измерительный прибор прямого действия - прибор с одним или несколькими преобразователями сигнала измерительной информации в одном направлении, т.е. без применения обратной связи (без возвращения к входной величине). Например, перемещение измерительного наконечника индикатора часового типа или измерительной головки в зависимости от размера контролируемого изделия преобразуется относительно неподвижной шкалы.

Измерительный прибор сравнения - прибор, предназначенный для непосредственного сравнения измеряемой величины с величиной, значение которой известно.

Измерительные преобразователи являются составными частями измерительных приборов, систем автоматического контроля, управления и регулирования. Наибольшее применение получили преобразователи индуктивные, механотропные, электроконтактные, пневмоэлектроконтактные и др. По месту, занимаемому в приборе, преобразователи подразделяют на первичные, передающие и промежуточные.

Метод измерений - совокупность приемов использования принципов и средств измерений. Под принципом измерений понимают физическое явление или совокупность физических явлений, положенных в основу измерений. По способу получения результатов измерения разделяют на *прямые, косвенные, абсолютные* и *относительные* (табл. 1.1.2).

Основные методы прямых измерений приведены в табл. 1.1.3.

В зависимости от числа одновременно выявляемых размерных параметров методы и средства подразделяют на *дифференцированные* (или поэлементные, т.е. расчлененные на отдельные параметры) и *комплексные*. Дифференцированный метод измерения характеризуется тем, что параметр каждого элемента изделия измеряют независимо от других элементов.

Комплексным методом измерения называют измерения, при которых определяют влияние комплекса параметров (элементов), характеризующих изделие и точность.

Для оценки эксплуатационных свойств средств измерений используют метрологические параметры (табл. 1.1.4).

1.1.2. Виды измерений

Измерение	Определение
Прямое	Измерение, при котором искомое значение величины находят непосредственно из опытных данных
Косвенное	Измерение, при котором искомое значение величины находят на основании известной зависимости между этой величиной и величинами, подвергаемыми прямым измерениям
Абсолютное	Измерение, основанное на прямых измерениях одной или нескольких основных величин и (или) использовании значений физических констант
Относительное	Измерение отношения величины к одноименной величине, играющей роль единицы, или измерение величины по отношению к одноименной величине, принимаемой за исходную

1.1.3. Методы измерений

Метод	Определение
Непосредственной оценки	Значения измеряемой величины получают непосредственно по отсчетному устройству измерительного прибора прямого действия Примечание. Отсчетное устройство - часть конструкции средства измерений, предназначенная для отсчитывания значений измеряемой величины
Сравнения с мерой:	Измеряемую величину сравнивают с величиной, воспроизводимой мерой
дифференциальный	На измерительный прибор воздействует разность измеряемой величины и известной величины, воспроизводимой мерой
совпадений	Измеряют разность между измеряемой величиной и величиной, воспроизводимой мерой, используя совпадения отметок шкал или периодических сигналов
нулевой	Результирующий эффект воздействия величин на прибор сравнения доводят до нуля

1.1.4. Параметры средств измерений

Параметр	Определение
Номинальное значение меры	Значение величины, указанное на мере или приписанное ей
Действительное значение меры	Действительное значение величины, воспроизводимой мерой (получают при ее измерении путем исключения систематических погрешностей)
Отсчет	Число, отсчитанное по отсчетному устройству средства измерений либо полученное счетом последовательных отметок или сигналов
Показания прибора (средства измерений)	Значение величины, определяемое по отсчетному устройству и выраженное в принятых единицах этой величины
Диапазон измерений	Область значений измеряемой величины, для которой нормированы допускаемые погрешности средства измерений
Предел измерений	Наибольшее или наименьшее значение диапазона измерений
Чувствительность измерительного прибора	Отношение изменения сигнала на выходе измерительного прибора к вызывающему его изменению измеряемой величины. Абсолютная чувствительность $S = \Delta l / \Delta x.$ Относительная чувствительность $S_0 = \Delta l \Big/ \frac{\Delta x}{x},$ где Δl - изменение сигнала на выходе; x - измеряемая величина; Δx - изменение измеряемой величины
Нормальные условия применения средства измерения	Условия применения средств измерений, при которых влияющие величины имеют нормальные значения или находятся в пределах нормальной области значений. При нормальных условиях определяется основная погрешность средств измерения

1.1.2. ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ

Результат измерения, как бы тщательно оно не проводилось, содержит погрешность измерения. Поэтому результат измерения всегда отличается от истинного значения измеряемой величины.

Разность между результатом измерения и истинным значением измеряемой величины называется *погрешностью измерения*.

Поскольку истинное значение измеряемой величины неизвестно, то неизвестна и погрешность измерения. В этом случае истинное значение измеряемой величины заменяют действительным значением. Под действительным значением физической величины понимают ее значение, найденное опытным путем и настолько приближающееся к истинному, что оно принимается вместо него.

Чтобы оценить результат измерения, необходимо оценить погрешности, с которыми оно выполнено, а для этого важно знать источники и причины, вызывающие погрешности.

Принято погрешности подразделять на три группы: *систематические, случайные* (табл. 1.1.5) и *грубые*.

Грубой называется *погрешность* измерения, существенно превышающая ожидаемую при данных условиях погрешность. Например, ошибочно снято показание прибора и др. Такие грубые погрешности обнаруживают при повторном измерении; их не принимают во внимание и исключают из результатов измерений.

Для выявления и исключения *систематических погрешностей* осуществляют поверку средств измерений в органах государственной или ведомственных метрологических служб, применяют особые методы измерения, проводят повторные измерения в разных местах с применением различных средств измерений. Но бывают случаи, когда и систематические погрешности выявить и исключить не удается. Тогда для обработки результатов измерений и оценки систематической погрешности с заданной вероятностью применяют специальные методики, основанные на теории вероятности.

1.1.5. Погрешности измерений и их составляющие

Погрешность	Определение	Причины возникновения погрешности
	Составляющие погрешности измерения	
Систематическая	Остающаяся постоянной или закономерно изменяющаяся при повторных измерениях одной и той же величины	Отклонение от нормальной температуры измерения; измерение прибором, у которого указатель смещен относительно нулевой отметки
Случайная	Изменяющаяся случайным образом при повторных измерениях одной и той же величины	Округление при отсчитывании показаний прибора; вариации показаний прибора
	Составляющие систематической погрешности измерения	
Инструментальная	Зависящая от погрешностей применяемых средств измерения	Несовершенство кинематической схемы прибора; отклонения размеров, формы и расположения поверхностей деталей прибора; износ прибора при эксплуатации
Методическая	Происходящая от несовершенства метода измерений	Невыполнение нормальных условий измерения, неправильная установка прибора, применение приближенных расчетных формул, ошибочные методики измерения
Субъективная	Обусловленная индивидуальными особенностями наблюдателя, производящего измерения	Недостаточно точное отсчитывание показаний прибора; ошибки при оценке на глаз долей деления шкалы, соответствующих положению указателя; параллакс при отсчете показаний прибора; разная реакция органов чувств на сигналы

Случайную погрешность обнаружить и исключить практически невозможно, так как она проявляется случайно. В этом случае определяют закон распределения случайных погрешностей и на основе теории вероятности находят доверительный интервал, в границах которого находится истинное значение измеряемой величины с заданной вероятностью. Чем уже этот интервал, тем ближе результат измерения к истинному значению измеряемой величины. Случайные погрешности уменьшаются с повышением точности и тщательности проведения измерений.

Таким образом, погрешность измерений включает в себя все составляющие как систематической, так и случайной погрешности. Известные систематические погрешности суммируются алгебраически, а случайные - квадратически.

Погрешности средств измерений (табл. 1.1.6) при технических измерениях во многих случаях определяют и погрешность измерений. В нормативно-технических документах (ГОСТ, ОСТ и др.) преимущественно указывают основную погрешность или предельно допускаемую погрешность. Эти погрешности не учитывают погрешности, допускаемые наблюдателем, и метода измерения. По основной погрешности, зная допуск на изготовление изделия, для измерения изделия подбирают соответствующее средство измерений.

1.1.6. Погрешности средств измерений

Погрешность	Определение
Δx абсолютная меры	Разность между номинальным значением меры $x_н$ и истинным значением x воспроизводимой ею величины $$\Delta x = x_н - x$$
$\Delta x_п$ абсолютная измерительного прибора	Разность между показанием измерительного прибора $x_п$ и истинным значением x измеряемой величины $$\Delta x_п = x_п - x$$ Примечание. В связи с тем, что истинное значение величины остается неизвестным, на практике вместо него пользуются действительным значением
δ относительная меры (измерительного прибора)	Отношение абсолютной погрешности меры (измерительного прибора) к истинному (действительному) значению величины, воспроизводимой мерой (предпочтительнее выражать в %) $$\delta = \pm\frac{\Delta x}{x_п}100$$
$\Delta_{пр}$ приведенная измерительного прибора	Отношение погрешности измерительного прибора к нормирующему значению x_N. За нормирующее значение x_N условно принимают значение верхнего предела измерений, длины шкалы и др. Обычно $\Delta_{пр}$ выражают в %: $$\Delta_{пр} = \frac{\Delta x}{x_N}100$$
Основная средства измерений	Погрешность средства измерений, используемого в нормальных условиях
Дополнительная	Погрешность, вызванная отклонением от нормальных условий измерений
Предельно допускаемая	Наибольшая (без учета знака) погрешность средства измерений, при которой оно может быть признано годным и допущено к применению

Глава 1.2

ИЗМЕРЯЕМЫЕ ПАРАМЕТРЫ

Для определения качества и работоспособности изделия, поиска дефектов и прогнозирования состояния машин необходимо измерять характерные параметры. Измеряемые параметры выбирают из множества параметров для исследования информативности признаков, сформированных на этих параметрах. На основании информативности признаков определяют окончательный ряд измеряемых параметров, которые используют в дальнейшем для диагноза неисправных состояний. Номенклатура измеряемых параметров различных изделий регламентируется стандартами.

При повышении требований к надежности машин число измеряемых параметров, а следовательно, необходимых измерительных средств увеличивается.

Физические параметры разделяют на группы, приведенные в табл. 1.2.1.

1.2.1. Группы физических параметров

Наименование группы	Измеряемые параметры
Кинематические	Время, скорость, ускорение, угловая скорость, угловое ускорение, период, частота, фаза, градиент скорости, объемный расход, плотность объемного расхода
Геометрические	Длина, площадь, угол, телесный угол, кривизна линии, кривизна поверхности, моменты плоских фигур, осевой и полярный моменты инерции площади плоской фигуры
Статические и динамические	Масса, сила, импульс силы, количество движения, давление, градиент давления, работа, энергия, мощность, коэффициент трения, коэффициент сопротивления, коэффициент упругости, момент силы, момент инерции, массовый расход, массовая скорость потока, затухание, добротность
Механические и молекулярные	Плотность, удельный объем, количество вещества, относительная молекулярная масса, молярная масса, молярный объем, коэффициент продольного растяжения, модуль продольной упругости, твердость, ударная вязкость, динамическая вязкость, текучесть, кинематическая вязкость, коэффициент поверхностного натяжения, концентрация вещества, коэффициент диффузии
Тепловые	Температура, количество теплоты, температурный градиент, тепловой поток, поверхностная плотность теплового потока, энтропия, теплоемкость (удельная и объемная), теплота фазового превращения, теплота сгорания топлива, коэффициент теплопроводности, коэффициент теплопередачи, коэффициент температуропроводности
Акустические	Звуковое давление, объемная скорость, звуковая энергия, плотность звуковой энергии, интенсивность звука, удельное акустическое сопротивление, механическое сопротивление, интенсивность звука, высота звука, тембр звука, громкость звука, акустический коэффициент отражения, акустический коэффициент поглощения, акустическая проницаемость перегородки, время реверберации
Электрические	Электрический заряд, поверхностная плотность заряда, напряженность электрического поля, электрическое смещение, поток электрического смещения, потенциал, электрический момент диполя, емкость, диэлектрическая проницаемость, диэлектрическая восприимчивость, сила тока, плотность тока, электрическое сопротивление, удельная проводимость
Магнитные	Магнитная индукция, магнитный поток, напряженность магнитного поля, магнитный момент, магнитодвижущая сила, магнитное сопротивление, индуктивность, взаимная индуктивность, намагниченность, магнитная проницаемость

Продолжение табл. 1.2.1

Наименование группы	Измеряемые параметры
Излучений	Лучистый поток, поверхностная плотность потока излучения, энергетическая освещенность, энергетическая яркость, энергия излучения, спектральная плотность энергии излучения, освещенность, яркость, экспозиция, сила света, коэффициент преломления, коэффициент отражения, коэффициент поглощения, коэффициент пропускания
Атомной физики	Момент количества движения, момент диполя, доза поглощенного излучения, экспозиционная доза излучения, радиоактивность, коэффициент рекомбинации

Число используемых физических величин ограниченно и не превышает 200. Наибольший практический интерес представляют измеряемые физические величины, находящиеся в функциональной связи с параметрами назначения и надежности объектов, например обнаружение дефекта в виде трещины и определение его параметров может быть выполнено с помощью измерения магнитной проницаемости, коэрцитивной силы, магнитной индукции ферромагнитного материала (магнитный метод), температуропроводности, теплоемкости, теплопроводности материала (тепловой метод) или модуля упругости, плотности, удельного волнового сопротивления материала (акустический метод).

Измерение физических параметров, использование специальных физических эффектов положены в основу различных методов контроля и технической диагностики, с помощью которых анализируют и оценивают сложное техническое состояние объектов.

Глава 1.3

ИЗМЕРЕНИЕ РАЗМЕРОВ

Методическая составляющая погрешности измерения размеров определяется: 1) отклонением от принятых условий определения размера; 2) отклонением схемы измерения от такой, которая следует из определения размера. Поэтому решение задачи измерения размеров начинается с установления условий и схемы измерения.

1.3.1. СИСТЕМЫ ОТСЧЕТА ОТКЛОНЕНИЙ И НОРМАЛЬНЫЕ УСЛОВИЯ ИЗМЕРЕНИЯ

При измерении линейных размеров в зависимости от задачи измерения за начало отсчета отклонений принимают или номинальные размеры или прилегающие поверхности (контуры), или средние. При контроле размеров, отклонений формы и расположения используют прилегающие.

Прилегающие поверхности и контуры - это поверхности и контуры, имеющие форму номинальных (и заданных чертежом), касательные к реальной поверхности, лежащие вне материала детали и имеющие наименьшее значение максимального отклонения от реальной поверхности.

Измерение размера - это или измерение размера прилегающего замкнутого контура (например, для цилиндрических поверхностей - диаметр прилегающего цилиндра), или измерение максимального расстояния между прилегающими поверхностями (контурами).

За начало отсчета отклонений приняты номинальные размеры. **Измеренное отклонение размера** - это разность между номинальным значением размера и измеренным размером.

За начало отсчета отклонений формы принимают прилегающую поверхность (контур).

Измерение отклонений формы - это измерение отклонений реальных поверхностей (контуров) от прилегающих. **Измерение отклонений расположения** - это измерение отклонений расположения прилегающих поверхностей (контуров) или их осей относительно номинальных положений или отклонений взаимного расположения.

Средние поверхности (контуры) определяют как поверхности и контуры, имеющие форму номинальных и пересекающие реальный профиль так, что разность сумм квадратов положительных и отрицательных отклонений минимальна.

В разделе 1.12 представлены методы определения средней линии и, в частности, метод наименьших квадратов.

Средние линии принимают за начало отсчета отклонений при измерении некоторых параметров шероховатости поверхности и при анализе отклонений формы (математические методы анализа изложены в 1.12).

Нормальные условия для линейных измерений в пределах от 1 до 500 мм и измерений углов с длиной меньшей стороны до 500 мм:
- температура окружающей среды 20 ^{0}С;
- атмосферное давление 101324,72 Па (760 мм рт. ст.);
- относительная влажность окружающего воздуха 58 % (нормальное парциальное давление водяных паров 1333,22 Па);
- ускорение свободного падения 9,8 м/с^2;

- направление линии измерения линейных размеров до 160 мм наружных поверхностей - вертикальное, в остальных случаях - горизонтальное;
- положение плоскости измерения углов - горизонтальное;
- относительная скорость движения внешней среды равна нулю;
- значения внешних сил равны нулю.

Нормальная область значений влияющих величин при линейных и угловых измерениях - это область, для которой погрешность средства измерения может превышать допускаемую основную погрешность на 0,1 от допуска на изготовление.

При выборе допускаемой погрешности измерения учитывается зависимость погрешности измерения Δ от размера d измеряемой физической величины. Такая зависимость положена и в основу построения системы допускаемых погрешностей измерения. В общем случае эта зависимость в параметрической форме имеет вид

$$d = \exp\left[\int \frac{du}{\left(bu^p + a\right)^{1/q} - u} + c\right],$$

$$\Delta = \exp\left[\int \frac{du}{\left(bu^p + a\right)^{1/q} - u} + c\right],$$

где u - параметр; c, a, p, q - постоянные.

Для практически встречающихся случаев можно выбрать $a = 0$. Тогда

$$\Delta = \left[b^{1/q}\left(d^{(1-p/q)} + c\right)\right]^{1/(1-p/q)},$$

где b, c - постоянные.

1.3.2. ВИДЫ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ РАЗМЕРОВ

Виды измерения: 1 - косвенные, 2 - прямые. Область применения косвенных измерений линейных величин ограничена в первую очередь точностью используемой зависимости между величинами, получаемыми прямыми измерениями, и искомыми. В то же время сложность построения прямых измерений в ряде случаев приводит к тому, что погрешность используемой зависимости может оказаться при прочих равных условиях меньше погрешности прямого измерения из-за сложности обеспечения: 1) требуемой инструментальной составляющей, 2) нормальных условий измерения.

Примеры: измерение среднего диаметра резьбы; измерение толщины листа рентгеновским толщиномером в процессе прокатки.

Координатные измерения распространены в связи с применением ЭВМ. Более подробные сведения о них приведены ниже.

Характерные особенности и ограничения области применения метода непосредственной оценки:

I. Измерение в широком диапазоне без перенастройки.

II. Измерение в условиях гибкого производства.

III. Возможность использования средств измерения с относительно простыми элементами базирования.

IV. Инструментальная составляющая погрешности измерения существенно (в отличие от метода сравнения) зависит от значения измеряемой величины и обычно больше, чем при методе сравнения.

V. Ограниченная возможность измерения размеров сложных деталей простыми по конструкции средствами измерения.

Характерные особенности и ограничение области применения метода сравнения:

I. Малый диапазон показаний.

II. Возможность обеспечения высокой чувствительности.

III. Возможность создания малогабаритных преобразователей.

IV. Эффективен при контроле в массовом или серийном производстве, в том числе при создании многомерных контрольных приспособлений.

V. Относительно небольшая инструментальная составляющая погрешности измерения.

VI. Возможность компенсации при настройке влияния таких возмущающих факторов, как температура.

Использование *концевых мер длины* для настройки средства измерения при методе сравнения сокращает затраты на изготовление и аттестацию специальных мер. Но при этом возможно увеличение методической составляющей погрешности измерения, обусловленной несоответствием конструкции меры и измеряемой детали. Плоскопараллельные концевые меры длины - одно из основных средств измерения, используемое для обеспечения единства и достоверности линейных измерений. Они служат для хранения и передачи единицы длины от эталона к изделию в поверочной схеме, начиная от образцовых средств измерений 1-го разряда.

Точность изготовления концевых мер длины регламентирована *классами точности:* 00, 01, 0, 1, 2, 3. Самый высокий 00 (допускаемые отклонения размеров от 0,05 до 0,35 мкм в зависимости от размера) и самый грубый 3 (допускаемые отклонения размеров от 0,8 до 6 мкм). После ремонта концевые меры могут быть отнесены к классам точности 4 и 5.

Особенности **контактных методов измерения** размеров связаны с действием измерительной силы на деталь, с выбором формы измерительного наконечника для различных задач измерения и мало связаны с принципом измерения.

Особенностью измерения размеров является относительно высокая доля методической составляющей погрешности измерения в сравнении с инструментальной составляющей. Опыт показывает, что методическая составляющая может превышать инструментальную и составить более половины погрешности измерения.

Для уменьшения методической составляющей погрешности измерения необходимо соблюдать два основных принципа: принцип инверсии и принцип Аббе.

Согласно **принципу инверсии** необходимо учитывать изменение назначения детали при изготовлении, измерении и эксплуатации. В частности, из него вытекают два требования: 1) обеспечение единства баз; 2) обеспечение адекватности относительных перемещений, в частности, при измерении и эксплуатации или при измерении и обработке.

Соблюдение **принципа Аббе** при построении схем измерения означает совпадение линии передачи первичного измерительного сигнала (в частности, линии перемещения измерительного наконечника) с линией измерения.

Схемы измерения высот и длин плоских деталей, диаметров в большинстве случаев совпадают со схемами измерения соответствующих отклонений формы в связи с необходимостью выделять прилегающие поверхности или контуры.

В машино- и приборостроении основной объем измерений размеров - это измерения с целью контроля. В зависимости от соотношений объемов изготавливаемых и контролируемых деталей контроль делят на *100%-ный* и *статистический*. Статистические методы контроля используют и при регулировании технологических процессов по показателям точности. Большинство задач, возникающих при статистическом контроле, можно решать, используя методы, изложенные в п 1.12.

Погрешность измерения при контроле приводит к появлению ошибок 1-го и 2-го рода, то есть к выбраковке деталей, действительные размеры которых находятся в пределах допуска, или к приемке деталей, выходящих за пределы допуска.

Обозначим n - вероятность ошибки 1-го рода (количество неправильно забракованных деталей).

Для определения вероятности неправильного забраковывания деталей примем, что отклонение от линейной зависимости кривой распределения в пределах допускаемой погрешности измерения пренебрежимо мало,

$$n = 0{,}5 - 3{,}5395\,\Phi\left[3 - (6z - H)/T\right] + \\ + 4{,}078\,\Phi\left[3 - (6z - 2H)/T\right] - \\ - 1{,}5393\,\Phi\left[3 - (6z - 3H)/T\right],$$

где $\Phi[\ ]$ - функция Лапласса; z - координата середины поля допускаемой погрешности измерения (или допуска калибра); H - допускаемая погрешность измерения (допуск калибра); T - допуск контролируемой детали.

1.3.3. ТЕХНОЛОГИЯ ИЗМЕРЕНИЯ ОТКЛОНЕНИЙ ОТ ПЛОСКОСТНОСТИ

Основные методы измерения отклонений от плоскостности приведены в табл. 1.3.1.

При измерении отклонений формы применяют *дискретные измерения*, поэтому при любом методе необходимо определение числа и расположения точек и линий измерения в зависимости от контура плоскости и размеров нормируемого участка. Для прямоугольного контура число точек n_1 измерения в продольном направлении (большая длина) в зависимости от длины L_1 нормируемого участка определяют по табл. 1.3.2. Число точек на линии измерения в поперечном направлении

$$n_2 = \frac{L_2}{L_1}(n_1 - 1) + 1,$$

где L_2 - ширина нормируемого участка.

Следовательно, общее наименьшее число точек измерения

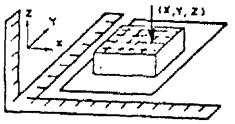
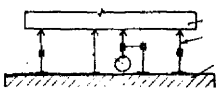
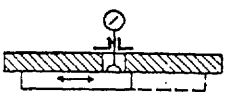
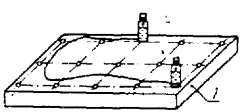
$$n = n_1 \cdot n_2.$$

Точки для измерения на непрямоугольных контурах определяют вписыванием рассматриваемого контура в прямоугольник.

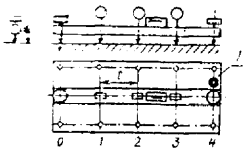
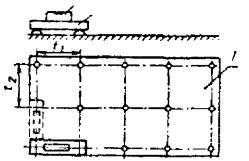
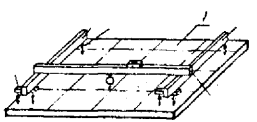
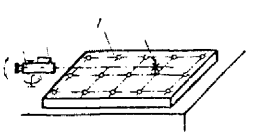
При *непрерывном измерении по линиям* измерения число дискретных значений ординат определяют так, чтобы исключить влияние шероховатости поверхности, а именно, шаг дискретности выбирают равным или несколько меньшим 20 % предельной длины волны шероховатости. Если шаг дискретности определен по другим критериям, то предельную длину волны шероховатости выбирают в 5 раз большей шага дискретности.

Для механической фильтрации шероховатости поверхности наконечник измерительного прибора выбирают сферической формы с радиусом $r \geq 25$ мм, а при электрической фильтрации $r \leq 0{,}25$ мм.

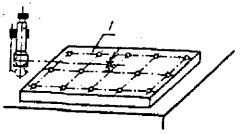
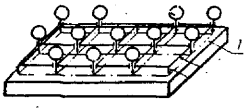
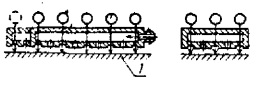
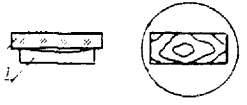
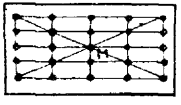
1.3.1. Методы измерения отклонений от плоскостности

Наименование метода	Схема измерения	Область применения	Погрешности (составляющие погрешности измерения)
1	2	3	4
1. Измерение координатной измерительной машиной		Наружные и внутренние поверхности	Погрешности: измерительной машины; от ограниченного числа и точек измерения
2. Измерение прибором для измерения длин и поверочной плитой		Наружные поверхности для нормированного участка $L_T \le 6000$ мм. Масса измеряемой детали не более допустимой нагрузки на поверочную плиту	Погрешности: прибора для измерения длин; отклонения от плоскостности поверочной плиты; от ограниченного числа и распределения точек измерения
3. Измерение поверочной плитой с отверстием и прибором для измерения длин		Наружные поверхности мелкоразмерных деталей с небольшой массой по сравнению с поверочной плитой. Размеры детали примерно в 2 раза меньше поверочной плиты. Не применим для измерения выпуклых поверхностей	Погрешности: прибора для измерения длин; обусловленные отклонением от плоскостности поверочной плиты; от ограниченного числа и распределения точек измерения
4. Измерение гидростатическими уровнями		Горизонтальные наружные поверхности в случаях отсутствия влияния вибраций (*1* - здесь и далее контролируемая деталь)	Погрешности: гидростатических уровней; обусловленные длиной и диаметром шланга; от влияния окружающей среды; обусловленные влиянием кривизны Земли (для больших размеров); от ограниченного числа и расположения точек измерения

Продолжение табл. 1.3.1

2	3	4
5. Измерение [illegible] уровнем		Только для горизонтальных наружных поверхностей $L_1 \le 5000$ мм. Жесткость детали должна исключать влияние массы линейки-компаратора	Погрешности: встроенных приборов для измерения длин; микрометрических винтов регулируемых опор; поверочной плиты для настройки линейки-компаратора; от ограниченного числа и распределения точек измерения
6. Измерение уровнем		Предпочтительно крупные горизонтальные поверхности $L_1 \le 1000$ мм	Погрешности: уровня; измерительного мостика; обусловленные влиянием кривизны Земли (для больших длин); от приведения измерительных профилей к общей базовой плоскости; от ограниченного числа и распределения точек измерения
7. Измерение прибором для измерения длин, уровнем и тремя поверочными линейками		Горизонтальные поверхности $L_1 \le 1600$ мм	Погрешности: прибора для измерения длин; поверочных линеек; обусловленные точностью выверки поверочных линеек; от ограниченного числа и распределения точек измерения
8. Измерение зрительной трубой, уровнем и целевой маркой		Крупные горизонтальные поверхности L_1 до 15000 мм, а при учете влияния окружающей среды L_1 до 100000 мм	Погрешности: зрительной трубы; уровня; обусловленные влиянием окружающей среды на базовую плоскость измерения; от ограниченного числа и распределения точек измерения

Продолжение табл. 1.3.1

1	2	3	4
9. Измерение зрительной трубой, пентапризмой и целевой маркой		Поверхности деталей длиной ≤ 30000 мм	Погрешности: зрительной трубы; обусловленные поворачиванием пентопризмы; обусловленные влиянием окружающей среды; от ограниченного числа и распределения точек
10. Измерение компаратором плоскости с неподвижными опорами		Поверхности деталей $L_1 \le 1000$ мм. Жесткость деталей должна быть такой, чтобы масса компаратора не искажала форму поверхности	Погрешности: приборов для измерения длин; из-за нежесткости основания, влияния массы, и настройки компаратора; от ограниченного числа и распределения точек измерения
11. Измерение компаратором плоскости с аэростатическим базированием		То же	Погрешности: приборов для измерения длин; из-за нежесткости основания компаратора и аэростатических опор; настройки компаратора; из-за массы компаратора и измеряемой детали; от ограниченного числа и распределения точек измерения
12. Интерференционное измерение плоской стеклянной пластиной		Определение относительно малых отклонений от плоскостности поверхностей с хорошей отражающей способностью с $L_1 \le 200$ мм	Погрешности: из-за отклонения от плоскостности стеклянной пластины; оценки интерферационной картины
13. Измерение с помощью методов измерения отклонения от прямолинейности		См. методы измерения отклонений от прямолинейности	Погрешности: метода измерения отклонения от прямолинейности; из-за перевода пространственных положений измеренных профилей в общую базовую плоскость; от ограниченного числа и распределения точек измерения

1.3.2. Число точек измерения для прямоугольного контура

Длина нормируемого участка L_1, мм	n_1	Длина нормируемого участка L_1, мм	n_1
До 100	5	Св. 2500 до 4000	17
Св. 100 до 160	7	Св. 4000 до 6300	19
Св. 160 до 250	7	Св. 6300 до 10000	21
Св. 250 до 400	9	Св. 10000 до 16000	23
Св. 400 до 630	9	Св. 16000 до 25000	25
Св. 630 до 1000	11	Св. 25000 до 40000	27
Св. 1000 до 1600	13	Св. 40000 до 63000	29
Св. 1600 до 2500	15	Св. 63000 до 100000	31

Стандарт, определяющий отклонение от плоскостности, рекомендует использовать прилегающую плоскость в качестве базового элемента. Прилегающую плоскость

$$A^*x + B^*y + C^*z + D^* = 0$$

вычисляют по координатам x_i, y_i, z_i точек P_i измеренной поверхности, соблюдая условие

$$\min\left(\max\left|h_i'(A,\ B,\ C,\ D)\right|\right),\quad i = 1,2,\ldots,\ n,$$

где $h'(A,B,C,D)$ - наименьшее расстояние точки P_i от плоскости

$$Ax + By + Cz + D = 0.$$

Отклонение от плоскостности

$$\mathrm{EFE} = \max\left|h_i\left(A^*, B^*, C^*,\ D^*\right)\right|,$$

$i = 1,2,\ldots,n,$

есть максимальное значение наименьшего расстояния реальной поверхности от прилегающей.

При использовании в качестве базового элемента средней плоскости

$$\overline{A}x + \overline{B}y + \overline{C}z + \overline{D} = 0$$

ее определяют по координатам точек измеренной поверхности, соблюдая условие

$$\min\left(\sum_{i=1}^{n} h_i^2(A,B,C,D)\right).$$

Отклонение от плоскостности в данном случае

$$\mathrm{EFE} = \left|h_p\left(\overline{A},\overline{B},\overline{C},\overline{D}\right)\right| + \left|h_v\left(\overline{A},\overline{B},\overline{C},\overline{D}\right)\right|,$$

где $h_p\left(\overline{A},\overline{B},\overline{C},\overline{D}\right)$ - максимальное наименьшее расстояние измеренной поверхности от средней плоскости над средней плоскостью; $h_v\left(\overline{A},\overline{B},\overline{C},\overline{D}\right)$ - максимальное наименьшее расстояние измеренной поверхности от средней плоскости под средней плоскостью.

Для того, чтобы реализовать метод измерения отклонения от плоскостности с помощью методов измерения отклонений от прямолинейности, целесообразно сетку точек расположить, как указано в п. 13 в табл. 1.3.1. В этом случае траектории будут иметь общие точки, что позволит путем введения поправок построить базовую плоскость и определить отклонение от плоскостности. Для этого определяют z для точки пересечения M и вычисляют z_i для остальных точек измерения на диагоналях по формуле

$$z_i = z_i' + \mathrm{v},$$

где z_i' - координатное значение точек P_i на рассматриваемой диагонали, полученное методом измерения отклонений от прямолинейности; v - поправочное значение смещения для рассматриваемой диагонали, вычисленное из принятого значения z для точки M минус значение z' для точки M данной диагонали.

Для всех других точек измерения на линиях измерения в поперечном и продольном направлениях принимают, что измеренные профили присоединены к двум уже известным точкам базовой плоскости, тогда

$$z_i = z_i' + \mathrm{v}_1 + Dq_i$$

где v_1 - поправочное значение смещения для рассматриваемой линии измерения, вычисленное из значения z минус значение z' для первой точки присоединения линии измерения; D - поправочное значение на поворот для рассматриваемой линии измерения, вычисленное из значения z минус значение z' для второй точки присоединения линии измерения минус v_1; q_i - относительное число для расстояния соответствующей точки измерения P_i на рассматриваемой линии измерения от точки вращения линии измерения (первой точки присоединения) по отношению к расстоянию второй точки присоединения от точки вращения.

Последующая обработка результатов измерений производится так, как указывалось выше.

1.3.4. ТЕХНОЛОГИЯ ИЗМЕРЕНИЯ ОТКЛОНЕНИЙ ОТ ПРЯМОЛИНЕЙНОСТИ

Методы и схемы измерения отклонений от прямолинейности представлены в табл. 1.3.3. В ней также указывается примерная область применения методов, достижимые погрешности измерения и составляющие погрешности измерения. Как и для измерения отклонений от плоскостности в качестве базовой прямой рекомендуется принимать прилегающую прямую. Эта рекомендация определяет и набор представленных методов измерения и методы обработки результатов измерений. Рекомендация связанна с системой допусков на отклонения формы, которая предполагает в качестве начала отсчета отклонений прилегающие поверхности линии и контуры. В тех случаях, когда не ставится задача контроля, выбор базовой поверхности, линии или контура должен быть согласован с задачей измерения.

1.3.5. ТЕХНОЛОГИЯ ИЗМЕРЕНИЯ ОТКЛОНЕНИЙ ОТ КРУГЛОСТИ

В табл. 1.3.4 представлены методы измерения отклонений от круглости, а также основные составляющие погрешности измерения.

При измерении отклонений от круглости стоит задача выбора плоскости измерения. Если она не задана, то измерение производят в нескольких плоскостях. Число плоскостей для задач контроля отклонений от круглости может определяться в соответствии с табл. 1.3.5. При этом первое и последнее сечения должны иметь расстояние $l / 2N$ от края, а расстояние между сечениями принимается равным l / N. При использовании круглограмм для определения отклонения от круглости следует иметь в виду, что из-за различных увеличений по радиальному и тангенциальному направлениям форма профилограммы не совпадает с формой реального профиля.

Измерение отклонений взаимного расположения поверхностней предполагает, что одна из ее поверхностей или ее геометрическая ось принимается за базу измерения. Оценка величины отклонений производится относительно этой базы. Отклонения формы базовых поверхностей и рассматриваемых при оценке исключаются. Это делается заменой реальных поверхностей прилегающими. Прилегающие поверхности могут имитироваться при измерении соответствующими элементами прибора.

Измерение параметров шероховатости производится на специализированных приборах, которые реализуют соответствующие методы измерения.

1.3.6. ИЗМЕРЕНИЯ НА КООРДИНАТНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ МАШИНАХ

Как указывалось выше, для определения отдельных геометрических характеристик деталей при контроле деталей сложных конструкций используются координатные измерительные машины. Особенности измерений на *координатно-измерительных машинах* (КИМ) зачастую определяются особенностями их построения.

На *координатно-измерительных машинах* (КИМ) производят измерение координат отдельных точек поверхностей объекта в принятой системе координат (прямоугольной, цилиндрической или сферической) и последующее определение необходимых геометрических параметров (размеров, формы и взаимного расположения поверхностей) путем математической обработки измеренных координат.

КИМ - устройство, обеспечивающее установку измеряемой детали, взаимное перемещение системы ощупывания и детали, измерение этих перемещений по координатам, обработку данных измерений и представление результатов расчетов измеряемых геометрических параметров.

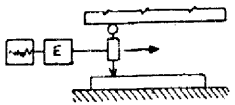
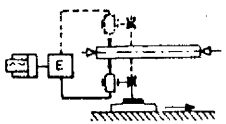
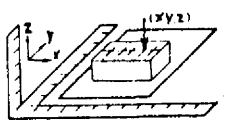
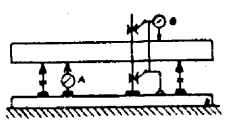
Блок координатных перемещений (БКП) имеет базовую поверхность и узлы координатных перемещений и, таким образом, образует *устройство взаимодействия* (УВ) измерительной машины с деталью, например взаимное перемещение измеряемой детали и *измерительной головки* (ИГ), установленной на одном из узлов машины.

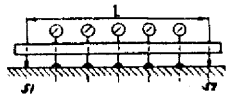
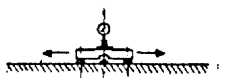
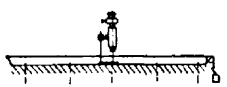
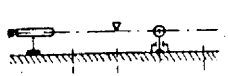
Координатные перемещения отсчитываются посредством *измерительных преобразователей* (ИП) и преобразуются затем в показания *блока цифровой индикации* (БИН) координатных перемещений и сигналы, используемые в ЭВМ для расчета и представления измеряемых геометрических параметров деталей.

Взаимные перемещения узлов БКП и УВ производятся либо вручную, либо электромеханическими приводами ЭМП. В последнем случае управление осуществляется либо от *блока управления электроприводами* (БУП) (автоматический режим), либо от *пульта* (П) (механический режим).

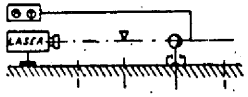
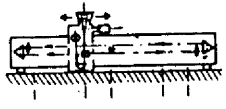
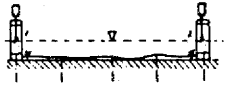
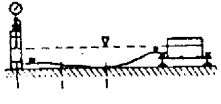
Функции *устройства преобразования* (УПС) зависят от типа используемой измерительной головки. При использовании головки касания в момент соприкосновения измерительного наконечника головки с измеряемой поверхностью детали устройством УПС подается электрический сигнал на отсчет перемещений по координатам от ИП и на останов и реверс взаимного перемещения детали и УВ. УПС кроме выдачи сигнала на отсчет перемещений по координатам воспринимает, усиливает и подготавливает для передачи в ЭВМ сигналы ИП, встроенных в ИГ отклонения. Эти сигналы пропорциональны отклонению наконечника измерительной головки от некоторого нулевого положения.

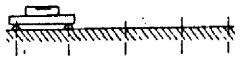
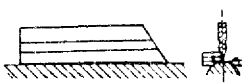
1.3.3. Методы измерений отклонений от прямолинейности

Наименование метода	Схема измерения	Область применения	Составляющие погрешности измерения
1	2	3	4
Непрерывное измерение специальными приборами		Определяется средствами измерения	$2s \approx \pm(0{,}1 + 0{,}3)$ мкм L до 100 мм; $2s \approx \pm(0{,}5 + 2)$ мкм L до 500 мм, где s - стандартное отклонение
Измерение методом исключения погрешности прямолинейного перемещения прибора для измерения длин		Для $L \le 500$ мм	$2s \approx \pm(1 + 5)$ мкм
Измерения на координатно-измерительной машине		Определяется измерительной машиной	Для L до 500 мм: в цеховых условиях $2s = \pm(4 + 15)$ мкм; в лабораторных $2s = \pm(0{,}5 + 5)$ мкм
Измерение от поверочной плиты или поверочной линейки прибором для измерения длин (или концевыми мерами)		Для поверочной линейки $L \le 1600$ мм	Погрешности: отклонения от прямолинейности меры; прибора; графического изображения измеренного профиля и графической оценки отклонений от прямолинейности. $2s \approx \pm(5 + 10)$ мкм, $L = 1600$ мм

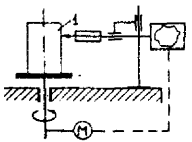
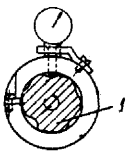
1	2	3	4
Измерение компаратором с несколькими приборами для измерения длин		$L \le 5000$ мм	Погрешности: от встроенных измерительных головок и микрометрических винтов регулируемых опор; поправочных значений мер прямолинейности; графического изображения измеренного профиля и графической оценки отклонений от прямолинейности. $2s = \pm(5 + 10)$ мкм L до 5000 мм
Измерение двухопорным мостиком и прибором для измерения длин, расположенным посередине		Ограничивается расстоянием между опорами мостика $L \le 500$ мм	То же
Измерение микроскопом от натянутой струны		Для вертикальных плоскостей и расстояний до 10000 мм	Погрешность измерения $\approx \pm(0{,}02 + 0{,}04)$ мм
Измерение зрительной трубой и целевой маркой		Расстояние до метки ≤ 5000 мм	Погрешность измерения $\pm 0{,}02 \pm(0{,}003 + 0{,}01)$ мм

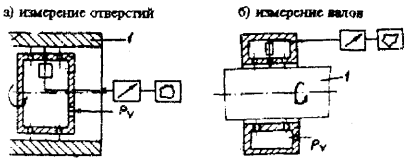
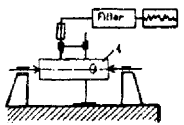
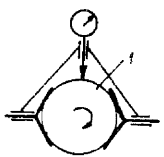
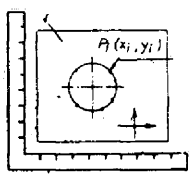
Продолжение табл. 1.3.3

1	2	3	4
Измерение фотоэлектрическим способом от светового луча лазера		Расстояние до метки ≤ 5000 мм	Погрешность измерения ±0,02 ±(0,003 + 0,01) мм
Измерение оптической линейкой		Диапазон измеряемых длин 500 - 3000 мм, соответствующий диапазон измеряемых отклонений 0,25 - 1 мм	Погрешности измерения на концах диапазона: 500 мм - 0,5 мкм 1500 мм - 1,5 мкм 3000 мм - 3 мкм
Измерение гидростатическими уровнями, подключенными дифференциально		Ограничивается диапазоном измерения прибора для измерения длин, применяемого для контроля уровня жидкости (≈10 + 25 мм)	Погрешности: от диаметра и длины шланга; измерения изменений положения уровня жидкости; прибора и др. (для L = 20 м $2s \approx \pm 0{,}02$ мкм)
Измерение с помощью одного или нескольких гидростатических уровней, подключенных к уравнительному сосуду		То же	То же

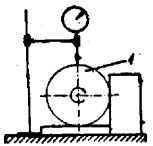
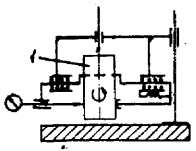
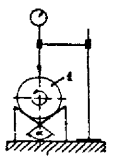
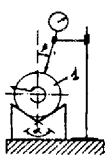
1	2	3	4
Измерение двухопорным мостиком и уровнем		L до 15 м	Погрешности: от вида прибора для измерения углов; от измерительного мостика; от шага контролируемых точек и длины участка; L = 10 м; $2s \approx \pm(1 + 5)$ мкм
Измерение двухопорным мостиком и автоколлиматором		L = (4 + 30) м в зависимости от типа автоколлиматора	То же
Измерение двухопорным измерительным мостиком и лазерным интерферометром для измерения углов положения		L = (30 + 50) м	- " -
Измерение лекальной линейкой		Быстрая ориентировочная оценка вида профиля плоских и образующей прямой цилиндрических поверхностей: L = (250 + 300) мм, минимальная неровность 1,5 - 2 мкм	Погрешности: от разрешающей способности глаза и опыта контролера; от лекальной линейки; от способа обработки и шероховатости поверхности и др.

1.3.4. Методы измерений отклонений от круглости

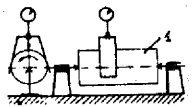
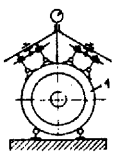
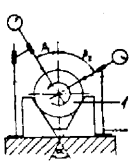
Наименование метода	Схема измерения	Область применения	Составляющие погрешности измерения
1	2	3	4
Измерение с применением прецизионного вращения		Валы и отверстия с отклонением от круглости от 0,1 до 300 мкм в зависимости от конструкции прибора, диаметры от 13 до (100 + 1000) мм, высота от 200 до 700 мм. (1 - деталь)	Радиальная погрешность шпинделя (от 0,05 до 0,3 мкм). Погрешность: передаточной характеристики (от 3 до 8 % верхнего предела диапазона измерения); центрирования; вызванная отклонением от параллельности оси детали оси шпинделя; обработки результатов измерений
Измерение с применением образца круглости		Валы и отверстия с допуском на диаметр от 4 до 8 квалитетов	Погрешность: измерительной головки; отклонения от круглости у применяемых образцов; остаточного зазора в случае применения нерегулируемых образцов круглости

1	2	3	4
Измерение с применением аэростатически центрированного опорного элемента		Ограничение определяется жесткостью опор и возможностью их использования для различных диаметров, длин	Погрешность: измерительного прибора; расположения оси опорного элемента относительно центра средней окружности в плоскости измерения
Измерение прибором для измерения радиального биения		Крупные детали, установленные в центрах (патронах или других приспособлениях). Допуск круглости не менее 5 мкм. Доля отклонения от круглости в радиальном биении не менее 20 %	Погрешность: измерительного прибора; базирования измеряемых деталей; от остаточного эксцентриситета, не исключенного фильтром.
Измерение скобой с базированием в двух соосных призмах		Диаметр ≥ 20 мм; длина ≥ 20 мм. Допуск круглости не менее 5 мкм	Погрешность: от отклонения соосности призм базирования; прибора; от влияния динамических факторов
Измерение поточечным ощупыванием на координатно-измерительных машинах (приборах)		Одновременно с измерением размеров и отклонений расположения. Детали сложной конструкции. Допускаемая погрешность измерения 2 - 5 мкм в зависимости от машины	Погрешность: координатно-измерительной машины; обусловленная ограниченным числом точек измерения

Продолжение табл. 1.3.4

1	2	3	4
Измерение средствами для измерения диаметра: - непрерывное измерение		Только для отклонений формы, имеющей четное количество неровностей	Погрешность: измерительного прибора; от изменения прогиба измерительной стойки (при непрерывном измерении); вызванная невыявленными нечетными составляющими отклонения от круглости; вызванная ограниченным числом измеренных диаметров (при дискретных измерениях)
-измерение по отдельным сечениям			
Измерение с применением призмы (трехточечное измерение): - симметричная схема		Валы и отверстия деталей небольшого размера, имеющие определенное число колебаний отклонений от круглости	Погрешность: средства измерения; от изменения прогиба измерительной стойки; вызванная невыявленными составляющими отклонения от круглости
- несимметричная схема			

Продолжение табл. 1.3.4

1	2	3	4
Измерение седлообразной призмой		Валы диаметром более 80 мм с отклонениями от круглости определенного числа колебаний	Погрешность: средства измерений; от невыявленных составляющих отклонения от круглости
Измерение призмой с самоустанавливающимися опорами		Диаметры от 80 до 1200 мм для накладных приборов и до 320 мм для стационарных	Погрешность: средства измерения; от невыявленных гармонических составляющих отклонения от круглости
Измерение призмой комбинированным способом		Валы и отверстия небольшого размера с отклонениями от круглости, определяющимися гармоническими составляющими до 15-й гармоники	Погрешность: средства измерения; от изменения прогиба измерительной стойки; от невыявленных составляющих отклонения от круглости

1.3.5. Выбор числа плоскостей измерений

l, мм	До 50			Св. 50 до 200			Св. 200		
l/d	До 1	Св. 1 до 3	Св. 3	До 1	Св. 1 до 3	Св. 3	До 1	Св. 1 до 3	Св. 3
N	1	2	3	2	3	4	3	4	5

Обозначения:

l - длина измеряемой цилиндрической поверхности;

l/d - соотношение длины и диаметра измеряемой поверхности;

N - число плоскостей измерения.

1.3.6. Варианты построения и режимы КИМ

Метод сравнения с мерой	Устройство взаимодействия КИМ с деталью	Режим считывания координат	Показания, используемые для определения координат точек детали	Режим взаимного перемещения детали и УВ	
				ручной	автоматический
Нулевой	ИГК	Динамичный	Показания ИП	+	+
	Жесткий измерительный наконечник	Статичный	- " -	+	-
	ИГО	Статичный	- " -	+	+
Дифференциальный	ИГО	Статичный*	Показания ИГО	+	+
		Динамичный	- " -	-	+
Противопоставления	ИГО	Динамичный	Показания ИП и ИГО	-	+
		Статичный*	- " -	+	+

*Используется редко.

Для обеспечения доступа к измеряемым поверхностям деталей и упрощения измерений в полярной, цилиндрической и сферической системах координат базовая часть КИМ снабжена поворотными столами (ПС).

Алгоритм обработки сигналов ИП и ИГ определяется тем, что КИМ можно рассматривать как прибор сравнения координаты точки измеряемой поверхности детали с координатной шкалы ИП. Сравнение указанных величин может проводиться нулевым методом, дифференциальным методом и методом противопоставления.

При нулевом методе координаты точки детали отсчитываются по показаниям ИП в момент касания ИГ с деталью.

При дифференциальном методе корпус ИГ выводится в заданное положение по показаниям ИП, а отклонение от этого положения отсчитывается по показаниям ИГ. При работе по методу противопоставления корпус и наконечник ИГ выводятся приблизительно в нулевое положение. Координата точки поверхности детали определяется суммированием одновременно произведенных отсчетов с ИП и ИГ.

Описанные выше варианты методов сравнения и используемые при этом устройства взаимодействия, режимы считывания координат и взаимного перемещения детали и УВ показаны в табл. 1.3.6.

Классификация измерительных машин по вспомогательным признакам отражает основные характеристики наиболее ответственных узлов, среди которых в первую очередь следует выделить БКП, ИП, систему привода узлов координатных перемещений.

Подавляющее большинство КИМ (до 90%) оснащено фотоэлектрическими преобразователями. Значительно реже используются индуктосины и еще реже лазерные преобразователи.

Принцип работы фотоэлектрических преобразователей с растровыми измерительными линейками основан на модуляции светового потока, проходящего через два взаимно подвижных растра, и превращении его в квазисинусоидальные электрические сигналы. Минимальное значение погрешности измерительных преобразователей составляет 1 - 2 мкм. Погрешность в пределах шага равна 0,02 0,05 шага, который для прецизионных систем составляет 8 - 20 мкм. Дискретность отсчета, зависящая от шага и числа интерполяции, достигает 0,1 мкм.

КИМ могут применяться для контроля практически всех встречающихся в машиностроении типов деталей, однако каждый тип деталей требует своего специфического программного обеспечения, измерительной оснастки, изменений в конструкции КИМ, а также специфической технологии измерений. Все эти вопросы должны учитываться при выборе КИМ.

К специфическим типам деталей можно отнести: корпусные детали, зубчатые колеса, кулачки, лопатки турбин, ходовые винты.

Современные координатно-измерительные машины требуют развитого программно-математического обеспечения (ПМО). Это требование обусловлено разнообразием функций, различием возможностей представления результатов измерений, уровнем автоматизации измерений, различным числом измерительных головок (1 + 5), наличием дополнительных функций КИМ (автоматическая замена измерительных наконечников, встроенность КИМ в ГАП, разнообразием конструкций КИМ).

Глава 1.4

ИЗМЕРЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ

1.4.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Электрические методы контроля основаны на создании в контролируемом объекте электрического поля либо непосредственным воздействием на него электрическим возмущением (например, полем постоянного или переменного тока), либо косвенно с помощью воздействия возмущениями неэлектрической природы (например, тепловым, механическим). В качестве информативного параметра используются электрические характеристики объекта контроля.

Так, электроемкостный метод контроля (ЭКМ) предусматривает введение объекта контроля в электростатическое поле и определение искомых характеристик материала по вызванной им реакции на источник этого поля. В качестве источника поля применяют электрический конденсатор, который является одновременно и первичным электроемкостным преобразователем (ЭП).

Информативность ЭМК определяется зависимостью первичных информативных параметров ЭП от характеристик объекта контроля, например диэлектрической проницаемости и коэффициента диэлектрических потерь. Косвенным путем с помощью ЭМК можно определять и другие физические характеристики материала: плотность, содержание компонентов в гетерогенных системах, влажность, степень полимеризации и старения и пр.

Электрические величины и единицы их измерения приведены в табл. 1.4.1.

1.4.1. Величины, единицы измерения в электротехнике

Величина	Обозначение в формулах	Наименование единицы	Символ	Равнозначные выражения
Сила тока	I, i	Ампер	А	-
Мощность	P	Ватт	Вт	1 Вт = 1 В · А = 1 Н · м/с
Работа, энергия	W	Джоуль	Дж	1 Дж = 1 Вт · с = 1 Н · м
Напряжение	U, u	Вольт	В	-
Сопротивление	R	Ом	Ом	1 Ом = 1 В/А
Удельное сопротивление	ρ	-	Ом · м	1 Ом · м = 1 В · м/А
Проводимость	G	Сименс	См	1 См = 1/Ом = 1 А/В
Электрический заряд	Q	Кулон	Кл	1 Кл = 1 А · с
Напряженность электрического поля	E	-	В/м	-
Емкость	C	Фарад	Ф	1 Ф = 1 Кл/В = 1 А · с/В

1.4.2. СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЯ

Приборы для измерения электрических величин классифицируют по принципу действия.

Магнитоэлектрические (МЭ) приборы. Подвижная часть приборов этой системы отклоняется в результате взаимодействия поля постоянного магнита и контура с протекающим по нему током. Магнитоэлектрические приборы имеют высокую чувствительность, малую потребляемую мощность, равномерную шкалу, хорошее успокоение. МЭ применяют как самостоятельно, так и в сочетании с различными преобразователями переменного тока в постоянный, для измерений на переменном токе.

Электромагнитные (ЭМ) приборы. Подвижная часть приборов этой системы отклоняется в результате взаимодействия магнитного поля катушки с протекающим по ней током и ферромагнитного сердечника. Шкалы ЭМ приборов неравномерны в начальной части (20 %) и в конце. ЭМ приборы пригодны для работы на постоянном и переменном токе, устойчивы к перегрузкам, отличаются простотой конструкции, имеют низкую стоимость. Недостатком является низкая чувствительность, значительная потребляемая мощность, влияние на точность измерений частоты измеряемого сигнала, внешних магнитных полей и температуры окружающей среды.

Электродинамические (ЭД) приборы. Принцип действия приборов основан на взаимодействии подвижной и неподвижной катушек с протекающими по ним токами. Шкалы ЭД приборов неравномерны, что зависит от формы катушек и их взаимного расположения.

Преимущество ЭД приборов - возможность работы в цепях постоянного и переменного тока с расширенным диапазоном частот. Приборы этой системы имеют большую потребляемую мощность и низкую чувствительность.

Ферродинамические (ФД) приборы. Приборы являются разновидностью ЭД приборов и отличаются выполнением неподвижных катушек на магнитопроводе из магнитомягкого материала. Потребляемая мощность меньше, чем у ЭД приборов, меньше влияние внешних магнитных полей и механических воздействий. При применении ФД приборов на постоянном токе появляется погрешность от гистерезиса, которая проявляется в виде различных показаний прибора в зависимости от возрастания или убывания тока нагрузки.

Электростатические (ЭС) приборы. Подвижная часть приборов перемещается в результате взаимодействия электрически заряженных проводников. Шкалы неравномерны. ЭС приборы можно использовать в цепях постоянного и переменного тока. К особенностям относится принципиальная возможность измерения только электрического напряжения, причем непосредственного измерения напряжений до 300 кВ в широком диапазоне частот - до десятков мегагерц.

Индукционные (И) приборы. Приборы содержат катушки, питаемые переменным током и создающие переменные магнитные поля, наводящие токи в подвижном диске, взаимодействующие с магнитными потоками. В результате этого взаимодействия подвижная часть приборов приходит во вращение. На основе индукционных измерительных механизмов выполняют электрические счетчики активной и реактивной энергии и ваттметры.

Термоэлектрические приборы измеряют нагрев проводника (описываемый законом $\Delta\theta \sim Ri^2$) проходящим по нему током. В приборах определяется непосредственно эффективное (действующее) значение тока.

Предельные параметры приборов различных систем дают представление о возможностях измерительных систем (табл. 1.4.2).

Измерительные преобразователи (ИП) предназначены для линейного преобразования основных параметров (силы постоянного и переменного тока, напряжения постоянного и переменного тока, частоты, угла сдвига фаз и коэффициента мощности, активной и реактивной мощностей) в унифицированные сигналы - напряжение 0 - 10 В и силу тока 0 - 5 мА.

1.4.3. МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ

В зависимости от объекта измерений, требуемой точности результата, диапазона рабочих частот, допустимого напряжения на измеряемом объекте применяют различные методы измерений. Наибольшее применение при измерении параметров линейных элементов получили метод вольтметра-амперметра, метод непосредственной оценки и мостовой метод.

Метод вольтметра-амперметра является косвенным, так как сводится к расчету по закону Ома параметров цепей на основании результатов измерений.

Этот метод используется при измерении активного и полного сопротивлений, емкости, индуктивности или взаимной индуктивности.

Метод непосредственной оценки реализуется в приборах прямого действия и используется для измерения сопротивления, емкости и индуктивности.

Мостовые методы применяют для измерения параметров линейных элементов. Мостовые средства измерений характеризуются высокой точностью, широким диапазоном измеряемых значений, высокой чувствительностью, возможностью измерения различных величин.

1.4.2. Предельные параметры электромеханических приборов различных систем

Система	Основная величина, преобразуемая в угол отклонения	Род тока; диапазон частот	Наименование приборов	Пределы измерения при непосредственном включении		Наивысший класс точности
				минимальный	максимальный	
Магнитоэлектрическая	Сила тока I	Постоянный	Амперметры Вольтметры Гальванометры Омметры	$0{,}1 \cdot 10^{-6}$ А $0{,}3 \cdot 10^{-3}$ В - 1×10^{-4} Ом	-	0,1
Электромагнитная	Сила тока I^2	Постоянный; переменный (действующее значение); 40 Гц - 8 кГц	Амперметры Вольтметры	0,005 А 0,75 В	300А 600 В	0,2
Электродинамическая	Сила тока $I_1 \times I_2$	Постоянный; переменный (действующее значение); 40 Гц - 20 кГц	Амперметры Вольтметры Ваттметры Варметры Фазометры Частотомеры	0,001 А 0,045 В 0,75 Вт 75 вар - 1Гц	10 А 600 В - - - -	0,05
Ферродинамическая	Сила тока $I_1 \times I_2$	Постоянный; переменный (действующее значение); 10 Гц - 10 кГц	Амперметры Вольтметры Ваттметры Варметры Фазометры Частотомеры	0,1 А 15 В 0,3 Вт 75 вар - 4Гц	10 А 600 В - - -	0,2
Электростатическая	Напряжение U^2	Постоянный; переменный (действующее значение); 20 Гц - 30 МГц	Вольтметры	10 В	300000 В	0,05
Индукционная	Сила тока $I_1 \times I_2$	Переменный; 50, 60 и 400 Гц	Счетчики электрической энергии, ваттметры	Номинальные значения 57,7 В; 1 А	Номинальные значения 380 В; 50 А	1,0

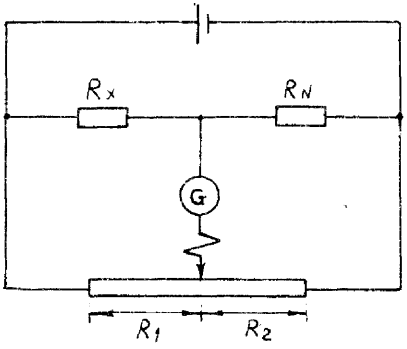


Рис. 1.4.1. Мост Уитстона для измерения сопротивлений

Для измерения емкости, индуктивности и других параметров цепей переменного тока используются мосты переменного тока. Особенностью мостов переменного тока является необходимость при уравновешивании регулирования не менее двух параметров моста. Процесс уравновешивания заключается в попеременном регулировании этих параметров. Трансформаторные мосты переменного тока имеют ряд преимуществ по сравнению с обычными мостами.

Для количественного определения напряженности электрического поля применяют емкостные датчики, заряд которых в поле пропорционален напряженности этого поля. Чтобы можно было проводить непрерывное измерение, зонд, находящийся в поле, перекрывается и вновь открывается с быстрым чередованием, например вращающейся заслонкой. Ток, протекающий через известное разрядное сопротивление, в таком случае будет пропорционален составляющей напряженности поля, перпендикулярной к зонду (датчику).

Измерение активных сопротивлений. В основу измерения активного (омического) сопротивления положен закон Ома. Поэтому определить сопротивление R можно, пропуская известный ток I через резистор, омическое сопротивление которого измеряется, и определяя падение напряжения на нем.

Удобнее и точнее измерять сопротивление при помощи моста Уитстона (рис. 1.4.1). Источник постоянного напряжения питает две ветви $R_X R_N$ и $R_1 R_2$ схемы моста. Измеряемое сопротивление R можно уравнять с известным сопротивлением R_N эталонного резистора, изменяя отношение R_1 / R_2 до тех пор, пока ток в нуль-гальванометре G не станет равным нулю. При этом справедливы равенства:

$$U_X/U_N = R_X/R_N = U_1/U_2 = R_1/R_2;$$

$$R_X = R_N\left(R_1/R_2\right).$$

Если R_X очень мало (в пределах 1 Ом - 1 мкОм), то переходные сопротивления получаются сопоставимыми с измеряемыми и вносят значительную погрешность в результат измерения. В этом случае применяют несколько более сложный мост Томсона. В мосте Томсона для неизвестного сопротивления применяется четырехпроводная схема: два токоподвода и два подвода для напряжения, электрически расположенные за переходными сопротивлениями и предназначаемые для измерения напряжения собственно на сопротивлении.

Мосты Уитстона и Томсона дают в простом и удобном для использования схемном исполнении точность измерений порядка 1 %; точность лабораторных мостов прецизионного исполнения может достигать 10^{-6} и более.

Измерение полных сопротивлений. Полные сопротивления цепи можно определять, питая цепь переменным напряжением и измеряя ток I и напряжение U по модулю и по их взаимному положению по фазе. Это можно осуществить при помощи схемы на рис. 1.4.2.

Для схемы справедливы соотношения

$$Z = U / I; \qquad R_\delta = P / I^2;$$

$$\omega L = \sqrt{Z^2 - R_\delta^2}; \quad \operatorname{tg}\delta = R_\delta/\omega L.$$

Этот способ измерения полных сопротивлений применяют в первую очередь на энергетических объектах.

Для измерения полных сопротивлений можно применять также и мостовые схемы, сходные с мостом Уитстона. Когда нуль-индикатор n (рис 1.4.3) показывает $U_n = 0$, соблюдается соотношение

$$Z_1 = Z_2 Z_3 / Z_4.$$

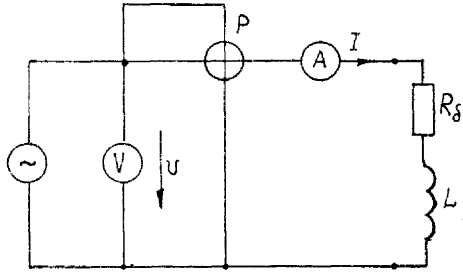


Рис. 1.4.2. Определение полных сопротивлений путем измерения тока, напряжения и мощности

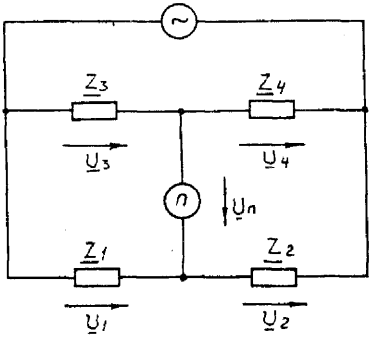


Рис. 1.4.3. Обобщенная схема измерительного моста переменного тока

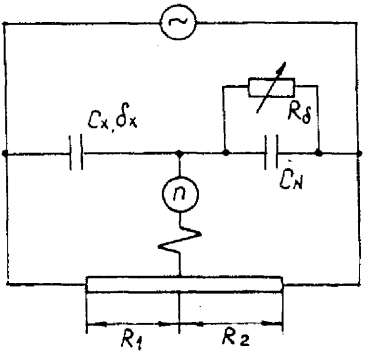


Рис. 1.4.4. Мост Вина для измерения емкостей

Неизвестное сопротивление Z_x здесь играет роль Z_1. Остальные полные сопротивления, входящие в схему, следует выбирать так, чтобы они обеспечивали возможность выполнения вышеприведенного равенства по величине и фазе. Кроме того, схема должна включать известное образцовое полное сопротивление. Эти условия позволяют создать весьма многочисленные варианты мостов переменного тока. На рис. 1.4.4 показан мост Вина, часто применяемый для измерения емкости конденсаторов. Неизвестное полное сопротивление, соответствующее емкости C_x с углом потерь δ_x, может быть легко определено по образцовой емкости с минимальными потерями C_N по калиброванному резистору с сопротивлением потерь R_δ и по отношению сопротивлений R_1/R_2. При этом

$$C_x = C_N\left(R_2/R_1\right); \quad \mathrm{tg}\delta_x = 1/\left(\omega C_N R_\delta\right).$$

При использовании мостов для измерения полных сопротивлений необходимо следить за тем, чтобы частота измерений располагалась в диапазоне, на который рассчитано соответствующее полное сопротивление.

Потери в индуктивностях и емкостях можно выразить значением того угла δ (угла потерь), на который сдвиг фаз между током и напряжением меньше 90°. Так как этот угол составляет всего несколько угловых градусов, он практически равен своему тангенсу - коэффициенту потерь $\mathrm{tg}\delta$. Добротность Q определяется как величина, обратная тангенсу угла потерь $(Q = 1/\mathrm{tg}\delta)$. Эти параметры тоже зависят от частоты, и поэтому необходимо указывать частоту, при которой проводилось измерение. Кроме трех основных составляющих полного сопротивления R, L и C возможны любые их сочетания. Для заданной частоты они могут быть сведены в конкретных случаях к эквивалентным схемам R - L или R - C.

В цифровых измерительных приборах (ЦИП) непрерывный сигнал преобразуется в дискретный выходной сигнал, представленный в цифровой форме. Преимущества ЦИП перед аналоговыми приборами обусловлены малой погрешностью измерений, высокой чувствительностью, большим быстродействием, отсутствием субъективной ошибки отсчета результата измерений, возможностью автоматизации процесса измерения и простой реализации возможности документирования результата измерений.

Технические характеристики ЦИП приводятся в табл. 1.4.3.

Значительному прогрессу цифровых средств измерений способствует применение микропроцессоров (МП). На их основе создаются новые поколения программируемых универсальных многофункциональных приборов. В ЦИП микропроцессоры могут выполнять автокалибровку, самодиагностику, математическую обработку результатов измерений, линеризацию характеристик измерительных преобразователей, коррекцию нуля. Кроме того, МП управляют временем измерения и процессом преобразования, осуществляют автоматический выбор диапазона и выполняют функции интерфейса.

Цифровые мосты с МП позволяют измерять не только сопротивление, емкость и индуктивность, но и определять активную проводимость, добротность и тангенс угла потерь. МП вычисляет процентные отклонения измеряемых величин от номинальных значений и контролируют заданные пределы измерения, что позволяет сортировать элементы цепей по допускам. МП обеспечивает выбор режима измерений (однократный, непрерывный или усредненный), уровня сигналов на измеряемом элементе, рабочей частоты и скорости измерений.

Возможность разработки и производства средств измерений электрических величин определяется наличием метрологического обеспечения, то есть методов и средств, позволяющих производить поверку средств измерений и обеспечивать единство измерений. Технические характеристики средств метрологического обеспечения приводятся в табл. 1.4.4.

1.4.3. Технические характеристики цифровых измерительных приборов

Средство измерения	Диапазон измерения (преобразования)			
	на постоянном токе	на переменном токе		сопротивления
		значение	частота	
Вольтметры	$1 \cdot 10^{-9}$ - $1 \cdot 10^{3}$ В	$1 \cdot 10^{-6}$ - $1 \cdot 10^{3}$ В	0,05 Гц - 100кГц	-
Омметры	-	-	-	10^{-8} - 10^{16} Ом
Комбинированные приборы	$1 \cdot 10^{-9}$ - $1 \cdot 10^{3}$ В; $1 \cdot 10^{-11}$ - 5 А	$1 \cdot 10^{-6}$ - $1 \cdot 10^{3}$ В; $1 \cdot 10^{-7}$ - 5 А	0,05 Гц - 100 кГц	$1 \cdot 10^{-6}$ - $1 \cdot 10^{10}$ Ом
АЦП и ЦАП	$1 \cdot 10^{-4}$ - $1 \cdot 10^{3}$ В; $1 \cdot 10^{-6}$ - 5 А	$1 \cdot 10^{-4}$ - $1 \cdot 10^{3}$ В; $1 \cdot 10^{-6}$ - 5 А	0,05 Гц - 100 кГц	$1 \cdot 10^{-2}$ - 10^{7} Ом

Средство измерения	Предел допускаемой погрешности измерения, %			Время измерения, с	Потребляемая мощность, В · А
	на постоянном токе	на переменном токе	сопротивление		
Вольтметры	0,2 - 0,0005	0,5 - 0,06	-	$60 - 1 \cdot 10^{-3}$	50
Омметры	-	-	0,005 - 20,0	$1 \cdot 10^{-3}$ - 5	50
Комбинированные приборы	0,5 - 0,002 0,5 - 0,01	1,0 - 0,05	1,5 - 0,005	$60 - 1 \cdot 10^{-2}$	60
АЦП и ЦАП	1,5 - 0,5	2,5 - 0,5	2,5 - 0,5	20	15

1.4.4. Технические характеристики средств метрологического обеспечения

Измеряемая величина или средство измерения	Параметр	Значение
1	2	3
Напряжение постоянного тока	Диапазон измерения	$5 \cdot 10^{-7}$ -10^{5} В
	Погрешность	± (0,0001 - 1,5) %
Меры напряжения постоянного тока:		
однозначные	Диапазон измерения	1,01756 - 1,01960 В
	Погрешность	± (0,0005 - 0,01) %
многозначные программируемые	Диапазон измерения	10^{-5} - 10^{3} В
	Погрешность	± (0,003 - 0,02) %
с ручным управлением	Диапазон измерения	10^{-9} - 10 В
	Погрешность	± (0,0002 - 0,02) %
Сила постоянного тока	Диапазон измерения	10^{-16} - $7 \cdot 10^{4}$ А
	Погрешность	± (0,01 - 5,0) %
Меры силы постоянного тока многозначные программируемые	Диапазон измерения	10^{-9} - 10 А
	Погрешность	± (0,006 - 0,03) %
Напряжение переменного тока	Диапазон измерения	10^{-4} - 10^{5} В
	Погрешность	± (0,01 - 0,5) %
	Частотный диапазон	0,02 - $5 \cdot 10^{3}$ кГц
Меры напряжения переменного тока многозначные программируемые	Диапазон измерения	10^{-5} - 10^{3} В
	Погрешность	± (0,03 - 0,2) %
	Частотный диапазон	0,02 - 100 кГц
Сила переменного тока	Диапазон измерения	10^{-7} - 10^{4} А
	Погрешность	± (0,03 - 0,5) %
	Частотный диапазон	0,02 - 200 кГц
Мощность переменного тока:		
однофазного	Напряжение	$5 \cdot 10^{-1}$ - $6 \cdot 10^{2}$ В
	Сила тока	$25 \cdot 10^{-3}$ - $6 \cdot 10^{2}$ А
	Погрешность	± (0,05 - 0,5) %
	Частотный диапазон	0,04 - 20 кГц

Продолжение табл. 1.4.4.

1	2	3
трехфазного	Напряжение	30 - 6 · 10^2 В
	Сила тока	10^{-1} - 6 · 10^2 А
	Погрешность	± (0,05 - 0,5) %
	Частотный диапазон	0,045 - 1,1 кГц
Сопротивление постоянному току;		
меры и магазины с ручным управлением	Диапазон измерения	10^{-4} - 10^{12} Ом
	Погрешность	± (0,002 - 0,2) %
меры программируемые	Диапазон измерения	1 - 10^7 Ом
	Погрешность	± (0,01 - 0,1) %
мосты и установки	Диапазон измерения	10^{-7} - 10^{15} Ом
	Погрешность	± (0,005 - 10,0) %
Сопротивление переменному току;		
меры и магазины с ручным управлением	Диапазон измерения	10^{-3} - 10^8 Ом
	Погрешность	± (0,005 - 0,01) %
	Частотный диапазон	0,05 - 100кГц
мосты и установки	Диапазон измерения	10^{-2} - 20 · 10^8 Ом
	Погрешность	± (0,05 - 15,0) %
	Частотный диапазон	0,05 - 10 кГц
Электрическая емкость;		
меры и магазины с ручным управлением	Диапазон измерения	10^{-15} - 1,1 · 10^{-4} Ф
	Погрешность	± (0,02 - 0,5) %
	Частотный диапазон	0,04 - 100 кГц
меры программируемые	Диапазон измерения	1 · 10^{-12} - 10^{-2} Ф
	Погрешность	± (0,1 - 10) %
	Частотный диапазон	0,05 - 10 кГц
мосты и установки	Диапазон измерения	10^{-14} - 20 · 10^{-3} Ф
	Погрешность	± (0,02 - 15,0) %
	Частотный диапазон	0,02 - 10^4 кГц
Индуктивность;		
меры и магазины с ручным управлением	Диапазон измерения	10^{-8} - 1 Гн
	Погрешность	± (0,02 - 1,0) %
	Частотный диапазон	0,02 - 3 · 10^4 кГц
меры программируемые	Диапазон измерения	10^{-6} - 2 · 10^3 Гн
	Погрешность	± (0,1 - 1,0) %
	Частотный диапазон	0,05 - 10 кГц
мосты и установки	Диапазон измерения	3 · 10^{-8} - 20 · 10^5 Гн
	Погрешность	± (0,05 - 15,0) %
	Частотный диапазон	0,04 - 50 кГц

Глава 1.5

ИЗМЕРЕНИЕ МАГНИТНЫХ ПАРАМЕТРОВ

1.5.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Магнетизм - универсальное свойство материи. Измерение магнитных характеристик веществ и готовых изделий позволяет не только определить их конкретные магнитные параметры, но косвенно по ним оценить структурное состояние, химический и фазовый составы, прочностные характеристики деталей, в ряде случаев уровень макро- и микронапряжений. Измерением магнитных полей вблизи несплошностей можно оценить геометрические параметры дефекта, а иногда и его вид.

В технической диагностике материалов и изделий измерения магнитных параметров используют как для аттестации магнитных материалов, так и для определения немагнитных параметров веществ, изделий и конструкций.

Классификация магнитных материалов. Магнитные материалы являются существенными элементами конструкции электрических машин, приборов и устройств. Магнитные материалы делятся на магнитомягкие и магнитотвердые.

Магнитомягкие материалы (МММ) имеют высокую магнитную проницаемость, низкое значение коэрцитивной силы, узкую петлю гистерезиса с малыми потерями на перемагничивание, способность намагничиваться до насыщения уже в слабых магнитных полях.

1.5.1. Некоторые характеристики промышленных магнитомягких материалов

Материал	$\mu_{нач}$	μ_{max}	H_c, А/м	B_s в поле H_s	ρ, Ом · м
Технически чистое железо	250	3500 - 4500	40 - 100	2,18 Тл $H_s = 5 \cdot 10^4$ А/м	10^{-7}
Электрохимическая сталь	200 - 600	3000 - 8000	10 - 65	1,89 Тл $H_s = 3 \cdot 10^4$ А/м	(6 - 2,5) 10^{-7}
Пермаллои:					
низконикелевые (40 - 50 % Ni)	2000 - 4000	15000 - 60000	5 - 32	1,3 - 1,6 Тл	(4,5 - 9) 10^{-7}
высоконикелевые (79 % Ni)	15000 - 100000	70000 - 300000	0,65 - 4	0,7 - 0,75 Тл	(1,6 - 8,5) 10^{-7}
Ферриты:					
никельцинковые	10 - 2000*	40 - 7000	1700 - 8	0,2 - 0,35 Тл	10^{-8} - 10
марганеццинковые	700 - 20000*	1800 - 35000	28 - 0,25	0,15 - 0,46 Тл	-
Магнитодиэлектрики на основе:					
альсифера	20 - 65	-	-	-	-
карбонильного железа	5 - 15	-	-	-	-
молибденового пермаллоя	60 - 250	-	-	-	-

*При $f = 100$ кГц

Обозначения: $\mu_{нач}$, μ_{max} - соответственно начальная и максимальная магнитная проницаемость; H_c - коэрцитивная сила; B_s - индукция насыщения; H_s - напряженность магнитного поля, при которой достигается B_s; ρ - удельное электрическое сопротивление

Магнитотвердые материалы (МТМ) обладают большой удельной магнитной энергией, отличаются большими значениями коэрцитивной силы H_c и остаточной индукции B_r.

К МММ в соответствии с ГОСТ принято относить материалы с $H_c^B < 4$ кА/м, к МТМ - с $H_c^B > 4$ кА/м. Для промышленных МММ наименьшая

$$H_c < 0{,}4 \text{ А/м},$$

а для МТМ наибольшая

$$H_c < 800 \text{ кА/м},$$

т.е. коэрцитивная сила отличается в $2 \cdot 10^6$ раз.

Значения основных магнитных характеристик некоторых промышленных МММ и МТМ представлены в табл. 1.5.1 и 1.5.2.

Данные, приведенные в таблицах, следует дополнить классификацией МММ по химическому составу, который в значительной степени определяет технологию производства, свойства и области применения материала.

Технически чистое железо является дешевым магнитным материалом, хорошо поддающимся механической обработке и имеющим высокие магнитные свойства в постоянных магнитных полях.

1.5.2. Некоторые характеристики промышленных магнитотвердых материалов

Материал	B_r, Тл	H_c^B, кА/м	W, Дж/м³	$(B \times H)_{max}$, Тл · А/м
Магнитные стали	0,8 - 1,0	4,64 - 13,6	960 - 2500	-
Альнико	0,5 - 1,33	40 - 87	-	7200 - 52800
Ферриты:				
бариевые	0,18 - 0,36	112 - 232	2800 - 14000	-
кобальтовые	0,24 - 0,28	128	5600 - 7200	-
Платинакс	0,3 - 0,5	208 - 240	0,016	-
Соединения редкоземельных металлов	0,85 - 0,9	600 - 700	70400 - 80000	-
Викаллой	0,9 - 0,95	24 - 38	4000 - 14000	-
Кунико, кунифе	0,34 - 0,73	21 - 57	2800 - 7400	-

Электротехнические стали обладают повышенной магнитной проницаемостью, небольшим значением H_c.

Пермалои - сплавы железа с никелем или железа с никелем и кобальтом, легированные молибденом, хромом. Имеют очень высокую магнитную проницаемость уже в слабых магнитных полях и предельно малые значения коэрцитивной силы. Недостатками являются большая чувствительность к механическим напряжениям, пониженные значения индукции насыщения.

Пермендюр - сплав железа с кобальтом, имеющий повышенную магнитную индукцию насыщения.

Перминвар - сплав железа с никелем и кобальтом, отличающийся постоянством магнитной проницаемости в широком диапазоне напряженности поля.

Низкочастотные ферриты представляют собой системы оксидов $NiO\text{-}ZnO\text{-}Fe_2O_3$ (никель-цинковые) или $MnO\text{-}ZnO\text{-}Fe_2O_3$ (марганцево-цинковые) с присадкой оксидов других металлов, имеют высокую магнитную проницаемость.

Высокочастотные никель-цинковые ферриты имеют значительно меньшую магнитную проницаемость, большую температурную стабильность и меньшие значения тангенса угла потерь $\mathrm{tg}\delta$.

Объектом магнитных измерений являются также слабомагнитные материалы, стали и чугуны.

К слабомагнитным материалам относятся диа-, пара- и антиферромагнетики, в том числе металлы и соединения, к которым предъявляются требования отсутствия магнитных примесей.

Слабоферромагнитные сплавы на основе железа должны отвечать требованиям "немагнитности", высокой механической прочности и антикоррозионной стойкости. Этими свойствами обладают хромоникелевые стали и некоторые другие сплавы. Относительная магнитная проницаемость слабоферромагнитных сталей находится в пределах 1,01 - 10, коэрцитивная сила 1 - 10 кА/м при низкой остаточной индукции.

Наиболее важными и широко используемыми в машиностроении металлическими материалами являются стали и чугуны. В их производство интенсивно внедряют средства и методы магнитного и электромагнитного контроля. В основе этих методов лежит зависимость магнитных свойств от изменений структуры стали и чугуна в процессе обработки. Характерные диапазоны изменения основных магнитных параметров чугунов и сталей: коэрцитивная сила 0,05 - 14 кА/м, максимальная магнитная проницаемость 20 - 5500, намагниченность насыщения 700 - 1700 кА/м.

Кривая намагничивания. Ферромагнетик в отсутствие внешнего магнитного поля разбит на области (домены), разделенные границами толщиной примерно 10^{-7} м (для железа). В размагниченном состоянии, несмотря на намагниченность каждого домена до насыщения, суммарный магнитный момент равен нулю. Под действием магнитного поля в ферромагнетике происходит изменение величины проекций магнитных моментов отдельных доменов на направление поля, и ферромагнетик приобретает суммарный магнитный момент, отличный от нуля.

Зависимость намагниченности M (магнитного момента единицы объема) от величины приложенного магнитного поля H носит название кривой намагниченности (рис. 1.5.1).Зависимость не является линейной и определяется соотношением

$$M = æH \quad (B = \mu_a H),$$

где μ_a - абсолютная магнитная проницаемость.

На практике удобнее пользоваться относительной величиной магнитной проницаемости

$$\mu = \mu_a / \mu_0,$$

где $\mu_0 = 4 \cdot 10^{-7}$ Гн/м.

В дальнейшем будем пользоваться относительными магнитными проницаемостями.

Кривая намагничивания зависит от исходного магнитного состояния. Если исходное состояние соответствует размагниченному, то кривая намагничивания носит название основной или первоначальной. Размагниченное состояние достигается нагревом выше температуры Кюри. Состояние, близкое к естественно размагниченному, может быть получено путем циклического премагничивания с плавно убывающей амплитудой магнитного поля.

Кривую намагничивания можно разбить на пять участков (рис 1.5.1, *а*).

Участок I характеризуется постоянной восприимчивостью (проницаемостью), т.е.

$$æ_{нач} = M/H = \text{const}$$
$$(\mu_{нач} = B / \mu_0 H = \text{const}).$$

Величину $æ_{нач}(\mu_{нач})$ называют *начальной восприимчивостью (проницаемостью).* Намагничивание на этом участке осуществляется за счет обратимого упругого сечения доменных границ.

На участке II (*область Рэлея*) намагничивание осуществляется за счет доменных границ. Для этой области кривой намагничивания справедлив закон Рэлея для намагниченности

$$M = æ_{нач} H + bH^2, \qquad (1.5.1)$$

где b - коэффициент Рэлея. Второй член учитывает необратимые процессы при намагничивании.

Участок III характеризуется высоким значением магнитной восприимчивости (проницаемости). Намагниченность меняется большими скачками Баркгаузена, вызванными необратимым смещением доменных границ.

На участке IV восприимчивость постепенно уменьшается. Намагничивание осуществляется за счет вращения векторов спонтанной намагниченности в направлении внешнего магнитного поля. Работа по повороту векторов затрачивается против энергии кристаллографической анизотропии. Процессы вращения происходят преимущественно обратимо. Для участка IV справедлив закон приближения к насыщению:

$$M = M_s\left(1 - \frac{A}{H} - \frac{B}{H^2} - \frac{C}{H^3} - \ldots\right) + æ_n H, \qquad (1.5.2.)$$

где M_s - намагниченность насыщения; $æ_n$ - восприимчивость парапроцесса; A, B, C ... - постоянные коэффициенты, определяющие вклад различных структурных факторов, влияющих на процесс намагничивания.

Выражение (1.5.2) справедливо для полей, при которых ферромагнетик намагничен до технического насыщения.

На участке V процессы смещения и вращения закончены. Незначительное увеличение намагниченности связано с дополнительной ориентацией спиновых магнитных моментов в направлении приложенного поля. Характер процессов намагничивания отражает также зависимость магнитной восприимчивости (проницаемости) от напряженности магнитного поля (рис. 1.5.1, *б*). Магнитная проницаемость $B / \mu_0 H$ имеет два значения $\mu_{нач}$ и μ_{max}, часто встречающиеся при описании магнитных свойств. Значение начальной магнитной проницаемости

$$\mu_{нач} = \frac{1}{\mu_0} \lim_{H \to 0} \frac{B}{H}.$$

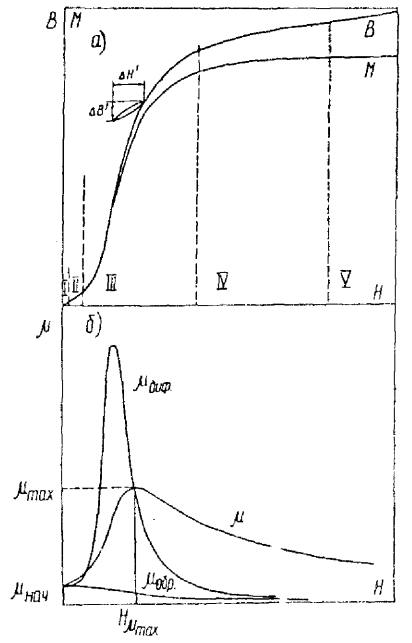


Рис. 1.5.1. Основные характеристики намагничивания: *а* - кривая намагничивания; *б* - петля магнитной проницаемости от напряженности магнитного поля

Измерение $\mu_{нач}$ представляет определенную трудность, обусловленную проведением измерений в очень слабых полях. При увеличении поля проницаемость растет и при некотором его значении, называемом полем максимальной магнитной проницаемости $\left(H_{\mu_{max}}\right)$, достигает максимального значения (μ_{max}), а далее убывает (рис. 1.5.1, *б*).

Если в ферромагнетике, имеющем некоторое магнитное состояние, увеличить поле на величину ΔH, то индукция возрастает на величину ΔB. Предел отношения $\Delta B / \Delta H$ при $\Delta H \to 0$ называют *дифференциальной магнитной проницаемостью*,

$$\mu_{диф} = \frac{1}{\mu_0} \lim_{\Delta H \to 0} \frac{\Delta B}{\Delta H}.$$

В случае уменьшения напряженности магнитного поля $\left(\Delta H'\right)$ уменьшается значение индукции $\left(\Delta B'\right)$, но вновь получаемое магнитное состояние не соответствует основной кривой индукции и будет определяться нисходящей ветвью частного цикла петли гистерезиса. При увеличении поля индукция приобретает первоначальное значение, изменяясь по восходящей петле магнитного гистерезиса (рис. 1.5.1, *а*). Величину проницаемости

$$\bar{\mu}_{диф} = \frac{1}{\mu_0} \lim_{\Delta H \to 0} \frac{\Delta B}{\Delta H}.$$

называют *дифференциальной проницаемостью убывания*. Поскольку по способу определения и численному значению она соответствует обратной проницаемости $\left(\mu_{обр}\right)$, то чаще употребляют последний термин.

В слабых магнитных полях (участок I кривой намагничивания) все три вида магнитной проницаемости имеют одинаковое значение. Дифференциальная проницаемость наиболее сильно изменяется в полях, соответствующих участку III, причем в полях от 0 до $H_{\mu_{max}}$ $\mu_{диф} > \mu$, а в точке, соответствующей полю $H_{\mu_{max}}$, значения максимальной и дифференциальной проницаемостей равны.

Петля магнитного гистерезиса. Уменьшение поля после насыщения сопровождается снижением намагниченности (индукции). Однако намагниченность (индукция) убывает не по кривой намагничивания, а с некоторым запаздыванием и при поле, равном нулю, сохраняет определенное значение, которое называют *остаточной намагниченностью* M_r (индукцией B_r). Если приложить поле обратного направления, то остаточная намагниченность начнет уменьшаться и при некотором значении поля намагниченность (индукция) окажется равной нулю. Это значение поля носит название *коэрцитивной силы* (H_c). Различают коэрцитивную силу по намагниченности $_M H_c$ (рис. 1.5.2, кривая *1*) и коэрцитивную силу по индукции $_B H_c$ (см. рис. 1.5.2, кривая *2*).

В ферромагнетиках с крутым участком кривой размагничивания и малой величиной H_c различие между $_M H_c$ и $_B H_c$ незначительное, но для материалов с большой коэрцитивной силой и пологим наклоном кривой размагничивания различие между коэрцитивными силами по индукции и намагниченности может достигать существенных значений. Дальнейшее увеличение поля противоположного направления приводит к росту намагниченности (индукции) отрицательного знака, и в поле, равном $-H_{max}$, ферромагнетик вновь достигает своего насыщения $-M_s (-B_s)$. Если уменьшить поле, а потом сменить его направление, то намагниченность (индукция) будет изменяться по восходящей кривой, т.е. в результате медленного циклического перемагничивания намагниченность (индукция) изменяется по замкнутой кривой, носящей название *статической петли гистерезиса*.

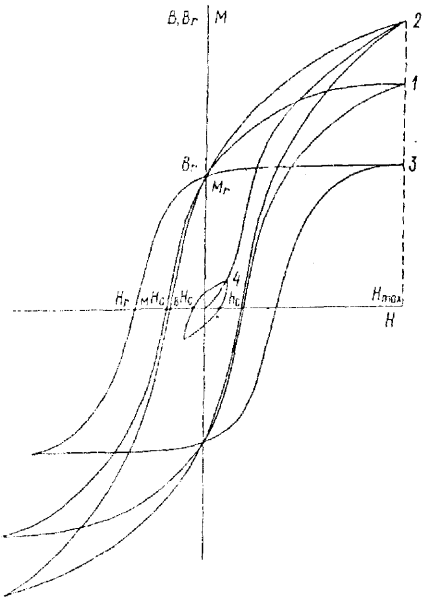


Рис. 1.5.2. Вид петли магнитного гистерезиса

Кроме петель $B(H)$ и $M(H)$, можно построить петлю магнитного гистерезиса по остаточной индукции $B_r(H)$ или остаточной намагниченности $M_r(H)$ (рис. 1.5.2). Петля гистерезиса по остаточной индукции (кривая 3) характеризуется коэрцитивной силой ${}_0H_c$, соответствующей напряженности размагничивающего поля, необходимого для проведения ферромагнетика в статическое размагниченное состояние. Коэрцитивную силу по остаточной индукции (намагниченности) иногда называют полем возврата или релаксационной коэрцитивной силой H_c.

На рис. 1.5.2 показана частная петля гистерезиса, характеризуемая коэрцитивной силой h_c, остаточной индукцией b_r и гистерезисными потерями на перемагничивание по частному циклу p_r.

Намагничивание тела. Реальные ферромагнитные изделия имеют конечные размеры, поэтому при их помещении в поле H_e на торцах образуются магнитные полюса, которые вызывают появление внутри ферромагнетика внутреннего поля, направленного против внешнего магнитного поля и зависящего от намагниченности

$$H_0 = NM,$$

где N – размагничивающий фактор, зависящий от геометрических характеристик тела.

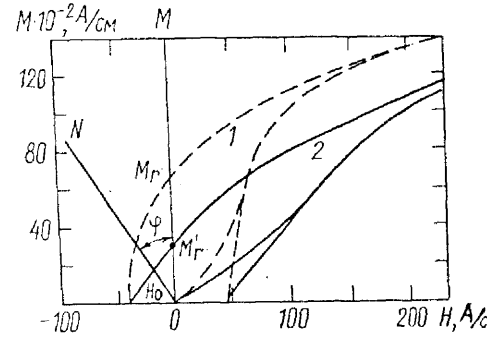


Рис. 1.5.3. Зависимость намагниченности от величины внутреннего поля

Чаще всего пользуются короткими образцами, поэтому бывает важно определить истинные параметры кривой намагничивания и петли гистерезиса. Поскольку внутреннее поле

$$H_i = H_e - NM,$$

то, вычитая из значения внешнего действующего поля величину размагничивающего поля H_0, можно найти величину истинного внутреннего поля. Это можно осуществить графически (рис. 1.5.3), если произвести смещение кривой намагничивания или петли гистерезиса в каждой точке с намагниченностью M влево на величину NM. Если учесть, что

$$H_0 = M\,\mathrm{tg}\varphi, \quad \mathrm{tg}\varphi = N,$$

то, проводя кривую сдвига ON под углом φ, можно производить смещение точек кривой намагничивания и петли гистерезиса непосредственно на величину отрезка $M\,\mathrm{tg}\varphi$ между осью ординат и линией ON.

Величины намагниченности насыщения и коэрцитивной силы для вещества и для тела практически одинаковы. Остаточная намагниченность M_r' значительно меньше намагниченности вещества, поскольку $H_e = 0$:

$$M_r' = H_i/N.$$

По аналогии с проницаемостью (восприимчивостью) основной кривой намагничивания проницаемость $\mu_т$ (восприимчивость $æ_т$) тела $\mu_т = B/\mu_0 H_e$ ($æ_т = M/H_e$). Магнитную проницаемость однородно намагниченного эллипсоида можно связать с магнит-

ной проницаемостью (восприимчивостью) вещества:

$$\mu_T = \frac{\mu}{1 + N(\mu - 1)}, \quad æ_T = \frac{æ}{1 + Næ}.$$

При $N(\mu - 1) >> 1$; $æN >> 1$ проницаемость тела слабо зависит от магнитных свойств материала, из которого изготовлено изделие, а в большей степени от его геометрических размеров, т.е. определяется проницаемостью формы *m*:

$$\mu_T \sim m = \frac{1}{N}.$$

1.5.2. МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ

При измерении магнитных свойств веществ и изделий объект подвергают воздействию магнитного поля. Для создания магнитных полей используют постоянные магниты, электромагниты различных конструкций, соленоиды и катушки. Для создания сильных магнитных полей применяют импульсные электромагниты и соленоиды, а также сверхпроводящие соленоиды.

К основным методам измерения магнитных свойств можно отнести:

1. **Баллистический метод** позволяет определить основную кривую индукции и намагниченности, петлю гистерезиса и различные виды проницаемости. Измеряется количество электричества, протекающего через индукционную катушку, охватывающей образец, когда поток резко меняется.

2. **Магнитометрический метод** также позволяет определить кривую намагничивания, петлю гистерезиса. Используется эффект магнитомеханического воздействия исследуемого образца на магнитную стрелку.

3. **Электродинамическим методом** можно определить основную кривую индукции и петлю гистерезиса. Измеряется угол поворота рамки с током, находящейся в поле намагниченного образца.

4. **Пондеромоторный метод** дает возможность измерять намагниченность, восприимчивость и другие магнитные характеристики при помощи измерения силы, действующей на образец.

5. **Индукционный метод** позволяет определять кривую индукции, намагниченности, проницаемости. Измеряется электродвижущая сила, которая возбуждается во вторичной обмотке, или реактивное сопротивление катушки, если в нее помещен образец.

6. **Мостовые методы** используются для определения основной кривой индукции, средней проницаемости, комплексной магнитной проницаемости, начальной проницаемости, комплексного магнитного сопротивления, коэффициента потерь и полных потерь.

7. **Ваттметрические методы,** как правило, применяют для измерения полных потерь на гистерезис и вихревые токи. Определяется мощность, которая поглощается в цепи катушки, содержащей образец.

8. **Калориметрические методы** позволяют определить полные потери на гистерезис и вихревые токи. Определяется тепло, выделяемое образцом при перемагничивании в переменном магнитном поле.

9. **Радиотехнические методы** дают возможность определять кривую индукции, семейство симметричных петель гистерезиса, полные потери, комплексную проницаемость при различных частотах, а также изучать ферро-, пара- и ядерный магнитные резонансы.

10. **Нейтронографический метод** основан на явлении магнитного рассеяния нейтронов, возникающего в результате взаимодействия магнитного момента нейтрона с магнитным моментом вещества. Метод позволяет исследовать магнитную структуру ферромагнитных, парамагнитных и антиферромагнитных веществ.

Выбор метода измерения определяется задачей проводимых измерений, необходимой степенью точности.

Индукционный метод получил наибольшее распространение при испытаниях в постоянных и переменных магнитных полях. Универсальность метода заключается в возможности проводить измерения на образцах любой формы в замкнутой и разомкнутой магнитных цепях.

1.5.3. МАГНИТНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

Основные типы магнитных преобразователей представлены на рис. 1.5.4.

Индукционный преобразователь, представляющий собой измерительную катушку (ИК), применяется для измерения магнитного потока Φ, магнитной индукции B и магнитного момента.

ИК для измерения магнитных потоков и индукции должна удовлетворять следующим требованиям. Необходимо, чтобы все витки катушки сцеплялись с одним и тем же потоком, то есть чтобы витки располагались в одной плоскости, перпендикулярной к линиям индукции. Для измерения индукции в образце все витки должны плотно примыкать к поверхности образца, охватывая его.

ИК для измерения напряженности магнитного поля выполняются в виде плоских катушек с четным числом слоев обмотки так, чтобы начало и конец находились в одном месте и провода от них можно было скрутить,

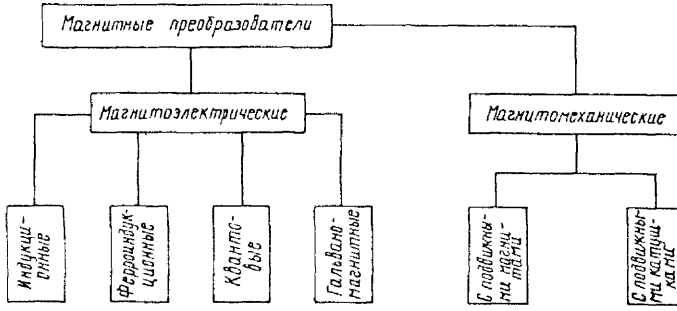


Рис. 1.5.4. Классификация магнитных преобразователей

не образовывая петли. Диаметр и длина катушки зависят от размеров пространства с однородным магнитным полем, величину напряженности которого требуется определить.

Для измерения напряженности магнитного поля непосредственно у поверхности испытуемого образца применяют плоские ИК, размеры которых выбирают такими, чтобы магнитное поле в месте, занимаемом катушкой, было однородным.

ИК делают обычно очень тонкой, чтобы можно было считать, что практически она находится в поле, равном полю внутри образца. Катушка плотно прижимается к поверхности образца, ее толщина не должна превышать 1,0 - 1,5 мм, число слоев намотки делают четным.

Изменение магнитного потока в индукционном преобразователе создается:

а) изменением самого потока;

б) перемещением ИК с сохранением ее ориентации относительно $\overline{H}$ в область пространства с другим значением магнитного потока;

в) скачкообразным поворотом ИК вокруг ее оси;

г) непрерывным вращением ИК;

д) совершением ИК кругильных или прямолинейных колебаний.

Принцип действия веберметра, баллистического гальванометра и других измерительных устройств подобного назначения состоит в интегрировании индукционного в ИК сигнала. Чаще всего требуется измерять либо абсолютные значения Φ, B, H, либо их конечные изменения. В соответствии с этим уравнения преобразования необходимо представить в таком виде, чтобы в них входили измеряемые величины.

Пусть катушка *1* поперечного сечения S с обмоткой, имеющей n витков, помещена в поле H и с ней сцепляется поток Φ (рис. 1.5.5). Для постоянного магнитного поля полный магнитный поток

$$\psi = n\Phi = H\mu S\cos\alpha,$$

где μ - магнитная проницаемость среды; α - угол между направлением вектора напряженности магнитного поля $\overline{H}$ и нормалью к поверхности катушки. Если ИК находится в однородном поле, при изменении Φ в цепи контура ИК индуцируется э.д.с.:

$$e = -nS\left(dB/dt\right)\cos\alpha = -nS\mu\left(dH/dt\right)\cos\alpha. \quad (1.5.3)$$

В (1.5.3) входит произведение числа витков ИК на ее поперечное сечение.

В общем случае ИК может быть многослойной, поэтому под величиной nS следует понимать параметр K_{S_n}, называемый *постоянной* измерительной катушки:

$$K_{S_n} = \sum_{1}^{n} S$$

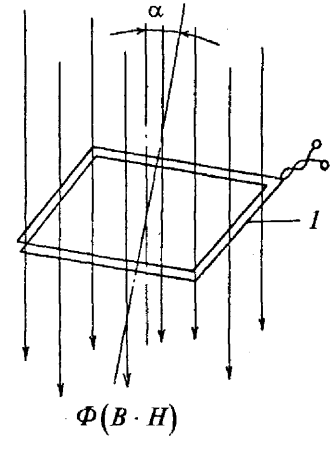


Рис. 1.5.5. Принцип действия веберметра

Следует различать применение ИК в постоянном и переменном полях. В первом случае при некотором конечном изменении полного потока $\Delta\psi$ за промежуток времени $\left(t_2 - t_1\right)$ можно записать

$$\Delta\psi = n\Delta\Phi = \int_{t_1}^{t_2} e\,dt = r\int_{t_1}^{t_2} i\,dt,$$

где i - ток; r - сопротивление измерительной цепи прибора. Таким образом, измеряя либо импульс э.д.с. (веберметром), либо импульс силы тока (баллистический гальванометр) можно определить изменение потока $\Delta\Phi$, а также изменение индукции ΔB или напряженности поля ΔH.

Если ИК используется для измерений в переменном периодическом магнитном поле, то

$$\psi_{max} = n\Phi_{max} = E/4k_{ф}f = E_{ср}/4f,$$

где Φ_{max} и ψ_{max} - амплитуды соответственно потока и полного потока; E - действующее значение э.д.с.; $E_{ср}$ - среднее значение э.д.с.; f - частота; $k_{ф}$ - коэффициент формы кривой.

Для измерения потока в постоянном магнитном поле необходимо, чтобы полный поток, сцепляющийся с ИК, подвергся изменению. Изменение потока сцепления может быть осуществлено либо путем самого потока, либо путем перемещения ИК относительно направления потока. В соответствии с этим применяются либо стационарные, либо подвижные ИК. Среди подвижных ИК различают линейноперемещающиеся, поворотные, вращающиеся и вибрирующие.

При вращении ИК относительно объекта измерения, создающего постоянный магнитный поток Φ, с угловой частотой ω в ней индуцируется э.д.с.

$$e = -n\frac{d}{dt}\left(\Phi\cos\omega t\right) = n\Phi\omega\sin\omega t. \qquad (1.5.4)$$

Интегрируя (1.5.4) за половину периода, получим среднее значение э.д.с.,

$$E_{ср} = 4fn\Phi.$$

Следовательно, зная частоту f вращения ИК и измерив $E_{ср}$ вольтметром средних значений, можно определить магнитный поток.

При вибрации ИК с частотой ω и амплитудой A вдоль оси X э.д.с.

$$e = -n\frac{d\Phi}{dx}\frac{dx}{dt}.$$

Если $x = A\sin\omega t$, то

$$e = -n\frac{d\Phi}{dx}A\omega\cos\omega t.$$

Интегрируя это выражение за полпериода, получим

$$E_{ср} = 4fnA\frac{d\Phi}{dt}.$$

Если в области вибрации обмотки

$$d\Phi/dx = \text{const},$$

то разность значений магнитного потока в двух крайних положениях ИК составляет $\Delta\Phi = 2A\frac{d\Phi}{dx}$ и

$$E_{ср} = 2fn\Delta\Phi. \qquad (1.5.5)$$

Аналогичный результат получим и при угловых колебаниях ИК, заменяя координату x на угол α. Формулы (1.5.4) и (1.5.5) справедливы и для стационарных ИК при непрерывно меняющемся магнитном потоке (вращающееся или переменное магнитное поле, вращающийся или вибрирующий намагниченный образец).

Одной из разновидностей индукционных преобразователей является магнитный потенциалметр. Это ИК с обмоткой, равномерно навитой по длине каркаса из изолирующего материала. Обмотка навивается либо на гибкий каркас (рис. 1.5.6, *а*) (гибкий потенциалметр), либо на жесткое основание призматической формы (рис. 1.5.6, *б*) или в виде дуги (рис. 1.5.6, *в*) (жесткие потенциалметры). Преобразователь предназначен для измерения разности магнитных потенциалов или м.д.с.

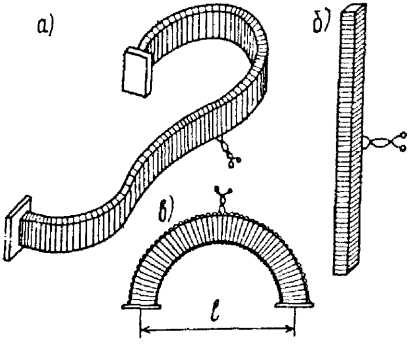


Рис. 1.5.6. Магнитные потенциалметры

Основные требования к устройству потенциалметров - строго одинаковое число витков обмотки на единицу длины; постоянное сечение по длине, обмотка имеет четное число слоев и кончается в середине потенциалметра.

Магнитный потенциалметр применяется и для измерения в переменном магнитном поле, жесткий преобразователь в виде дуги с фиксированной базой применяется для измерения напряженности однородного магнитного поля.

Основные параметры ферромагнитных материалов - H_c, B_r, M_S, основную кривую намагничивания, петлю гистеризаса - можно определить, используя для измерения стационарные и подвижные ИК.

При измерении коэрцитивной силы H_c, образец разомкнутой формы либо удаляется из стационарной катушки, либо катушка сдергивается с образца, сохраняя свою ориентацию относительно него.

Стационарные ИК, как правило, однослойные с известным числом витков n, плотно или с некоторым зазором охватывающие однородно намагниченную часть образца, позволяют определять магнитную индукцию. При наличии зазора между ИК и образцом следует учитывать влияние воздушного зазора на результат измерений.

Стационарные или линейноперемещающиеся катушки, о которых упоминалось выше, а также потенциалметры служат для измерения напряженности магнитного поля на поверхности образцов. Подбирая соответствующим образом параметры катушек индукции и напряженности магнитного поля, можно измерить всю основную кривую намагничивания и петлю гистерезиса ферромагнитного материала. Из кривой B (H) определяют начальную и максимальную магнитные проницаемости.

Стационарные катушки используют для измерения намагниченности в достаточно больших намагничивающих полях и поэтому близкой к намагниченности насыщения M_S.

При определении M_S по методу Штеблейна (рис. 1.5.7) внутри используемого для намагничивания электромагнита высверливается канал, по которому перемещается латунный держатель с измеряемым (x) и стандартным (ст) образцами. Между полюсами электромагнита зажаты две ИК, соединенные последовательно и навстречу друг другу. Катушки имеют одинаковое произведение числа витков на сечение $n_1S_1 = n_2S_2$. При перемещении эталона и образца через такую катушку в ней индуцируется импульс тока, пропорциональный разности намагниченностей насыщения стандартного и исследуемого образцов.

Величина намагниченности насыщения исследуемого образца

$$M_{Sx} = \left(M_{S\,\text{ст}} \pm \frac{C_\text{б}\alpha}{\mu_0 (n_1 - n_2) S_\text{ст}} \right) \frac{S_\text{ст}}{S_x},$$

где α - показания измерительного прибора; $C_\text{б}$ - постоянная прибора; $S_\text{ст}$, S_x - площади сечения стандартного и измеряемого образцов.

При испытаниях магнитных материалов в постоянных магнитных полях в качестве интегрирующего прибора к индукционным преобразователям чаще всего служит баллистический гальванометр или веберметры различных типов.

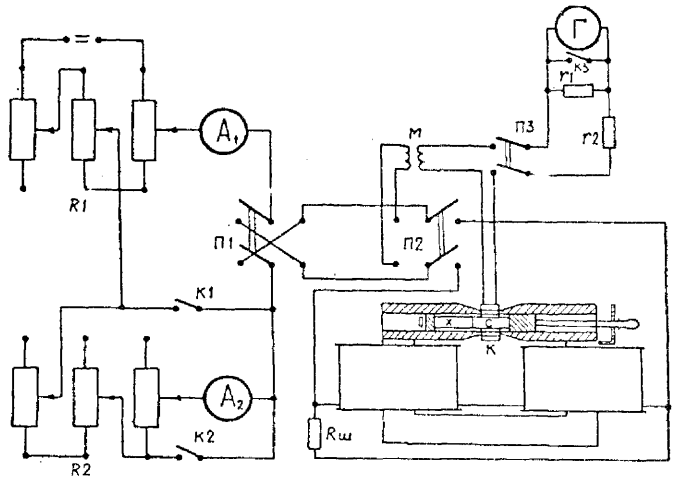


Рис. 1.5.7. Схема определения M_S по методу Штеблейна

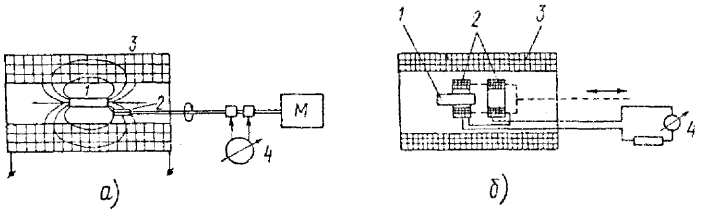


Рис. 1.5.8. Схемы магнитометров:
1 - образец; *2* - ИК; *3* - намагничивающее и размагничивающее устройство; *4* - регистрирующий прибор

Измерение э.д.с. в катушке, вращающейся относительно объекта измерения, составляет принцип работы приборов, называемых измерительными генераторами (рис. 1.5.8, *а*), и используется преимущественно для измерения параметров постоянных или медленно изменяющихся магнитных полей. Относительная вибрация ИК и испытуемого образца и измерение индуцированной э.д.с. лежит в основе работы вибрационных магнитометров (рис. 1.5.8, *б*), используемых для измерения магнитного момента материалов в постоянных или медленно (по отношению к частоте вибрации) меняющихся полях. Метод измерений непрерывно изменяющихся магнитных потоков с помощью стационарной измерительной катушки и веберметра дает возможность регистрации зависимости магнитного потока от намагничивающего поля.

Устройства с использованием сверхпроводящих ИК для измерения магнитного потока являются самыми чувствительными и перспективными. В технической диагностике последние два метода наиболее часто используются для измерения коэрцитивной силы.

Первичные преобразователи напряженности магнитного поля и магнитной индукции, используемые в переменных магнитных полях, аналогичны преобразователям, применяемым в постоянном поле. Отличие состоит в том, что в переменном поле большую роль начинают играть собственные емкость и индуктивность. В практике измерения координат динамических петель намагничивания нашли распространение осциллографические, феррометрические и стробоскопические средства измерений.

Ферроиндукционные преобразователи (феррозонды). При решении многочисленных магнитометрических задач, например, при измерении магнитного поля Земли и его вариаций, при магнитной дефектоскопии изделий и т.д. все чаще применяются феррозондовые преобразователи (магнитно-модуляционные датчики ММД). С помощью феррозондов можно измерять постоянные и переменные магнитные поля от 10^{-6} А/см до 10^2 - 10^3 А/см.

Феррозонды относятся к активным индукционным преобразователям и по своему принципу действия во многом схожи с магнитными усилителями. От последних они отличаются тем, что не содержат управляемой электрической цепи. В феррозондах она заменена магнитной в виде стержневых сердечников из магнитомягких материалов, приобретающих намагниченность под действием измеряемого поля. Поскольку напряженность магнитного поля характеризуется вектором, а намагниченность сердечников зависит не только от их ориентации, но и от соотношения продольных и поперечных размеров, то, кроме отмеченных свойств, феррозонды обладают еще и диаграммой направленности, благодаря чему они могут быть использованы для измерения компонент магнитного поля.

Действие феррозонда основано на нелинейности кривой перемагничивания ферромагнитного материала. В простейшем виде феррозонд представляет собой стержень из магнитомягкого материала (чаще всего пермаллоя), на котором помещены две обмотки: ω_1 - для создания в сердечнике переменного магнитного потока (поля возбуждения) и ω_2 - для измерений индуцированной э.д.с.

Если по обмотке ω_1 пропустить переменный ток, то магнитное состояние сердечника будет меняться по динамической петле, а в обмотке ω_2 появится э.д.с. Если ток изменяется по синусоидальному закону (чаще всего феррозонды работают при синусоидальной кривой тока возбуждения), то э.д.с. в обмотке будет содержать, кроме основной частоты, высшие (нечетные) гармоники. Практически в феррозонде используют сердечники длиной от 1 - 3 сотен миллиметров, а частоту возбуждения от 50 Гц до сотен килогерц.

При помещении зонда в постоянное магнитное поле, действующее одновременно с переменным полем, форма динамической петли перемагничивания сердечника становится несимметричной. В направлении действия постоянного магнитного поля перемагничивание может осуществляться при меньших мгновенных значениях переменного тока, чем в случае отсутствия постоянного поля, то есть перемагничивание в направлении действия

постоянного поля осуществляется за меньший промежуток времени (меньше полупериода). При неизменных величине и форме переменного тока в обмотке зонда, помещенного в постоянное поле, изменяются величина и форма э.д.с.: наряду с нечетными гармониками в кривой э.д.с. появляются четные гармоники, величины которых пропорциональны напряженности постоянного поля. Большинство феррозондовых магнитометров работают на выделении 2-й гармоники.

Для облегчения выделения второй гармоники феррозонды обычно выполняют в виде двух одинаковых ферроэлементов, а обмотки возбуждения и вторичные (измерительные) с попарно равными числами витков соединяют таким образом, чтобы напряжение на концах вторичных обмоток в отсутствие постоянного поля было равно нулю.

Работа на удвоенной частоте типична для феррозондов. Однако дифференциальный феррозонд может работать и на основной частоте.

В магнитных измерениях применяются измерительные феррозонды (рис. 1.5.9).

Сердечник *1* набирают из 20 - 50 пластин пермаллоя толщиной 0,2 - 0,35 мм. На две длинные стороны сердечника наматывают одинаковые катушки, включаемые последовательно. Если поверх сердечника поместить индикаторную обмотку *3*, то при пропускании по обмоткам *2* переменного тока э.д.с. в обмотке *3* будет равна нулю. Если такое устройство поместить в постоянное поле, направленное вдоль длинной стороны сердечника, нарушится равенство потоков, сцепленных с катушками *2*. В индикаторной катушке появится э.д.с., пропорциональная величине постоянного магнитного поля. Такие зонды, в частности, нашли широкое применение в широко распространенных коэрцитиметрах серии КИФМ в качестве нуль-индикатора.

К основным областям применения феррозондов можно отнести:

1. Для геофизических исследований - изучение магнитного поля Земли, исследование магнитных полей атмосферы и полей других планет.

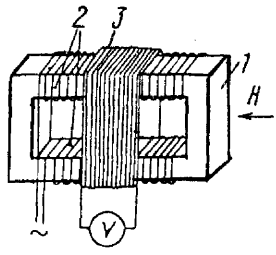


Рис. 1.5.9. Измерительный феррозонд

2. Искатели ферромагнитных масс при поиске полезных ископаемых, для обнаружения железных предметов в неферромагнитной среде, для обнаружения кораблей, мин и т.п.

3. Измерение толщины стенок деталей из неферромагнитных и ферромагнитных материалов. Регистрируют колебания толщины стенки неферромагнитного изделия до 1 мк.

4. В качестве чувствительных элементов в магнитометрах, коэрцитиметрах, анизометрах. Для измерения внутреннего поля на поверхности изделий из ферромагнитных материалов, в дефектоскопии для выявления нарушений сплошности и поиска скрытых дефектов, при измерении поля в пермеаметрах, а также для определения степени размагничивания изделий.

Гальваномагнитные преобразователи. *Датчики Холла.* Эффект Холла заключается в появлении э.д.с. между противоположными сторонами пластины, если через пластину пропустить ток и поместить ее при этом в магнитное поле. Направление тока, векторы напряженности поля и э.д.с. Холла взаимно перпендикулярны. Эффект Холла может наблюдаться в металлах и полупроводниках, однако в полупроводниках он значительно выше.

Эффект Холла объясняется действием силы Лоренца (действием магнитного поля на движущийся заряд), которая направлена перпендикулярно векторам скорости движения заряда и напряженности магнитного поля. Благодаря действию силы Лоренца в пластине появляется разность потенциалов - э.д.с. Холла

$$u_x = R_x \frac{i H}{d},$$

где R_x - постоянная Холла, Ом · см^2/А; i - ток в датчике (пластине), А; d - толщина пластины, см; H - напряженность магнитного поля, А/см. Постоянная Холла определяется экспериментально.

Основными достоинствами датчиков Холла является пропорциональность э.д.с. Холла напряженности магнитного поля, их малый размер (порядка миллиметра), а также отсутствие подвижных частей в измерительном механизме. Они позволяют измерять напряженности магнитного поля в диапазоне от 0,1 до 10^5 А/см. Большим преимуществом является возможность использования переменных магнитных полей в широком диапазоне частот (примерно до 10^{12} Гц).

При измерениях чаще стремятся получить э.д.с. Холла переменной, т.к. усилитель переменного тока более стабилен и можно существенно повысить чувствительность и точность метода.

Датчики Холла во многих случаях используют для тех же целей, что и ферроиндуктивные преобразователи.

Магниторезисторы. Электрическое сопротивление некоторых металлов и сплавов зависит от напряженности магнитного поля, в котором они помещены. Особо сильная зависимость электрического сопротивления от напряженности магнитного поля наблюдается у висмута. Поэтому висмутовую спираль или отрезок висмутовой проволоки иногда применяют для измерения напряженности сильных магнитных полей.

С ее помощью можно измерять напряженность поля в узких щелях электромагнитов и систем с постоянными магнитами. Измерение напряженности поля заключается в следующем.

Спираль помещают в магнитное поле, и на месте или потенциометре постоянного тока измеряют ее электрическое сопротивление. При 18 °С имеет место следующая зависимость между напряженностью магнитного поля и отношением электрического сопротивления спирали в поле H к электрическому сопротивлению спирали в отсутствие поля:

H, А/см . . .	0	1600	3200	8000	16000
$R_н/R_0$ . . .	1	1,046	1,14	1,48	2,09

Квантовые преобразователи. Для измерения напряженности (индукции) постоянных магнитных полей применяют преобразователи, в которых используются ядерные, электронные и атомные явления.

Сущность *метода ядерного магнитного резонанса* (ЯМР) заключается в следующем. Если парамагнитное вещество поместить в постоянное однородное магнитное поле, то ядра вещества, обладающие магнитным моментом и моментом количества движения, будут прецессировать вокруг направления приложенного поля с частотой, определяемой соотношением

$$\omega = \gamma H ,$$

где ω - частота прецессии; γ - гиромагнитное отношение, то есть отношение магнитного момента к моменту количества движения; H - напряженность постоянного магнитного поля.

Если теперь перпендикулярно полю приложить переменное магнитное поле, то при совпадении частоты прецессии с частотой вспомогательного переменного поля будет наблюдаться ЯМР - амплитуда прецессии возрастает и достигает максимального значения. Увеличение амплитуды прецессии сопровождается поглощением ядрами вещества энергии высокочастотного вспомогательного поля.

Таким образом, измерение напряженности поля сводится к фиксации резонанса и последующему измерению частоты этого резонанса. Сам факт наступления резонанса может быть обнаружен, например, по уменьшению амплитуды высокочастотных колебаний, обусловленному поглощением энергии ядрами вещества преобразователя; в этом случае метод называют *ядерным резонансным поглощением.* Или используется метод ядерной индукции, когда в измерительной катушке, ось которой перпендикулярна векторам напряженности постоянного и переменного поля, индуктируется э.д.с. резонансной частоты. Гиромагнитное отношение для ряда веществ определено с высокой точностью (10^{-3} %), поэтому погрешность измерения напряженности поля зависит в основном от используемого измерителя частоты и может быть доведена до 0,01 - 0,005 % при неоднородности измеряемого поля не более 0,2 % на сантиметр.

Недостатком ЯМР является невозможность измерений неоднородных полей, так как в неоднородном поле наблюдается расширение резонансной линии.

Метод *свободной ядерной индукции* дает возможность определять гиромагнитное отношение, константы квадрупольной связи; на этом принципе созданы аэро- и переносные магнитометры для измерения индукции магнитного поля Земли.

В отличие от ЯМР преобразователи *электронного парамагнитного резонанса* (ЭПР) основаны на использовании резонанса электронов в веществах, атомы которых имеют неспаренные электроны, благодаря чему электронная оболочка обладает магнитным дипольным моментом. Методика и аппаратура для обнаружения ЭПР подобна методике и аппаратуре ЯМР. Сигнал ЭПР на несколько порядков больше сигнала ЯМР, что позволяет применять преобразователи малого объема и измерять индукции в том диапазоне (от 10^{-5} до $5 \cdot 10^{-4}$ Т), в котором трудно пользоваться ядерным преобразователем.

При использовании квантовых преобразователей в слабых магнитных полях для увеличения резонансного сигнала производится ориентация магнитных моментов ядер с помощью постоянного магнитного поля (метод свободной ядерной индукции) или методом оптической ориентации атомов некоторых веществ, находящихся в газообразном или парообразном состоянии. На методе оптической ориентации основаны атомные квантовые преобразователи с оптической накачкой и оптическим методом обнаружения резонансного сигнала. Приборы с атомными преобразователями обеспечивают непрерывность измерений, обладают высокой чувствительностью, их недостаток - относительно большой объем преобразователя (десятки кубиче-

ских сантиметров). В атомных преобразователях используется резонанс атомов рубидия, цезия, гелия.

Магнитомеханические преобразователи основаны на механических перемещениях проводника с током или ферромагнитных тел под действием магнитного поля.

Измерение силы взаимодействия намагниченного образца и подвижной магнитной стрелки положено в основу магнитометрического метода. Образец и магнитная стрелка должны быть расположены определенным образом относительно друг друга. Рассматривая взаимодействие магнитных полей образца и стрелки, можно получить формулу для расчета намагниченности образца:

$$M = C\alpha,$$

где α - угол отклонения магнитной стрелки в поле намагниченного образца; C - коэффициент пропорциональности.

Основной частью такого неастатического преобразователя является магнитная стрелка, т.е. подвижный магнит, имеющий форму цилиндра. Магнитную стрелку подвешивают на нити из вольфрама, серебра или кварца, на которой крепится зеркальце для отсчета угла поворота стрелки. Чувствительность магнитометра будет тем больше, чем тоньше и длиннее нить подвеса.

С помощью магнитометра можно определить кривую намагничивания. Намагничивающая катушка располагается горизонтально, и ее ось проходит через центр стрелки магнитометра. С противоположной стороны стрелки на таком же расстоянии устанавливают другую катушку точно таких же размеров, как и намагничивающая. Обе катушки соединяют последовательно для компенсации. В этом случае на магнит будет действовать только магнитное поле, создаваемое самим образцом. Однако на магнит такого неастатического преобразователя действуют также горизонтальная составляющая напряженности магнитного поля Земли и различные посторонние поля, из-за чего магнитометр такого типа не нашел широкого применения.

Для уменьшения влияния посторонних магнитных полей прибегают к устройству астатической системы, состоящей из двух магнитов, которые имеют одинаковые магнитные моменты и расположены один над другим так, что их магнитные оси находятся в одной плоскости и параллельны, а полярности магнитов противоположны друг другу. Иначе говоря, результирующий магнитный момент такой системы должен быть равен нулю. При работе с этим преобразователем взаимное расположение преобразователя и объекта измерения должно быть таким, чтобы поле, создаваемое измеряемым объектом, воздействовало в основном на нижний магнит.

Существуют магнитометры, астатическая система которых состоит из двух катушек, которые помещаются в намагничивающий соленоид. Принципиальная схема такого магнитометра показана на рис. 1.5.10. Астатическую систему выполняют из алюминиевой рамки, к которой прикрепляют две катушки *АК*. Ток к катушкам подводят через медные ленты и тонкие спирали от батареи *Б*. Сила тока, пропускаемого через обмотки, варьируется в зависимости от величины магнитного момента исследуемого образца.

При измерении можно использовать образец *О* в виде эллипсоида вращения или цилиндрической формы. Исследуемый образец помещают в намагничивающий соленоид *НС*. Образец ориентируется параллельно относительно нити подвеса системы, при этом концы образца находятся на одном уровне с катушками *АК*. Результаты измерения на таком магнитометре можно сравнить с баллистическими измерениями.

Магнитомеханические преобразователи используют главным образом для измерения магнитного момента прямолинейных образцов горных пород и магнитов, а в отдельных случаях - для определения магнитных свойств образцов материалов. До недавнего времени они широко применялись в геофизических исследованиях при измерении параметров магнитного поля Земли и его вариаций. В настоящее время их практически вытеснили ферроиндукционные и квантовые преобразователи как более точные и обладающие большими возможностями. В настоящее время они еще находят применение в толщиномерах отрывного типа.

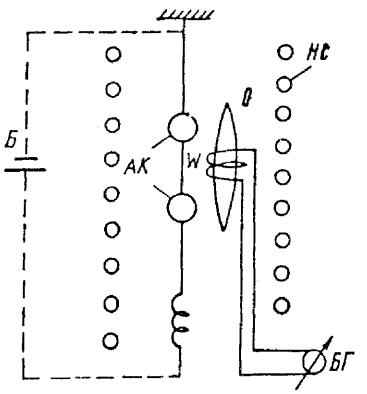


Рис. 1.5.10. Магнитомеханический преобразователь

Глава 1.6

ИЗМЕРЕНИЕ ОПТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ

1.6.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Оптические свойства материалов и изделий весьма многочисленны. Основные из них - это спектральные и интегральные показатели преломления и поглощения, излучательная способность, коэффициенты отражения, поглощения, пропускания, рассеяния.

Термин свет или **оптическое излучение** (ОИ) означает совокупность электромагнитных волн или фотонов различной частоты, распространяющихся в пространстве и взаимодействующих с веществом в различном агрегатном состоянии.

Это взаимодействие проявляется в различных физических и физико-химических эффектах - поглощении и нагреве, преломлении и т.п., сопровождающихся преобразованием пространственных, спектральных, интенсивностных, поляризационных, временных характеристик и степени когерентности ОИ.

Взаимодействие ОИ с веществом, как правило, носит линейный характер. Однако в мощном лазерном излучении наблюдаются нелинейно-оптические эффекты (самофокусировка, просветление среды, преобразование частоты света и т.д.). Энергия ОИ измеряется в джоулях.

Мерой интенсивности воздействия ОИ является **лучистый поток** или его мощность, т.е. количество энергии, переносимой излучением за единицу времени через произвольную поверхность. Единица измерения потока в СИ - 1 Вт = 1 Дж $\cdot$ с$^{-1}$.

Лучистые потоки принято классифицировать следующим образом: **по спектральному составу** излучения - на монохроматические и полихроматические; **по оптико-геометрическим характеристикам** - на сходящиеся, расходящиеся и параллельные; **по временным признакам** - на стационарные и нестационарные, в т.ч. импульсные; **по степени поляризации** - на потоки неполяризованного, частично поляризованного и полностью поляризованного света, которые, в свою очередь, подразделяются по виду поляризации (линейной, круговой или эллиптической) и характеру ориентации ортогональных компонент вектора поляризации в плоскости падения лучей (параллельно или нормально к ней). **По степени когерентности** потоки делятся на некогерентные, частично когерентные и когерентные.

Все виды потоков могут быть *изотропными* или *анизотропными* в зависимости от характера распределения плотности соответствующего параметра во времени или пространстве в пределах области распространения излучения.

Физические основы взаимодействия излучения и вещества. Эффекты взаимодействия света и вещества с гомогенной изотропной средой могут быть описаны единым параметром - *комплексным показателем преломления* N (КПП) с учетом его зависимости от частоты, температуры, напряжений и др. факторов:

$$N = n - i\,K\,,$$

где действительная часть n определяет скорость света в среде, а показатель поглощения K - затухание ОИ. Для немагнитных веществ (магнитная проницаемость $\mu = 1$)

$$n = \sqrt{\varepsilon}\,,$$

где ε - диэлектрическая постоянная.

Для металлов связь их оптических постоянных с электрическими характеристиками задается уравнениями:

$$n^2\left(1 - K^2\right) = \varepsilon \quad \text{и} \quad n^2\,K = 2\pi\sigma/\omega\,,$$

где σ - удельная проводимость; ω - круговая частота излучения.

Вещества можно разделить на следующие:

однородные, ОС которых сводится к свойствам гладкой поверхности;

однородные, для описания ОС которых используется модель плоского слоя (или системы слоев);

вещества с шероховатой границей раздела сред в приповерхностной области;

неоднородные вещества с объемной системой неоднородностей, описываемые моделью типа совокупности рассеивающих слоев.

По численным значениям КПП можно выделить:

сильнопоглощающие вещества с $K > 10$ (металлы и т.п.) и высокой отражательной способностью, оптические свойства которых определяются характеристикой поверхности;

слабопоглощающие вещества с $K \le 0{,}01$ (вода, газы, некоторые стекла и т.п.) с низкой отражательной способностью, определяемой практически полностью величиной n;

вещества с $0{,}01 \le K \le 0{,}1$ (полупроводники), отражательная и излучательная способность которых существенно зависят от толщины слоя материала;

вещества с $0{,}1 \le K \le 10$ (тонкослойные покрытия и т.п.), отражение которых зависит и от толщины слоя и от величины K.

Спектральные характеристики оптических свойств определяются совокупностью значений КПП для различных частот излучения. Как правило, спектр КПП находят экспериментально.

Взаимосвязь основных оптических констант вещества - показателя преломления и показателя поглощения определяется интегральным уравнением Крамерса-Кронинга, позволяющим вычислить одну из констант на фиксированной частоте по известным для всего спектра значениям другой.

По спектральным свойствам материалы обычно разделяют на металлы, полупроводники и диэлектрики. Металлы характеризуются высокой отражательной способностью, особенно в ИК-области спектра, наличием точки температурной инверсии, увеличением излучательной способности в УФ-диапазоне. Их оптические свойства определяются в основном проводимостью.

Для полупроводников характерно наличие поглощения в УФ- и ИК-областях спектра, а также сильная зависимость оптических свойств от температуры.

Для диэлектриков характерно наличие зон прозрачности в широком диапазоне спектра с резкой границей поглощения.

Оптические свойства многокомпонентных рассеивающих сред (лаки, краски, окислы металлов и пр.) описывают с помощью различных моделей теории светорассеивающих (мутных) сред, например с помощью двухпотокового приближения. Оптические свойства веществ в монолите и в дисперсной среде могут резко различаться, например металлы хорошо отражают свет в монолитном состоянии, но в состоянии мелкодисперсной фазы обладают низкой отражательной способностью и используются в качестве поглощающих покрытий (платиновая чернь и т.д.). Диэлектрики в дисперсной фазе хорошо отражают свет в спектральных областях, соответствующих полосам поглощения монолитного материала.

Важнейшая особенность ОС газов - селективность поглощения излучения. Форма и положение линий испускания (поглощения) газов сильно зависят от их концентрации и температуры.

При взаимодействии ОИ с веществом имеет место его поглощение, рассеяние, отражение и преломление.

Обозначим через $F_{0\lambda}$ падающий на вещество монохроматический поток ОИ; $F_{\alpha\lambda}$ - поглощенный средой поток; $F_{\rho\lambda}$ - отраженный поток; $F_{m\lambda}$ - рассеянный поток; $F_{\tau\lambda}$ - вышедший из среды поток.

На основании закона сохранения энергии

$$F_{0\lambda} = F_{\alpha\lambda} + F_{\rho\lambda} + F_{m\lambda} + F_{\tau\lambda}.$$

Величины

$$\alpha_\lambda = F_{\alpha\lambda}/F_{0\lambda}; \qquad \rho_\lambda = F_{\rho\lambda}/F_{0\lambda};$$

$$m_\lambda = F_{m\lambda}/F_{0\lambda} \quad \text{и} \quad \tau_\lambda = F_{\tau\lambda}/F_{0\lambda}$$

называются соответственно спектральными коэффициентами поглощения, отражения, рассеяния и пропускания. Они показывают, какую долю от падающего потока составляют поглощенный, отраженный, рассеянный и прошедший через среду лучистые потоки.

При взаимодействии вещества с полихроматическими лучистыми потоками вводят понятие интегральных коэффициентов поглощения, рассеяния, отражения и пропускания:

$$\alpha = F_\alpha/F_0 = \int F_{0\lambda}\,\alpha_\lambda\,d\lambda \Big/ \int F_{0\lambda}\,d\lambda,$$

$$\rho = F_\rho/F_0 = \int F_{0\lambda}\,\rho_\lambda\,d\lambda \Big/ \int F_{0\lambda}\,d\lambda,$$

$$m = F_m/F_0 = \int F_{0\lambda}\,m_\lambda\,d\lambda \Big/ \int F_{0\lambda}\,d\lambda,$$

$$\tau = F_\tau/F_0 = \int F_{0\lambda}\,\tau_\lambda\,d\lambda \Big/ \int F_{0\lambda}\,d\lambda.$$

1.6.1.1. ОТРАЖЕНИЕ СВЕТА

Отражением света (ОС) называется эффект возвращения световой волны при ее падении на границу раздела двух сред обратно в первую среду.

Различают зеркальное, диффузное и смешанное ОС. Зеркальное ОС имеет место, если неровности поверхности малы по сравнению с длиной волны света. При этом свет отражается по законам геометрической оптики, т.е. угол падения равен углу отражения, а падающий и отраженный лучи лежат в одной плоскости с нормалью к поверхности в точке падения света.

Диффузное ОС сопровождается равномерным распределением отраженного света в пределах полусферы. Оно характерно для поверхности с неровностями порядка длины волны света, расположенными беспорядочно.

Смешанное ОС наблюдается при отражении от поверхностей с неровностями, большими длины волны света. Для него характерно преимущественное отражение в направлении зеркального ОС в сочетании с менее интенсивной диффузионной компонентой. Регулярные неоднородности поверхности приводят к появлению пространственного распределения отраженного света, характерного для явления дифракции.

ОС обычно носит селективный характер, что и определяет цветность различных тел.

ОС от гладкой поверхности диэлектрика в сильной степени зависит от поляризации падающего света и угла падения. При падении неполяризованного света на гладкую поверхность под углом Брюстера

$$i = \operatorname{arctg}\left(1/n\right),$$

где n - показатель преломления среды, отраженное излучение становится полностью поляризованным в плоскости, параллельной плоскости падения. При падении света на гладкую поверхность двух сред из среды с большим показателем преломления наблюдается полное внутреннее отражение при углах больших

$$i \geq \arcsin\left(n_2 / n_1\right).$$

При этом расчет коэффициента отражения от гладкой поверхности ведется по формулам Френеля, связывающей его значение с углами падения, показателями преломления сред и состоянием поляризации падающего света; расчет коэффициента отражения от гладкой поверхности поглощающих сред (металлы, полупроводники) ведется с использованием комплексного показателя преломления с учетом поглощения в веществе.

Распределение отраженного света в пространстве, особенно при смешанном ОС, описывается с помощью индикатриссы коэффициента отражения. Иногда для характеристики рассеивателей используют понятие коэффициента яркости (β), т.е. отношение яркости (L) конкретного объекта в заданном направлении к яркости (L_0) идеального рассеивателя.

ОС, особенно при смешанном отражении, существенно зависит от геометрии освещения образца и регистрации рассеянного излучения, что необходимо оговаривать при измерениях наряду с другими факторами (спектр излучения источника, поляризация света, тип фотоприемника и пр.)

1.6.1.2. ПОГЛОЩЕНИЕ СВЕТА

Поглощение света (ПС) - уменьшение энергии световой волны в веществе вследствие преобразования ее во внутреннюю энергию вещества или в энергию вторичного излучения (люминесценция), имеющего иной спектральный состав и иные направления распространения.

Для твердых веществ характерно собственное поглощение, обусловленное взаимодействием света с кристаллической решеткой, и характеристическое (селективное) поглощение, возникающее вследствие колебаний и вращений молекул и приводящее к появлению полос резонансного поглощения.

Газы обладают в основном избирательным поглощением.

Ослабление монохроматического света в гомогенной изотропной среде за счет поглощения описывается законом Бугера

$$F_{X\lambda} = F_{0\lambda} \cdot \alpha_\lambda = F_{0\lambda} \exp(-a_\lambda X),$$

где X - длина пути света в среде; $F_{0\lambda}$ - падающий поток; $F_{X\lambda}$ - поток, поглощенный средой; a_λ - спектральный показатель поглощения среды, мм$^{-1}$;

$$a_\lambda = 4\pi K / \lambda,$$

где K - главный показатель поглощения среды; λ - длины волны света.

Ослабление полихроматического излучения определяют интегрированием соответствующих потоков по длинам волн.

1.6.1.3. РАССЕЯНИЕ СВЕТА

Рассеяние света (РС) - преобразование света веществом, сопровождающееся изменением направления его распространения, поляризации и (в общем случае) частоты.

РС обусловлено его дифракцией на оптических неоднородностях среды, зависит от их размеров, концентрации и комплексного показателя преломления.

Существует большое число разновидностей эффекта РС. Рассеяние Рэлея происходит без изменения частоты света, наблюдается при прохождении света через скопление частиц с размерами, меньшими длины его волны.

Рассеяние света может происходить на электронах среды (явление Комптона), молекулах вещества (комбинационное рассеяние), флуктуации плотности среды (рассеяние Мандельштама-Бриллюена). Рассеяние Тиндаля характерно для мутных сред с размерами частиц порядка долей длины волны света, а рассеяние Ми - для сред с частицами, размеры которых составляют несколько длин волн света.

В мощном лазерном излучении наблюдаются нелинейные эффекты - вынужденное рассеяние Мандельштама-Бриллюена (ВРМБ) и др. Для каждого вида рассеяния характерна своя индикатрисса рассеяния. Например, при рассеянии Рэлея, Тиндаля индикатрисса имеет симметричный характер, а при рассеянии Ми - резко выраженную асимметрию. Для слабомутных сред (вода, чистый воздух, стекло) характерно малоугловое рассеяние, т.е. яркость пучка в направлении падающего на

среду света значительно больше его яркости в иных направлениях.

Для сильно рассеивающихся сред (молочное стекло и т.п.) характерно изотропное рассеяние.

В первом приближении ослабление ОИ за счет рассеяния может быть описано зависимостью, аналогичной закону Бугера,

$$F_{m\lambda} = F_{0\lambda}\, m_\lambda = F_{0\lambda} \exp(-r_\lambda X),$$

где r_λ - коэффициент ослабления излучения за счет рассеяния.

Рассеяние во многих случаях носит селективный характер, поэтому при измерениях оговаривают геометрию опыта, тип источника излучения, спектральный диапазон фотоприемника и др.

Например, непрозрачные в видимом свете (сильно рассеивающие) слои некоторых красителей становятся оптически прозрачными в ИК-диапазоне спектра, что используется в ИК-интроскопии.

В мощном лазерном излучении наблюдается нелинейно-оптические эффекты рассеяния света (вынужденное рассеяние Мандельштама-Бриллюена и др.).

Суммарное ослабление света веществом за счет рассеяния и поглощения определяется коэффициентом экстинкции

$$\gamma_\lambda = r_\lambda + a_\lambda,$$

вводимым в формулу закона Бугера.

1.6.1.4. ПРОПУСКАНИЕ СВЕТА

Пропускание света, как и отражение, бывает направленным, диффузионным и смешанным. При направленном пропускании, характерном для оптических стекол, структура пучка падающего света не изменяется. Коэффициент пропускания учитывает при этом как френелевские потери на границах среды, так и поглощение в ней. Иногда вводят понятие коэффициента внутреннего пропускания τ'_λ, характеризующего потери в среде без учета потерь на отражение. Для плоской прозрачной пластины между τ_λ и τ'_λ имеет место соотношение

$$\tau_\lambda = \tau'_\lambda \left(1 - \rho^2\right).$$

Спектр пропускания среды, характеризуется соответствующей зависимостью $\tau(\lambda)$, представляемой таблицей или графиком значений τ_λ.

В соответствии с законом Бугера

$$\tau_\lambda = \exp\left(-\alpha_\lambda l\right).$$

Для удобства расчетов вводят величину оптической плотности

$$D = \ln\left(1/\tau\right)$$

или

$$D = \lg\left(1/\tau\right),$$

измеряемую в Беллах (Б). При этом $\tau = 10^{-D}$. Коэффициент пропускания двух пластин определяется $\tau_{1,2} = \tau_1 \tau_2 = 10^{-\left(D_1 + D_2\right)}$ и т.д.

Для распространенного случая измерения τ_λ слоя плоского прозрачного диэлектрика (стекло, полимер) с известным показателем преломления n при нормальном падении света на образец получим с учетом формул Френеля

$$\tau_\lambda = \tau'_\lambda \left[1 - \left(\frac{n-1}{n+1}\right)^2\right]^2.$$

При оценке пропускания рассеивающей среды следует учесть дополнительное ослабление света за счет его рассеяния. При этом выражение закона Бугера имеет вид

$$\tau_\lambda = \exp\left[-\left(\alpha_\lambda + m_\lambda\right) l\right],$$

где m_λ - коэффициент рассеяния; l - длина пути лучей в среде.

При измерениях пропускания прозрачных люминесцирующих сред в спектральном диапазоне, соответствующем области возбуждения люминесценции, необходимо тщательно отфильтровывать ее излучение, например, с помощью узкополосного светофильтра или дополнительного спектрофотометра.

1.6.1.5. ПРЕЛОМЛЕНИЕ СВЕТА

При падении пучка лучей света на границу раздела однородных гладких прозрачных сред часть его отражается под углом α_1, равным углу падения, и другая же часть проходит во вторую среду под углом α_2, определяемым законом преломления

$$\sin\alpha_1 / \sin\alpha_2 = n_{21}.$$

Константа n есть относительный показатель преломления второй среды по отноше-

нию к первой и определяется отношением скоростей света в этих средах. Абсолютный показатель преломления n_a есть отношение скорости света в вакууме к его скорости в среде. Очевидно, что

$$n_{21} = n_{2a} / n_{1a} .$$

Чаще всего в технике определяют показатель преломления среды к воздуху

$$n_a = n_{a\,\text{воздух}} n_{21} .$$

При нормальном атмосферном давлении и комнатной температуре $n_{a\,\text{воздух}} = 1{,}00027$. При условиях измерений, отличных от нормальных, вводят поправку для реальных значений температуры, давления и влажности воздуха.

Показатель преломления определяется природой вещества и зависит от внешних условий, особенно от температуры, и длины волны света. Принято указывать индексами значения температуры и длины волны света, при которых измерен показатель преломления.

Различают изотропные и анизотропные материалы. У первых (стекла, жидкости, газы) показатель преломления не зависит от направления света при измерениях. Анизотропные материалы (кристаллы и др.) характеризуются двойным лучепреломлением, т.е. расщеплением луча на два, распространяющихся с разными скоростями. Скорость одного из них ("необыкновенного") зависит от направления. Анизотропия наблюдается и у изотропных в обычных условиях веществ при сжатии и других воздействиях.

Лучи, отраженные от поверхности раздела, тоже несут информацию о показателях преломления сред. Их соотношение влияет на амплитуду, фазу и поляризацию отраженного луча, причем эти параметры зависят также от поляризации и направления падающего луча.

Преломление и отражение света от сильнопоглощающих сред (полупроводники, металлы) описываются теми же соотношениями, что и для прозрачных, но с введением комплексного показателя преломления

$$N = n - i K .$$

Показатель преломления зависит от плотности вещества. Функция показателя преломления $f(n)$ обычно прямо пропорциональна плотности:

$$f(n) = r\, d ,$$

где r - постоянная, характерная для конкретного вещества, называется *удельной рефракцией*; d - плотность.

Дисперсия - это зависимость показателя преломления от длины волны света. Обычно при увеличении частоты показатель преломления увеличивается (нормальная дисперсия), однако в окрестности полос поглощения среды наблюдается аномальная дисперсная. Дисперсию оценивают разностью показателей преломления каких-либо длин волн $n_{\lambda 1} - n_{\lambda 2}$ (частная дисперсия) или коэффициентом дисперсии.

Зависимость показателя преломления от температуры и давления характеризуется с помощью термооптических, пьезооптических (эластооптических) коэффициентов.

Зависимость величины двулучепреломления среды от интенсивности внешнего электрического поля описывается электрическими постоянными Керра и Поккельса.

В области сильных световых полей показатель преломления среды может зависеть от мощности пучков света (нелинейно-оптические эффекты).

1.6.1.6. ТЕРМОРАДИАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЕЩЕСТВА

Все нагретые тела излучают в широком спектре ОИ. Для абсолютно черного тела (АЧТ) существует однозначная связь между его температурой и параметрами его излучения (спектр и мощность).

Реальные тела (при равных с АЧТ температурах) излучают меньшие мощности. Кроме того, спектральное распределение теплового излучения многих реальных объектов может существенно отличаться от спектра излучения АЧТ.

Для неселективных (серых) излучателей основной терморадиационной характеристикой (ТРХ) служит *коэффициент излучения* ε, равный отношению излучательных способностей серого тела и АЧТ.

Отметим, что для серых тел сохраняется не только спектральное, но и угловое распределение излучения АЧТ, которое в свою очередь является диффузным или ламбертовским излучателем.

Для неселективных излучателей отличие спектра их излучения от АЧТ особенно сильно вне полос резонансного поглощения, в пределах которых имеет место "черное излучение".

Количественно тепловое излучение определяется энергетической светимостью M и спектральной плотностью энергетической светимости m_λ.

В соответствии с законами Стефана-Больцмана и Планка

$$M = \varepsilon \sigma T^4$$

и

$$m_\lambda = \varepsilon_\lambda c_1 \lambda^{-5} \left[\exp\left(c_2 / \lambda T\right) - 1 \right]^{-1},$$

где c_1, c_2 - константы; T - температура.

Величины ε и ε_λ (интегральный и спектральные коэффициенты излучательной способности) являются важнейшими оптическими характеристиками тел. Их численные значения зависят от многих факторов (материал, шероховатость поверхности и т.д.) и меняются в пределах $0 \le \varepsilon \le 1$ и $0 \le \varepsilon_\lambda \le 1$.

Коэффициенты излучения измеряются обычно для двух режимов. В первом случае оценивают излучение тел в пределах полусферического телесного угла 2π, во втором - измерения проводят в узком телесном угле, обычно в направлении нормали к поверхности (этот коэффициент излучения отмечают индексом ε^N). Для изотропных поверхностей и неселективных (серых) излучателей:
для диэлектриков

$$\varepsilon / \varepsilon^N \approx 1,$$

для металлов

$$\varepsilon / \varepsilon^N \approx 1 + 1{,}3.$$

Коэффициенты излучения определяют, как правило, экспериментально.

1.6.2. ФОТОМЕТРИЧЕСКАЯ АППАРАТУРА

Фотометрическая аппаратура весьма разнообразна. Для спектральных измерений применяют спектрофотометры различных конструкций, монохроматоры, другие спектральные приборы, а также наборы стеклянных, интерференционных или других фильтров, выделяющих нужную область спектра.

Поляриметрические измерения проводят с помощью фотометров, оснащенных пленочными или кристаллическими поляризаторами и анализаторами, компенсаторами и т.п. приспособлениями.

Измерения пространственного распределения оптических характеристик объектов (индикатрисс) производят с помощью гониофотометров, снабженных многоэлементными матричными фотоприемниками или приспособлениями для проведения испытаний при различных углах падения света на образец и приема излучения; угловое разрешение лучших гониофотометров составляет 10 угл. сек.

Оптические характеристики в диффузном излучении определяют обычно с помощью шаровых фотометров, снабженных оптическими интеграторами типа сферы Ульбрихта.

Измерения оптических характеристик при импульсном освещении объекта реализуют с помощью фотометров, содержащих импульсные источники света и малоинерционные фотоприемники (ФЭУ, фотодиоды и др.).

Для измерения в мощном и сверхмощном лазерном излучении используют фотометры, содержащие устойчивые к такому воздействию оптические элементы и приемники излучения (охлаждаемые зеркала, фокусаторы, линзы из оптических керамик, калориметрические приемники излучения и т.д.).

Измерение оптических характеристик в области сверхмалых мощностей (биолюминесценция, оптическая световая связь, интегральная оптика и пр.) производят с помощью высокочувствительных фотометров на базе ФЭУ, усилителей яркости света, чувствительных фотоматериалов и т.п.

Измерение интегральных (по длинам волн) оптических характеристик производят фотометрами с приемниками излучения, имеющими соответствующую спектральную характеристику.

Несмотря на разнообразие типов и схемотехнических решений фотометров, все они содержат такие блоки, как источник и приемник излучения, оптические элементы различного назначения (линзы, призмы, зеркала, поляроиды, аттенюаторы, световоды, светофильтры, светоделители, дифракционные решетки и т.п.), а также электронные схемы обработки сигналов.

Современные фотометры делятся на два типа: 1) прямого отсчета; 2) метода сравнения.

В первых используется световая характеристика приемника, то есть зависимость сигнал-свет. Эти приборы обычно имеют один приемник; шкала в них градуирована непосредственно в световых единицах.

В фотометрах, работающих по методу сравнения, приемник используется в качестве индикатора, сравнивающего исследуемый поток с заданным (эталонным).

Фотометры сравнения (ФС) делятся на три группы:

с одновременным сравнением потоков с помощью двух фотодетекторов;

с последовательным сравнением потоков при одном фотодетекторе;

с компенсацией эталонного излучения (метод замещения).

Для высокоточных измерений применяют обычно двухлучевые фотометры, позволяющие устранять влияние на результаты испытаний нестабильности характеристик источников света, приемника излучения. Наивысшей точностью обладают фотометры с оптической компенсацией, реализующие способ замещения. При этом выходной сигнал фотометра, в рабочем канале оптической схемы которого установлен образец, компенсируется до исходного (например, нулевого при балансных схемах измерения) значения введением в опорный канал оптического клина или

компенсатора, для которого величина его компенсирующего перемещения (воздействия) однозначно связана с измеряемым параметром. Их погрешность составляет 0,1 - 0,5 %.

Возможности конструктивно более простых одноканальных фотометров прямого измерения в видимой и ближней ИК-области спектра существенно расширились за счет разработки метода самокалибровки кремниевых фотодиодов. Сущность его заключается в точном определении абсолютной чувствительности фотодиодов специальной конструкции для волны излучения фиксированной длины. Погрешность измерения мощности в диапазоне 1 - 10 мВт лазерного излучения при длине волны 0,63 мкм составляет 0,05 %.

Одной из определяющих тенденций развития фотометрической аппаратуры является переход к использованию многоканальных систем измерения, реализуемых либо с помощью систем бегущего луча (сканирующие лазерные микроскопы и подобные устройства), либо на основе матричных фотопреобразователей. Последние особенно перспективны в связи с жесткой геометрией светочувствительной структуры. Это ПЗС [фотодиодные (ФД) линейки и матрицы], электронно-оптические микроканальные умножители и т.п. устройства.

Например, ФД-линейки, сопряженные оптически с усилителями яркости изображения на базе микроканальных усилителей, обеспечивают регистрацию оптических сигналов в области длин волн 0,2 - 1,3 мкм при динамическом диапазоне до 100 дБ и минимальной мощности на входе порядка 10^{-6} Вт. Пространственное разрешение 1 200 элементов и более по длине ФД-линейки при абсолютной величине одного элемента (пикселя) до 10×10 мкм (зазор между ними 2 - 3 мкм). Точность растра ПЗС и ФД-линеек порядка 0,01 % при высокой его стабильности во времени. Временное разрешение подобных систем до 10^{-6} с.

Высокая метрологическая надежность матричных фотопреобразователей в достаточно широком диапазоне внешних условий, а также простота их соединения с ПЭВМ за счет дискретного характера сигнала определяют перспективность их применения в фотометрической аппаратуре самого различного назначения.

Возможности фотометра любого типа существенно расширяются при сочетании их с волоконно-оптическими системами сбора информации. Использование световодов позволяет проводить измерение объектов сложной формы, в различных полостях, в условиях сильных электромагнитных помех, при радиационном воздействии, в газовой или жидкой средах. Длина световодов до 100 м и более. Световоды из кварца используют для измерений в УФ-, ВИ- и ближней ИК-областях спектра (0,2 - 2,0 мкм), световоды из специальных халькогенидных стекол и кристаллов применяют для работы в дальнем ИК-диапазоне (2 + 20 мкм и более). Диаметры световодов от 0,5 мм для одножильных до 10 мм и более для многожильных (в том числе регулярных, передающих изображение с разрешением до 40 $мм^{-1}$). Число каналов в оптических диссекторах (ответвителях) достигает 50 - 100 и более. Существенно, что световоды имеют стабильные оптические характеристики (при отсутствии изгибов, ударов и т.п. воздействий, а также мощных потоков рентгеновского излучения, взывающего потемнение стекол).

Принципиально новым направлением фотометрии стала видеоэллипсометрия, основанная на телевизионной визуализации распределения степени поляризации по поверхности образцов в реальном времени.

В качестве источников света в современной фотометрической аппаратуре применяются как традиционные излучатели (светоизмерительные лампы накаливания, в т.ч. галогенные со стандартными спектрами излучения - источники типа "А", "С", "Д" и т.д.), так и новые источники света - импульсные ксеноновые лампы, светодиоды, лазеры различных типов. Применение лазеров позволяет реализовать принципиально новые методы когерентной фотометрии с повышенной точностью.

Контроль энергии или мощности лазеров производят с помощью стандартных тепловых или фотоэлектрических измерителей. Особенно широко применяют тепловые измерители на основе болометров, пироэлектриков, термоэлементов. Для измерения мощного $(P \geq 1\,Вт)$ излучения, особенно длинноволнового, обычно измеряют с помощью этих приемников температуру твердого или жидкого поглотителя в калориметрической ячейке. При этом на измеритель направляется часть пучка лазера, отводимая с помощью полупрозрачной пластины, дифракционной решетки, зеркального обтюратора и т.п. устройств. Встречаются датчики проходного типа, выполненные в виде герметичной ячейки с поглощающим излучение газом, располагаемой в пучке лазера. Поглощая излучение, газ нагревается и изменяется давление в ячейке, которое измеряется пьезоэлементом или др. датчиками давления.

В ряде случаев необходимо контролировать распределение интенсивности по сечению пучка, в том числе в реальном времени.

Для этого применяют специальные сканирующие измерители мощности с приемной аппаратурой в виде точечной диафрагмы или узкой щели (или полоски), перемещаемых по сечению пучка.

Распределение мощности по сечению для потоков $P \le 0{,}1$ Вт можно оценивать с помощью пироэлектрических телевизионных камер, фотодиодных матричных преобразователей, тепловизоров. Этот метод применяют с использованием ответвителей пучка с дополнительными ослабляющими устройствами (поглощающие фильтры). Применяют также мишени из металла для визуализации поля излучения импульсных лазеров косвенным методом по температурному полю мишени.

1.6.3. МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ

1.6.3.1. МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ОТРАЖЕНИЯ

Наиболее общим образом коэффициент отражения (КО) определяется как отношение отраженной части светового потока к падающей.

По условиям падения (отражения) различают полусферическое, коническое, направленное направления потока.

Согласно принципу обратимости Гельмгольца при определении направленного КО получается одно и то же значение, если источник и приемник излучения поменять местами.

В подавляющем большинстве случаев, особенно в ИК-области спектра, измеряется монохроматический или квазимонохроматический КО в связи со сложностью реализации широкополосных (неселективных) источников и приемников излучения.

Потребности современной техники стимулировали также в последнее время развитие методики измерения интегральных КО для полихроматических источников, в связи с большим значением этого параметра для теплообмена объекта со средой.

Для имитации источников заданного спектрального состава применяют сложные оптические установки с ксеноновыми лампами, угольной дугой, трубчатыми кварцевыми лампами и др. современными источниками света.

Эти установки позволяют, в частности, измерять КО в условиях, имитирующих космические.

Схемы измерения КО существенно различны для зеркальных и диффузных объектов.

Измерения коэффициентов зеркального отражения (КЗО). В абсолютном методе измерения КЗО на приемник излучения направляют лучистый поток, обычно параллельный, и регистрируют соответствующий сигнал a_1. Затем в пучок света вводят образец, а приемник перемещают в плоскости падения луча и нормали к зеркалу до положения, при котором на него полностью попадает отраженный от зеркала поток и снова фиксируют сигнал приемника a_2.

Отношение сигналов равно КЗО

$$\rho_{зер} = a_1 / a_2 .$$

Измерения выполняют при различных углах падения. В случае необходимости меняют и другие параметры эксперимента - спектральный состав излучения, диаметр пучка света, степень поляризации и т.п. Данный метод требует прецизионного устройства углового перемещения приемника (или излучателя) и тщательной юстировки установки в целом.

Влияние рассеянного света в помещении лаборатории устраняется модуляцией излучателя. Для компенсации нестабильностей излучателя и приемника часть излучения направляют с помощью оптического коммутатора непосредственно на приемник, реализуя двухканальную схему измерения.

Абсолютное измерение КЗО возможно также методом Тэйлора с помощью интегрирующей сферы.

Измерение КЗО особенно сложно для высокоотражающих зеркал лазеров и т.п. систем, так как сигналы приемника при его освещении непосредственно от излучателя и отраженным пучком от образца очень близки.

В силовой лазерной оптике коэффициент отражения мощного излучения иногда определяют как

$$\rho_{зер} = 1 - \alpha ,$$

где α - коэффициент поглощения.

В свою очередь, α определяют косвенно, фиксируя нагрев зеркала.

При массовых измерениях, поверке рефлектометров удобнее применять относительный метод измерения, основанный на сравнении сигналов, получаемых в одинаковых условиях эксперимента при отражении света от образца и эталона с известным КЗО.

Иногда требуется оценить КЗО при диффузном освещении образца. Подобные задачи возникают, например, в гелиотехнике.

В этом случае образец освещают с помощью молочного стекла, равномерно освещенного снаружи множеством ламп, или используют полую диффузно окрашенную изнутри сферу, свет в которую вводят через закрепленный в ее стенке рассеиватель. Отраженный образцом поток измеряют через одно из отверстий сферы. КЗО вычисляют, например, используя принцип обратимости Гельмгольца.

Измерение КЗО поверхностей произвольной формы проводят, используя не параллельные, а сходящиеся пучки света, сфокусированные на образец линзой на площадку возможно меньшего размера, в пределах которой ее можно считать плоской. Отраженный

пучок при этом сохраняет структуру падающего пучка и с помощью дополнительной линзы направляется на фотоприемник. Иногда применяют автоколлимационный вариант метода со светоделителем. Возможны как абсолютные, так и относительные измерения.

С помощью микрофотометрических устройств измерения КЗО можно проводить с высоким пространственным разрешением (вплоть до 0,01 мм и менее), что необходимо при исследовании подложек микросхем, распределения КЗО по торцу световодов и т.п.

Схемы измерения диффузного отражения. В принципе измерение лучистого потока, отражаемого диффузной поверхностью, не представляет особой трудности - достаточно измерить яркость отраженного излучения в одном направлении и проинтегрировать ее на основании закона Ламберта по полусфере.

Особенно удобно измерение ОС при помощи вспомогательного идеального диффузного рассеивателя.

На поверхность контролируемого объекта направляют излучение источника и определяют яркость поверхности L_λ. Затем заменяют образец эталоном и измеряют его яркость $L_{\lambda э}$. Зная $\rho_{\lambda э}$ эталона, находят ρ_λ объекта по формуле

$$\rho_\lambda = \rho_{\lambda э} \frac{L_\lambda}{L_{\lambda э}}.$$

В качестве эталона обычно применяют свежую окись магния или матированное молочное стекло типа МС-13.

Упомянутая выше методика, однако, не пригодна для объектов со смешанным (зеркально-диффузным) характером отражения. При этом отраженное излучение неоднородно распределено по полусфере, и для определения отраженного потока недостаточно измерения в одном направлении. Приемником следует измерить угловую плотность (или яркость) отраженного излучения в каждой точке полусферы либо собрать излучение из полусферы на приемник. Излучение обычно направляется по нормали к образцу. Индикатриса отраженного излучения имеет, как правило, осесимметричный характер, поэтому измерение достаточно провести в одной плоскости, содержащей нормаль к образцу. Метод этот, однако, пригоден только для контроля ОС объектов, близких к диффузным, так как при значительной зеркальной составляющей появляется ошибка из-за невозможности измерить ОС при направлениях, близких к нормали. При падении излучения на объект под углом, отличным от нормального, индикатриса становится неосесимметричной и приходится измерять ОС для всех точек полусферы.

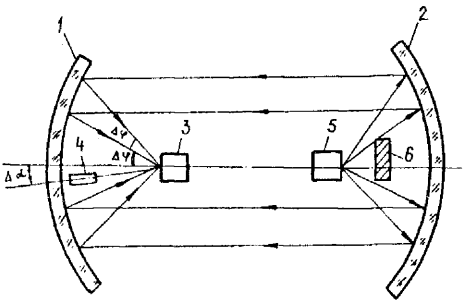


Рис. 1.6.1. Схема рефрактометра с темнопольным осветителем:
1, 2 - сферическое зеркало; *3* - образец; *4* - фотодетектор; *5* - источник света; *6* - экран

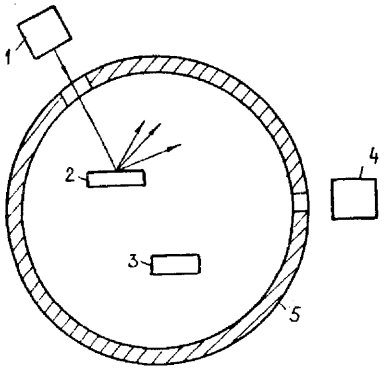


Рис. 1.6.2. Схема рефрактометра с интегрирующей сферой:
1 - источник света; *2* - экран; *3* - образец; *4* - фотоприемник; *5* - сфера

От указанных недостатков свободна установка, показанная на рис. 1.6.1.

Осесимметричная пространственная индикатрисса отражения создается за счет освещения образца полым конусом света. Это не изменяет значения ОС по сравнению с обычным способом освещения при заданных углах $\Delta\alpha$ и $\Delta\varphi$, так как эффект темнопольного освещения сводится к увеличению числа аналогично расположенных относительно поверхности освещенных пучков, т.е. эквивалентно увеличению интенсивности падающего пучка (при изотропности отражательных свойств объекта). Для измерения падающего потока вместо образца ставится приемник излучения.

Вместо собирания излучения из полусферы при падении луча на образец для измерения ОС объектов со смешанным характером отражения можно использовать полусферическое освещение (например, с помощью шара Ульбрихта) и измерение отражения в заданном направлении (рис. 1.6.2).

Внутренняя поверхность сферы покрыта диффузно отражающей краской. Возможность измерения направленной ОС в данном случае следует из принципа Гельмгольца. Для этого достаточно измерить яркость образца и стенки сферы и взять их отношение. Проблемой в этом методе является равномерность окраски сферы.

Для измерения ОС при высоких температурах эффективен метод относительной рефлектометрии. Он основан на измерении отношения двунаправленных ОС при двух длинах волн λ_1 и λ_2. Метод, однако, пригоден только для веществ, у которых индикатриссы одинаковы для λ_1 и λ_2, что редко имеет место.

Для собирания отраженного от объекта излучения часто применяют зеркальные полусферы (рис. 1.6.3). Объект и приемник установлены вблизи от центра полусферы в оптически сопряженных точках. Для измерения падающего потока приемник ставится на место образца. ОС определяется по формуле

$$\rho_\lambda = \rho_{\lambda c} \frac{c_{отр}}{c_{пад}},$$

где $\rho_{\lambda c}$ - ОС сферы; $c_{отр}$ и $c_{пад}$ - показания индикатора при соответствующих положениях приемника.

Вместо сферы можно применить параболы, однако им свойственны такие недостатки, как уход части отраженного излучения через отверстие сферы, влияние аберраций оптики и угловой чувствительности приемника.

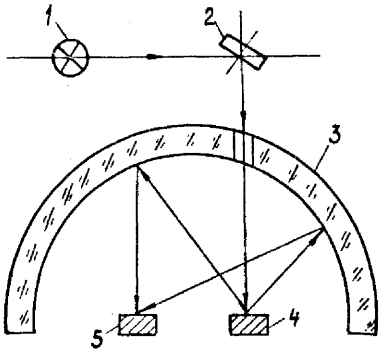


Рис. 1.6.3. Схема рефрактометра с зеркальной полусферой:
1 - источник света; *2* - зеркало; *3* - полусфера; *4* - образец; *5* - фотодетектор

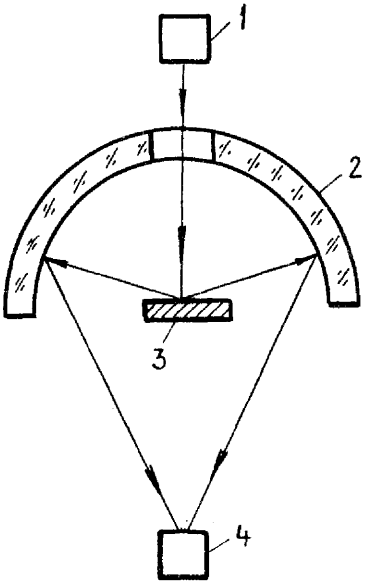


Рис. 1.6.4. Схема рефрактометра с эллипсоидным зеркалом:
1 - источник света; *2* - эллипсоид; *3* - образец; *4* - фотоприемник

Наиболее эффективны и поэтому свободные от этих недостатков схемы с эллипсоидными зеркалами (рис. 1.6.4). Здесь снижено влияние аберрации, отраженный поток падает на приемник под малым углом, образец и приемник существенно отдалены друг от друга, что облегчает, например, нагрев объекта, возможно определение потерь отраженной энергии через входное отверстие при смешанном отражении образца.

1.6.3.2. ИЗМЕРЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ПОГЛОЩЕНИЯ (КП)

Экспериментально коэффициент поглощения обычно определяется путем измерения ослабления параллельного светового потока при прохождении однородной плоскопараллельной пластины. При этом необходимо учитывать коэффициент отражения от обеих поверхностей. Если известен показатель преломления пластины, его вычисляют по формуле Френеля. Если показатель преломления неизвестен, его отдельно измеряют, например, рефрактометром. Влияние отражения можно исключить, воспользовавшись пластинами из одного материала, но с различными толщинами l_1 и l_2. Уравнение для вычисления α_λ имеет в этом случае вид

$$\alpha_\lambda = \left[1/(l_1 - l_2)\right] \lg\left(\Phi_{\lambda l_2}/\Phi_{\lambda l_1}\right),$$

где $\Phi_{\lambda l_1}$ и $\Phi_{\lambda l_2}$ - соответственно потоки после прохождения первой и второй пластин или пропорциональные им сигналы фотоприемника. Перед фотоприемником рекомендуется ставить оптический интегратор типа молочного стекла.

В случае одной пластины КП определяют по формуле

$$\alpha_\lambda = (1/l)\left[2\lg(1-\rho_\lambda) - \lg\tau_\lambda\right],$$

где τ_λ и ρ_λ - соответственно коэффициенты пропускания и отражения образца.

Измерения в белом (полихроматическом) свете проводят, используя широкополосные излучатели и приемники со светофильтрами.

Интегральный КП может быть также подсчитан по результатам его спектрофотометрического определения по формуле

$$КП_\Sigma = \alpha_\Sigma = \int F_\lambda \alpha_\lambda S_\lambda d\lambda \Big/ \int F_\lambda S_\lambda d\lambda,$$

где F_λ и S_λ - спектральные плотности излучения света и чувствительности фотоприемника. Пределы интегрирования выбираются исходя из задачи.

Схема рефрактометрического метода измерения КП показана на рис. 1.6.5. Излучение непрерывного или импульсного лазера *1* линзой *5* фокусируется на объект *7*. Диффузно отраженное излучение сферическим зеркалом *6* фокусируется на приемник излучения *8*. Зеркально отраженное излучение полупрозрачной пластиной *2* направляется на приемник *4*. Пластинка *2* направляет также часть излучения лазера на контрольный приемник *3*. КП определяется по формуле

$$A = 1 - \rho,$$

где $\rho = \rho_д + \rho_з$, $\rho_д$ и $\rho_з$ - соответственно коэффициенты диффузного и зеркального отражения, определяемые по сигналам приемников *3*, *4* и *8*. Калибровка прибора производится по стандартным фотометрическим эталонам. Объект может в процессе эксперимента нагреваться (охлаждаться) от дополнительного (внешнего) источника питания. Измерения проводят на образцах различной шероховатости без покрытия и с различными поглощающими пленками.

1.6.3.3. ИЗМЕРЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА РАССЕЯНИЯ СВЕТА

Измерения коэффициента рассеяния света (КРС) для слабо рассеивающих веществ (оптические стекла, некоторые полимеры) проводят аналогично измерению коэффициента пропускания света (КПС). Образец в виде плоской пластины с полированными гранями устанавливается нормально к параллельному пучку света, диаметр которого должен быть менее габарита образца. Предварительно измеряется сигнал, пропорциональный интенсивности прямо прошедшего света y_0.

Затем фотоприемную часть прибора, состоящую из объектива и жестко скрепленного с ним приемника лучистой энергии, поворачивают вокруг оси, проходящей через середину образца, на угол, при котором "прямой" поток излучения не попадает на приемник. В этом случае сигнал прибора y пропорционален только рассеянному световому потоку.

КРС вычисляют по формуле

$$m_\lambda = y / y_0 .$$

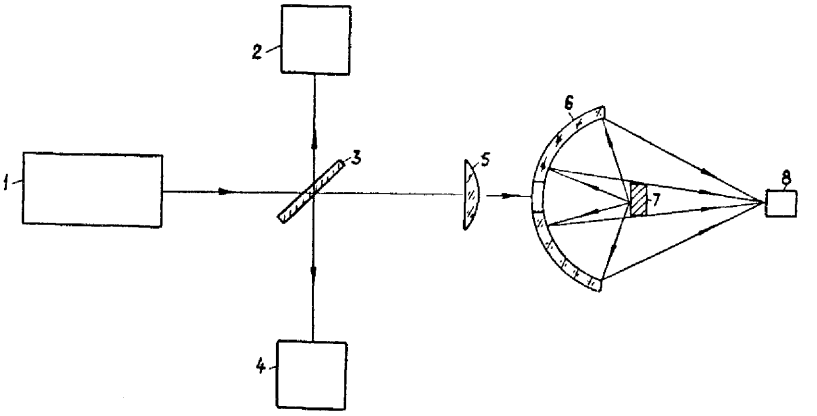


Рис. 1.6.5. Схема лазерного рефрактометра

Сложность измерений заключается в том, что интенсивность рассеянного света в высокопрозрачных оптических материалах может быть значительно (в сотни и более раз) меньше интенсивности "прямого" света. Поэтому в качестве источника света предпочтительны лазеры с высокой интенсивностью излучения. В этом случае абсолютная величина рассеянного потока позволяет достичь хорошего отношения сигнал/шум, особенно при модуляции излучения и его дополнительной спектральной фильтрации на входе фотоприемника с помощью интерференционного светофильтра.

Измерения проводят в области малых углов. Особенность подобных измерений состоит в необходимости применения точного гониометра, поскольку интенсивность рассеянного света возрастает по мере приближения к оси пучка. Обычно проводят измерения значений m_λ для ряда углов α и затем экстраполируют полученную зависимость $m_\lambda = m_\lambda(\alpha)$ до значения $m_\lambda(0)$ при $\alpha \to 0$.

Измерения КРС имеют особое значение в новых областях техники - производстве материалов для волоконно-оптических линий связи и оптических элементов сверхмощных лазеров, где рассеяние света во многом определяет качество изделий.

Измерения КРС для сильно рассеивающих материалов (бумага, матовые стекла, ряд полимеров, растворы и пр.) производят с помощью гониофотометров. В лазерном гониофотометре (ЛГФ) образец (пластина из исследуемого материала, кювета с раствором и пр.) освещается лазером. Излучение, рассеянное в полусферу, анализируется с помощью световодов, расположенных под различными углами к образцу и направляющих свет на фотоприемники.

Возможна схема с механическим сканированием излучения с помощью единичного световода, перемещаемого по дуге окружности с центром в середине образца. В ряде случаев, для оценки КРС образцов с неровной поверхностью (кристаллы и т.п.) они могут помещаться в иммерсионную жидкость для устранения бликов отраженного света.

Описанные выше гониофотометры универсальны, но сложны и требуют тщательной юстировки.

В промышленности часто применяют фотометры с фиксированным углом приема излучения, обычно 45° или 90° к оси падающего пучка. Эти приборы, называемые *нефелометрами* (измерители мутности), применяют для концентрационного колориметрического анализа, так как КРС в ряде случаев функционально связан с количественным содержанием химического элемента.

1.6.3.4. ИЗМЕРЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ ПРОПУСКАНИЯ

Для оптически прозрачных изотропных нерассеивающих сред (полированные стекла, кюветы с жидкостью и т.п.) применяют **метод измерения в параллельных пучках** при ортогональном падении лучей света на образец. С помощью фотометра (или спектрофотометра) интегральные (или спектральные) коэффициенты пропускания определяют как отношение интенсивностей прошедшего через объект и падающего на него излучения. Измерения проводят в естественном или поляризованном свете. Возможен относительный метод измерения (сравнение коэффициентов пропускания образца и эталона в равных условиях).

Для оптически активных, двулучепреломляющих сред при измерениях оговаривают направление плоскости поляризации лучей, падающих на объект.

Часто используется **денситометрический** (спектроденситометрический) **метод измерения**, при котором с помощью логарифмического фотодетектора непосредственно измеряется оптическая плотность образца. Соответствующие приборы - денситометры обычно имеют спектральную характеристику, близкую к спектру чувствительности зрения, реализуемую с помощью светофильтров.

Измерение пропускания (или оптической плотности) рассеивающих материалов производят обычно с помощью оптических интеграторов типа шара Ульбрихта, устанавливаемых непосредственно за образцом. Объект освещается либо коллимированным (например, лазерным) пучком лучей, либо диффузным, реализуемым с помощью дополнительного рассеивателя (молочное стекло, диффузор в виде полой сферы и т.д.).

Измерения могут выполняться, как и в случае определения всех других оптических характеристик, в широком спектральном диапазоне или в монохроматическом излучении, естественном или поляризованном свете, при различной интенсивности (в экспериментах по нелинейной, силовой оптике) и геометрии падения (приема) лучей.

Индикатриссы рассеяния света регистрируют с помощью гониофотометров. Точность измерения достигает 1 + 2 % и менее при тщательной подготовке аппаратуры, угловое разрешение от 10″ до 2°.

Метрологическое обеспечение измерения коэффициентов пропускания или оптической плотности основано на использовании высокостабильных нейтральных или цветных светофильтров, эталонах оптической плотности (с диапазоном ослабления до 5 + 6 порядков, т.е. с плотностью до 5 + 6 Белл).

1.6.3.5. МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ

В зависимости от используемого физического принципа их можно разделить на оптико-геометрические, интерференционные, рефлектометрические и иммерсионные.

Оптико-геометрические методы основаны на использовании законов преломления света. Например, если образец имеет форму призмы с углом при вершине α_0 (рис. 1.6.6, *а*), то показатель его преломления связан с экспериментально определяемым с помощью гониометра углом α, соответствующим ходу луча в призме параллельно ее основанию, соотношением

$$n = \sin\left[\tfrac{1}{2}(\delta + \alpha)\right] \Big/ \left[\sin\left(\tfrac{\alpha}{2}\right)\right].$$

Автоколлимационный вариант метода (рис. 1.6.6, *б*) базируется на измерении угла α, при котором совпадают направления падающего и отраженного лучей. Выходная грань призмы обычно алюминируется.

В способе скользящего падения лучей (рис. 1.6.6, *в*) углу падения придается максимальное значение ($\alpha = 90°$), источник располагается в плоскости входной грани призмы. Пучок лучей от источника конечных размеров всегда дивергирован, т.е. содержит лучи, распространяющиеся в пределах некоторого телесного угла. При этом за счет эффекта полного внутреннего отражения (ПВО) наблюдатель видит резкую границу светлого и темного полей. Положение ее соответствует условию ПВО для лучей, падающих из призмы на границу среда - воздух.

Погрешность измерения оптико-геометрическими методами обычно $10^{-5}n$ при использовании гониометров, определяющих углы с точностью 1 - 5″. Размер призм 20 - 40 мм, угол $\alpha = 60°$.

Для измерения малых разностей показателей преломления используют дифференциальные рефрактометры (рис. 1.6.6, *г*). При равенстве показателей преломления $n_1 = n_2$ луч выходит из блока призм без отклонения. При наличии разности

$$\Delta n = n_1 - n_2$$

луч отклоняется. Это отклонение Δx связано с расстоянием от призмы l до анализатора изображения соотношением

$$\Delta n = \Delta x \Big/ \left(l \cdot \mathrm{tg}\,\alpha\right).$$

Погрешность составляет $\pm 10^{-7}$ при $l = 10^3$ мм.

При использовании полых призм возможно измерение показателей преломления жидкостей и газов.

Для измерения спектральных показателей преломления, в том числе в УФ- и ИК-областях спектра, используют соответствующие приемники и источники излучения в сочетании со спектрофотометрами или светофильтрами.

Метод призмы реализован в ряде конструкций специальных приборов (Ченса, Джелли и т.д.), из которых наиболее распространены рефрактометры Пульфриха и Аббе, основанные на методе предельного угла.

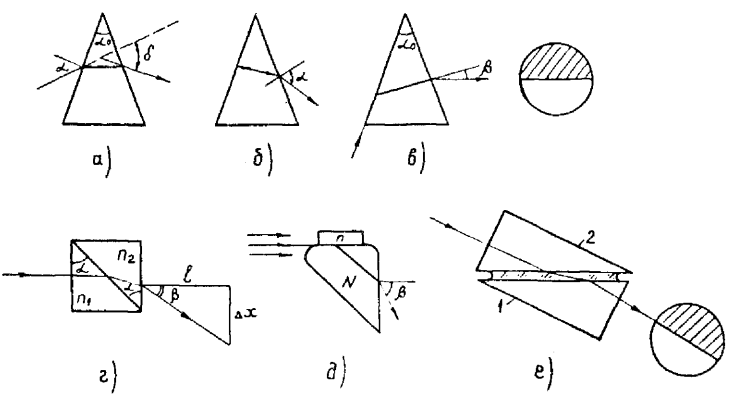


Рис. 1.6.6. Схемы рефрактометрических методов:
а - преломляющей призмы; *б* - автоколлимационной призмы;
в - скользящего падения лучей; *г* - дифференциальный; *д* - Пульфриха; *е* - Аббе

В рефрактометре Пульфриха (рис. 1.6.6, *д*) образец с помощью иммерсионной жидкости устанавливается на измерительной призме с известным показателем преломления N. Измерением угла β, характеризующего положение границы раздела, определяют показатели преломления образца по формуле

$$n = \sqrt{N^2 - \sin^2\beta}\,.$$

Образец может быть помещен в термостатированную кювету.

Погрешность порядка $10^{-5}n$.

В рефрактометре Аббе (рис. 1.6.6, *е*) введена дополнительная (осветительная) призма, что позволяет, в частности, измерять показатели преломления жидких и твердых сред в белом свете с помощью специального компенсатора хроматизма (призмы Амичи).

Этот компенсатор позволяет измерять и дисперсию образцов, в том числе термостатированных.

Существуют также рефрактометры предельного угла с неподвижными оптическими элементами, так называемые погружные, применяемые для экспресс-анализа жидкостей.

Интерференционные методы рефрактометрии основаны на измерении малых разностей показателей преломления, вызывающих соответствующее изменение оптической длины хода лучей, проходящих через эталонный и рабочий образцы. Используются стандартные схемы интерферометров Релея, Жамена, Майкельсона, Тваймена. Разработаны голографические интерферометры, а также близкие к ним по принципу действия оптические томографы. Последние позволяют, в частности, восстанавливать профиль показателя преломления в объекте по результатам его зондирования лазерным лучом с разных направлений. Так измеряют профиль показателя преломления в оптических волокнах, газовых струях и т.п. объектах.

Интерференционные рефрактометры применяют в основном для анализа показателей преломления жидкостей и газов - в аэродинамике, в газоанализе и т.д. Чувствительность достигает 10^{-9} для газов и 10^{-8} для жидкостей при условии хорошего термостатирования кювет и достаточной их длины (5 - 3 м).

Рефлектометрические методы рефрактометрии. Исследование интенсивности и поляризации света, отраженного от границы раздела сред, позволяет измерять показатели преломления неоднородных анизотропных и сильнопоглощающих сред, тонких пленок и поверхностных слоев. Метод не требует специальной подготовки образца, причем локальность контроля составляет до 0,01 мм.

Существуют фотометрический и эллипсометрический варианты данного метода.

В первом случае измеряют коэффициенты отражения R_p и R_s для света, поляризованного параллельно и перпендикулярно плоскости падения, а также для естественного света.

В эллипсометрическом варианте измеряют скачки фаз δ_p и δ_s, их разность

$$\Delta = \delta_p - \delta_s\,,$$

а также отношение амплитуд r_p и r_s отраженного света для p- и s- поляризации, т.е.

$$\psi = \operatorname{arctg}\sqrt{r_p / r_s}\,.$$

Энергетические и поляризационные характеристики отраженного света зависят от состояния поляризации падающей световой волны, угла падения лучей i на поверхность и показателя преломления сред. Обычно различают внешнее (свет падает на среду из воздуха, $n_{21} > 1$) и внутреннее отражение ($n_{21} < 1$).

Зависимость R_p, R_s и R_a от угла падения света для внешнего и внутреннего отражения показана на рис. 1.6.7. Значения характерных углов Брюстера $i_Б$ (полной поляризации) и предельного i_c определяются выражениями

$$i_Б = \operatorname{arctg} n_{21} \quad \text{и} \quad i_c = \arcsin n_{21}\,.$$

Видно, что крутизна зависимости $R = R(i)$ для ПВО существенно выше, что определяет большую точность этого метода.

Таким образом, зная показатель преломления одной из сред и измерив один из параметров, описанных выше, можно определить показатель преломления второй среды.

Для поглощающих сред коэффициенты поглощения $K \neq 0$ ($K \approx 10^{-4} + 1$ для диэлектриков, $K = 1 + 10$ для металлов).

Отношение комплексных коэффициентов отражения имеет вид

$$\bar{\rho} = \bar{\rho}_p / \bar{\rho}_s = \operatorname{tg}\psi \cdot \exp(i\Delta)\,.$$

Комплексный показатель преломления среды N вычисляют по известному значению показателя преломления n и величине K.

При анализе анизотропных сред следует фиксировать ориентацию оптической оси кристалла.

Погрешность определения n и K составляет 10^{-3}, если параметры n, ψ и i измерены с точностью $\pm\ 0{,}01^\circ$.

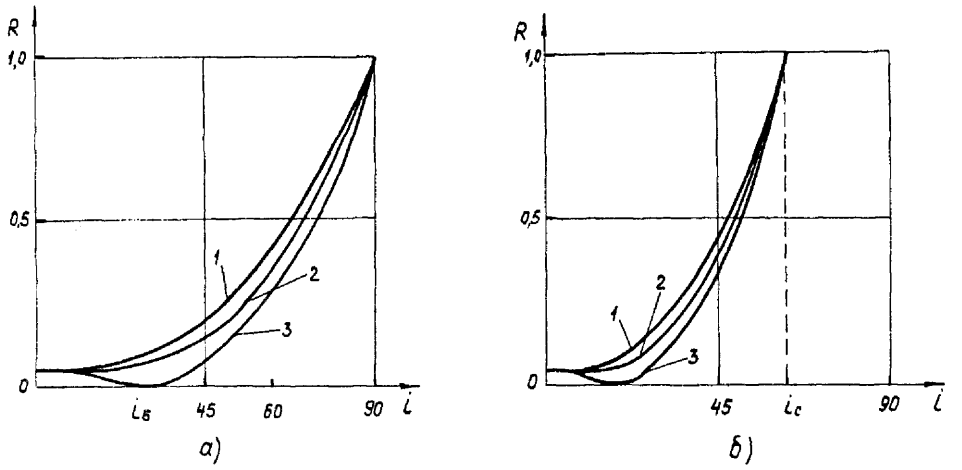


Рис. 1.6.7. Закономерности отражения света:
а - падение света из воздуха;
б - свет падает на поверхность раздела из среды с большим показателем преломления:
1 - свет поляризован ортогонально плоскости падения;
2 - свет поляризован в плоскости падения; *3* - свет не поляризован

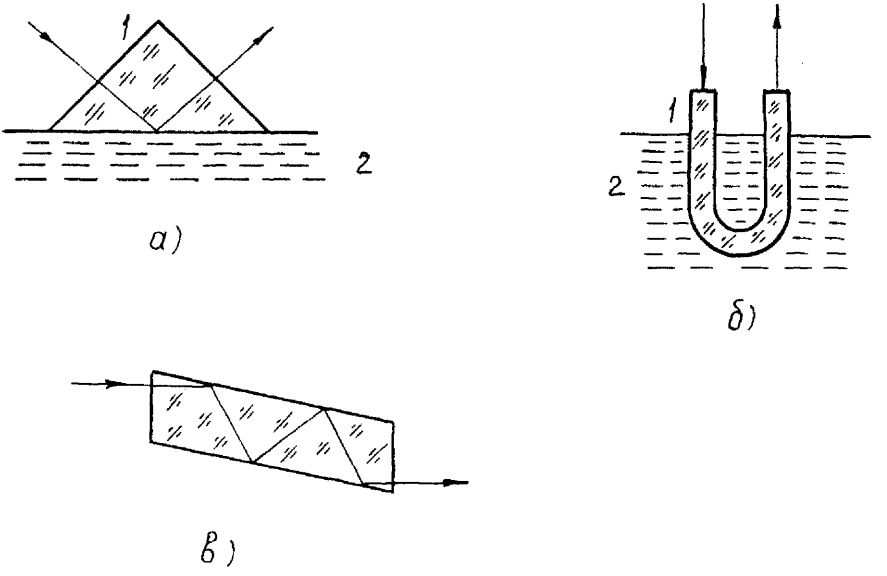


Рис. 1.6.8. Схемы фотометрических рефрактометров ПВО:
а - призменный; *б* - световодный; *в* - с плоско - параллельной пластиной

На рис. 1.6.8 показаны типовые схемы измерения показателя преломления фотометрическим методом внутреннего отражения (наиболее точным) с помощью призмы ПВО, световода и приставки с многократным отражением (МПВО).

При анализе поглощающих сред необходимо измерение по крайней мере двух независимых параметров отраженного света: R_a и R_p или R_s при двух углах падения (i); R_p / R_s при двух i и т.п.

При известной спектральной зависимости $R(\lambda)$, n_2 и K_2 могут быть вычислены с помощью соотношения Крамерса-Кронинга.

При определении R при внешнем отражении используются стандартные фотометри-

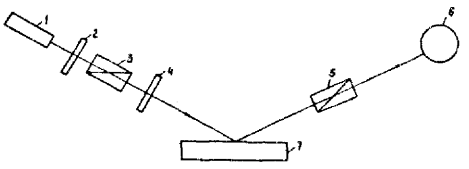


Рис. 1.6.9. Схема эллипсометра:
1 - лазер; *2, 4* - компенсаторы; *3* - поляризатор; *5* - анализатор; *6* - фотоприемник; *7* - образец

ческие устройства и приемы (приставки зеркального отражения типа ПЗО-1 к спектрофотометрии и др.).

Схема эллипсометра для измерения n показана на рис. 1.6.9.

Вращая, например, поляризатор *3* и анализатор *5* при фиксированном компенсаторе 4_{π} добиваются минимального сигнала фотоприемника и отсчитывают соответствующие значения эллипсометрических параметров Δ и ψ.

Современные фотоэлектрические эллипсометры работают с лазерами на гелий-неоне ($\lambda = 0{,}063$ мкм), на CO_2 ($\lambda = 10{,}6$ мкм), обеспечивают точность измерения показателя преломления до $10^{-5}n$.

Для непрерывного измерения показателя преломления в промышленности чаще всего используется дифференциальный гониометрический метод, метод ПВО или фотометрический.

Иммерсионный метод. В этом методе показатель преломления исследуемого вещества находится сравнением со средой с известным показателем преломления.

Особенно удобен этот метод при анализе мелких образцов (порошки, зерна микрокристаллов и т.п.). Проба помещается в жидкость, показатель преломления которой плавно изменяется (нагревом, разбавлением и т.п.) до момента равенства с показателем преломления образца. Критерием является появление характерной полоски Бекке на границе объекта, его "исчезновение" (метод нулевого контраста), появление характерной окраски при освещении белым светом (эффект Христиансена), появление дифракционных картин (метод Обреимова) и т.п.

Погрешность метода порядка $10^{-3}n$. Основная область применения - контроль стекол, кристаллов, минералогия, криминалистика, биология.

1.6.3.6. МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ИЗЛУЧЕНИЯ

Интегральный коэффициент излучения измеряют радиационным, калориметрическим и рефлектометрическим методами.

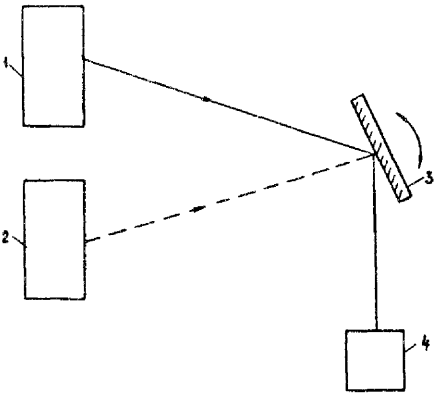


Рис. 1.6.10. Схема радиационного метода измерения излучательной способности:
1 - эталон; *2* - образец; *3* - зеркало; *4* - пирометр

Радиационный метод (рис. 1.6.10) основан на сравнении энергетической светимости объекта и эталона с известным ε, находящихся при одной температуре. Если используется приемник излучения с линейной характеристикой,

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \varphi / \varphi_0,$$

где ε_0 - коэффициент излучения эталона; φ и φ_0 - сигналы приемника при визировании образца и эталона соответственно.

Часто в качестве эталона используют АЧТ ($\varepsilon_0 = 1$). Для уменьшения погрешности измерений целесообразно использовать эталоны с $\varepsilon_0 \to \varepsilon$.

В качестве эталонов с большим коэффициентом излучения можно использовать, кроме АЧТ, материалы, покрытые сажей, специальными эмалями и красками и т.п.

Для эталонов с малым ε_0 используют полированные металлы и другие материалы с высоким коэффициентом отражения (малым коэффициентом поглощения).

Погрешность измерений складывается из погрешностей значения ε_0, нестабильности аппаратуры и т.п. и составляет для радиационного метода в среднем 5 - 10 %.

При измерениях ε обычно используют тепловые приемники излучения, отличающиеся неселективностью спектральных характеристик в широком диапазоне длин волн (обычно 0,5 - 20 мкм), например болометры, термоэлементы, пироэлектрики.

Калориметрический метод измерения ε основан на определении количества теплоты,

выделяемой нагретым телом в виде лучистой энергии, и последующим вычислением коэффициента излучения по соответствующему уравнению теплового баланса.

В стационарном варианте метода рассматривают установившийся теплообмен между образцом и внутренней поверхностью теплоизолированной камеры, с зачерненными стенками, в которую он помещается.

Преимущество метода - отсутствие образцов сравнения.

При отсутствии теплообмена из-за конвенции и теплопроводности (камера обычно вакуумируется и охлаждается, а образец подвешивается на подвесках, обеспечивающих его теплоизоляцию) количество теплоты, переданное образцом в окружающее пространство,

$$Q = \varepsilon \sigma F \left(T^4 - T_1^4 \right),$$

где F - площадь поверхности образца; T и T_1 - температура образца и стенок камеры; σ - постоянная. Зная F, T и T_1 (измеряемые обычно прецизионными терморезисторами), а также энергию, необходимую для поддержания температуры T образца в условиях эксперимента, вычисляют ε.

В нестационарном варианте метода фиксируют динамику остывания образца после выключения источника нагрева (лазер, электронагреватель и т.п.). Если образец площадью S выполнен в виде тонкой пластинки, то

$$\varepsilon = m \cdot c \, \Delta T \Big/ \sigma S \left(T^4 - T_1^4 \right) \Delta \tau,$$

где m - масса образца; c - теплоемкость его материала; T - начальная температура образца; T_1 - температура камеры; ΔT - изменение температуры образца за время $\Delta \tau$.

Рефлектометрический метод применяется в основном для непрозрачных материалов и основан на вычислении ε по соотношению

$$\varepsilon_\lambda = \alpha_\lambda = 1 - \rho_\lambda .$$

При этом ρ_λ определяется одним из описанных выше способов с учетом требований к оптико-геометрическим условиям проведения испытаний (значение угла падения и апертуры освещающего луча, телесный угол приема излучения и т.п.). Для уменьшения влияния фоновых засветок источник света обычно модулируют. При использовании относительного метода измерений в качестве образцов сравнения используют объекты, имеющие оптические характеристики, близкие к аналогичным характеристикам объекта.

Измерение диффузного коэффициента отражения наряду с использованием оптических интеграторов (шар Ульбрихта и т.п.) возможно на основе метода частичных коэффициентов отражения. Метод основан на измерении спектральной плотности энергетической светимости пучков лучей, отраженных от эталона и объекта под равными углами, вычислении соответствующих коэффициентов отражения и их пространственной суммации. Измерения проводят обычно на гониофотометрических установках, оптически сопряженных с монохроматорами.

Погрешность измерения ε_λ составляет обычно 5 + 10 %.

Измерение практически важного коэффициента α_s (коэффициент поглощения солнечной радиации) производят рефлектометрическим и калориметрическим методом при использовании в качестве источника облучения образца либо непосредственно Солнца (в гелиоустановках, различных бортовых системах космической техники), либо искусственные источники, например ксеноновые лампы высокого давления, яркость и особенно спектр излучения которых наиболее близки к соответствующим характеристикам солнечной радиации.

Для определения α_s непосредственно на объектах используют портативные накладные фотометры (ФМ - 89 и др.), обычно с импульсными источниками света.

Глава 1.7

ИЗМЕРЕНИЕ МАССЫ

1.7.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Масса и вес (сила тяжести) тела принципиально различны. Масса тела m не зависит от места нахождения тела и связана с силой тяжести соотношением

$$G = mg,$$

где g - ускорение свободного падения.

Поскольку g зависит от места, градуировка прибора измерения массы правильна для места ее проведения и для других мест с идентичными условиями.

Единицей массы является международный прототип килограмма, хранящийся в Международном бюро мер и весов в Париже. Прототип представляет собой цилиндр из сплава иридия с платиной, масса которого неизменна в течение 1 000 лет с точностью до 0,01 мг. Масса утвержденных для сравнения с национальными прототипами рабочих эталонов может быть определена с точностью

$(1+3)\,10^{-9}$. По национальному прототипу массы создаются сначала вторичные эталоны, а затем эталоны-копии и рабочие эталоны, используемые органами метрологической службы и госповерителями для поверок находящихся в обращении, подлежащих обязательной поверке гирь и весов. Взаимоподчиненность эталонов приведена в табл. 1.7.1.

1.7.1. Взаимоподчиненность эталонов

Мера	Место хранения	Сроки сличения по эталону следующего, более высокого класса
Международный прототип	Международное бюро мер и весов	
Государственный эталон	Государственный (национальный) институт	По потребности
Рабочий эталон	Государственный институт	То же
Сравнительный эталон	Отделение государственного института или поверочные ведомства	10 лет
Контрольный эталон	Отделение государственного института или поверочные ведомства	5 лет
Образцовые гири	Станции поверки и поверители	1 год

Рабочие эталоны не должны отклоняться от номинального значения более чем на 0,4 предельно допустимой погрешности калибровки поверяемых ими гирь.

Допустимая погрешность контрольных эталонов равна 0,25 допустимой погрешности рабочих эталонов. Значение погрешности эталона-копии должно быть известно и учитываться при его применении. Соответственно с этим в ЕЭС введена система, предусматривающая пять классов точности для гирь, причем каждый высший класс является эталоном для последующего низшего. Допустимая погрешность гирь низшего класса равна трехкратной погрешности гирь следующего за ним класса большей точности. В табл. 1.7.2 приведены допустимые диапазоны погрешностей гирь отдельных классов. Класс F_2 соответствует требованиям, предъявляемым к гирям прецизионных весов, а класс E_2 - к гирям лабораторных весов (аналитические гири).

Для применяемых при торговых операциях гирь общего назначения допускаются более широкие диапазоны погрешностей, причем в соответствии с международными соглашениями эти гири должны изготовляться только с плюсовыми отклонениями масс, так как при практическом применении гири изнашиваются (табл. 1.7.3). На рис. 1.7.1, *а*, *б* показаны принятые в ЕЭС конструкции гирь, калибровка которых признается всеми партнерами.

При равновесии на открытом воздухе (плотностью 1,2 кг/м^3 при 20 °С) гири и сравнительного эталона из материала плотностью 8000 кг/м^3 гире присваивается условная расчетная масса, численно равная массе эталона.

Условная масса $m_к$ гири массы m из материала плотностью ρ (кг/м^3) при 20 °С

$$m_к = m\,\frac{\rho - 1{,}2}{0{,}999850\,\rho}.$$

Материал для изготовления гирь следует выбирать исходя из условия, чтобы при изменении плотности воздуха на 10 % от 1,2 кг/м^3 максимальная ошибка взвешивания не превышала 0,25 допустимой ошибки калибровки.

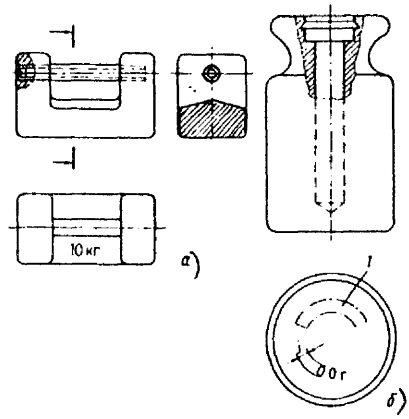


Рис. 1.7.1. Торговые гири, принятые в ЕЭС

1.7.2. Допустимые пределы погрешностей гирь высшей точности согласно стандарту ЕЭС и предписаниям Международной организации законодательной метрологии (МОЗМ)

Номинальное значение массы	Погрешности (± мг) по классам					
	E_1	E_2	F_1^{1*}	F_2	M_1^{2*}	M_3^{3*}
50 кг	25	75	250	750	2 500	25 000
20 кг	10	30	100	300	1 000	10 000
10 кг	5	15	50	150	500	5 000
5 кг	2,5	7,5	25	75	250	2 500
2 кг	1,0	3,0	10	30	200	1 000
1 кг	0,5	1,5	5	15	50	500
500 г	0,25	0,75	2,5	7,5	25	250
200 г	0,10	0,3	1,0	3,0	10	100
100 г	0,05	0,15	0,5	1,5	5,0	50
50 г	0,03	0,1	0,3	1,0	3,0	30
20 г	0,025	0,080	0,25	0,8	2,5	25
10 г	0,020	0,060	0,20	0,6	2,0	20
5 г	0,015	0,050	0,15	0,5	1,5	15
2 г	0,012	0,040	0,12	0,4	1,2	12
1 г	0,010	0,030	0,10	0,3	1,0	10
500 мг	0,008	0,026	0,08	0,25	0,8	-
100 мг	0,005	0,015	0,05	0,20	0,6	-
50 мг	0,004	0,012	0,04	0,12	0,4	-
20 мг	0,003	0,010	0,03	0,10	0,3	-
10 мг	0,002	0,008	0,025	0,08	0,25	-
5 мг	0,002	0,006	0,020	0,06	0,20	-
2 мг	0,002	0,006	0,030	0,06	0,20	-
1 мг	0,002	0,006	0,020	0,06	0,20	-

[1*] Мелкие гири. [2*] Образцовые гири. [3*] Торговые гири.

1.7.3. Характеристики торговых гирь, принятых в ЕЭС

Номинальные значения	Пределы погрешностей, мг		Материал
	при первичной калибровке	при последующих поверках	
1	2	3	4
1 г	+ 5 − 0	± 5	Любой материал, обладающий плотностью 7 - 9,5 г/см^3 и твердостью не меньше твердости латунного литья при прочности на истирание и коррозионной стойкости, как у серого чугуна, и состоянии поверхности, сопоставимом с точным чугунным литьем. Серый чугун не допускается для изготовления гирь, масса которых менее 100 г
2 г	+ 5 − 0	± 5	
5 г	+ 10 − 0	± 10	
10 г	+ 20 − 0	± 20	
20 г	+ 20 − 0	± 20	

Продолжение табл. 1.7.3

1	2	3	4
50 г	+ 30 – 0	± 30	
100 г	+ 30 – 0	± 30	
200 г	+ 50 – 0	± 50	
1 кг	+ 200 – 0	± 200	
2 кг	+ 400 – 0	± 400	
5 кг	+ 800 – 0	± 800	Серый чугун
10 кг	+ 1 600 – 0	± 1 600	
20 кг	+ 3 200 – 0	± 3 200	
50 кг	+ 8 000	± 8 000 – 0	

Определение зависящей от допустимой ошибки калибровки ε плотности материала гири ρ производится по приближенным расчетным формулам:

1. При $|\varepsilon| \le 6 \cdot 10^{-5}$

$$8\,000 \frac{1}{1 + \frac{|\varepsilon|}{6} 10^6} \le \rho \le 8\,000 \frac{1}{1 - \frac{|\varepsilon|}{6} 10^6}.$$

2. При $|\varepsilon| > 6 \cdot 10^4$

$$8\,000 \frac{1}{1 + \frac{|\varepsilon|}{6} 10^6} \le \rho.$$

1.7.2. ПРИБОРЫ И СПОСОБЫ ИЗМЕРЕНИЯ МАССЫ

Приборы для измерения массы называют **весами**. При каждом взвешивании выполняют хотя бы одну из четырех основных операций - определение неизвестной массы тела ("взвешивание"), отмеривание определенного количества массы ("отвешивание"), определение класса, к которому относится подлежащее взвешиванию тело ("тарировочное взвешивание" или "сортировка"), взвешивание непрерывно протекающего материального потока.

Измерение массы основано на использовании закона всемирного тяготения, согласно которому гравитационное поле Земли притягивает массу с силой, пропорциональной этой массе. Силу притяжения сравнивают с известной по величине силой, создаваемой различными способами:

1) для уравновешивания используется груз известной массы;

2) уравновешивающее усилие возникает при деформации упругого элемента;

3) уравновешивающее усилие создается пневматическим устройством;

4) уравновешивающее усилие создается гидравлическим устройством;

5) уравновешивающее усилие создается электродинамически при помощи соленоидной обмотки, находящейся в постоянном магнитном поле;

6) уравновешивающее усилие создается при погружении тела в жидкость.

Первый способ является классическим. Мерой во втором способе является величина деформации; в третьем - давление воздуха; в четвертом - давление жидкости; в пятом - ток, протекающий по обмотке; в шестом - глубина погружения и подъемная сила.

Наиболее распространенным является первый способ.

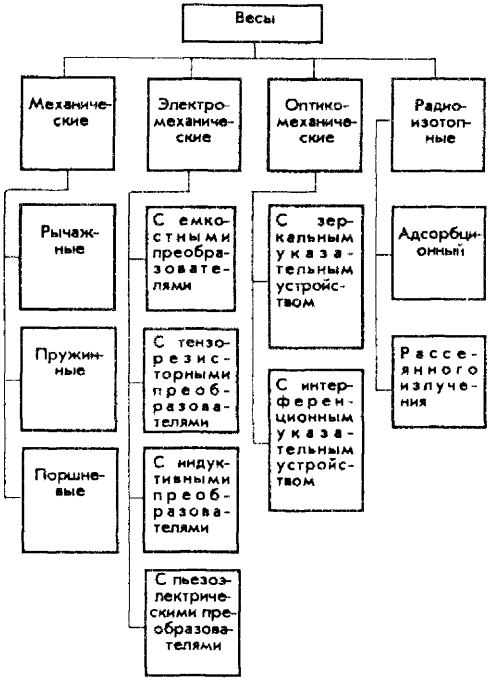


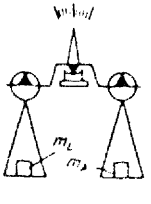
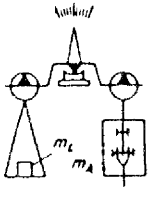
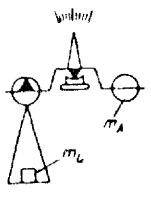
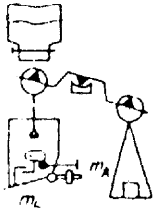
Рис. 1.7.2. Классификация весов

Классификация весов приведена на рис. 1.7.2. Механические весы основаны на принципе сравнения масс при помощи рычагов, пружин, поршней и чашек весов. В электромеханических весах усилие, развиваемое взвешиваемой массой, измеряется через деформацию упругого элемента с помощью тензорезисторных, индуктивных, емкостных и пьезоэлектрических преобразователей. Радиоизотопные преобразователи основаны на измерении интенсивности ионизирующего излучения, прошедшего через измеряемую массу. У преобразователя абсорбционного типа интенсивность излучения уменьшается с увеличением толщины материала, а у преобразователя рассеянного излучения интенсивность воспринимаемого рассеянного излучения растет с увеличением толщины материала.

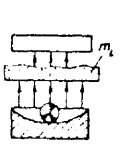
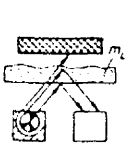
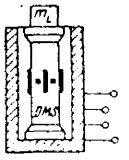
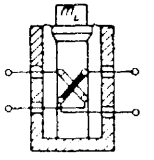
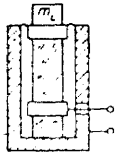
Основные технические характеристики механических рычажных весов представлены в табл. 1.7.4, а радиоизотопных и электромеханических - в табл. 1.7.5.

Преимуществом коромысловых равноплечих и гирных весов являются их высокая точность и независимость показаний от места измерения. Коромысловые весы с передвижными гирями и квадратные весы отличаются удобством эксплуатации. Дозаторы позволяют автоматизировать и повысить производительность процессов взвешивания. Отличием радиоизотопных весов являются малые измеряемые усилия, универсальность и нечувствительность к высоким температурам, а электромеханических весов с тензометрическими преобразователями - дешевизна и высокая точность измерения. Электромеханические весы с индуктивными преобразователями могут работать без усилителя, а с пьезометрическими преобразователями имеют широкий диапазон измерений и температурный диапазон.

1.7.4. Механические рычажные весы

Параметр	Коромысловые равноплечие	Гирные	Коромысловые с передвижными гирями	Квадратные	Весовые дозаторы
					
Пределы измерений, кг	10^{-6} - 10^{3}	10^{-6} - 10^{3}	10^{-4} - 10^{6}	10^{-3} - 10^{4}	10 - 10^{3}
Погрешность измерения, %	± 0,1	± 0,1	± 0,5	± 0,5	± 0,5

1.7.5. Радиоизотопные и электромеханические весы

Параметр	Абсорбционные	Рассеянного излучения	С тензорезисторными преобразователями	С индуктивными преобразователями	С пьезоэлектрическими преобразователями
					
Предел измерений, не более	10^2 кг/м^2	10^2 кг/м^2	10^6 кг	10^8 кг	10^4 кг
Погрешность измерения, %	± 1,0	± 1,0	± (0,1 + 1,0)	± (0,5 + 1,0)	± 1,0

По назначению весоизмерительные и весодозирующие устройства разделяют на следующие шесть групп:

1) весы дискретного действия;
2) весы непрерывного действия;
3) дозаторы дискретного действия;
4) дозаторы непрерывного действия;
5) образцовые весы, гири, передвижные весоповерочные средства;
6) устройства для специальных измерений.

К первой группе относят лабораторные весы различных типов, представляющие отдельную группу весов с особыми условиями и методами взвешивания, требующих высокой точности показаний; весы настольные с наибольшим пределом взвешивания (НПВ) до 100 кг, весы платформенные передвижные и врезные с НПВ до 15 т; весы платформенные стационарные, автомобильные, вагоноточные, вагонные (в том числе и для взвешивания на ходу); весы для металлургической промышленности (к ним относятся системы шихтоподачи для питания доменных печей, электровагон-весы, углезагрузочные весы для коксовых батарей, весовые тележки, весы для жидкого металла, весы для блюмов, слитков, проката и т.д.).

Весы первой группы изготовляют с коромыслами шкального типа, циферблатными квадратными указателями и цифропоказывающими и печатающими указательными приборами и пультами. Для автоматизации взвешивания применяют печатающие аппараты автоматической записи результатов взвешивания, суммирования итогов нескольких взвешиваний и аппараты, обеспечивающие дистанционную передачу показаний весов.

Ко второй группе относят конвейерные и ленточные весы непрерывного действия, ведущие непрерывный учет массы транспортируемого материала. Конвейерные весы отличаются от ленточных непрерывного действия тем, что их выполняют в виде отдельного весового устройства, устанавливаемого на определенном участке ленточного конвейера. Ленточные весы представляют собой самостоятельные ленточные конвейеры небольшой длины, оснащенные весоизмерительным устройством.

К третьей группе относят дозаторы для суммарного учета (порционные весы) и дозаторы для фасовки сыпучих материалов, используемых в технологических процессах различных отраслей народного хозяйства.

К четвертой группе относят дозаторы непрерывного действия, используемые в различных технологических процессах, где требуется непрерывная подача материала с заданной производительностью.

Принципиально дозаторы непрерывного действия выполняют с регулированием подачи материала на конвейер или с регулированием скорости ленты.

Пятая группа включает метрологические весы для проведения поверочных работ, а также гири и передвижные средства поверки.

Шестая группа включает различные высокоизмерительные устройства, служащие для определения не массы, а других параметров (например, подсчета равновесных деталей или изделий, определения крутящего момента двигателей, процентного содержания крахмала в картофеле и т.д.).

1.7.2.1. ВАЖНЕЙШИЕ МЕТРОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЕСОВ

Пределом взвешивания (диапазоном измерения) называется часть шкалы указателя, в пределах которой должны быть обеспечены до-

пустимые значения погрешностей весов и в которой весы допускаются в обращение с обязательной их поверкой.

Верхняя граница предела взвешивания, называемая наибольшим пределом взвешивания, определяет наибольшую массу, измеряемую при одноразовом взвешивании. Нижняя граница предела взвешивания определяется минимальным грузом, при одноразовом взвешивании которого относительная погрешность взвешивания не должна превышать допустимого значения.

Чувствительность. В несамоустанавливающихся весах, а также в весах с аналоговой шкалой чувствительностью E называется отношение отклонения указателя ΔL к вызвавшему его изменению нагрузки Δm:

$$E = \Delta L / \Delta m;$$

измеряется в единицах длины, отнесенных к единицам массы.

В весах с цифровой индикацией (дискретно-цифровых весах) чувствительностью E называется отношение числа цифровых шагов z к вызвавшему их изменению нагрузки m:

$$E = z / m;$$

измеряется числом цифровых шагов, отнесенным к единице массы.

Повышение чувствительности ограничено допустимым значением вариации показаний весов: для аналитических весов, предназначенных для взвешивания микроколичеств, - появлением флуктуации, вызываемой броуновским движением молекул; для рычажных весов - увеличением времени успокоения, повышением стоимости калибровки; для электромеханических весов - повышением затрат, необходимых для увеличения разрешения. Нижний предел чувствительности весов, подлежащий обязательной поверке, определяется инструкцией по калибровке. В общем случае чувствительность определяется минимальным изменением нагрузки (с учетом допустимых погрешностей), обеспечивающим четкое, устойчивое отклонение весов.

1.7.2.2. ПРИЧИНЫ, ВЫЗЫВАЮЩИЕ ПОГРЕШНОСТИ ВЗВЕШИВАНИЯ

Упругая деформация рычагов. Это явление может вызвать удлинение или укорочение эффективной длины рычагов. При этом передаточные отношения становятся зависимыми от величины нагрузки и появляется погрешность нелинейности.

Непараллельность призменных опор. При идеальном положении призменных опор рабочие ребра всех призм параллельны между собой и перпендикулярны плоскости вращения рычагов. При невыполнении этих условий в результате смещения точки приложения силы вдоль ребра опоры может возникнуть погрешность и измениться подвижность механизма весов.

Трение в шарнирах. При отсутствии загрязнений в условиях эксплуатации трение в шарнирах, обычно выполненных в виде опорной подушки и призмы, незначительно. При загрязнении трение может увеличиться настолько, что уменьшится подвижность, а следовательно, возрастет вариация показаний.

Износ рабочих ребер призм. При затуплении призм длины рычагов неточно выдерживаются и зависят от угла поворота призмы. Это влечет за собой увеличение вариации показаний.

Предельными погрешностями называют указываемые изготовителем (гарантируемые) или приводимые в инструкциях по калибровке предельно допустимые значения погрешностей (калибровочные погрешности). Эти погрешности представляют собой отклонение в верхнюю или нижнюю сторону от истинного значения веса гири или от истинного показания весов. Их превышение недопустимо.

Глава 1.8

ИЗМЕРЕНИЕ ВРЕМЕНИ

1.8.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Время как физическая величина, измеряемая в процессе контроля или диагностирования, выступает либо в виде фиксируемого момента, соответствующего некоторому событию, либо в виде интервала времени между событиями. Количественной оценкой в первом случае является *дата момента времени*, а во втором - *длительность интервала.*

Основной единицей измерения времени во всех употребляемых системах единиц является *секунда.* В основу измерения времени было положено вращение Земли, и долгое время единицей измерения времени - секундой - служила 1/86400 среднесолнечных суток. Поскольку период вращения Земли вокруг оси изменяется, в связи с требованиями равномерности астрономической системы сличения времени, было введено значение секунды как 1/31556925,9747 тропического года. Погрешность секунды в таком определении меньше, так как она привязана к году, величине более стабильной, чем сутки. Однако при практической реализации и в этом случае погрешности были значительны.

Учитывая, что молекулы и атомы некоторых веществ в переменном электрическом поле возбуждаются и изменяют свое электрическое состояние на резонансной частоте,

свойственной только молекулам и атомам данного вещества, в 1967 г. на Международной конференции по мерам и весам была принята новая единица - атомная секунда - интервал времени, в течение которого совершается 9 192 631 770 колебаний атома цезия - 133, соответствующих переходу между двумя сверхтонкими уровнями. За секунду также принимается интервал времени, в течение которого совершается 1 420 405 751,8 колебаний атома водорода.

Таким образом, параллельно существуют астрономическая система измерения времени и атомная система, дополняющие друг друга.

По стандарту час (ч, *h*) и минута (мин, min) относятся к внесистемным единицам. Стандартные интервалы времени: 1 год, 6 мес, 3 мес, 1 мес, 1 сут., 1 ч, 100 с, 1 с и любой интервал, равный 10^{-n}, где n - целое положительное число.

С понятием "время" связано понятие "интервал времени" и "момент времени". Интервал времени можно измерить, а для момента времени можно ввести понятие нуля или начального момента событий. Непрерывная последовательность интервалов времени определенной длительности, отсчитываемая от начального момента, составляет *шкалу времени*. Шкалу времени можно воспроизвести, наблюдая за периодически (хронометрическим) процессом, протекающим непрерывно. Установление числовых значений моментов времени называют определением или *исчислением времени*.

В соответствии с тремя известными единицами измерения времени (секундой всемирного времени, эфемеридной секундой и секундой атомного времени) различают три независимые шкалы времени - всемирную (ИТ), эфемеридную (ЕТ) и атомную (АТ).

Для удобства потребителей введена шкала *координированного всемирного времени* (ИТС), в которой в настоящее время ведется большинство практических измерений. Она сохраняет преимущества атомной шкалы, так как в основе ее лежит атомная секунда. Один раз в год производят коррекцию так, чтобы разность значений времени в шкалах ИТС и ИТ не превышала 1 с. Для потребителей, которым необходимо знать более точное значение разности ИТС и ИТ радиостанции службы времени передают регулярные сигналы, уточняющие эту разность до 0,02 с.

1.8.2. СИСТЕМЫ ХРАНЕНИЯ И ПЕРЕДАЧИ ЕДИНИЦЫ ВРЕМЕНИ

Государственный первичный эталон времени предназначен для воспроизведения и хранения размеров единиц времени и частоты и шкал атомного времени с помощью вторичных эталонов и образцовых мер измерений времени и частоты.

В состав Государственного эталона входят квантовые меры, которые делятся на реперы и хранители. *Реперы* (опорные) генерируют базовую частоту, создавая эталонный размер единицы измерения - секунды. *Хранители* (часы), установив размер секунды с репером, ведут непрерывный счет времени.

Функциональная схема Государственного эталона времени и частоты (ГЭВЧ) показана на рис. 1.8.1. Его основу составляют подсистемы воспроизведения и хранения размеров единиц и шкал времени АТ и ИТС. С помощью цезиевых реперов частоты *1* периодически определяются и контролируются действительные значения частот водородных реперов частоты *2*. Цезиевый репер воспроизводит размер секунды, водородный - хранит воспроизведенную цезиевым репером единицу времени и частоты. По сравнению с цезиевым репером водородный репер имеет более высокую стабильность, в связи с чем погрешность хранения и размера секунды снизилась на порядок. Шкала времени воспроизводится с высокой точностью и в соответствии с определением секунды в системе СИ.

Вторичными эталонами являются водородные хранители времени *3*.

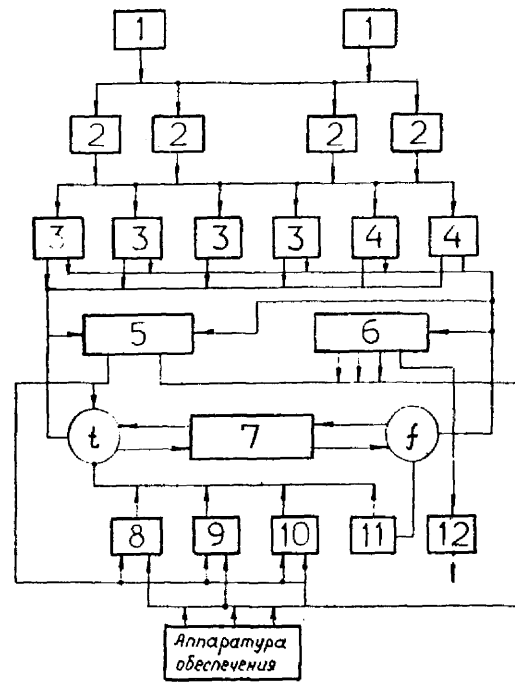


Рис. 1.8.1. Функциональная схема ГЭВЧ

Погрешность воспроизведения частоты цезиевых реперов составляет $0,8 \cdot 10^{-13}$. Погрешность в воспроизведении частоты одним водородным репером за год составляет (4 - 8) 10^{-14}, а всей группы реперов - менее $5 \cdot 10^{-14}$. Использование водородных реперов позволяет проводить длительные экспериментальные исследования цезиевых реперов частоты без ухудшения метрологических характеристик эталона в целом.

В систему хранения шкалы времени входят четыре водородных *3* и два цезиевых *4* хранителя времени. Водородные хранители, не отличаясь конструктивно от водородных реперов, используются в режиме непрерывного хранения шкалы времени. Нестабильность частоты водородных хранителей составляет величину $2 \cdot 10^{-14}$ за месяц. Цезиевые хранители используются только для повышения надежности хранения шкалы времени.

Система формирования рабочей шкалы времени *5* обеспечивает автоматический выбор лучшего из трех водородных хранителей и переключение на резервный в случае пропадания сигнала частоты ведущего хранителя или ухудшения его метрологических характеристик. Рабочая шкала времени ИТСр, формируемая таким образом, является приближенной, ее отклонение не превышает $\pm 20 \cdot 10^{-9}$ с. Это позволяет использовать шкалу ИТСр в оперативной работе ГЭВЧ без введения дополнительных поправок. По шкале ИТС ведутся все передачи сигналов точного времени и образцовых частот через специальные радиостанции, центральное телевидение и другие каналы связи.

Система внутренних сличений состоит из аппаратуры управления и предварительного анализа результатов измерений, аппаратуры измерения интервалов времени *8* и аппаратуры измерения разности частот *9*. Разрешающая способность измерения интервалов времени 10^{-9} и разности частот $1 \cdot 10^{-14}$ за 1 000 с и $2 \cdot 10^{-15}$ за сутки. Измерительный комплекс *6* позволяет проводить абсолютные измерения частот до 10^{13} Гц с погрешностью, меньшей $1 \cdot 10^{-12}$, и до $0,8 \cdot 10^{14}$ Гц с погрешностью меньше $1,5 \cdot 10^{-11}$.

Система внешних сличений обеспечивает передачу размеров единиц и шкалы времени ГЭВЧ вторичным и рабочим эталонами внутри страны и позволяет сравнивать шкалу времени ИТС со шкалами времени национальных эталонов других стран. В состав этой подсистемы входят: приемно-регистрирующий комплекс *9* для сличения частот, передаваемых по наземным каналам телевидения с погрешностью (0,2 + 1) 10^{-6} с на 1 000 км длины линии передачи, комплекс аппаратуры *10* для сличения шкал времени через метеорные следы. Погрешность сличения составляет $50 \cdot 10^{-9}$ с. Комплекс аппаратуры *11* предназначен для сличения шкал времени через фазовые сличения радионавигационных станций РНС-Е. В зоне до 1 500 км он обеспечивает сличение эталонов с погрешностью (0,2 + 0,5) 10^{-6} с. Комплекс *12* включает два комплекта цезиевых часов, перевозимых на самолетах, автомашинах или в составе измерительной времячастотной лаборатории на базе автобуса. Погрешность сличений (0,003 + 0,1) 10^{-6} с при времени транспортирования до пяти суток. Погрешность передачи шкалы ИТС вторичным эталонам в Европейской части страны (0,1 + 0,5) 10^{-6} с, в Сибири и на Дальнем Востоке (0,3 + 1,0) 10^{-6} с.

По результатам исследований эталона, а также сличения с национальными эталонами Германии, США, Международного бюро времен можно заключить, что Государственный первичный эталон времени и частоты имеет неисключенную систематическую погрешность $2 \cdot 10^{-13}$, среднеквадратическое отклонение результатов измерений $5 \cdot 10^{-14}$, нестабильность частоты за время до месяца $2 \cdot 10^{-14}$.

Размер единицы и шкала времени передаются потребителям через радиометеорные каналы связи, по ТВ и оптическим каналам в зоне прямой видимости. Используют также метод сличения эталонов при помощи перевозимых квантовых (водородных) часов.

1.8.3. МЕТОДЫ И ПРИБОРЫ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ВРЕМЕНИ

Типичные временные величины - период вращения или продолжительность оборота, длительность периода или длительность колебания, период полураспада (радиоактивного вещества), длительность импульса, постоянная времени, время успокоения, время нарастания (фронт импульса), время включения, время накопления, время выключения. В импульсной технике используют понятие - длительность переднего фронта импульса, время спада импульса, время разрешения, собственное (мертвое) время счетчика.

Методы измерения времени - совокупность приемов использования принципов хронометрии, мер времени и других хронометрических средств.

Мера времени - это средство измерения времени, предназначенное для воспроизведения интервалов времени заданной длительности или заданных моментов времени. Длительность интервала или дата момента, воспроизводимого мерой времени, называется *значением меры времени*. Меры времени могут быть однозначными и многозначными, то-есть воспроизводящими ряд интервалов времени различной длительности или моментов времени различных дат.

При контроле или диагностике используются однократные или многократные моменты времени. Первые соответствуют неповторяющимся событиям, вторые - потоку событий. Соответственно первые характеризуются одной датой этого момента на принятой шкале времени, вторые - набором дат моментов или датой одного из моментов и набором длительностей интервалов между ними. Многократные моменты могут быть периодическими, то-есть следовать через равные интервалы времени, или апериодическими. В последнем случае описание набора моментов должно быть статистическим.

При использовании измерения интервалов времени последние также могут быть однократными и многократными. В первом случае для описания используются длительность интервала и дата некоторого его характерного момента. При измерениях многократных интервалов времени они могут быть перекрывающимися или неперекрывающимися. Во втором случае должны определяться статистические характеристики потока неперекрывающихся интервалов, а в первом требуются, кроме этого, многоканальные средства измерения их продолжительности.

Приборы и устройства времени по функциональным свойствам разделяются на следующие группы:

1) измерители текущего времени, показывающие текущее время в часах, минутах и секундах;

2) измерители интервалов времени - секундомеры, реле времени и т.д.;

3) измерители физических характеристик (временных величин) - тахометры, счетчики оборотов и др.;

4) программно-временные задатчики интервалов времени (таймеры);

5) датчики равномерной скорости (стабилизаторы частоты вращения двигателей, часовые механизмы самопишущих приборов и др.).

Классификация приборов для измерения времени по принципу действия показана на рис. 1.8.2.

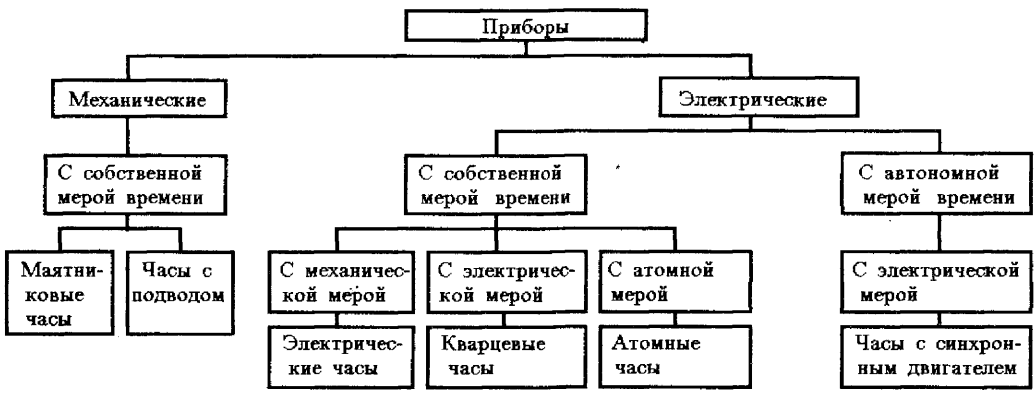


Рис. 1.8.2. Классификация приборов для измерения времени

Рис. 1.8.3. Классификация мер времени

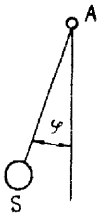
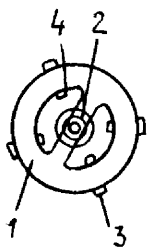
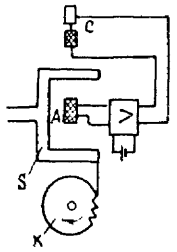
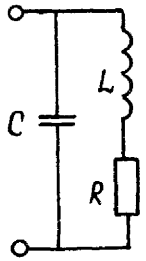
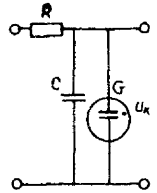
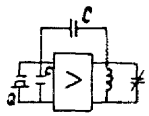
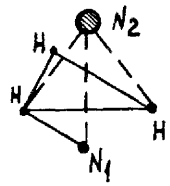
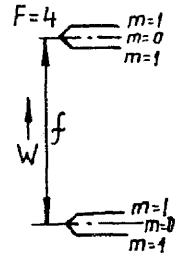
Механические			Электрические			Атомные	
Маятниковая колебательная система	Вращающая колебательная система	Камертонная колебательная система	Колебательный контур	Генератор релаксационного колебания	Кварцевый осциллятор	Молекулярная колебательная система (аммоний)	Атомная колебательная система
							
A - ось маятника; *S* - центр тяжести; φ - угол отклонения	*1* - вращающееся кольцо; *2* - спиральная пружина; *3* - винт для уравновешивания; *4* - ось подшипника	*C* - камертон; *A* - соленоид; *K* - храповое кольцо		*G* - лампа тлеющего разряда; $U_к$ - релаксационное напряжение	*Q* - кварцевый осциллятор	H - атом водорода; N_1 - первое положение атома азота; N_2 - второе положение атома азота	*W* - энергия; *f* - участок перехода

Рис. 1.8.4. Меры времени с колебательной системой

Классификация мер времени представлена на рис. 1.8.3. Как правило, в мерах используются два основных принципа измерения времени - принцип *периодической хронометрии* и принцип *апериодической хронометрии*. Наиболее распространенные периодические процессы, используемые для измерения времени и построения мер времени - механическое вращательное движение или колебательные процессы в механических, электромеханических или квантовых системах.

Принцип апериодической хронометрии заключается в использовании в качестве значений меры времени длительности интервалов, разделяющих определенные маркерные состояния апериодического монотонного процесса. Частным случаем является равномерный процесс, например равномерное механическое движение или линейно изменяющееся электрическое напряжение.

Механические колебания в приборах времени реализуются с помощью систем с накопителями энергии (маятник, пружина), имеющими положение равновесия, при отклонении от которого возникают силы, возвращающие их в это положение.

В приборах времени с камертонной колебательной системой (рис. 1.8.4) движение камертона *3* индуктивно воспринимается соленоидом *A*, сигнал которого усиливается и накладывается на запирающий LC - контур, катушка которого снова возбуждает синфазные механические колебания камертона, которые механически преобразовываются с помощью собачки в дискретное вращение храпового колеса *K*.

Электрические колебательные системы этих приборов используют колебательный LC - контур, в котором возбуждаются электрические колебания.

В кварцевых генераторах при механической деформации кристаллов кварца или турмалина возникают электрические заряды и, наоборот, под действием электрического поля происходит их механическая деформация. Если прикладываемое электрическое поле периодическое, кристалл колеблется с частотой возбуждающего поля при совпадении частоты его собственных колебаний с частотой поля. Амплитуда собственных колебаний зависит от структуры кристалла, его размеров и температуры.

В схеме кварцевого генератора резонансный LC - контур используется в качестве слабо демпфированного вибратора. Кварцевый генератор Q является высокоустойчивым резонансным контуром, напряжение которого усиливается и используется для возбуждения резонансного LC - контура. Частота возбужденных колебаний понижается, декодируется и используется для формирования показаний цифрового поля.

В атомных колебательных системах при переходе от возбужденного к нормальному состоянию атом излучает с характеристической высокостабильной частотой. Молекулярная колебательная система содержит, например, молекулы аммиака NH_3, имеющие пирамидальную структуру. Атом азота колеблется между двумя состояниями с высокостабильной частотой (23 870 Гц).

Апериодические меры времени, не содержащие колебательной системы, могут использовать расход массы (объема). Расход вытекающей или высыпающейся массы зависит от диаметра выходного отверстия и давления у выхода. При использовании в качестве времязадающего фактора процесса горения длительность его зависит от химического состава сгораемого вещества, строения горелки, подвода кислорода.

Электрические апериодические меры времени используют экспоненциальный заряд (разряд) конденсатора, атомные апериодические меры времени используют радиоактивные процессы распада. Например, изотоп углерода C_{14} имеет период полураспада 5 760 лет.

Приборы измерения времени можно свести к схеме рис. 1.8.5. Основные элементы - источник энергии, колебательная система (осциллятор), счетчик, выходное устройство (иногда с предварительным кодированием). Имеются еще органы управления подачей питания и передачей колебаний от осциллятора и счетчика.

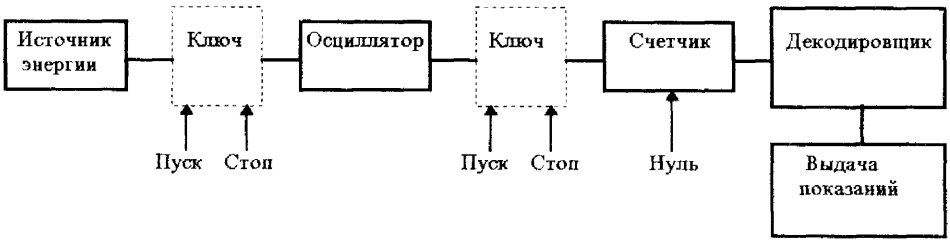


Рис. 1.8.5. Блок-схема прибора измерения времени

Таким образом, как правило, процедура измерения времени сводится к счету строго периодической последовательности импульсов, формируемых с помощью колебаний осциллятора. При этом возможно управление колебаний подачей энергии; в устройствах же, называемых *хронографами*, осциллятор колеблется все время, а подключаются к работе только счетчик и выходное устройство. В приборах, разрешающая способность которых не выше 0,1 с, пуск может производиться вручную; при более высокой разрешающей способности - с помощью магнитных пускателей. В электронных приборах измерения времени используется высокоточный кварцевый осциллятор с частотой 10 МГц и электронные вентильные схемы управления. Эти приборы наряду с измерением промежутков времени позволяют осуществлять измерение частоты, периода и других производственных величин.

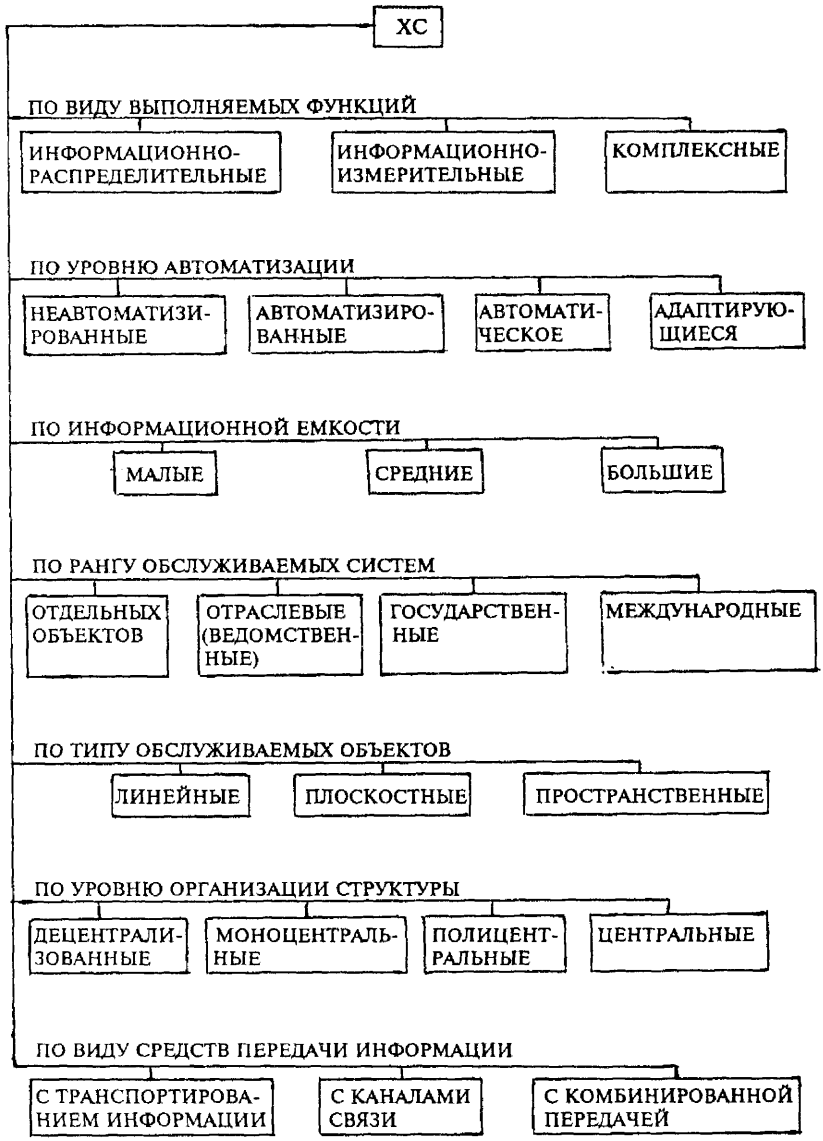


Рис. 1.8.6. Классификация хронометрических систем (ХС)

Широко используемая группа приборов времени - программно-временные задатчики, то есть приборы на базе часов, воспроизводящие требуемую временную программу управления. Программно-временные задатчики включают хронизаторы (тактовые генераторы, синхронизаторы, задатчики меток времени и т.д.), временные приводы (задатчики равномерного движения, часового угла и т.д.), реле времени (таймеры, устройства задержки и др.), программные реле времени (программаторы, программные часы и др.), временные командоаппараты (задатчики аналоговых программ, программно-временные контроллеры и др.). Их применяют для управления типовыми технологическими процессами, промышленным оборудованием, научными приборами, навигационной аппаратурой и т.д.

Автоматическая система временного программного управления состоит из объекта управления и системы, управляющей объектом по требуемой временной программе. Эта система содержит задатчик временной программы управления в виде программного сигнала для обеспечения требуемой программы поведения объекта управления, например обеспечения требуемого закона изменения обобщенных координат объекта управления.

Наиболее сложные и мощные по функциональным возможностям комплексные средства измерения времени - *хронометрические системы* (ХС). ХС - совокупность мер времени, хронометрических приборов и преобразователей и вспомогательных устройств, соединенных между собой каналами связи. ХС предназначены для выработки хронометрической информации, удобной для автоматической обработки, передачи и использования в автоматических системах управления. Хронометрическая информация - многообразие сведений о количественных характеристиках моментов и интервалов времени. Классификация хронометрических систем представлена на рис. 1.8.6.

По характеру выполняемых функций различают информационно-распределительное (ИР) и информационно-измерительные (ИИ) ХС. ИР ХС - системы распределения хронометрической информации с целью обеспечения ее единства и унификации на обслуживаемых объектах. Наиболее распространенный тип ИР ХС - системы единого времени.

ИИ ХС - системы получения, сбора и обработки хронометрической информации с целью нахождения количественных временных характеристик объектов измерения. Информация систематизируется, анализируется и представляется на табло и других средствах в виде таблиц, графиков и т.д.

Комплексные системы представляют собой комбинацию ИР ХС и ИИ ХС. Назначение комплексных ХС определяется ИИ ХС, а единство измерений обеспечивается ИР ХС.

Точность приборов измерения времени характеризуется тремя параметрами:

1) установка - отклонение фактической индикации от времени ИТС;

2) ход - постоянное во времени отклонение частоты колебаний осциллятора от номинального значения (единица измерения - с/сут);

3) вариация хода - изменение частоты собственных колебаний осциллятора во времени под влиянием факторов окружающей среды (положение в пространстве, температура, вибрации и пр.) или внутренних изменений (износ, разрядка источников питания, питание пьезоэлемента и пр.) (Единица измерения - $с/сут^2$).

Для различных типов приборов вариации хода приведены в табл. 1.8.1.

1.8.1. Вариации хода

Тип осциллятора	Величина погрешности, $с/сут^2$
Камертон	10^{-5}
Кварцевый пьезоэлемент	10^{-5} - 10^{-10}
Цезий, рубидий	10^{-10} - 10^{-11}
Водород, аммиак	10^{-12}

Глава 1.9

ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ

1.9.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Температура - физическая величина, определяемая как параметр состояния термодинамического равновесия макроскопических систем. В соответствии со вторым началом термодинамики температура определяется как производная от энергии тела по его энтропии. Термодинамическая температура всегда положительна и измеряется с помощью термодинамической шкалы (ТШ), единицей которой служит Кельвин (К).

С общепринятой шкалой Цельсия ТШ связана соотношением

$$t = T - 273{,}15 \text{ К},$$

где T - термодинамическая температура. Единица температурного интервала - Кельвин с высокой точностью совпадает с градусом Цельсия (^{0} С).

Температура - величина экстенсивная, то есть измеряемая косвенным образом за счет преобразования ее в какую-либо интенсивную

(непосредственно измеряемую) величину, например электрический ток, давление газа, тепловое расширение тел и т. д. на основе использования соответствующих термометрических свойств тел.

При построении практических температурных шкал, то есть конкретных зависимостей между температурой и реальным термометрическим свойством, приписывают значения температур t_1 и t_2 двум фиксированным точкам x_1 и x_2, соответствующим основному интервалу шкалы. Если принять $t_1 = 0$, то уравнение шкалы, при линейной зависимости $x = x(t)$ имеет вид

$$t = t_2 (x - x_1) / (x_2 - x_0),$$

где t, x - текущие значения температуры и термометрического свойства.

Таким образом построенные шкалы, в отличие от термодинамической, зависят от термометрических свойств тел, но легче реализуются на практике.

Международная практическая температурная шкала (МПТШ), совпадает с термодинамической в нескольких *реперных точках* (точки фазовых переходов чистых веществ, например, плавления золота, тройной точки воды и т. д.), а в других точках приближается к ней в пределах точности измерений, воспроизводимости приборов и методов вычисления градуировочной кривой. Единица измерения в МПТШ - Кельвин.

В свою очередь термодинамическая шкала реализуется с помощью газовых термометров, основанных на законах идеального газа, законах теплового излучения, термошумовых и магнитных термометров (последние применяют в криогенной области).

Единство температурных измерений обеспечивается Государственным эталоном температуры (Кельвин) в диапазоне 1,5 - 2800 К. Путем сравнения с эталоном значения температур передаются образцовым приборам. По образцовым приборам калибруются рабочие термометры.

Для сверхвысоких температур в качестве образцовых иногда используют плазменные источники (например, капилляры из диэлектрика в СВЧ-полях), реализующие температуру до 10^5 К.

Для $T > 10^5$ К (ядерные реакции, лазерное излучение) образцовые источники находятся в стадии разработки.

Температуру разреженных газов (и вакуума) оценивают мощностью пронизывающих их излучений, эквивалентной мощностью абсолютно черного тела (АЧТ) или идеального излучателя при соответствующей температуре.

1.9.2. МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ

Методы принято делить на две большие группы - контактные и бесконтактные, которые, в свою очередь, подразделяются по физическим эффектам, положенным в основу принципа их действия.

1.9.2.1. КОНТАКТНЫЕ МЕТОДЫ

Термометры расширения. К этой группе приборов относятся широко распространенные жидкостные (ртутные, спиртовые и др.) термометры, а также биметаллические и дилатометрические термометры.

Действие **жидкостных термометров** основано на измерении объема жидкости при нагреве и охлаждении. Они состоят из наполненного термометрической жидкостью стеклянного резервуара, соединенного с капиллярной трубкой, свободный конец которой запаян. Резервуар, капилляр и скрепленная с ними шкала заключены в корпус (обычно стеклянный). Диапазон измерения от -80^{0}С до +210^{0}С спиртовых и от -35^{0}С до +760^{0}С для ртутных термометров. Верхний предел ограничен температурой размягчения стекла, равной 780^{0}С. Постоянная времени составляет 1 + 10 с.

Изготовляют также "палочные" жидкостные термометры с толстостенными капиллярами, на внешней поверхности которых непосредственно нанесена шкала. Длина термометра до 600 мм. Форма корпуса прямая или изогнутая. Цена деления шкалы обычно 0,1^{0}С, основная погрешность ±0,2^{0}С (в диапазоне до +100^{0}С) и до ±5^{0}С (в области до 750^{0}С). Шкала жидкостных ТР - линейная. Для уменьшения погрешностей капилляры изготовляют из стекол с малым коэффициентом объемного термического расширения.

Жидкостные термометры расширения применяют для измерения температур в непосредственной близости от объекта. Область их применения - термометрия газов и жидкостей, расплавов и т. п., медицина. Выпускаются жидкостные ТР различных конструкций, в том числе с запоминанием минимальной и максимальной температур, контактные для регулирования технических процессов и т. д.

Градуировка и проверка термометров расширения всех типов производится с помощью термостатов.

Дилатометрические термометры (ДЛТ) основаны на относительном удлинении при нагреве (охлаждении) двух тел (обычно металлических) с различными температурными ко-

эффициентами линейного расширения (ТКЛР). ДЛТ бывают стержневого и пластинчатого типов. Стержневые ДЛТ представляют собой металлическую трубку с закрытым дном, в которую вставлен стержень из материала с малым КЛР (кварц, фарфор). КЛР стержня значительно меньше КЛР трубки, поэтому при ее нагреве стержень перемещается и приводит в движение измерительный орган прибора (стрелка и т.п. указатель).

ДЛТ для пластинчатого типа состоит из двух изогнутых и спаянных между собой по краям металлических полосок с различными КЛР. Изменение степени изгиба пластинки при нагреве (охлаждении) передается (обычно механически) указателю прибора.

Зависимость длины металлических тел в ДЛТ от температуры имеет вид

$$l_t = l_0 (1 + \beta t),$$

где l_0 - длина тела при $t = 0^0$C, β - ТКЛР, т.е. шкала ДЛТ линейки.

Основная область применения ДЛТ - датчики в системах автоматического регулирования, сигнализации и т.д. Диапазон рабочих температур от -30 до $+1000^0$C. Погрешность порядка 1 ÷ 3 %. ДЛТ особенно часто применяют для контроля температур газов и жидкостей, особенно в тяжелых условиях (в стволах скважин и т.д.).

В деформационных термометрах (ДТ) чувствительным элементом служит биметаллическая пластинка, выполненная, например, из инвара и стали. Если один конец пластинки закрепить, то перемещение Δx свободного конца при нагреве на величину Δt будет

$$\Delta x = A\Delta t,$$

где A - коэффициент пропорциональности.

Таким образом, шкала этих приборов - равномерная.

Биметаллические термометры используются в термографах для записи временного хода температуры, ряде других приборов для автоматической регистрации температуры, регулирования производственных процессов и т.д. Диапазон измерения обычно от -35^0C до $+45^0$C для пары инвар - сталь. Отличительная особенность ДТ - стабильность показаний. Погрешность измерений порядка $0,5^0$C.

Пироскопы (конусы Зегтера) - разновидность термометров расширения, принцип действия которых основан на изменении формы конусов из специальных материалов (обычно керамики) при достижении температуры размягчения (плавления). Применяется в стекольной, керамической, некоторых других областях индустрии в качестве термочувствительных индикаторов. Температурный диапазон $+600 \div 2000^0$C (в зависимости от типа материала), чувствительность порядка $1 \div 3^0$C.

Манометрическая термометрия. Принцип действия манометрических термометров (МТ) основан на зависимости давления жидкости, газа или пара с жидкостью в замкнутой системе постоянного объема от температуры. Эти приборы могут быть показывающими или регистрирующими. МТ состоят из термобаллона, трубчатой пружины и соединительной капиллярной трубки, выполняемой обычно из металла и имеющей длину до 60 м.

Эти приборы особенно эффективны при контроле температуры в сложных условиях, в агрессивных средах, взрывоопасных помещениях. При повышении давления в термочувствительном элементе трубчатая пружина приводит во вращение связанный с ней указатель.

Жидкостные МТ на основе ксилола, ртути, спирта имеют диапазон измерения от -60 до $+300^0$C, их шкала - равномерная, класс точности 1 ÷ 1,5. Газовые МТ (азотные, гелиевые) работают в диапазоне $-100 \div +600^0$C. Их шкала также равномерная, так как изменение давления в термосистеме пропорционально изменению температур и описывается уравнением

$$p_1 - p_2 = \alpha p_1 (t_2 - t_1),$$

где p_1, p_2, t_1 и t_2 - начальные и конечные давления и температуры газа; α - температурный коэффициент объемного расширения газа, $\alpha = 0,00366\ K^{-1} = 1/273\ K^{-1}$.

В конденсационных (парогазовых) МТ термодатчик частично заполнен низкокипящей жидкостью (ацетон, фреон, хлористый метил). Пары жидкости, давление которых изменяется с температурой, вызывают перемещение индикатора прибора. Область измеряемых температур от -180^0C до $+300^0$C. Их отличительная особенность - неравномерная шкала.

Инерционность МТ порядка 5 - 15 с.

Разновидностью МТ являются адсорбционные датчики, основанные на способности некоторых веществ концентрировать на своей поверхности другие вещества, например жидкости или газы. Интенсивность этого процесса зависит от температуры, что и позволяет использовать его в термометрии.

Термометрия на основе датчиков температуры с твердым наполнителем. Принцип действия этих датчиков, представляющих собой капсулы, заполненные твердым кристаллическим веществом, основан на изменении объема наполнителя при изменении агрегатного состояния (плавлении, кристаллизации) при нагреве или охлаждении. Используя смесь различных веществ, можно добиться определенного диапазона температур плавления, то

есть реализовать датчики как релейного, так и измерительного типов.

В качестве термоактивных веществ перспективны такие легкоплавкие кристаллические вещества, как дифенил, бромоформ, смесь воска с порошком меди, синтетические цеизины, а также некоторые сорта резин. Основная область применения подобных датчиков - системы регулирования теплового режима охлаждающих жидкостей и масла в двигателях внутреннего сгорания (ДВС), а также системы отопления, устройства тепло- и холодоснабжения и т.п.

Конструктивно датчики выполняют двух типов - мембранные и поршневые. В первых изменение объема наполнителя приводит к перемещению штока, обусловленного деформацией мембраны капсулы. В поршневых датчиках шток при плавлении наполнителя выдавливается непосредственно из упругого разделителя типа резиновой втулки с глухим дном.

Температурный диапазон достаточно узок - обычно от $+20^0$C до $+80^0$C ÷ 100^0C. Инерционность порядка 30 с. Зона пропорциональности порядка 10 ÷ 15^0C, чувствительность порядка 1^0C.

К достоинствам данных датчиков можно отнести значительные усилия перемещения (до 2 кН), большая амплитуда перемещений (до 25 мм) при малом количестве наполнителя, повышенная устойчивость к ударам, вибрации, тряске, коррозии, простота конструкции, малые габариты и масса, устойчивость к влиянию среды, долговременная стабильность (до $70 \cdot 10^3$ циклов срабатывания).

Методы электротермометрии. Эти методы подразделяют на термоэлектрические, терморезистивные, термотранзисторные, термошумовые, частотные.

Действие **термоэлектрических термопарных датчиков** основано на эффекте Зеебека, заключающегося в том, что в замкнутой цепи, составленной из разнородных проводников (или полупроводников), возникает электрический ток, если температура мест соединения их различна. Величина соответствующей термо ЭДС зависит от типа металла, является линейной функцией температуры спаев и определяется выражением

$$E = \alpha(t_1 - t_2),$$

где α - коэффициент пропорциональности, индивидуальный для каждой пары металла; t_1 и t_2 - температуры спаев.

Температуру одного из спаев (свободного) поддерживают постоянной (обычно при 0^0C) для получения однозначности и стабильности работы термометра.

По материалу термоэлектродов термопары делят на две группы - из неблагородных и благородных металлов и сплавов. Наибольшее распространение получили термопары из платины, платинородия, хромеля, алюмеля, копеля, а также железа, меди и константана.

Серийно выпускаются термопары платинородиевые платиновые (ТПП), платинородиевые (ТПР), хромель-копелевые (ТХК), хромель-алюмелевые (ТХА), вольфрам-рениевые (ТВР).

Широкое применение термопар (ТП) обусловило разнообразие их конструкций. По способу контакта со средой, различают погружаемые и поверхностные ТП; по условиям эксплуатации - стационарные, переносные, разовые и многократного применения; в защищенных от коррозии и агрессивных сред корпусах и т.п.

Инерционность термопар составляет от 10 до 60 с, диапазон измеряемых температур от -200^0C до $+2500^0$C. Погрешность 1 ÷ 2 %.

Статическая характеристика термопар практически линейна, а их параметры нормированы для ряда стандартных материалов. Диаметр зондов термопар от 0,5 мм до 12 мм и более (в защитном чехле). Длина соединительных проводов до 50 м и более. Выпускаются системы многоточечного контроля на 100 и более термопар. Для работы в условиях атомных электростанций применят термопары из радиационно-стойких материалов. Для температур свыше $+2500^0$C применяют термопары из карбидов металлов (гафния, ниобия, титана, циркония), на основе углеродистых и графитовых волокон.

Термопары являются датчиками активного типа (генераторами тока).

Для регистрации сигналов термопар используют милливольтметры магнитоэлектрической системы, автоматические электронные потенциометры, цифровые измерительные устройства, в том числе с микропроцессорной обработкой сигналов.

Градуировку термопар, их поверку производят с помощью водяных и масляных термостатов (при $t \leq +300^0$C), образцовых платиновых термопреобразователей.

Действие **терморезистивных преобразователей** (ТР) основано на свойстве металлов изменять электрическое сопротивление при изменении температуры. ТР применяют в комплекте со вторичными электроизмерительными приборами (логометры, мостовые схемы). В металлических ТР зависимость сопротивления от температуры близка к линейной и может быть описана формулой

$$R_t = R_0(1 + \alpha t),$$

где R_t и R_0 - сопротивления при текущей и начальной температурах; t - температура; α - температурный коэффициент сопротивления

резистора ($\alpha \approx 10^{-3}$ град$^{-1}$ для чистых металлов и $\alpha \approx 0{,}03$ град$^{-1}$ для полупроводниковых ТР).

Лучшим материалом для ТР является платина ($R_0 \approx 10 \div 1000$ Ом при 0^0С). Порог чувствительности миниатюрных ТР, изготовленных методом вжигания тонких пленок платины на керамическое основание толщиной 1 - 2 мм при ширине пленки 0,1 мм, длине 5 мм и сопротивлении 300 Ом, составляет 10^{-5} К/Ом.

Статические характеристики металлических ТР линейны в широком диапазоне температур, а для полупроводников описываются формулой

$$R = A \exp(a/T),$$

где A и a - постоянные данного полупроводникового ТР (называемого обычно термисторами).

Обычно для термисторов $a < 0$, но существуют и ТР (позисторы) со статической характеристикой, которая имеет две ветви с $a > 0$ и $a < 0$.

Линеаризация характеристик термисторов и позисторов осуществляется аналоговыми или цифровыми средствами.

Шумовая термометрия. Тепловое хаотическое движение носителей зарядов в проводниках приводит к тому, что на концах проводника возникают случайные напряжения. Амплитуды этих напряжений подчиняются закону распределения Гаусса (нормальный закон), математическое ожидание которого равно нулю, а дисперсия зависит от температуры проводника. Среднеквадратичное значение напряжения шума определяется формулой Найквиста:

$$U^2 = 4 K R T \Delta f,$$

где K - постоянная Больцмана; R - электрическое сопротивление проводника; T - термодинамическая температура; Δf - диапазон частот, в котором производятся измерения.

Среднеквадратичное значение напряжения теплового шума проводника линейно связано с его термодинамической температурой. Таким образом, измерив среднеквадратичное значение шума, можно определить температуру проводника, то есть использовать его в качестве термометра. С помощью термометров, построенных по этому принципу, можно измерять температуру в широком диапазоне со средним квадратическим отклонением до сотых долей Кельвина.

Метод нашел применение в основном в атомной энергетике и при точных физических измерениях, в частности для реализации МПТШ-68 в области криогенных температур.

Термотранзисторными термопреобразователями (ТТП) принято называть датчики на основе транзисторов, термометрической характеристикой которых служит обычно напряжение эмиттер - база. ТТП применяют в диапазоне от -70 до $+200^0$С. Для ТТП характерна стабильность и линейность характеристик преобразования, высокая чувствительность, малые габариты и масса, экономичность. Приборы с ТТП содержат мостовую измерительную схему, одним из плеч которой является переход эмиттер - база транзистора, на коллектор которого подается запирающее напряжение. Дискретность отсчета для ТТП составляет от $0{,}05^0$С до 1^0С, погрешность порядка $0{,}1^0$С.

Частотные методы электротермометрии основаны на зависимости резонансной частоты колебаний электрического или механического колебательного контура от температуры.

Метод автогенератора. В качестве термодатчика (ТД) используется при этом терморезистор, сопротивление которого изменяется при нагреве по линейному закону,

$$R_T = R_0 + \alpha T,$$

где R_0 - сопротивление при начальной (например, нулевой) температуре; T - текущая температура; α - температурный коэффициент сопротивления.

ТД включают в схему генератора в качестве задающего частоту звена, причем подбором корректирующих элементов. Можно обеспечить зависимость частоты от температуры. Диапазон измеряемых температур и быстродействие определяется типом терморезистора.

Кварцевые термометры. (КТ). Температурные зависимости собственной резонансной частоты кварцевых пьезоэлементов в сильной степени зависит от ориентации пластинки кварца относительно ее кристаллографических осей. Для термометра применяют элемент с такими срезами, чтобы температурный коэффициент частоты (ТКЧ) был максимален. Такие датчики можно включить в схему высокочастотного (или релаксационного) генератора, частоту которого можно измерить непосредственно частотомером. Лучшие результаты дает схема, в которой частота датчика сравнивается с частотой опорного пьезоэлемента, вырезанного из кварца с ориентацией среза, при которой ТКЧ минимален. Разностная частота является линейной функцией температуры.

Типичные характеристики КТ: рабочая частота 5 - 30 МГц, чувствительность до (10^{-5}) °С, крутизна преобразования порядка 1000 кГц/^{0}С, постоянная времени 5 - 10 с, достижимый диапазон температур -100 - +500°С, воспроизводимость шкалы не хуже 0,01°С после циклических измерений температуры, нелинейность преобразования не превышает 0,1 % в рабочем диапазоне температур.

Пьезоэлемент обычно подвешивается на тонких проволоках в колбе с гелием, разме-

щенной в корпусе из стали, или размещается в медном цилиндрическом корпусе, также располагаемом в стальной трубке диаметром 5 - 10 мм.

Некоторым недостатком КТ является необходимость очень точной ориентации пластинки (порядка 5′) относительно оптимальной конфигурации, что технологически очень сложно. Однако, учитывая высокие метрологические характеристики, они очень перспективны.

Световодные термодатчики применяют, когда требуется полная изоляция от электрических и магнитных полей и повышенная помехоустойчивость.

Датчик в этих приборах расположен на конце волоконного световода, с помощью которого информация о температуре передается на оптоэлектронное устройство с цифровым дисплеем или выходом на самописец.

Многим видам материалов при изменении температуры свойственно изменение количества отраженного или пропущенного света, эмиссионной способности (люминесценции) и поляризация.

Среди используемых материалов - жидкие холестерические кристаллы, которым свойственно изменение отражательной способности определенной длине волны.

Другим видом оптических материалов являются кристаллы двойного лучепреломления, имеющие различные показатели преломления для ортогонально-поляризованных волн, а показатель преломления, как известно, зависит от температуры. У некоторых веществ, например у танталата лития, изменение температуры вызывает значительное изменение величины показателя преломления. Измеряемая температура 18 ... 49°С, чувствительность 0,1°С, диаметр датчика 0,5 - 1,0 мм.

Действие абсорбционных оптических датчиков основано на функциональной зависимости поглощенного пучка света от температуры. Это свойственно полупроводниковым материалам, в частности арсениду галлия. Датчик на основе арсенида галлия имеет форму призмы небольших размеров. На входе и выходе датчика расположено по одному или по два оптических световода, обеспечивающих минимальные потери в диапазоне длин волн, соответствующем спектру поглощения кристалла. Разрешающая способность такого датчика 0,2°С в диапазоне температур 33 - 47°С.

Люминофоры с присадками европия имеют сильную зависимость яркости люминесценции от температуры. Эти датчики дают возможность измерять температуру до 320°С (линии спектра - зеленые и красные). Люминофорный датчик на основе эрбия, иттрия имеет диапазон измерений 9 - 250°С. В качестве источника излучения может быть использована вольфрамогалогенная лампа, а для передачи сигнала - волоконный оптический световод диаметром 0,4 - 1,0 мм.

В ряде случаев используются термооптические эффекты в самих волноводах (изменение плоскости поляризации, вращения модовой структуры, модуляции затухания), однако такие датчики обладают невысокой локальностью измерения.

Для измерения температуры жидких металлов при помощи световода, погруженного непосредственно в расплав и выводящего его тепловое излучение в безопасную зону, применяют иммерсионные пирометры. Для этого применяют световоды без оболочки, изготовляемые из плавленного кварца или сапфира (окиси алюминия). Температура расплава может достигать 2000°С.

Использование инфракрасных световодов из халькогенидных и фторидных стекол, прозрачных в области 2 - 14 мкм, позволяет осуществлять волоконно-оптические пирометры для измерения температур слабонагретых объектов (20 - 200°С). Для них характерны высокая светосила (апертура 0,6 - 0,9), хорошее светопропускание, термостойкость до +120°С.

Термоиндикаторы. Действие термоиндикаторов основано на изменении состояния, яркости и цвета свечения некоторых веществ при нагреве. С его помощью можно быстро и экономично получить информацию о тепловом режиме объекта.

Преимуществом термоиндикаторов является запоминание распределения температур в процессе испытаний, простота и наглядность, экономичность.

К недостаткам термоиндикаторов следует отнести инерционность, сравнительно невысокую точность, необходимость нанесения на изделие специальных покрытий, сложность изучения динамических температурных режимов. Включение их в системы терморегулирования представляет значительные трудности.

Существуют обратимые, многократно меняющие цвет при нагреве, и необратимые термоиндикаторы.

Термоиндикаторы обоих типов используют для контроля температурных полей, определения горячих точек на обшивке самолетов при их испытаниях, в аэродинамических трубах и т.п.

К обратимым термоиндикаторам относятся холестерические *жидкие кристаллы*. При изменении их температуры отраженный свет резко изменяет свой спектр.

Жидкие кристаллы могут наноситься непосредственно на объект контроля. Однако если это позволяет геометрия объекта, удобнее использовать капсулированные жидкие кристаллы в виде тонких (толщиной 0,01 - 0,05 мм) полимерных пленок, в которых герметично расположено активное вещество. При этом

важно обеспечить хорошее прилегание пленки к объекту. Зазор даже в 0,1 мм может сильно исказить результаты измерения. Устранить влияние воздушного зазора можно, используя специальные нетоксичные, легко удаляемые смазки, например, на основе кремниевых соединений, обладающих высокой теплопроводностью, сравнимой с теплопроводностью меди. Смазки наносятся на объект равномерным слоем толщиной 0,2 - 0,5 мм, а к ней прикладывается пленка с жидким кристаллом (ЖК). Максимальный размер пленок ЖК порядка 0,5 × 0,5 м^2.

Пленки ЖК обладают анизотропией теплопроводности. Поперечная (в плоскости пленки) теплопроводность значительно ниже, чем продольная (поперек слоя), что обеспечивает возможность длительного наблюдения тепловых изображений.

Жидкие кристаллы могут работать в диапазоне от +20^{0}С до +200^{0}С.

Для достижения максимальной температурной чувствительности применяют жидкие кристаллы, работающие в узком температурном диапазоне (2 - 3^{0}С). Например, жидкокристаллический термоиндикатор, работающий в диапазоне 41 - 43^{0}С, имеет чувствительность 0,5^{0}С.

Действие *люминофорных термоиндикаторов* основано на температурной зависимости цвета или интенсивности люминесценции некоторых веществ, например сульфидов цинка и кадмия.

Недостатком люминофорных индикаторов является необходимость точной стабилизации возбуждающего люминесценцию излучения (обычно ультрафиолетового).

Люминоформы применяют при исследовании микрообъектов в радиоэлектронике, например при обнаружении дефектов в транзисторах.

Изооптические термографические преобразователи. Действие изооптических термографических преобразователей (ИТП) основано на эффекте Христиансена, то есть спектральном смещении полосы пропускания оптически неоднородной структуры, компоненты которой имеют различный характер изменения показателя преломления от температуры.

ИТП представляют собой структуры типа твердого раствора, например мелкодисперсный порошок стекла (размер частичек 5 ÷ 40 мкм) в кремнийорганическом каучуке. Температурная зависимость дисперсионных рефракционных параметров каучука близка к линейной в области температур от минус 20 до плюс 150^{0}С.

Для стекол же характерна слабая зависимость показателя преломления от температуры. При нагреве раствора длина волны, соответствующая равенству показателей преломления среды и наполнителя, плавно изменяется. Поэтому при освещении кюветы с раствором полихроматическим источником ее цвет в проходящем излучении будет изменяться в зависимости от температуры. Если одну из стенок кюветы выполнить зеркальной, эффект наблюдается в отраженном свете.

Подбором марок каучуков и стекол добиваются создания ИТП, работающих в определенном диапазоне температур, что повышает их чувствительность. ИТП могут быть получены в виде тонких пластин, гибких пленок, паст, замазок.

Разработаны изооптические термографы с визуализацией изотерм на изображении теплового поля ИТП, находящегося в контакте с объектом.

Для автоматизации измерений температуры объекта ИТП сопрягаются с телевизионными или другими колориметрическими системами объективного анализа цвета.

1.9.2.2. МЕТОДЫ ПИРОМЕТРИИ ИЗЛУЧЕНИЯ

Законы излучения абсолютно черного тела (АЧТ) могут применяться с известной поправкой для большинства реальных тел.

Для реальных тел законы излучения АЧТ применимы только в первом приближении. Их излучение может отличаться от излучения АЧТ при той же температуре как спектральным составом, так и интенсивностью. *Тела*, излучение которых имеет тот же спектр, что и излучение АЧТ при данной температуре, и отличается от него только интенсивностью, называются *серыми*.

Для оценки излучательной способности реальных (серых) тел вводят понятие коэффициента излучения $\varepsilon(\lambda, T) \le 1{,}0$. Очевидно, что для АЧТ и серых тел

$$\varepsilon(\lambda, T) = \alpha(\lambda, T).$$

Это выражение может быть получено из закона Кирхгофа и означает, что коэффициент излучения равен коэффициенту поглощения реального тела $[\alpha(\lambda, T)]$.

Значения $\varepsilon(\lambda, T)$ и $\varepsilon(T)$ зависят от температуры объекта, его материала и состояния его поверхности.

Источники излучения, спектр которых отличается от спектра АЧТ при данной температуре, называются *селективными*.

Однозначная связь между мощностью и спектром излучения и температурой тела существует только для АЧТ. Для реальных объектов введены понятия эквивалентных температур.

1. Радиационной или энергетической температурой T_0 серого излучателя с истинной температурой $T_и$ называется такая температура АЧТ, при которой его яркость равна яркости данного излучателя.

2. Яркостной температурой серого излучателя $T_я$ с истинной температурой $T_и$ называют такую температуру АЧТ, при которой его спектральная яркость для некоторой длины волны λ равна спектральной яркости данного излучателя при той же длине волны.

3. Цветовой температурой $T_ц$ серого излучателя с истинной температурой $T_и$ называют такую температуру АЧТ, при которой "цвета" их излучений совпадают.

При определении температуры изделий, находящихся в непосредственной близости от высоконагретых тел, необходимо учитывать излучение фона, отраженное от объекта контроля, поскольку детекторы ИК-излучения, как правило, регистрируют именно суммарное излучение.

Необходимо учитывать также эффекты ослабления ИК-излучения в атмосфере или среде, отделяющих изделие от детектора. Спектр пропускания ИК-лучей атмосферой имеет два характерных "окна" прозрачности (2 - 5 и 8 - 14 мкм).

Закон Бугера описывает поглощение в среде:

$$\Phi = \Phi_0 \exp(-kl),$$

где Φ - поток, прошедший среду толщиной l; Φ_0 - исходное значение потока; k - натуральный показатель ослабления, учитывающий поглощение и рассеяние излучения.

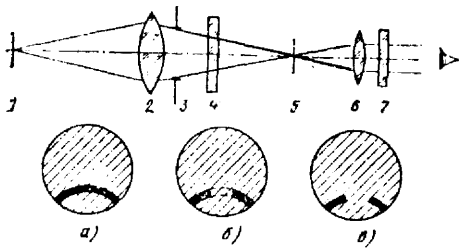


Рис. 1.9.1. Схема яркостного пирометра:
а, б, в - поле зрения прибора для различных режимов накала нити лампы

Яркостные визуальные пирометры (рис. 1.9.1) применяют для измерения яркостных температур выше 600^{0}С. Принцип их действия основан на зависимости спектральной яркости нагретых тел от температуры, описываемой законами Планка и Вина.

Объектив *2* проектирует объект *1* через диафрагму *3* и нейтральный фильтр *4* на плоскость *5*. В этой плоскости находится нить спектральной пирометрической лампы, которая рассматривается через красный фильтр *7* с помощью окуляра *6*. Наблюдатель видит одновременно изображение лампы и объекта.

Потенциометром меняют яркость лампы до исчезновения ее изображения на фоне объекта, затем определяют соответствующий этому моменту ток лампы и по градуировочной шкале прибора температуру объекта.

Применяя красный фильтр *7*, можно вести измерения в узком спектральном интервале. При высоких яркостях объекта вводят фильтр *4*.

Недостатком метода является субъективность измерения, преимуществом - простота и удобство в работе.

Яркостные пирометры с электронно-оптическими преобразователями (ЭОП) и специально передающими телевизионными трубками (видиконами) чувствительны в ИК-области спектра и позволяют измерять более низкие температуры (200 - 600^{0}С).

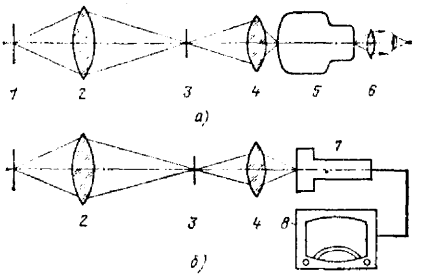


Рис. 1.9.2. Схема яркостного пирометра с ЭОП (*а*) и телевизионной системой (*б*):
1 - объект; *2* - объектив; *3* - нить лампы; *4* - оптика переноса изображения; *5* - ЭОП; *6* - окуляр; *7* - ИК-видикон; *8* - телевизор

Действие яркостного пирометра с ЭОП (рис. 1.9.2) основано на преобразовании испускаемых объектом и эталонной лампой ИК-лучей в видимое излучение с помощью ЭОП или видикона. Яркости визуализированных изображений объекта и спирали пирометрической лампы уравнивают обычным способом.

Принцип действия фотоэлектрических яркостных пирометров основан на применении фотопреобразователей для измерения монохроматической яркости объекта или ее сравнения с яркостью эталона. Эти приборы позволяют автоматизировать и ускорить процесс измерения и исключить субъективные ошибки измерения. Нижний температурный предел пирометров определяется спектральной чувствительностью приемника излучения.

Своеобразной модификацией яркостных пирометров являются фотографические пирометры, фиксирующие изображение объекта и эталона яркости на фотопленке и осуществляющие их фотометрическое сравнение визуальным методом или с помощью денситометров.

Преимущество этих приборов - возможность регистрации температурных полей объектов большого размера с высокой пространственной и временной разрешающей способностью.

Действие **цветовых пирометров** основано на сравнении интенсивности излучения объекта в двух спектральных диапазонах. Логарифм их отношения обратно пропорционален цветовой температуре объекта. Оптическая схема цветового пирометра обычно содержит два цветных фильтра, через которые с помощью модулятора поток излучения от объекта попеременно направляется на фотоприемник. Функциональная схема цветового пирометра показана на рис. 1.9.3.

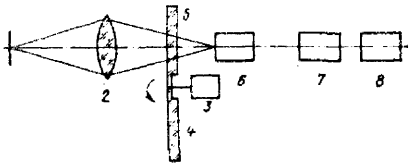


Рис. 1.9.3. Схема цветового пирометра:
1 - объект; *2* - объектив; *3* - модулятор; *4*, *5* - селективные светофильтры; *6* - приемник излучения; *7* - электронная схема; *8* - регистратор

Диапазон измеряемых температур 1000 ÷ 2500^{0}С.

Метод цветовой пирометрии может быть распространен на инфракрасную область спектра при соответствующем подборе приемника излучения и материалов проекционной оптики и светофильтров.

Нижний предел температурного диапазона может быть расширен при этом до 20 - 50^{0}С.

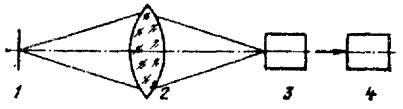


Рис. 1.9.4. Схема радиационного пирометра:
1 - объект; *2* - объектив; *3* - приемник; 4 - индикатор

Действие **радиационных пирометров** (рис. 1.9.4) основано на использовании закона Стефана-Больцмана, выражающего зависимость излучаемой телом энергии от его температуры.

Приборы этого типа широко используют для измерения низких температур (-20 ÷ 100^{0}С). Приемниками излучения служат термопары или болометры. Часто применяют термобатареи (последовательно соединенные термопары). Находят применение пироэлектрические детекторы.

Для измерения температуры слабонагретых тел применяют объективы из материалов, прозрачных в соответствующей спектральной области. Стекло используют для измерения температур от 900^{0}С. Кварц применяют для регистрации температур более 400^{0}С. Объективы из фтористого лития или фтористого бария позволяют фиксировать температуры в диапазоне 20 - 500^{0}С. Часто используют также зеркальную оптику.

Существенное влияние на показания радиационного пирометра оказывает состояние поверхности контролируемого объекта, поскольку оно связано с его излучательной способностью.

Для определения распределения температуры по поверхности объекта вдоль заданной линии развертки применяют радиационные пирометры с оптико-механической системой линейного сканирования (термопрофили).

Для визуализации тепловых полей применяют **тепловизоры**.

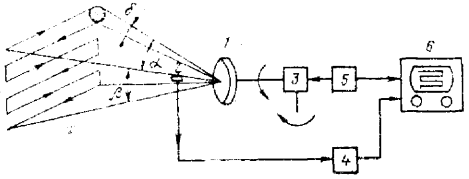


Рис. 1.9.5. Структурная схема тепловизора

Структурная схема тепловизора (рис. 1.9.5) с оптико-механическим сканированием включает приемную оптическую систему *1*, детектор ИК-лучей *2*, сканирующую систему *3*, обеспечивающую последовательный просмотр объекта по заданному закону, усилитель *4*, систему развертки и синхронизации *5* и кинескоп *6*.

Принцип действия тепловизора заключается в просмотре по заданному закону движения поверхности объекта узким оптическим лучом с угловым размером δ, сформированным системой объектив - приемник. Обзор происходит в пределах угла поля зрения (углы α и β) за время T, которое принято называть временем кадра. Угол δ носит название мгновенного угла поля зрения.

Тепловизор позволяет выделять на тепловом изображении объекта области одинаковых температур с помощью изотерм, высвечивающихся на кинескопе. В нижней части кадра обычно формируется серая шкала, которая используется для измерения температуры. При этом яркость отдельных участков изображения объекта сравнивают с яркостью элементов

шкалы, для которой при калибровке прибора определяют температурный перепад, соответствующий переходу от белого до черного.

Характеристики тепловизоров

Чувствительность по температуре, ^{0}C, не ниже	0,1 - 0,3
Мгновенное поле зрения, мин, не более	1 - 3
Поле обзора	5 - 60^0
Диапазон измеряемых температур, ^{0}C	0 - 1000
Частота кадров, кадр/с	25 - 50
Число строк в кадре	до 512
Число элементов в кадре	до 512×712

Приемник ИК-излучения обычно охлаждают жидким азотом или термоэлектрическим микрохолодильником.

Применение в тепловизорах узкополосных фильтров, прозрачных на длине волны 3,39 мкм, где имеется окно прозрачности газа CO_2, позволяет фиксировать ИК-излучение через пламя. Наличие линзовой оптики позволяет легко изменять увеличение системы сменой объективов.

Тепловизоры обычно имеют черно-белые или цветные видеомониторы и устройства обработки термограмм (выделение изотерм, обращение контраста, представление в псевдоцветах, термопрофильное квазиобъемное представление теплового поля и т. п.).

Термограммы регистрируют с помощью фотокамер, видеомагнитофонов, систем цифровой памяти, работающими в комплексе с мини-ЭВМ.

Перспектива развития телевизионных систем заключается в создании спектральных цифровых камер, в том числе стереоскопических, а также разработке радиотепловизионных приборов для диапазона длин 0,1 - 1 мм, в котором многие диэлектрики прозрачны, и представляется возможность измерять их внутреннюю температуру.

Тепловизионные микроскопы предназначены в основном для обследования и измерения тепловых полей изделий микроэлектроники, при этом достигается линейное разрешение 60 - 20 мкм, температурное разрешение 0,5 - 3^{0}C.

Трубки с пироэлектрической мишенью - пирокоды. Конструкция пирокона подобна конструкции стандартного видикона. Основные отличия - использование окна, прозрачного для ИК-излучения, и пироэлектрического материала мишени. Тепловое излучение объекта фокусируется объективом на мишень. В результате поглощения излучения на поверхности мишени формируется потенциальный рельеф мишени, соответствующий распределению температур. Сигнал, возникающий при считывании сфокусированным электронным пучком распределения потенциала (заряда), пропорционален распределению интенсивности падающего на мишень излучения.

Преобразование лучистой энергии в электрический заряд пироэлектрической мишени не имеет принципиальных ограничений по длине волны. Это является большим преимуществом пирокона. Поскольку пироэлектрический эффект зависит от измерения температуры в каждой точке мишени, пирокон не воспроизводит теплового изображения стационарного объекта, а передает только динамику тепловой картины. Поэтому ИК-излучение, вызывающее изменение температуры пироэлектрической мишени, должно быть переменным. Для этого существуют два наиболее приемлемых способа модуляции лучистого потока во времени: 1) обтюрация стационарного потока с помощью колеблющегося или вращающегося затвора перед входным окном; 2) медленное перемещение камеры, чтобы сигнал, получаемый любым элементом мишени, не оставался постоянным.

Достоинством тепловизионных приборов с пироконом является возможность создания компактных малогабаритных приборов.

Матричные тепловизоры. В отличие от тепловизионных систем с одноэлементным фотоприемником и последовательным сканированием в тепловизоре с матричным приемником каждый приемный элемент длительное время "смотрит" на объект. Это время, определяемое периодом кадровой развертки тепловизора, гораздо больше длительности визирования одного элемента объекта в тепловизоре с одноэлементным фотоприемником (при одной и той же частоте кадров).

Матричное ФПУ может обеспечить более высокую температурную чувствительность тепловизора, чем одноэлементный фотоприемник.

1.9.2.3. МЕТОДЫ АКТИВНОЙ ОПТИЧЕСКОЙ ТЕРМОМЕТРИИ (АОТ)

Эти методы основаны на использовании в качестве термометрического свойства изменения характеристик оптического излучения (амплитуда, частота, фаза, поляризация) после его взаимодействия с объектом контроля. Методы особенно эффективны для измерения температуры газообразных и жидких сред в объектах новой техники (исследование процессов горения в реактивных двигателях, топках мощных тепловых станций, диагностика плазмы, анализ активных элементов мощных лазеров, изучение взрывных процессов, дистанционное зондирование атмосферы и т. д.).

Методы АОТ можно разделить на *интегральные и локальные*. В первом случае получают информацию о среднем по ходу просвечивающего луча значении температуры среды (методы теневые, интерференционные, спектрального поглощения и т.д.). Методы локаль-

ной термометрии основаны на фокусировке излучения в любую точку среды и измерении соответствующих характеристик рассеянного излучения (методы упругого и комбинационного рассеяния, активная спектроскопия когерентного рассеяния (АСКР) и др.).

Теневые и интерференционные методы обладают такими достоинствами, как бесконтактность, информативность (многоканальная регистрация, высокая локальность и чувствительность), наглядностью (при визуализации полей температур), безынерционность, что делает их незаменимыми для использования быстропротекающих нестационарных процессов в прозрачных жидкостях и газах.

Измерение температурных полей в твердых телах в общих чертах аналогично описанной выше схеме, однако в ряде случаев дополнительно необходимо учитывать фотоупругие эффекты (двулучепреломление, оптическая анизотропия), возникающие в жестко закрепленных стержнях. Однако и в этом случае теневые и интерференционные методы являются единственным средством измерения и анализа динамики разогрева этих и подобных им объектов.

Расшифровка интерферограмм и тенеграмм облегчается, если с помощью какого-либо традиционного датчика (пирометр, термопара и т.п.) можно определить температуру в какой-либо точке поля измерений.

1.9.2.4. МЕТОДЫ ЛАЗЕРНОЙ ТЕРМОМЕТРИИ (МЛТ)

Лазеры могут применяться в описанных выше теневых и интерференционных (в т.ч. голографических) методах, где их применение позволило существенно улучшить характеристики процесса термометрии в реальном времени.

Однако уникальные свойства лазерного излучения (яркость, монохроматичность, когерентность, направленность) позволили реализовать и принципиально новые методы термометрии.

Метод термометрии на основе *комбинационного* (рамановского) *рассеяния света* (КРС), то есть неупругого столкновения фотонов с молекулами вещества и соответствующего смещения спектра рассеянного излучения относительно частоты излучения лазера. Температура (вращательная или колебательная) каждой двухатомной или многоатомной фракции в газовой смеси определяется по интенсивности каждой компоненты рассеянного света. Рабочий диапазон температур, измеряемой с помощью КРС от 100 К (*вращательные спектры КРС*) до 6000 К и более (*колебательные спектры КРС*). Однако интенсивность спектра КРС очень низка, что требует применения мощных лазеров.

Резкого усиления сигналов КРС добиваются, используя лазер с частотой излучения, соответствующей полосе поглощения вещества.

Для этой разновидности резонансного КРС (РКРС) используют лазеры с перестройкой частоты излучения (например, на красителях). Типовая схема термометра на основе РКРС для исследования процесса горения состоит из лазера мощностью порядка 1 - 10 Вт, перестраиваемого по частоте (в диапазоне длин волн 0,4 - 0,8 мкм), фокусирующей оптики и фотоумножителя с набором интерференционных фильтров. Выбор частот обусловлен использованием в качестве "информационных" молекул азота, число которых в пламени обычно велико, а спектр поглощения не зависит от температуры. Характерно, что используется односторонний доступ к объекту (регистрируется излучение, рассеянное назад).

Особенно перспективен метод *когерентного антистоксова рассеяния света* (КАРС). Он основан на использовании двух синхронно перестраиваемых по частоте лазеров, фокусируемых в одну точку объекта. В момент совпадения разности частот лазеров с резонансной частотой молекул газа освещенной объем газа начинает излучать когерентное и узко направленное излучение, интенсивность которого существенно превышает сигналы КРС. В анализируемый объем можно дополнительно направить излучение третьего лазера, тогда в спектре рассеянного сигнала появится антистоксова компонента, интенсивность которой превышает сигнал КРС в 10^6 раз.

1.9.2.5. ЛАЗЕРНО-АКУСТИЧЕСКАЯ ТЕРМОМЕТРИЯ (ЛАТ)

Основана на визуализации акустических волн с помощью стробоскопического освещения лазером среды. Длина волны лазера может быть любой (например, зеленой $\lambda = 0{,}51$ мкм) и выбирается из условия минимизации оптических фоновых помех.

Акустические колебания вдоль лазера фотографируют (или визуализируют телевизионным или другим способом) и измеряют непосредственно длину волн давления, которая связана с температурой через соотношение

$$V_T = V_0 + a(T - T_0),$$

где V_T и V_0 - скорости звука при температурах T и T_0; $V = \lambda f$; λ- длина волны, мм; f - частота, Гц.

Для температур 1000 - 2000 К длина волны звука меняется в интервале 0,5 - 1 м, что не вызывает технических трудностей при измерении ее численного значения.

Погрешность метода порядка 5 %.

Перспективны для визуализации температурных полей и такие современные способы, как томографический, голографический, нелинейно-оптический и некоторые другие, находящиеся в стадии исследований.

1.9.2.6. АКУСТИЧЕСКИЕ ТЕРМОМЕТРЫ

Метод акустической термометрии основан на зависимости скорости звука от температуры. Для идеального газа фазовая скорость распространения звука не зависит от амплитуды и частоты колебаний. Для точных измерений важен учет влажности воздуха.

Наибольшие возможности для термометрии дают *ультразвуковые* (УЗ) *колебания*. Скорость УЗ измеряется стандартным методом. Температурная зависимость скорости УЗ определяется выражением

$$d\tau/dT = -L/2cT,$$

где L - расстояние, проходимое УЗ; c - скорость; τ - время распространения.

При изменении температуры на 1 К τ изменяется на 1 - 10 мкс, что вполне измеримо. В импульсных УЗ-термометрах излучатель и приемник обычно совмещены. Возможна реализация и фазовых УЗ-термометров (УЗ) на непрерывном УЗ-измерении. Достоинство УЗТ - практическая безынерционность и отсутствие термометрического тела, непосредственно воспринимающего изменение температуры и, как следствие, вносящего погрешности в измерения.

УЗТ широко применяется в метеорологии, при измерении газовых сред, термометрии слитков и т.п.

Ультразвуковые частотные термометры основаны на использовании поверхностных акустических волн (ПАВ), т.е. упругие волны распространяются вдоль свободной границы поверхности тела или вдоль его границы с другими средами (жидкими, твердыми). ПАВ, поперечные по отношению к распространению, могут быть поляризованы перпендикулярно к поверхности (волны Рэлея) и параллельно (волны Лева). Датчики на ПАВ представляют собой пьезокристалл, на который методом фотолитографии наносятся (так называемые встречно-штыревые антенны) металлические электроды периодической структуры, геометрия которой выбирается в зависимости от длины волны и структуры ПАВ. Электроды служат антеннами, преобразующими электромагнитный сигнал в акустический или наоборот.

Основным термометрическим свойством датчика ПАВ является скорость распространения акустической волны. Такой датчик может одновременно измерять температуру и давление (или влажность) среды, то есть реализовать многопараметровые, комплексные измерения. Для этого достаточно, например, выполнить его в виде тонкой мембраны из пьезоэлектрика, на обеих сторонах которых наносятся антенны, выходы которых разделены.

Область измеряемых температур от -20^{0}С до +200^{0}С, чувствительность порядка 0,1 - 0,5^{0}С, инерционность порядка 1 с.

1.9.2.7. МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Для обеспечения единства измерений разработаны поверочные схемы, в которых указаны методы градуировки и поверки приборов, а также их предельные значения и допустимые погрешности.

В качестве эталонных интерполяционных приборов используют платиновый термометр сопротивления (-180^{0}С ... +630^{0}С) и платинородий-платиновые термопары (630 ... 1063^{0}С).

Эталонными приборами в области температур более 1063^{0}С (точка затвердевания золота) служат температурные лампы, градуированные по эталонному АЧТ (T = 1063^{0}С) на яркостные температуры с помощью спектропирометрических установок.

Датчики пирометрических приборов (стеклянные жидкостные термометры, термопары, яркостные, цветовые и радиационные пирометры и др.) проверяют с помощью устройств воспроизведения температуры. При этом используют два метода поверки по постоянным точкам плавления и кипения химически чистых веществ и по показаниям образцовых приборов.

Показывающие и самопишущие приборы, входящие в состав термометрической аппаратуры (логометры, электронные потенциометры), проверяют отдельно методом сравнения с показаниями электроизмерительных приборов.

Преобразователи температуры проверяют методом сравнения с показаниями образцовых приборов с помощью специальных устройств для получения заданной температуры (термостатов, криостатов, электропечей, температурных ламп).

Для калибровки и испытания тепловизионной и радиометрической аппаратуры широко применяют излучатели АЧТ ("абсолютно черное тело") различных типов.

Наиболее распространены излучатели АЧТ со сферической, цилиндрической и конической формой излучающих полостей.

Рядом фирм выпускаются излучатели АЧТ с плоской черненой излучающей поверхностью больших размеров (до 400×400 мм^2).

Для изменения коэффициента черноты слабонагретых тел можно использовать терморадиометр, позволяющий определять его значения в пределах 0,02 - 1,0 и в спектральном интервале (4 - 40 мкм).

Глава 1.10

ИЗМЕРЕНИЕ ДАВЛЕНИЯ

1.10.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Давление - физическая величина, характеризующая интенсивность нормальных (перпендикулярных) к поверхности сил, с которыми одно тело действует на другое. При равномерном распределении сил вдоль поверхности давление равно

$$p = F / s,$$

где F - сумма приложенных перпендикулярно к ней сил.

При неравномерном распределении сил это равенство определяет среднее давление на данную площадку. Если $s \to 0$, то говорят о давлении в точке.

Давление измеряют манометрами, барометрами, вакуумметрами, различными датчиками. Единица давления в международной системе единиц (СИ) - 1 Па (Паскаль); 1 Па = Н/м^2.

Существуют внесистемные единицы - физическая атмосфера, техническая атмосфера, бар, миллиметры водяного и ртутного столбов (торр):
1 бар = 10^5 Н/м^2;
1 мм рт. ст.= 1,00000014 торр= 132,3224 Н/м^2;
1 ат = 1 кгс/см^2;
1 атм = 1,033227 ат = 760 торр;
1 мм водн. ст. = 0,00011 кгс/см^2.

В США применяется еще единица
1 psi = 1 фунт / дюйм^2 = 0,070306682 кгс /см^2, в основном для измерения избыточного (по отношению к атмосферному) давления.

В любой точке покоящейся жидкости или газа давление по всем направлениям одинаково. Это справедливо и для идеальных, лишенных трения потоков жидкости или газа. Для вязкой жидкости давление в точке есть среднее давление по трем взаимно перпендикулярным направлениям. Давление в газах связано с передачей импульса при столкновении находящихся в тепловом движении молекул друг с другом или с поверхностью сосуда, в котором заключен газ. Давление в газе пропорционально его температуре (то есть кинетической энергии его частиц).

Диапазон давлений, встречающихся в технике, чрезвычайно широк, от 10^{-7} до 10^{10} Н/м^2. Обычно различают области глубокого вакуума (10^{-7} - 10^{-4} Н/м^2), глубокого технического вакуума (10^{-4} - 10^{-1} Н/м^2), вакуума (10^{-1} - 10^4 Н/м^2), разрежения (10^3 - 10^5 Н/м^2), давления умеренного (10^5 - 10^6 Н/м^2), среднего (10^6 - 10^7 Н/м^2), высокого (10^7 - 10^9 Н/м^2) и сверхвысокого (10^9 - 10^{10} Н/м^2).

Нормальное давление 760 мм рт. ст. = = 100565 Н/м^2 = 1005,65 ГПа = 0,1 МПа (1 МПа = 10^4 ГПа).

Давление может быть определено непосредственно измерением силы, действующей на данную поверхность. На этом методе основаны, например, грузопоршневые манометры, в которых сила, действующая на поршень с известной площадью, уравновешивается гирями (или действием сжатой пружины). Аналогичны по принципу действия жидкостные манометры, в которых измеряемое давление определяется по высоте и удельной массе столба жидкости.

При измерениях высоких давлений в качестве образцовых мер могут использоваться точки затвердевания (или фазового перехода) различных веществ.

Помимо упомянутых выше прямых методов измерения давления, существует много косвенных. Так, механические методы основаны на определении упругого прогиба чувствительных элементов специальной формы под действием контролируемого давления (анероиды, сильфонные манометры, трубка Бурдона и др.).

В области сверхвысоких взрывных давлений мерой их максимального значения может быть пластическая деформация чувствительного элемента. Для определения сверхвысоких давлений используют эффекты изменения параметров кристаллической решетки (определяемые рентгеноструктурным анализом), увеличения плотности ряда материалов (стекла и др.), сдвига частоты люминесценции рубина и т.д.

1.10.2. ПРИБОРЫ ИЗМЕРЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ

Жидкостные манометры и барометры применяются в основном для измерения низких давлений (близкого к нормальному атмосферному) или для контроля небольших разностей высоких статических давлений. Основной их элемент - стеклянная трубка (обычно V-образной формы, расположенная вертикально), заполненная (частично) рабочей жидкостью. Изменение давления в одном из плеч трубки вызывает пропорциональное изменение уровня жидкости в другом, оцениваемое с помощью оптических или иных отсчетных устройств. В качестве рабочих (запорных) жидкостей применяют спирт, воду, ртуть, силиконовые (кремнийорганические) соединения.

Преимущества этих традиционных систем - простота, хорошая помехозащищенность, искробезопасность. Недостаток - отсутствие электрического сигнала на выходе.

Грузовые и поршневые манометры измеряют усилие на поршне, перемещающемся в полом цилиндре. Уравновешивается это усилие гирями (грузовые манометры), пружиной, электромагнитной силой. Основная область

применения - средние давления. Разновидность приборов данного класса - микроманометры колокольного типа. В них чувствительный элемент (ЧЭ) выполнен в виде опущенного в воду колокола. При изменении давления ЧЭ перемещается, пока не достигается равновесие сил, действующих на него (собственная масса, архимедова сила и измеряемое давление).

Пружинные манометры - наиболее распространенные средства измерения давления. Мера давления - упругое перемещение манометрической пружины, передаваемое на стрелочный отсчетный механизм. В анероидных и пластинчатых манометрах в качестве упругого ЧЭ применяют профилированные мембраны, представляющие герметичную коробку. Применяют также трубчатые пружины, открытый конец которых укреплен в штуцере, а второй (запаянный) конец свободно перемещается под действием давления контролируемой среды.

Плоские мембраны и трубчатые пружины изготовляют из латуни, спецсталей, медно-бериллиевых сплавов, иногда из особых марок сталей, устойчивых к агрессивным средам.

Пружинные манометры, как это следует из принципа их действия, измеряют разность между контролируемым и атмосферным давлениями.

Для измерения абсолютного давления ЧЭ надо поместить в вакуум.

Другая проблема - температурная компенсация погрешностей из-за изменений модуля упругости материала трубок, например, с помощью биметаллических конструкций.

Пружинные манометры на базе сильфонов (из стали, медно-бериллиевой бронзы с покрытиями и т.п.) отличаются большим динамическим диапазоном измерения, стабильностью показаний,. большим развиваемым усилием.

Термокондуктометрические вакуумметры основаны на зависимости теплопроводности газов от давления при низких его уровнях, когда длина свободного пробега молекул становится соизмеримой с элементами ЧЭ манометра. Изменение давления газа (и его теплопроводности) вызывает, например, изменение температуры ЧЭ из нагреваемой током проволоки, которое измеряется с помощью мостовой схемы.

Давление является широко распространенным параметром диагностирования машин. Для измерения разности давлений и преобразования абсолютного давления в стандартный электрический сигнал наибольшее распространение получили измерительные преобразователи, основанные на методе силовой компенсации, тензометрическом и емкостном методах. Другие методы измерения (магнитная компенсация, виброчастотный) используются реже.

Метод силовой компенсации заключается в компенсации усилия, развиваемого на чувствительном элементе измерительного преобразователя под действием измеряемого параметра элементом обратной связи. Энергия на элемент обратной связи поступает от внешнего источника питания через выходной усилитель пропорционально измеряемому параметру. Компенсация усилия на чувствительном элементе позволяет уменьшить его деформацию и тем самым существенно повысить его метрологические характеристики.

Все большее широкое распространение получают **тензорезисторные измерительные преобразователи**, обладающие высокими метрологическими и эксплуатационными характеристиками.

Непосредственное преобразование деформации упругого чувствительного элемента в электрический сигнал, осуществляемое тензочувствительными элементами, дает возможность значительно уменьшить габаритные размеры приборов, повысить их точность, надежность, долговечность, быстродействие, стойкость к внешним дестабилизирующим воздействиям. Принцип действия этих приборов основан на преобразовании деформации упругих элементов в изменение сопротивления тензорезисторов. Тензорезистор воспринимает деформацию либо от манометрического упругого элемента, либо от консольной балки, работающей на изгиб, либо от стержня, работающего на сжатие под действием усилия, возникающего в чувствительном элементе при воздействии измеряемого параметра. Полупроводниковые тензорезисторы в отличие от металлических проволочных и фольговых тензорезисторов обладают на два порядка большей чувствительностью. Для повышения стабильности датчиков применяют диффузионные и эпитаксиальные тензорезисторы.

В кремниевую монокристаллическую подложку p- или n-типа проводимости, защищенную маской моноксида кремния, проводят диффузию примесей соответственно n- или p-типа проводимости и получают резистор требуемых форм и геометрии в виде диффузионного слоя. В том месте подложки, где концентрация диффундирующих примесей равна концентрации примесей подложки,. образуется p - n -переход, который изолирует резистор от подложки. Если же затем в соответствующих местах резистора нанести металлические контакты, между которыми параллельно плоскости p - n -перехода пропускать ток, то собственное сопротивление резистора будет зависеть от величины и вида деформации подложки. Такой тензорезистор называют *планарным диффузионным*. Если на кремниевой монокрис-

таллической подложке одного типа проводимости нарастить эпитаксиальный слой (напылить тонкую пленку другого типа проводимости), в которой травлением образовать резистор требуемых форм и геометрии с металлическими контактами, то получают мезаструктурный эпитаксиальный тензорезистор.

Диффузионные и эпитаксиальные тензорезисторы в отличие от наклеиваемых полупроводниковых тензорезисторов позволяют создавать монокристаллический упругий элемент с высокими метрологическими характеристиками (например, кремний деформируется упруго без гистерезиса и ползучести вплоть до температуры 600^0С, причем максимальное значение упругой деформации достигнет 2,6 %). Между рабочим телом тензорезистора и подложкой отсутствует клеевой слой, что:

1) снижает число преобразований в измерительной цепи деформация - электрический выходной сигнал и тем самым повышает точность измерений;

2) позволяет полностью передавать рабочему телу тензорезистора возникающие в подложке деформации, поскольку связь между рабочим телом тензорезистора и подложкой атомарная и идеально упругая;

3) полностью исчезают гистерезис и ползучесть, присущие клеевому слою.

Диффузионные и эпитаксиальные тензорезисторы дают возможность получить преобразователи с весьма малой базой - до сотен микрометров. В качестве материалов их подложки используют кремний и сапфир.

Их достоинствами являются: искробезопасное исполнение с повышенным уровнем взрывозащиты, коррозионная стойкость в различных агрессивных средах, виброустойчивость, пыле- и водозащищенность, высокие метрологические, динамические характеристики и надежность, малые габаритные размеры и масса; стандартный выходной сигнал в виде силы постоянного электрического тока. Подобные приборы могут работать в различных климатических условиях.

Принцип действия *емкостных преобразователей* основан на изменении емкости конденсатора, образованного проводящей поверхностью изолированного электрода и поверхностью чувствительного элемента при воздействии на последний измеряемого давления. Изменение емкости с помощью электронной схемы преобразуется в унифицированный электрический сигнал. Емкостные преобразователи выполняют в виде плоского или сферического конденсатора. Чувствительным элементом, воспринимающим давление, чаще всего является мембрана, которая либо сама является частью конденсатора, либо непосредственно соединена с обкладкой конденсатора, например штоком.

Зависимость величины емкости от давления в емкостных преобразователях носит нелинейный характер. Уменьшение нелинейности достигается благодаря введению в зазор конденсатора специального диэлектрика, что повышает чувствительность преобразователя и позволяет работать при меньшем ходе мембраны, а также с помощью электронной схемы с таким коэффициентом преобразования, что суммарный коэффициент преобразования всей системы получается достаточно линейным.

К преимуществам емкостных преобразователей следует отнести высокую чувствительность и хорошие динамические свойства, высокую прочность (порядка 0,25 %) и сравнительно малые габаритные размеры и массу.

Специфической областью применения емкостных преобразователей является измерение низких давлений, а также давления в быстроменяющихся процессах.

Метод магнитной компенсации заключается в преобразовании перемещения постоянного магнита, жестко связанного с чувствительным элементом, в изменение магнитного потока в сердечнике магнитомодуляционного преобразователя. Появляющийся при этом сигнал рассогласования управляет выходным усилителем, который, в свою очередь, выдает выходной сигнал постоянного тока в линию дистанционной передачи и параллельно в обмотку обратной связи. Последняя создает магнитный поток обратной связи для компенсации входного управляющего воздействия. Измерительные преобразователи, основанные на компенсации магнитных потоков, отличаются малой чувствительностью к вибрации и высокой надежностью работы в экстремальных условиях.

Виброчастотный метод измерения основан на принципе возникновения колебательных процессов в динамических системах, содержащих инерционный элемент, способный накапливать энергию (индуктивность, массу), и элемент, накапливающий потенциальную энергию (емкость, пружину). В данных преобразователях упругий чувствительный элемент, например тонкостенная труба или натянутая струна, включается в резонансный контур. Колебания упругого элемента на резонансной частоте определяют частоту колебаний контура. Изменение резонансной частоты упругого элемента, а следовательно, и контура под влиянием изменения давления есть мера измеряемого давления.

Для контроля и автоматизации технологических процессов в металлической, нефтяной, нефтехимической, химической и других отраслях промышленности наряду с электрическими и электронными датчиками широкое распространение находят пневматические измерительные преобразователи абсолютного давления и перепада давления.

Наиболее широкое применение пневматические измерительные преобразователи нашли во взрыво- и пожароопасных производствах, где применение электрических приборов в обычном исполнении по требованиям техники безопасности недопустимо. Используют пневматические датчики, основанные на принципе силовой или частичной силовой компенсации, а также перемещения чувствительного элемента. Пневматические измерительные преобразователи выпускают с единым диапазоном выходного сигнала 20 - 100 кПа при давлении питания 140 кПа.

Пределы измерения пневматических измерительных преобразователей перепада давления находятся в диапазоне от 0 - $2{,}1 \cdot 10^5$ до 0 - 10^7 кПа, абсолютного давления от 0 - $1{,}2 \cdot 10^4$ до 0 - $7 \cdot 10^7$ кПа. Точность измерения до ±0,25 %.

Измерительные преобразователи, основанные на принципе силовой компенсации, состоят в основном из трех блоков: измерительного узла, силового преобразователя и усилителя.

Принцип силовой компенсации заключается в том, что измеряемый параметр, воздействуя на чувствительный элемент измерительного блока, преобразуется в пропорциональное ему усилие, которое через рычажную систему силового преобразователя уравновешивается усилием элемента обратной связи. При изменении измеряемого параметра происходит незначительное перемещение рычажной системы и связанного с ней управляющего органа индикатора рассогласования. Последний преобразует перемещение в управляющий сигнал, который поступает на вход усилителя. Выходной сигнал усилителя подается в линию дистанционной передачи и одновременно в элемент обратной связи, где преобразуется в пропорциональное усилие. Мерой измеряемого давления является величина выходного сигнала датчика, которая необходима для создания уравновешивающего усилия обратной связи.

Принцип частичной силовой компенсации отличается тем, что перемещающийся чувствительный элемент создает на дополнительном упругом элементе усилие, которое преобразуется в пневматический выходной сигнал с помощью преобразователя, работающего по принципу силовой компенсации. Таким образом, усилием обратной связи уравновешивается лишь часть усилия, развиваемого чувствительным элементом под действием измеряемого параметра.

Датчики с силовой компенсацией имеют высокую точность измерения за счет глубокой отрицательной обратной связи, охватывающей всю схему измерения, включая чувствительный элемент. Они обладают повышенной чувствительностью, возможностью охвата нескольких пределов измерения без замены деталей и узлов и высокой степенью конструктивной унификации.

Пневматические измерительные преобразователи, использующие преобразование перемещения чувствительного элемента, основаны на принципе, когда измеряемый перепад давления, воздействуя на чувствительный элемент измерительного блока, вызывает перемещение связанного с ним управляющего органа (заслонки) относительно сопла. Это приводит к изменению давления в линии сопла, а следовательно, и на выходе усилителя, управляемого этим давлением. Изменение давления на выходе усилителя вызывает перемещение элемента обратной связи и связанного с ним сопла до тех пор, пока не наступит положение равновесия. В качестве чувствительного элемента используют сильфонный элемент, обеспечивающий высокую точность преобразования разности давлений в перемещение.

Световодные датчики давления. С их помощью можно создать ЧЭ, отличающиеся одновременно высокой чувствительностью, минимальными размерами, малой инерционностью, большим динамическим диапазоном, отсутствием гальванической связи с объектом, устойчивостью к агрессивным средам, возможностью эффективного преобразования пропорционального давления оптического сигнала в электрический с помощью современных оптоэлектронных преобразователей.

В существующих манометрах эти требования удовлетворяются не полностью. Так, жидкостные манометры имеют высокую чувствительность (до 0,02 Па), но пригодны лишь для оценки статических давлений, сравнительно громоздки. Мембранные тензопреобразователи имеют токоподводы, значительные характерные размеры (6 + 10 мм).

Миниатюрные пьезопреобразователи (∅ 1 мм) имеют невысокую чувствительность, работают в основном в области средних давлений ($\leq 10^5$ Па), не пригодны для работы на частотах ниже 5 Гц, отличаются сильной температурной погрешностью.

Емкостные преобразователи с ЧЭ в виде тонкой металлической мембраны, используемой в качестве одной из обкладок динамического конденсатора (∅ 5 + 6 мм), имеют высокую чувствительность и хорошие динамические характеристики, однако требуют частотной модуляции сигнала, сложных схем обработки сигнала. Понятно, что нужна и гальваническая связь с объектом.

В манометрических датчиках на основе световодов ЧЭ выполняется обычно в виде миниатюрной (∅ 1 мм) гибкой мембраны. Датчик имеет два (или более) световодов. Один из них транспортирует свет от внешнего источника к мембране. После отражения от нее свет поступает в другой световод и направляется к фотодиоду. Количество отражен-

ного в световод фотоприемного канала света пропорционально расстоянию между ним и мембраной и меняется в соответствии с ее прогибом под действием внешнего давления. Подобные датчики применяются в современной промышленности, в том числе для измерения быстрых пульсаций давления.

В световодных датчиках для контроля сравнительно больших давлений обычно используется эффект возникновения двойного лучепреломления в фотоупругих материалах под действием давления. В них ЧЭ располагается между двумя световодами, на которых установлены скрещенные поляроиды. При вращении плоскости поляризации в ЧЭ (кристалл кварца и т.п.) изменяется световой поток через него, измеряемый оптоэлектронным датчиком на внешних торцах световодов. Подобные датчики применяют, например, для измерения давления в скважинах при геофизических исследованиях и других экстремальных условиях.

Для измерения в области очень низких давлений до 10^{-3} мм рт. ст. распространение получили ионизационные манометры (ИМ). В них разрядный ток служит мерой давления. Различные модификации ИМ в основном состоят из накаленного катода, спирального или сетчатого анода и коллектора в качестве ионной ловушки. Показания такого ИМ зависят от рода газа. Обычно непосредственно измеряется давление воздуха или азота, для других газов вводятся поправки. Для повышения точности измерений иногда (для устранения десорбции ионов) устанавливают диафрагму между коллектором и источником ионов.

Глава 1.11

ИЗМЕРЕНИЕ УРОВНЯ И РАСХОДА

Уровень заполнения и расход входят в число параметров, характеризующих состояние среды. При выборе устройства для измерения уровня или расхода необходимо учитывать такие физические и химические свойства материала, как температура, абразивные свойства, вязкость, электрическая проводимость, радиоактивность, химическая агрессивность и т.д. Кроме того, следует принимать во внимание рабочие условия в резервуаре или трубопроводе и около него : давление, температуру, способ заполнения, наличие перемешивающих устройств, огнеопасность и взрывоопасность.

1.11.1. МЕТОДЫ И УСТРОЙСТВА ИЗМЕРЕНИЯ УРОВНЯ

Наиболее распространенными измерителями уровня являются устройства, в которых в качестве чувствительных элементов используются поплавки. Физический принцип основан на уравновешивании силы тяжести и выталкивающей силы, действующих на поплавок в противоположных направлениях.

В качестве поплавков применяют преимущественно полые шаровидные или цилиндрические тела, полость которых меньше плотности жидкости. Изменение плотности жидкости или условий трения в системе передачи показаний приводит к дополнительной погрешности.

В простейшем случае поплавок крепят к тросику или цепочке, перекинутым через ролик или зубчатое колесо. Измеренная величина передается механическим способом. Для обеспечения непрерывного функционирования к другому концу тросика или цепочки крепят противовес. При данном способе угол поворота ролика соответствует изменению уровня жидкости.

В большинстве случаев применяют системы электрической передачи данных. Для преобразования перемещения поплавка в электрическую величину используют потенциометры, например спиральный многооборотный потенциометр. Полученное напряжение, соответствующее уровню жидкости, передается на индикатор.

Вместо потенциометра применяют сельсин с редуктором. Электромеханическая передача представляет собой "электрический вал", так как вторичный прибор состоит из сельсина, соединенного со счетным механизмом. При вращении ротора сельсина вращается барабан счетного механизма и на индикаторе появляются цифры, указывающие уровень жидкости.

Другим методом преобразования перемещения поплавка в электрический сигнал является метод шаговых переключений. Обязательным условием для применения данного метода является относительно медленное изменение уровня жидкости. Диапазон изменения уровня делится на некоторое число ступеней. Тросик (или цепочка), на котором закреплен поплавок, перекинут при этом через шестерню. Спусковой переключатель при изменении уровня на одну ступень осуществляет кратковременное замыкание импульсивных контактов, причем повышению и понижению соответствуют отдельные контакты. Реверсивный счетчик, суммируя импульсы с учетом их знака, дает показание уровня жидкости. При "кодовом" методе каждому положению поплавка соответствует определенное сочетание положений переключателей, каждый из которых имеет свою цену деления. Затем полученная кодовая посылка преобразуется в сигнал напряжения или тока.

Способ преобразования перемещения поплавка в электрический сигнал с использованием магнитной связи основан на том, что в

поплавке находится кольцевой магнит, который взаимодействует со стержневым магнитом (рис. 1.11.1). Поплавок *1* с кольцевым магнитом *4* скользит вдоль направляющей трубки *2*, а стержневой магнит *3* перемещается вместе с ним внутри трубки. Перемещение внутреннего магнита передается наружу и преобразуется в электрический сигнал.

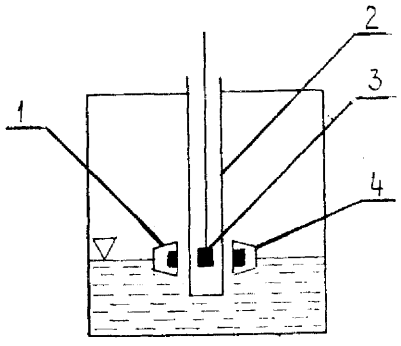


Рис. 1.11.1. Схема поплавкового уровнемера с магнитной связью

Широко распространены буйковые уровнемеры, которые известны также под названием "глазок Вейса". Трубчатый поплавок, а в емкостях высокого давления - сплошной алюминиевый стержень, свободно подвешен на пружине. В зависимости от уровня жидкости на стержень действует подъемная сила, вследствие чего пружина сжимается и укорачивается. Поплавок соединен с плунжером соленоидного дифференциально трансформаторного датчика. Плунжер перемещается в герметичной гильзе из отпущенной легированной стали с 0,2 % ванадия. Гильза расположена в системе, имеющей первичную и вторичную обмотки. В цепь вторичной обмотки включен гальванометр, ток через который определяется уровнем в резервуаре.

Электромеханический метод измерения уровня с применением отвеса используют для измерения уровня заполнения сыпучим материалом. Метод основан на использовании отвеса, опускающегося на тросике до тех пор, пока не изменится натяжение тросика в момент его касания с поверхностью измеряемого материала. Необходимо учитывать влияние растяжения тросика вследствие воздействия массы отвеса и массы смотанного с барабана тросика. Недостаток метода в том, что необходимо при каждом измерении поднимать и опускать отвес.

Таким образом, *электромеханические уровнемеры* предназначены для измерения уровня жидкости, отвесы - для измерения уровня сыпучих материалов. Преимущество *электромеханических уровнемеров* заключается в их относительной надежности и в возможности применения в различных условиях эксплуатации, в том числе в резервуарах высокого давления. Температура или состав жидкости не имеют значения. Большинство электромеханических уровнемеров не требует вспомогательных источников энергии, что повышает надежность. Несмотря на наличие движущихся частей, нуждающихся в постоянном техническом обслуживании, эти уровнемеры пока еще широко применяют вследствие их простоты.

Обычные механические уровнемеры не позволяют производить непрерывные измерения, если объектом измерения являются вязкие, зернистые или порошкообразные материалы. *Емкостный метод* дает такую возможность. В этом методе конденсатор образован стенкой резервуара и щупом, погруженным в его содержимое. Емкость конденсатора находится в диапазоне пикофарад, обусловливается выбором частоты.

Измерение емкости осуществляют при помощи резонансных схем или мостов переменного тока с самоуравновешиванием. Верхняя часть конденсатора заполнена воздухом, нижняя - сыпучим материалом или жидкостью. Емкость изменяется в зависимости от повышения или понижения уровня заполнения.

Точность измерения зависит от конструкции, изоляции и правильного размещения емкостного зонда. Зонд в зависимости от требуемой длины выполняют из проволочного тросика, металлического стержня или трубки. Если материал, заполняющий резервуар, обладает электропроводностью или подвержен коррозии, измерительный зонд покрывают слоем эбонита, стекла или другого материала. Применение емкостного метода измерения уровня связано со сравнительно высокими расходами, так как приходится использовать источник тока высокой частоты. Погрешность измерения 2 - 3 %. Для компенсации изменений емкости вследствие изменения электрических свойств жидкости применяют системы измерения, содержащие два зонда. Второй зонд служит в качестве компенсационного, и его устанавливают так, чтобы он всегда был полностью покрыт жидкостью.

Кондуктометрический метод измерения уровня основан на изменении силы тока. В пустом резервуаре сопротивление между двумя электродами бесконечно велико; при погружении электродов в проводящую среду сопротивление уменьшается соответственно величине проводимости. Область применения метода ограничена исключительно изменением уровня заполнения токопроводящими жидкостями.

Кондуктометрические индикаторы уровня выполняют в виде указателей предельных значений или уровнемеров, осуществляющих непрерывное измерение. Особое значение они приобретают как дистанционные измерители

уровня воды в паровых котлах. На предприятиях химической промышленности их применяют лишь в качестве указателей предельных значений.

Кондуктометрический метод требует меньших затрат, чем емкостный. Недостаток метода в том, что он ограничен измерением уровня токопроводящих жидкостей.

Гидростатический и пневматический методы пригодны для измерения уровня любых жидкостей.

Измерение уровня гидростатическим методом основано на измерении давления жидкости на дно резервуара, которое измеряется в открытых сосудах обычным или дифференциальным манометрами. В резервуарах, находящихся под давлением, уровень жидкости можно измерить только посредством дифференциального манометра. При использовании дифференциальных манометров место установки измерительного прибора не влияет на правильность индикации, если оно находится ниже уровня днища резервуара, а измерение давления осуществляется относительно давления постоянного уровня жидкости.

Высоту уровня жидкости измеряют пневматическим методом с помощью *барботирования газа*. В жидкость, уровень которой надлежит измерить, погружают трубку, в которую через небольшой дроссель непрерывно нагнетают сжатый воздух или защитный газ, например азот. Пневматическое давление, устанавливающееся в погруженной трубке за дросселем, соответствует гидростатическому давлению над концом трубки и является тем самым мерой уровня заполнения резервуара.

Преимущество гидростатического и пневматического способов заключается в том, что они обладают весьма высокой эксплуатационной надежностью. Гидростатический метод можно использовать для измерения уровня в резервуарах высокого давления. Преимущество пневматического метода в том, что измерительный механизм не находится в контакте с измеряемым материалом. Поэтому его удобно применять для измерения уровня агрессивных, сильно загрязненных, вязких и склонных к кристаллизации жидкостей.

Ультразвук можно использовать для измерения уровня как жидкостей, так и сыпучих материалов. Способ непригоден для измерения уровня жидкости, содержащей твердые частицы. Такие химические и физические свойства жидкости, как агрессивность, плотность и вязкость, играют при этом второстепенную роль. *Ультразвуковой метод* позволяет осуществлять сигнализацию уровня сыпучих материалов, а также легких хлопьевидных и содержащих воздух материалов, например стиропора, целлюлозы, мелкозернистых или порошкообразных синтетических материалов.

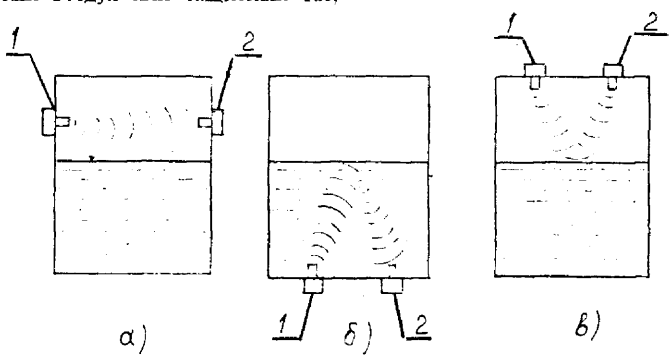


Рис. 1.11.2. Схемы ультразвуковых уровнемеров:
а - сигнализатор предельного уровня; *б* - с измерением через контролируемую среду; *в* - с измерением через воздушнопаровую среду; *1* - излучатель; *2* - приемник

Мерой уровня служат степень затухания ультразвука или время его распространения. В первом случае излучатель и приемник располагают внутри резервуара друг против друга (рис. 1.11.2, *а*). При заполнении пространства между излучателем и приемником жидкостью или сыпучим материалом изменяются условия распространения ультразвука, что проявляется в изменении амплитуды принимаемого сигнала. Однако такое устройство обеспечивает лишь сигнализацию достижения предельного уровня. Для непрерывного измерения уровня жидкости излучатель и приемник располагают либо на днище резервуара (рис. 1.11.2, *б*), либо на его крышке (рис. 1.11.2, *в*). Измерения осуществляют по *методу эхолота* - определяют время распространения ультразвука до поверхности жидкости и обратно.

Метод удобен в труднодоступных условиях, когда по конструктивным причинам невозможно воспользоваться другим способом измерения. Однако метод требует больших расходов, связанных с необходимостью применения электронного оборудования.

Измерение уровня радиоактивными изотопами целесообразно прежде всего там, где вследствие высокого давления, разреженности, агрессивности среды нельзя использовать обычные приборы. Наиболее целесообразно применять радиоактивные изотопы для измерения уровня агрессивных материалов, веществ с повышенной адгезионной способностью, в резервуарах с высокой температурой среды, в резервуарах со встроенными мешалками, в бункерах с крупнокусковыми материалами (уголь, руда), в шахтных печах, на металлургических заводах.

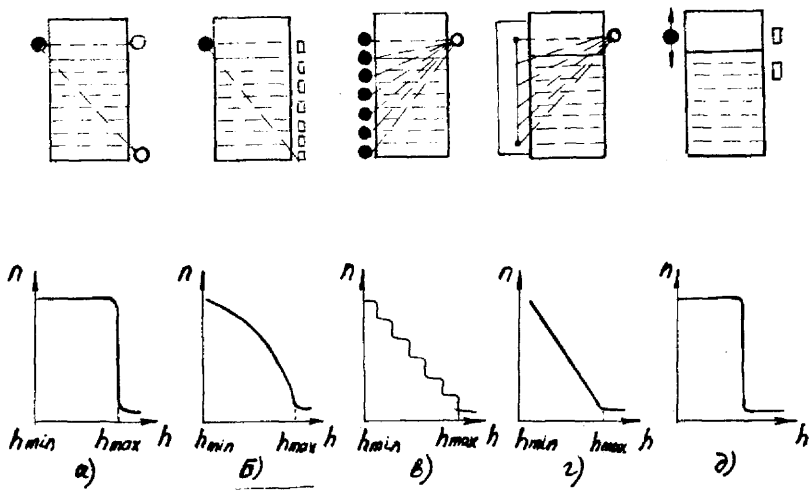


Рис. 1.11.3. Схемы расположения радиоактивных излучателей и приемников

В основе измерения радиоактивными изотопами лежит поглощение радиоактивного излучения соответствующим материалом, находящимся в резервуаре. Известны различные схемы расположения излучателей. В варианте на рис. 1.11.3, *а* использован один изотоп, испускающий два пучка лучей. Счетчики радиоактивного излучения соединены параллельно. Как видно из графика, превышение пределов h_{max} и h_{min} вызывает резкое изменение частоты повторения импульсов n. Почти непрерывная индикация уровня достигается путем размещения друг над другом нескольких излучателей, как показано на рис. 1.11.3, *в*.

В этом случае индикация носит псевдонепрерывный характер. Бесступенчатой характеристики можно достичь, если применить стержневидный препарат профессора Бертольда. Ввиду того, что мощность препарата на концах стержня усилена, превышение минимального и максимального уровня заполнения (рис. 1.11.3, *г*) выявляется особенно четко. Таким методом можно производить измерение высоты до 3 м. Вариант непрерывного измерения показан на рис. 1.11.3, *б*. Здесь счетчики радиоактивного излучения устанавливают вертикально. Благодаря расположению в ряд параллельно включенных счетчиков диапазон измерения можно увеличить приблизительно до 1,2 м. Другим решением, также пригодным для измерения высоких уровней, является метод измерения со следящим управлением (рис. 1.11.3, *д*).

Преимущество метода радиоактивных изотопов в том, что этот метод является бесконтактным. Этим методом можно измерять уровень заполнения резервуара даже в исключительно сложных условиях. Обеспечивается эксплуатационная надежность установки, ее износ и ремонтные работы невелики, что приводит к снижению расходов. Погрешность измерения около 2 %.

При реализации *термического метода* используют термопары, проволочные и полупроводниковые терморезисторы. Метод не позволяет измерять уровень химически агрессивных жидкостей, он также непригоден для измерения уровня заполнения сыпучими материалами. Дистанционный уровнемер в виде стальной водомерной трубки устанавливают снаружи резервуара и соединяют с ним по принципу сообщающихся сосудов. На наружной стенке стальной трубки размещены на различной высоте параллельно включенные термоэлементы. Из-за постоянной конденсации заполненная паром полость трубки нагревается сильнее, чем часть трубки, заполненная водой. Изменение уровня воды вызывает более сильное нагревание большего или меньшего количества термоэлементов, при этом снимаемое с них напряжение при прочих равных условиях представляет собой меру высоты заполнения резервуара.

Термический метод можно использовать также и в случае, когда жидкость, заполняющая резервуар, имеет температуру ниже температуры окружающей среды. В этом случае в резервуаре монтируют стержень с электрическим подогревом, часть которого, расположенная в жидкой среде, подвергается сильному охлаждению. Для резервуаров со сжиженными газами данный метод непригоден. Из-за термической инерционности системы метод можно применять только в резервуарах, уровень заполнения которых изменяется достаточно медленно.

Термический метод можно применять только для измерения уровня жидкостей. Хотя термопары позволяют получать лишь относительные величины, их преимущество в том, что они не нуждаются в источниках вспомогательной энергии. Терморезисторы требуют подвода энергии и их техническое обслуживание обходится дороже.

Применение *динамометров* для измерения уровня заполнения резервуаров любого типа предпочтительно в случаях заполнения резервуара агрессивным материалом или при размещении встроенного уровнемера. Метод удобен также там, где подвешивание резервуара к динамометру или его установка на динамометр не связаны с конструктивными трудностями. Он пригоден прежде всего для грубых сыпучих материалов. В принципе происходит взвешивание содержимого резервуара, в результате которого можно сделать вывод о высоте его заполнения.

Измерение уровня одним динамометром возможно лишь в том случае, если резервуар содержит жидкость. При использовании двух динамометров образование суммарной величины можно осуществить при помощи одного манометра со сдвоенным измерительным механизмом, причем один механизм воздействует на стрелку, а другой механизм вращает в противоположном направлении циферблат манометра. При использовании трех динамометров образование суммы величин следует производить электрическим путем. В этом случае возможно таким образом полностью исключить силу тяжести резервуара и трубопроводов, служащих для заполнения и опорожнения резервуара.

Преимущество уровнемеров с динамометрами в том, что в самом резервуаре нет ни одного элемента, необходимого для осуществления измерения. Поэтому целесообразно применять метод для измерения уровня агрессивных материалов. Недостаток метода - при небольшой высоте уровня точность измерения снижается; необходимо также устранять силовое воздействие подводящих трубопроводов.

В отличие от гидравлического электрический динамометр работает очень надежно и не нуждается в техническом уходе, так как не содержит движущихся деталей. Погрешность измерения электрического динамометра 0,25 %.

Метод измерения уровня *с помощью микроволн по принципу радара* основан на бесконтактном измерении расстояния от крышки резервуара до поверхности среды. Обычный диапазон измерения от 0,5 до 25 м при погрешности измерения 2,5 мм. Метод чаще всего используют для измерения уровня вязких, загрязненных, взрывоопасных и агрессивных жидкостей. Недостаток метода - необходимость значительных затрат на электронное оборудование.

Изменение уровня заполнения резервуаров можно определять с помощью *интерферометрического метода измерения расстояния*. Измеряют расстояние до поплавка или до поверхности жидкости, отражающей лазерные лучи. В качестве измерительного сигнала принимают разность фазовых углов между направленным и отраженным лазерными лучами. Измерить смещение рефлектора можно также с помощью лазерного интерферометра со счетчиком. Этим способом можно определять изменение уровня заполнения жидкостью с точностью до нескольких микрометров.

В качестве сигнализаторов могут быть использованы *вибрационные концевые выключатели*. В частности, для сыпучих материалов применяют вибрирующие подобно камертону устройства, в которых пьезоэлектрическим способом возбуждаются механические колебания в диапазоне резонансной частоты. Гашение этого колебания, возникающее при перекрытии зонда измеряемым материалом, вызывает резкое уменьшение амплитуды колебаний. Это уменьшение фиксируется индикатором.

Метод вытеснения. Если тело погрузить в жидкость, оно становится легче на величину, пропорциональную массе вытесненной им жидкости. Путем подбора соответствующей длины тела погружения, определяющего диапазон измерения, можно измерить уменьшение его силы тяжести, пропорциональное массе вытесненной жидкости, и преобразовать полученную величину в пневматический или электрический сигнал.

Установка смотрового стекла в стенку резервуара позволяет визуально определять высоту уровня. Однако если смотровые стекла повреждены или загрязнены изнутри, дефект можно устранить лишь после прекращения эксплуатации установки. Поэтому в производстве принято осуществлять *измерение уровня при помощи водомерных стекол*. В основе способа лежит принцип сообщающихся сосудов. Водомерные стекла монтируют так, чтобы их можно было отключить посредством запорных клапанов. При работе с вязкими или сильно загрязненными жидкостями их применять не рекомендуется.

1.11.2. МЕТОДЫ И УСТРОЙСТВА ИЗМЕРЕНИЯ РАСХОДА

Расходом называют количество вещества, протекающее через данное сечение трубопровода в единицу времени. Различают *объемный расход*, измеряемый в единицах объема в единицу времени, и *массовый расход*, измеряемый в единицах массы в единицу времени.

Классификация методов, применяемых для измерений объемных расходов, приведена в табл. 1.11.1. В зависимости от принципа действия объемные счетчики подразделяют на две большие группы.

1.11.1. Классификация методов для измерений объемных расходов

Метод измерения	Тип счетчика	Чувствительный элемент	Модель	Контролируемая среда
Прямое измерение объемов (объемные счетчики непосредственного действия)	Объемные счетчики с неподвижными стенками измерительных камер (опорожняющие счетчики)	Неподвижные камеры	Камера с автоматическим переключением	Жидкость
		Опрокидывающаяся камера	Опрокидывающиеся счетчики	
		Вращающиеся камеры	Барабанные счетчики	
	Объемные счетчики с перемещающимися стенками камер (вытесняющие счетчики)	Поршень Вращающийся поршень Запорная жидкость Упругий чувствительный элемент	Счетчики: однопоршневые, многопоршневые, кольцевые, с овальными шестернями, сухие газовые, мокрые газовые, дисковые	Газ
Косвенное измерение объемов (счетчики без измерительных камер)	Объемные счетчики, лопастные (турбинные)	Аксиальная турбинка Тангенциальная турбинка	Лопастные счетчики: Вольтмана, роторные, шнековые	Жидкость, жидкость + газ

1. Объемные счетчики непосредственного действия, в которых последовательно отмеряются определяемые размером и формой измерительных камер объемы контролируемой среды и с помощью счетного механизма подсчитывается число прошедших через счетчик порций. Счетчики этого типа разделяют на опорожняющиеся и вытесняющие. Опорожняющиеся счетчики имеют жесткие камеры, из которых контролируемая среда свободно вытекает. Счетчики этого типа непригодны для измерения расхода как жидкостей, так и газов.

2. Бескамерные счетчики, в которых объем определяется различными косвенными методами, например путем измерения перемещения или скорости потока, интегрированием расхода по времени. При этом необходимо учитывать плотность контролируемой среды.

Принцип действия объемных счетчиков. В объемных счетчиках опорожняющегося типа заполнение измерительных камер обеспечивается подачей контролируемой среды под небольшим давлением, а их опорожнение - опрокидыванием или автоматическим открытием выпускного клапана.

Барабанный счетчик (рис. 1.11.4) является типичным примером опрокидывающегося счетчика. Измерительная камера *2* почти целиком заполнена средой. После окончательного ее заполнения контролируемая среда через щель начинает поступать в камеры *3*, в результате чего центр тяжести системы смещается влево и барабан поворачивается по направлению стрелки. При этом измерительная кромка *4* выходит из контролируемой среды; при дальнейшем вращении среда из камеры *2* выливается через выпускное отверстие *5*. Одновременно камера *3* снова начинает наполняться. Для удаления воздуха из измерительной камеры при ее заполнении предусмотрена трубка *1*. Погрешность лучших моделей таких счетчиков не превышает 0,1 %.

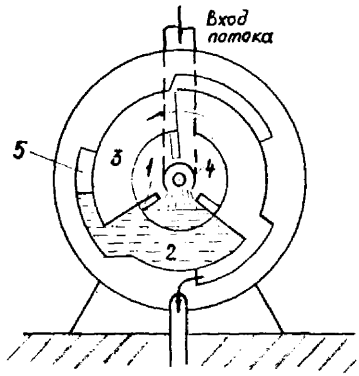


Рис. 1.11.4 Схема барабанного счетчика

В *вытесняющих счетчиках* контролируемая среда приводит в движение подвижные стенки измерительных камер. Погрешность измерения вызывается главным образом утечками между неподвижными и перемещающимися стенками измерительных камер. Существенную роль играет вязкость контролируемой среды. Счетчики этого типа применяют во всех случаях, когда точность расходомеров с дросселирующим (сужающим) устройством недостаточна. Значительным преимуществом вытесняющих счетчиков является повышенная точность при измерении пульсирующих потоков. Вследствие наличия утечек эти счетчики неприменимы для измерения малых расходов.

Известны также *расходомеры*, в которых вытесняющие счетчики приводятся в движение не за счет энергии потока контролируемой среды, а сервомотором. В процессе измерения число оборотов сервомотора изменяется таким образом, что разность давлений на входе и выходе расходомера равна нулю. В диапазоне расходов 0,15 - 150 л/ч достижима погрешность 0,25 %.

Счетчик с кольцевым поршнем (кольцевой счетчик) состоит из двух полых концентрично установленных и соединенных между собой перегородкой цилиндров. В образованную таким образом измерительную камеру помещают кольцевой поршень с радиальной прорезью. При своем движении кольцевой поршень перемещается радиально вдоль разделяющей перегородки измерительной камеры; одновременно ось поршня скользит по внутренней стенке внутреннего цилиндра. Таким образом, поршень перемещается по внутренней и наружной стенкам измерительной камеры. Для входа и выхода контролируемой среды предусмотрены на одном или на разных торцах измерительной камеры входное и выходное отверстия. Кольцевые счетчики применяют в основном в качестве бытовых счетчиков расхода воды. Счетчики этого типа особенно подходят для точного измерения малых расходов.

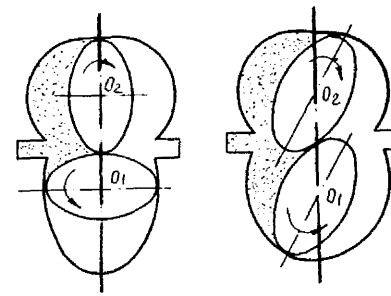


Рис. 1.11.5. Принцип действия счетчика с овальными шестернями

Счетчики с овальными шестернями относятся к измерителям объемного расхода жидкостей с перемещающимися разделительными элементами. Прибор состоит из измерительной камеры, в которой находятся две сцепленные между собой овальные шестерни, обкатывающие друг друга во встречных направлениях. На рис. 1.11.5 показана схема вращения шестерен.

Под действием поступающего под давлением в измерительную камеру потока жидкости разделительная стенка, образованная зацеплением шестерен, перемещается при обкатке и порции жидкости, объем которых зависит от геометрических размеров четырех серповидных частей камеры между шестернями и участками ее стенок, вытесняются через выходной патрубок.

При каждом полном обороте шестерен выдаются одинаковые объемы жидкости, по числу оборотов счетчика определяют суммарный объемный расход. Благодаря высокой точности измерения в широком диапазоне расходов, независимости показаний от вязкости контролируемой среды, малым потерям давления и значительному вращающему моменту даже при пуске, а также благодаря длительной работоспособности счетчики нашли широкое применение в качестве измерителей расходов жидкостей и газов, а также в качестве измерительных преобразователей (датчиков) и сигнализаторов в системах управления и регулирования.

Основными элементами *роторного газового счетчика* являются установленные в подшипниках гладкие роторы, обкатывающие друг друга в камере, выполненной в виде неподвижных цилиндров неполного кругового сечения. Роторы соединены с шестеренчатым редуктором, залитым маслом. Так как зазор между поверхностями роторов равен 0,05 - 0,1 мм, то при вращении, вызываемом контролируемым потоком газа, роторы не соприкасаются.

Роторные счетчики применяют в основном для установки на газопроводах дальнего

газоснабжения и при измерении расхода дорогостоящих газов. Их применение неизбежно при низком давлении газа и требованиям повышенной точности измерения, несмотря на высокую стоимость. Высокая точность измерения может быть обеспечена только при учете реальных параметров контролируемого газа (давления, температуры, влажности) и непрерывной корректировке показаний.

С помощью запорной жидкости в *мокрых газовых счетчиках* отделяется часть объема. Измерительная камера, включающая эту часть объема, поворачивается вокруг оси под давлением контролируемой среды, поступающей через входное отверстие. По мере вращения измерительная камера заполняется, затем отсекается дальнейшее поступление среды и происходит ее вытеснение из измерительной камеры, заполненной жидкостью. Малогабаритные счетчики подобного типа широко применяют в лабораториях, при калибровке расходомеров других типов, а также в качестве контрольных счетчиков в промышленных условиях.

В рассмотренных объемных счетчиках каждому перемещению или повороту чувствительного элемента соответствовал точно ограниченный объем жидкости. В рассматриваемых далее счетчиках, обеспечивающих косвенное определение расхода, в качестве чувствительного элемента применена турбина с лопастями, вращаемая контролируемым потоком. При использовании такого прибора в качестве объемного счетчика число оборотов турбинки должно быть пропорционально объему протекающей жидкости.

Одним из наиболее распространенных счетчиков подобного типа являются *счетчики Вольтмана*. Их выполняют двух видов:

1) со шнековой турбинкой, ось которой совпадает с направлением контролируемого потока и соединена передачей со счетчиком оборотов - так называемые счетчики с аксиальной турбинкой;

2) с турбинкой, ось которой перпендикулярна направлению потока и несет на себе счетчик оборотов - так называемый счетчик с вертикальной турбинкой.

Принцип действия приборов обоих типов основан на измерении скорости вращения турбинки контролируемым потоком жидкости. В химической промышленности счетчики Вольтмана с вертикальной турбинкой применяют главным образом для измерения расхода горячей и холодной воды. Преимущественно их устанавливают на турбопроводах с диаметром условного прохода более 50 мм.

При измерении малых расходов турбинными счетчиками с механической передачей энергетические потери в системе передачи от турбинки к счетчику числа оборотов вызывают значительные погрешности. Индуктивное преобразование скорости вращения турбинки в электрический сигнал измерителя скорости снижает энергетические потери. В первоначальной конструкции прибора такого типа (*расходомер Поттера*) постоянный магнит встроен в одну из лопастей или в ступицу турбинки, помещенной в корпус из аустенитной стали или пластмассы. При вращении турбинки магнит индуцирует в расположенной на наружной части корпуса обмотке импульсы напряжения, частота которых пропорциональна числу оборотов турбинки. Принцип действия расходомера Поттера аналогичен принципу действия счетчика Вольтмана с аксиальной турбинкой.

В другом конструктивном варианте (*расходомер Rotoquant*) пару или несколько пар лопастей и ступицу турбинки изготавливают из ферромагнитного материала, а на наружной части корпуса располагают по окружности или параллельно оси один или несколько постоянных магнитов с индукционными катушками. При вращении турбинки под действием контролируемого потока жидкости изменяется воздушный зазор магнитного корпуса, а следовательно, и магнитный поток. Изменение потока возбуждает в обмотках переменное напряжение пропорциональной частоты.

Применение счетчиков Поттера ограничивается высокими затратами, вследствие чего эти приборы используют в качестве измерителей расхода горючего в самолетах, а также для дистанционного измерения на нефтепроводах. Компактность конструкции приборов Rotoquant позволяет применять их при высоких давлениях.

Одноструйные тангенциальные счетчики характеризуются наличием прямого гладкого канала, по которому протекает контролируемая среда. Поток жидкости тангенциально подводится к турбинке и приводит ее во вращение. В *многоструйных счетчиках* имеется специальный корпус, направляющее устройство которого распределяет струи жидкости по всему периметру турбинки. Тангенциальные счетчики позволяют точнее контролировать расходы, чем счетчики Вольтмана. Однако при одинаковом условном проходе допустимая продолжительность работы тангенциальных счетчиков в случае сохранения допустимых потерь давления меньше, чем счетчиков Вольтмана.

Методы измерения расхода по перепаду давления основаны на использовании энергетических закономерностей, определяющих зависимость кинетической энергии потока, а следовательно, его скорости от физического состояния среды. При дросселировании потока установленным в турбопроводе сужающим устройством скорость его увеличивается и согласно уравнению Бернулли потенциальная энергия давления превращается в кинетичес-

кую. По возникающему перепаду давления на сужающем устройстве может быть определен расход. В качестве сужающих устройств используют дифрагмы, сопла, трубки Вентури.

Подобно методам измерения расхода при помощи устанавливаемых в контролируемом потоке сужающих устройств, метод динамического напора относится к группе методов определения расхода по переменному перепаду давления.

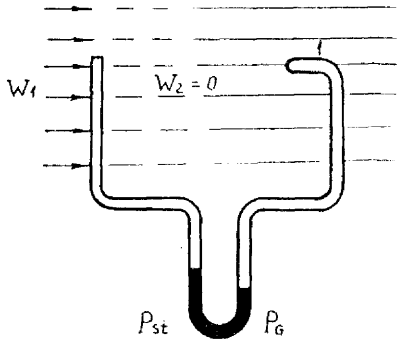


Рис. 1.11.6. Метод определения расхода путем измерения динамического напора:
1 - напорное устройство; p_{st} - статическое давление; p_G - суммарное давление

Для измерения в контролируемый поток помещают небольшое напорное устройство (рис. 1.11.6) и определяют распределение скоростей потока по сечению трубопровода. Расход определяют путем интегрирования полученного распределения скоростей по площади сечения.

По сравнению с другими устройствами, предназначенными для измерения скоростей потоков, *напорные трубки* обладают универсальностью и простотой конструкции. Существенным их недостатком является малая величина характеризующего расход динамического давления, измерение которого с достаточной степенью точности лишь в редких случаях может производиться обычными дифманометрами.

Стоимость расходомеров с большим диаметром условного прохода и затраты на их установку в трубопроводы большого диаметра увеличиваются непропорционально увеличению размеров трубопровода. Это обусловило необходимость разработки ряда методов измерения расходов, основанных на измерении местных скоростей потока в одной или нескольких точках поперечного сечения трубопровода и последующем определении средней скорости потока в данном сечении, по которой определяется расход. К числу подобных расходомеров относятся погружные турбинные счетчики, напорные трубки и тепловые зонды. В *расходомере Аннубсера* напорными трубками измеряются динамические напоры в четырех точках поперечного сечения трубопровода, лежащих на одном диаметре, а путем усреднения результатов этих замеров определяется суммарный динамический напор, являющийся мерой расхода; необходимый поправочный коэффициент, зависящий от диаметра трубопровода и числа Рейнольдса, находится эмпирически.

Разновидностью напорного расходомера является *устройство с напорной шайбой*. В трубопровод помещают цилиндрическое тело (шайбу). Возникающее на шайбе под действием динамического напора контролируемого потока динамическое усилие преобразуется методом силовой компенсации в пневматический выходной сигнал.

Метод измерения расхода по потере давления на прямом участке трубопровода основан на использовании сопротивления трения для получения измерительной информации о расходе. Изменения скорости потока и его кинетической энергии на измерительном участке являются помехам и должны быть исключены или скорректированы.

Реализацией метода определения расхода путем измерения усилия, развиваемого потоком, набегающим на помещенное в него тело, является *поплавковый расходомер* (*ротаметр*). Принцип его работы основан на измерении усилия, развиваемого контролируемым потоком, обтекающим помещенный в него поплавок. Ротаметры могут быть изготовлены из коррозионно-стойких материалов для измерения расходов практически любых сред. Установка ротаметра в трубопровод не требует наличия перед ним прямого участка. Это позволяет устанавливать приборы такого типа непосредственно до и после изгибов трубопроводов и вентилей. Потеря давления на ротаметрах мала и при выборе прибора соответствующего размера может быть доведена до минимума. Приборы просты по конструкции и состоят из малого числа деталей. Погрешность измерения не превышает 2 %, а при особо точной калибровке может быть уменьшена до 1 %.

Принцип действия *пружинно-дискового расходомера* аналогичен принципу действия ротаметра. В ротаметрах вес поплавка уравновешивается суммой усилий потока и подъемной силой, в пружинно-дисковом расходомере уравновешивающее усилие развивается измерительной пружиной. Возможности установки пружинно-дискового расходомера аналогичны таковым для ротаметров. В приборе легко заменять измерительную пружину и шкалы при изменении диапазона измерения. Существенным преимуществом по сравнению с ротаметрами является независимость показаний прибора от влияния силы тяжести, что позволяет устанавливать его в любом положении и измерять, например, расходы в потоках, направленных сверху вниз.

В *расходомерах с поворотной лопастью* непосредственно измеряется усилие, развиваемое контролируемым потоком на поворотной лопасти, уравновешенной ее собственным весом, реже - усилием пружины. Проходное сечение расходомера при нулевом расходе полностью перекрывается лопастью. При увеличении расхода под действием развиваемого усилия лопасть поворачивается и угол поворота служит мерой расхода. Приборы этого типа предназначены прежде всего для измерений больших расходов и расходов сильно загрязненных сред.

Методы определения расхода по разности уровней основаны на преобразовании потенциальной энергии положения уровня контролируемой среды в кинетическую энергию потока при постоянстве потенциальных энергий давления, обеспечиваемых наличием свободной, открытой в атмосферу поверхности. Метод применим для измерения расходов жидкостей, протекающих по открытым лоткам и каналам.

Существует несколько разновидностей подобных устройств. В *расходомерах Вентури* боковые сужения канала или соответствующая профилировка дна приводят к увеличению скорости потока и соответственно к понижению уровня. В водосливных каналах подпор создается перегородкой с острой кромкой. Расход определяется по высоте уровня жидкости относительно высоты перегородки.

Измерение расхода меточными методами предусматривает введение в контролируемый поток небольшого количества легко выявляемого вещества и определение времени прохождения им определенного участка пути или измерение изменений его концентрации в потоке.

Так, метод солевых растворов по Аллену предусматривает импульсивное введение в контролируемый поток порции солевого раствора. С помощью установленной в непосредственной близости от места ввода меточного раствора первой пары электродов и находящейся на некотором расстоянии от нее второй пары электродов фиксируют изменения электрической проводимости, обусловленные перемещением метки по контролируемому участку. Расход определяют по времени перемещения метки между парами электродов.

Дифференциальный метод солевых растворов предусматривает определение расхода по изменению известной концентрации раствора натрийбихромата, вводимого дозирующим насосом в течение определенного интервала времени с постоянным расходом в контролируемый поток. Мерой концентрации является оптическая плотность, определяемая с помощью высокочувствительного колориметра.

Для создания меток используют радиоактивные материалы. Расход определяют также по времени перемещения метки между двумя приемниками-счетчиками.

Корреляционные методы измерения расхода основаны на использовании вызываемых турбулентностью потока или особыми течениями многофазных смесей случайных возмущений, например местных и нерегулярных колебаний давления, температуры, электропроводности, перемещений электрических зарядов, скорости, оптической проницаемости потока. Метод предусматривает регистрацию изменяющихся сигналов двух последовательно установленных в потоке датчиков; вычисление коррелятором по этим сигналам времени пробега потоком измерительного участка известной длины (расстояние между датчиками) и определение по найденному времени пробега и геометрии измерительного участка искомого расхода.

Несмотря на то, что корреляционные методы измерения расхода давно известны, они применялись ранее только для решения узкоспециальных задач, так как были связаны со значительными затратами. Стремительное развитие производства быстродействующих и недорогих элементов микроэлементной техники обеспечивает возможность выпуска корреляционных расходомеров, конкурентоспособных по своей стоимости.

Тепловыми называются *методы*, основанные на измерении зависящего от расхода теплового параметра (температуры, разности температур или производных от этих величин параметров) контролируемого потока или контактирующего с ним тела.

Так, *термоанемометрический метод* предусматривает определение расхода по изменению температуры нагреваемой электрическим током проволоки, помещенной в контролируемый поток газа. Известны два варианта этого метода - *метод постоянного тока* и *метод постоянной температуры*. В первом случае ток, протекающий по проволоке, поддерживается постоянным и контролируется сопротивление проволоки, во втором - сопротивление проволоки поддерживается постоянным путем регулирования приложенного к ней напряжения. Методы обладают рядом преимуществ - высокая чувствительность, что обеспечивает возможность измерения малых и средних скоростей потоков; малая инерционность; простота средств обработки информации. К числу недостатков методов относятся уменьшение чувствительности с возрастанием скорости потока; обусловленная неоднородностью материала проволоки необходимость индивидуальной калибровки первичных преобразователей. Благодаря малой инерционности проволочные термоанемометры применимы при исследованиях турбулентных потоков.

Применяемые для измерения скорости потока *термозонды* состоят из обладающих высоким температурным коэффициентом полупроводниковых терморезисторов с отрицательным или положительным температурным

коэффициентом. Тепловое равновесие помещенного в контролируемый поток электрически нагреваемого измерительного преобразователя устанавливается в зависимости от условий его охлаждения. Сопротивление преобразователя, зависящее от температуры в состоянии равновесия, измеряется при помощи электрической схемы. Термозонды используют преимущественно для измерения скоростей потоков жидкостей. Вследствие значительной инерционности достаточная точность обеспечивается лишь при измерениях скоростей относительно стационарных потоков.

При охлаждении источника тепла (проволоки) потоком воздуха мерой скорости этого потока может служить температура источника или потребляемая им мощность в зависимости от того, какой из этих параметров стабилизируется в процессе измерения. В режиме стабилизации температуры *позистор* (терморезистор с положительным температурным коэффициентом) нагревается до температуры, при которой устанавливается баланс между потребляемой электрической мощностью и отдаваемой тепловой мощностью. При охлаждении позистора вследствие увеличения скорости потока, сопротивление его снижается, что увеличивает потребляемую мощность, предотвращая дальнейшее снижение температуры.

Согласно закону электромагнитной индукции, в электрическом проводнике, перемещающемся в магнитном поле, возникает электрический ток. Этот эффект используется в *индукционном расходомере*. Протекающая жидкость отождествляется с проводником, то есть должна обладать определенной минимальной проводимостью. Контролируемый поток протекает по армированной изолятором трубе, в стенках которой перпендикулярно направлению магнитного поля и потока среды установлены два диаметрально расположенных электрода, с которых снимается напряжение, пропорциональное средней скорости потока.

Магнитно-индукционные расходомеры отличаются видом прикладываемого магнитного поля - переменное синусоидальное, переменное с треугольной формой возбуждающего электрического тока, периодически включающееся, постоянное.

Магнитно-индукционный метод обладает следующими достоинствами: по точности превосходит другие методы; отсутствие непосредственного контакта с контролируемым потоком; результаты измерения не зависят от температуры, вязкости, концентрации давления и направления движения контролируемой среды; способ применим для измерения расхода химически агрессивных и коррозионноактивных жидкостей, ламинарных и турбулентных потоков. Метод применяют для контроля агрессивных кислот, пульп (смесей руда - вода, уголь - вода, песок - вода), жидких металлов (натрия, ртути, висмута) в системах охлаждения ядерных реакторов.

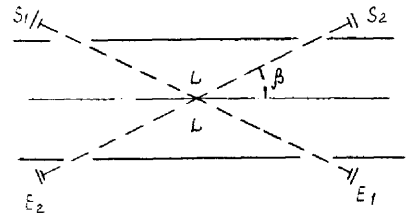


Рис. 1.11.7. Схема ультразвукового частотно-импульсного расходомера

Принцип действия *ультразвуковых расходомеров* основан на зависимости скорости распространения ультразвуковых колебаний в движущейся жидкости от скорости перемещения самой жидкости. Так, в частотно-импульсном устройстве (рис. 1.11.7) излучатель S_1 непрерывно посылает ультразвуковой сигнал до момента его появления на приемнике E_1, после чего S_1 выключается и излучение прерывается на все время поступления сигнала на приемник E_1; далее цикл периодически повторяется. Аналогично работает система канала S_2 - E_2, причем выдаваемые генератором импульсы в обоих каналах совпадают по фазе. Возникающие две последовательности импульсов следует через определенные промежутки времени, которые являются мерой расхода.

Возможно непосредственное измерение разности времен прохождения ультразвуковых колебаний по этим каналам, однако результат измерения при этом зависит от скорости распространения ультразвука в среде, что является существенным недостатком метода.

Дифференциально-фазовый метод предусматривает непрерывную посылку синусоидальных колебаний на два ультразвуковых датчика попеременно или одновременно (при двухканальной схеме). Поступающие ультразвуковые колебания сдвинуты по фазе относительно друг друга, так как волны, перемещающиеся по направлению потока, движутся быстрее. Частоту посылки импульсов подбирают таким образом, чтобы разность фаз при максимальной скорости не превышала длины волны λ. Тогда

$$\Delta\varphi / 360 = \Delta t / T = f\Delta t,$$

где Δt - разность времени прохождения ультразвуковых колебаний; T - период колебаний; f - частота колебаний.

При изучении ультразвуковых колебаний постоянной частоты f_1 в жидкость часть ультразвуковой энергии рассеивается находящими-

ся в среде частицами, плотность которых отличается от плотности основной среды. При этом в соответствии с законом Допплера, изменяется частота отраженного сигнала. Разность частот определяется уравнением

$$f_1 - f_2 = 2f_1 \frac{\cos\beta}{a_0} v,$$

где f_2 - частота отраженного сигнала; a_0 - скорость звука; v - скорость потока среды; β - угол между направлением потока и направлением распространения ультразвуковых волн.

При постоянных значениях f_1, $\cos\beta$ и a_0 разность

$$f_1 - f = k_0 v.$$

Таким образом, сдвиг частот прямо пропорционален скорости потока v и может быть использован для измерения расхода без потери давления.

Ряд измерителей расхода основан на определении *частоты вихрей*, возникающих в потоке при помещении в него специальных устройств. Эти завихрения называются *вихревой дорожкой Кармана*. При числах Рейнольдса, превышающих 70, для бесконечно длинного цилиндра диаметром d связь между частотой вихрей f и скоростью потока v определяется числом Струхаля:

$$C = fd / v.$$

Число Струхаля остается неизменным в широком диапазоне чисел Рейнольдса, поэтому скорость потока может быть определена измерением частоты вихрей.

Иногда в контролируемом потоке создаются вращательные завихрения, перемещающиеся в направлении его движения и воспринимаемые преобразователем, конструкция которого выполнена без каких-либо подвижных частей. Вращающийся поток создается установленными на входе расходомера направляющими пластинками, вытянутыми по контуру в направлении движения потока. Встроенный в стенку расходомера терморезистор выдает импульсы, частота которых пропорциональна скорости потока, которые поступают затем в электронный блок. На выходе расходомера установлен механический струевыпрямитель, устраняющий вращение потока.

Измеритель расхода с качающимся телом пригоден для газов и жидкостей. Прибор показан на рис. 1.11.8. Через штуцер *1* контролируемая среда поступает в корпус, протекает через два прямоугольных канала *2* и, выходя из них в сечении *3*, воздействует в точке *4* на качающееся призмообразное тело. Через штуцер *5* среда удаляется из прибора.

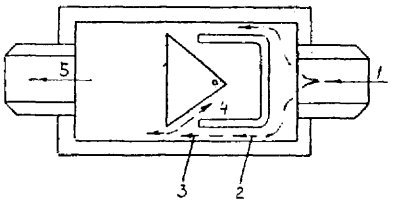


Рис. 1.11.8. Измеритель расхода с качающимся чувствительным элементом

Качание тела при движении среды возникает вследствие того, что случайные возмущения выводят язычок, находящийся в среднем положении, из состояния покоя. Возмущающие усилия возникают вследствие турбулентности потока, которая практически всегда образуется в нем. После возникновения колебаний язычка их частота при постоянной плотности среды пропорциональна расходу.

Гироскопический расходомер состоит из V-образной измерительной трубки, совершающей крутильные колебания с частотой 50 - 60 Гц относительно оси вращения. Кориолисова сила, воздействующая на тело, движущееся с нелинейным ускорением, скручивает трубку пропорционально произведению массы на скорость. *Угол скручивания* определяется оптоэлектронным датчиком, по сигналу которого вычисляется массовый расход. Свойства, протекающей через прибор среды (температура, плотность или вязкость), не влияют на его показания, поэтому гироскопические расходомеры применимы для измерений двухфазных потоков (например, воды и водяного пара) и успешно используются для измерений массового расхода угольной пыли.

Лазерный метод измерения скорости потока основан на измерении времени перемещения пылевых частиц на отрезке пути, ограниченном двумя лазерными лучами. Подобный лазерный прибор используется, например, для измерения расхода в аэродинамических трубах; при этом контролируется скорость всегда присутствующих в воздухе пылевых частиц. Достоинством метода является возможность непосредственного измерения скорости без установки в трубопроводе дополнительных устройств и без каких-либо воздействий на поток. Аналогично можно измерять скорость потоков жидкостей.

При перемещении частиц относительно неподвижной точки, из которой ведется наблюдение, частота рассеиваемого пылью света изменяется пропорционально скорости частиц согласно закону Допплера. В типовом устройстве допплеровский эффект для красного излучения гелий-неонового лазера (6328 Å) составляет около 1 МГц при скорости потока 1 м/с. Метод позволяет бесконтактно контроли-

ровать скорость потоков жидкостей и газов в диапазоне от 0,01 мм/с до 1 000 м/с. Метод применим при достаточной прозрачности среды и незначительном содержании в ней частиц, отражающих излучение.

Глава 1.12

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ НАБЛЮДЕНИЙ

Выбор математических методов определяется поставленными задачами измерения. Фундаментальная теория измерения имеет два основных направления: физическое и математическое. Первое основано на тезисе о неизбежности погрешности измерения. Второе - на абстракции "абсолютно точного" сравнения. Поэтому математические проблемы при физических измерениях возникают в первую очередь вследствие того, что полученное при наблюдении значение величины отличается от действительного и в качестве последнего принимают какую-нибудь его оценку. Поиск приемлемой оценки приводит к различным задачам определения ее значения в зависимости от: 1) характера измеряемой величины (величина неизменяющаяся, изменяющаяся во времени или в зависимости от другой величины) и 2) особенностей процесса измерения (прямое или косвенное измерение; равноточные или неравноточные измерения; метод непосредственной оценки или сравнения).

Требования к представлению результата измерения величины независимо от особенностей процесса измерения определяют следующие необходимые **задачи обработки результатов наблюдений**:

определение оценки математического ожидания;

определение среднего квадратического отклонения (дисперсии);

вычисление доверительного интервала;

оценка (выявление) грубых погрешностей;

оценка и выбор закона распределения.

Иногда требуется определить медиану, моду, вариационный размах и коэффициент вариации. Кроме того, использование измерений для определения зависимостей, моделей и характеристик процессов привело к постановке ряда типовых задач, непосредственно основанных на обработке результатов измерений.

1.12.1. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ НАБЛЮДЕНИЙ ПРИ ПРЯМЫХ ИЗМЕРЕНИЯХ

Предположим, что произведено n наблюдений $x_1, x_2, \ldots, x_n$ и точность получения x_i для любого i одинакова, то есть имеют место равноточные измерения. Тогда, при нормальном законе распределения погрешностей, в качестве результата измерения принимаем **среднее арифметическое значение**

$$\bar{x} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_i. \qquad (1.12.1)$$

Для достаточно больших n [1] можно ограничиться полученным результатом. Но часто при измерениях по разным соображениям n ограничено. Тогда необходимо указать доверительный интервал для $\bar{x}$. И во всех случаях $\bar{x}$ не дает оценки точности процесса измерения.

Для оценки точности измерения или рассеяния значений физической величины используют **дисперсию** σ^2 или **среднее квадратическое отклонение** σ.

При ограниченном n представительную и несмещенную [2] оценку σ определяют в виде

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2}. \qquad (1.12.2)$$

В качестве относительной характеристики рассеяния может использоваться **коэффициент вариации**:

$$V = (S/\bar{x})100\%.$$

Он показывает, насколько велико рассеяние по сравнению со средним значением. И в частности, показывает долю некорректируемой погрешности измерения, если среднее значение характеризует систематическую составляющую погрешности измерения.

[1] Значение n можно считать достаточно большим, если при этом рассчитываемые параметры пренебрежимо мало отличаются от параметров генеральной совокупности объема $N >> n$. В частности, $\bar{x}$ и S пренебрежимо мало отличаются от математического ожидания и σ. Например, n можно считать достаточно большим, если доверительный интервал на порядок меньше допускаемой погрешности измерения.

[2] Понятия несмещенной, эффективной и состоятельной оценки параметров генеральной совокупности используются в следующем смысле: несмещенная - оценка, математическое ожидание которой совпадает с оцениваемым параметром при любом объеме выборки; эффективная - оценка, имеющая минимально возможную дисперсию; состоятельная - оценка, сходящаяся по вероятности к тому или иному параметру закона распределения.

1.12.1. Нормированная функция Лапласа $\Phi_0(z)$

z	Сотые доли для z									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0,0	0,0000	040	080	120	160	199	239	279	319	359
0,1	398	438	478	517	557	596	636	675	714	753
0,2	793	832	871	910	948	987				
	0,1...	...	...	...	...	...	026	064	103	141
0,3	179	217	255	293	331	368	406	443	480	517
0,4	554	591	628	664	700	736	772	808	884	879
0,5	915	950	985							
	0,2...	...	...	019	054	088	123	157	190	224
0,6	257	291	324	357	389	422	454	486	517	549
0,7	580	611	642	673	703	734	764	794	823	852
0,8	881	910	939	967	995					
	0,3...	...	...	...	...	023	051	078	106	133
0,9	159	186	212	238	264	289	315	340	365	389
1,0	413	437	461	485	508	583	554	577	599	621
1,1	643	665	686	708	729	749	770	790	810	830
1,2	849	869	888	907	925	944	962	980	997	
	0,4...	...	...	...	...	...	...	...	...	015
1,3	032	049	066	082	099	115	131	147	162	177
1,4	192	207	222	236	251	265	279	292	306	319
1,5	332	345	357	370	382	394	406	418	429	441
1,6	452	463	474	484	495	505	515	525	535	545
1,7	554	564	573	582	591	599	608	616	625	633
1,8	641	649	656	664	671	678	686	693	699	706
1,9	713	719	726	732	738	744	750	756	761	767
2,0	772	778	783	788	793	798	803	808	812	817
2,1	821	826	830	834	838	842	846	850	854	857
2,2	860	864	867	871	874	877	880	883	886	889
	966	474	906	263	545	755	894	962	962	893
2,3	892	895	898	900	903	906	908	911	913	915
	759	559	296	969	581	133	625	060	437	758
2,4	918	920	922	924	926	928	930	932	934	936
	025	237	397	506	564	572	531	493	309	128
2,5	937	939	941	942	944	946	947	949	950	952
	903	634	323	969	574	139	664	151	600	012
2,6	953	954	956	957	958	959	960	962	963	964
	388	729	035	308	547	754	930	074	169	274
2,7	0,4965	966	967	968	969	970	971	971	972	973
	330	358	359	333	280	202	099	972	621	646

Продолжение табл. 1.12.1

z	Сотые доли для z									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
2,8	0,4974	975	975	976	977	978	978	979	980	980
	449	229	988	726	443	140	818	476	116	738
2,9	981	981	982	983	983	984	984	985	985	986
	342	929	498	052	589	111	618	110	588	051
3,0	986	986	987	987	988	988	988	989	989	989
	501	938	361	772	171	558	933	297	650	992
3,1	990	990	990	991	991	991	992	992	992	992
	324	646	957	260	553	836	112	378	636	886
3,2	993	993	993	993	994	994	994	994	994	994
	129	363	590	810	024	230	429	623	810	991
3,3	995	995	995	995	995	995	996	996	996	996
	166	335	499	658	811	959	103	242	376	505
3,4	996	996	996	996	997	997	997	997	997	997
	631	752	869	982	091	197	299	398	493	585
3,5	997	997	997	997	997	998	998	998	998	988
	674	759	842	922	999	074	146	215	282	347
3,6	988	988	988	988	988	988	988	988	988	988
	409	469	527	583	637	689	739	787	834	879
3,7	998	998	999	999	999	999	999	999	999	999
	922	964	004	043	080	116	130	184	216	247
3,8	999	999	999	999	999	999	999	999	999	999
	274	305	333	359	385	409	433	456	478	499
3,9	999	999	999	999	999	999	999	999	999	999
	519	539	557	575	593	609	625	641	655	670
4,0	999	999	999	999	999	999	999	999	999	999
	683	696	709	721	733	744	755	766	775	784
4,1	999	999	999	999	999	999	999	999	999	999
	793	802	811	819	826	834	841	848	854	861
4,2	999	999	999	999	999	999	999	999	999	999
	867	872	878	883	888	893	898	902	907	911
4,3	999	999	999	999	999	999	999	999	999	999
	915	918	922	925	929	932	935	938	941	943
4,4	999	999	999	999	999	999	999	999	999	999
	946	948	951	953	955	957	959	961	963	964
4,5	999	999	999	999	999	999	999	999	999	999
	966	968	969	971	972	973	974	976	977	978
5,0	999									
	997									

Примечание: Если значения функции указаны в двух строках, то вторая строка цифр является продолжением первой.

1.12.2. Значения $t_{q,k}$ в зависимости от k степеней свободы и от вероятности $\alpha = q/100$ для распределения Стьюдента

k \ q	10,0	5,0	2,5	2,0	1,0	0,5	0,3	0,2	0,1
1	6,314	12,706	25,452	31,821	63,657	127,30	212,20	318,30	636,60
2	2,920	4,303	6,205	6,965	9,925	14,089	18,216	22,327	31,600
3	2,353	3,182	4,177	4,541	5,841	7,453	8,891	10,214	12,922
4	2,132	2,776	3,495	3,747	4,604	5,597	6,435	7,173	8,610
5	2,015	2,571	3,163	3,365	4,032	4,773	5,376	5,893	6,869
6	1,943	2,447	2,969	3,143	3,707	4,317	4,800	5,208	5,959
7	1,895	2,365	2,841	2,998	3,499	4,029	4,442	4,785	5,408
8	1,860	2,306	2,752	2,896	3,355	3,833	4,199	4,501	5,041
9	1,833	2,262	2,685	2,821	3,250	3,690	4,024	4,297	4,781
10	1,812	2,228	2,634	2,764	3,169	3,581	3,892	4,144	4,587
12	1,782	2,179	2,560	2,681	3,055	3,428	3,706	3,930	4,318
14	1,761	2,145	2,510	2,624	2,977	3,326	3,583	3,787	4,140
16	1,746	2,120	2,437	2,583	2,921	3,252	3,494	3,686	4,015
18	1,734	2,101	2,445	2,552	2,878	3,193	3,428	3,610	3,922
20	1,725	2,086	2,423	2,528	2,845	3,153	3,376	3,552	3,849
22	1,717	2,074	2,405	2,508	2,819	3,119	3,335	3,505	3,792
24	1,711	2,064	2,391	2,492	2,797	3,092	3,302	3,467	3,745
26	1,706	2,056	2,379	2,479	2,779	3,067	3,274	3,435	3,704
28	1,701	2,048	2,369	2,467	2,763	3,047	3,250	3,408	3,674
30	1,697	2,042	2,360	2,457	2,750	3,030	3,230	3,386	3,646
∞	1,645	1,960	2,241	2,326	2,567	2,807	2,968	3,090	3,291

Наличие смещенности (несимметричности) формы кривой распределения можно определить по показателю **ассиметрии**:

$$S_k = \frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^3}{nS^3}.$$

В качестве характеристики большего (меньшего) подъема эмпирической кривой распределения в сравнении с кривой нормального распределения используют **эксцесс**:

$$E_k = \frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^4}{nS^4} - 3.$$

Отличие от нуля показателя ассиметрии и эксцесса указывает на отклонение от нормального распределения.

При нормальном распределении для оценки рассеяния может использоваться **размах** выборки

$$R = x_{\max} - x_{\min}.$$

При небольших $n(n<10)$ эта оценка имеет неплохую эффективность, но при больших n мало эффективна по сравнению с S.

Оценка центра распределения по неравноточным наблюдениям связана с введением "весов" наблюдений g_i, обратно пропорциональных дисперсиям

$$g_1 : g_2 : \ldots : g_n = \frac{1}{S_1^2} : \frac{1}{S_2^2} : \ldots : \frac{1}{S_n^2},$$

и вычисляется по формуле

$$x = \left[\sum_{i=1}^{n} g_i x_i\right] \Big/ \sum_{i=1}^{n} g_i.$$

1.12.3. Значение предела χ_i^2 в зависимости от вероятности $p\left(\chi^2 > \chi_i^2\right)$ и числа k степеней свободы χ^2 - распределения

k	Вероятность p							
	0,99	0,98	0,95	0,90	0,80	0,70	0,50	0,30
2	0,020	0,040	0,103	0,211	0,446	0,713	1,386	2,41
3	0,115	0,185	0,352	0,584	1,005	1,424	2,366	3,66
4	0,30	0,43	0,71	1,06	1,65	2,19	3,36	4,9
5	0,55	0,75	1,14	1,61	2,34	3,00	4,35	6,1
6	0,87	1,13	1,63	2,20	3,07	3,83	5,35	7,2
7	1,24	1,56	2,17	2,83	3,82	4,67	6,35	8,4
8	1,65	2,03	2,73	3,49	4,59	5,53	7,34	9,5
9	2,09	2,53	3,32	4,17	5,38	6,39	8,34	10,7
10	2,56	3,06	3,94	4,86	6,18	7,27	9,34	11,8
11	3,1	3,6	4,6	5,6	7,0	8,1	10,3	12,9
12	3,6	4,2	5,2	6,3	7,8	9,0	11,3	14,0
13	4,1	4,8	5,9	7,0	8,6	9,9	12,3	15,1
14	4,7	5,4	6,6	7,8	9,5	10,8	13,3	16,2
15	5,2	6,0	7,3	8,5	10,3	11,7	14,3	17,3
16	5,8	6,6	8,0	9,3	11,2	12,6	15,3	18,4
17	6,4	7,3	8,7	10,1	12,0	13,5	16,3	19,5
18	7,0	7,9	9,4	10,9	12,9	14,4	17,3	20,6
19	7,6	8,6	10,1	11,7	13,7	15,4	18,3	21,7
20	8,3	9,2	10,9	12,4	14,6	16,3	19,3	22,8
21	8,9	9,9	11,6	13,2	15,4	17,2	20,3	23,9
22	9,5	10,6	12,3	14,0	16,3	18,1	21,3	24,9
23	10,2	11,3	13,1	14,8	17,2	19,0	22,3	26,0
24	10,9	12,0	13,8	15,7	18,1	19,9	23,3	27,1
25	11,5	12,7	14,6	16,5	18,9	20,9	24,3	28,1
26	12,2	13,4	15,4	17,3	19,8	21,8	25,3	29,3
27	12,9	14,1	16,2	18,1	20,7	22,7	26,3	30,3
28	13,6	14,8	16,9	18,9	21,6	23,6	27,3	31,4
29	14,3	15,6	17,7	19,8	22,5	24,6	28,3	32,5
30	15,0	16,3	18,5	20,6	23,4	25,5	29,3	33,5

Продолжение табл. 1.12.3

k	Вероятность p							
	0,20	0,10	0,05	0,02	0,01	0,005	0,002	0,001
1	1,64	2,7	3,8	5,4	6,6	7,9	9,5	10,83
2	3,22	4,6	6,0	7,8	9,2	11,6	12,4	13,8
3	4,64	6,3	7,8	9,8	11,3	12,8	14,8	16,3
4	6,0	7,8	9,5	11,7	13,3	14,9	16,9	18,5
5	7,3	9,2	11,1	13,4	15,1	16,3	18,9	20,5
6	8,6	10,6	12,6	15,0	16,8	18,6	20,7	22,5
7	9,8	12,0	14,1	16,6	18,5	20,3	22,6	24,3
8	11,0	13,4	15,5	18,2	20,1	21,9	24,3	26,1
9	12,2	14,7	16,9	19,7	21,7	23,6	26,1	27,9
10	13,4	16,0	18,3	21,2	23,2	25,2	27,7	29,6
11	14,6	17,3	19,7	22,6	24,7	26,8	29,4	31,3
12	15,8	18,5	21,0	24,1	26,2	28,3	31	32,9
13	17,0	19,8	22,4	25,5	27,7	29,8	32,5	34,5
14	18,2	21,1	23,7	26,9	29,1	31	34	36,1
15	19,3	22,3	25,0	28,3	30,6	32,5	35,5	37,7
16	20,5	23,5	26,3	29,6	32,0	34	37	39,2
17	21,6	24,8	27,6	31,0	33,4	35,5	38,5	40,8
18	22,8	26,0	28,9	32,3	34,8	37	40	42,3
19	23,9	27,2	30,1	33,7	36,2	38,5	41,5	43,8
20	25,0	28,4	31,4	35,0	37,6	40	43	45,3
21	26,2	29,6	32,7	36,3	38,9	41,5	44,5	46,8
22	27,3	30,8	33,9	37,7	40,3	42,5	46	48,3
23	28,4	32,0	35,2	39,0	41,6	44,0	47,5	49,7
24	29,6	33,2	36,4	40,3	43,0	45,5	48,5	51,2
25	30,7	34,4	37,7	41,6	44,3	47	50	52,6
26	31,8	35,6	38,9	42,9	45,6	48	51,5	54,1
27	32,9	36,7	40,1	44,1	47,0	49,5	53	55,5
28	34,0	37,9	41,3	45,4	48,3	51	54,5	56,9
29	35,1	39,1	42,6	46,7	49,6	52,5	56	58,3
30	36,3	40,3	43,8	48,0	50,9	54	57,5	59,7

Несмещенная оценка величины дисперсии

$$S^2 = \frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n} g_i (x_i - \bar{x})^2.$$

Доверительный интервал для $\bar{x}$, отвечающий доверительной вероятности (1 - α), при неизвестном σ

$$\left(\bar{x} - t_{q,n-1}\frac{S}{\sqrt{n-1}};\ \bar{x} + t_{q,n-1}\frac{S}{\sqrt{n-1}} \right)$$

и при известном σ (или при достаточно большом n)

$$\left(\bar{x} - t_q\frac{\sigma}{\sqrt{n}};\ \bar{x} + t_q\frac{\sigma}{\sqrt{n}} \right),$$

где t_q - квантиль распределения, определяется по табл. 1.12.1 (t_q=z для $\Phi_0(z)$=(1 - α/2, α=q/100); $t_{q,n-1}$- квантиль распределения, определяется по табл. 1.12.2, где $k = n - 1$.

Пример. Определить доверительный интервал математического ожидания для n = 9 при доверительной вероятности 1 - α = = 1 - 0,05 = 0,95, если известно, что σ = 2.

По табл. 1.12.1 определяем, что для вероятности (1 - α) / 2 = Φ_0 (z) = 0,95/2 t_q = z =1,96. Тогда с вероятностью 0,95 доверительный интервал ($\bar{x}$ - 1,31, $\bar{x}$ + 1,31) покрывает математическое ожидание.

Пример. Определить доверительный интервал математического ожидания при доверительной вероятности 1 - α = 0,95, если произведено n = 10 наблюдений и получены следующие значения измеряемой величины x:
x_1 = +2, x_2 = +1, x_3 = -2, x_4 = +3, x_5 = +2, x_6 = +4, x_7 = -2, x_8 = +5, x_9 = +3, x_{10} = +4.

В соответствии с (1.12.1) и (1.12.2) получим $\bar{x}$ = +2 и S = 2,3. Из табл. 1.12.2 находим, что $t_{q,n-1} = t_{5,9}$ = 2,262 (q = 100 α = = 100·0,05 = 5).Тогда с вероятностью 0,95 доверительный интервал (0,2658; 3,7342) покрывает математическое ожидание.

Доверительный интервал σ в предположении, что величина nS^2 / σ^2 распределена по закону χ^2 с (n - 1) степенью свободы,

$$\left(\frac{\sqrt{n}S}{\chi_1};\ \frac{\sqrt{n}S}{\chi_2} \right),$$

где χ_1 и χ_2 соответствуют двум предельным границам доверительного интервала, отвечающего доверительной вероятности 1 - α (определяются по табл. 1.12.3).

Пример. Определить доверительный интервал σ при доверительной вероятности 0,96, если по результатам 10 измерений получено, что S = 2,3.

Определяют два предела вероятности p_1 и p_2 (соответствующие χ_1 и χ_2), покрывающие σ с вероятностью 0,96:

$$p_2 = 0{,}5\alpha = 0{,}5(1 - 0{,}96) = 0{,}02;$$
$$p_1 = 1 - 0{,}5\alpha = 0{,}98.$$

Из табл. 1.12.3 находим, что p_1 =0,98 и p_2 = 0,02 при числе степеней свободы k = = n - 1 = 9 соответствуют χ^2 = 2,53 и χ^2 = 19,7. Доверительный интервал (1,64 < σ < 4,57).

Следует иметь в виду, что грубые ошибки при проведении измерений должны исключаться из данных, используемых при вычислении оценок статистических параметров. Если на основании анализа процесса измерения не удается исключить причины или увидеть и отбросить грубые ошибки, то используют один из критериев их определения.

Предположим, что подозрительным является значение x_{max} из результатов наблюдений, а распределение следует нормальному закону. Принимается уровень значимости, определяющий вероятность α перехода действительным отклонением некоторой границы. Значение x_{max} считают грубой ошибкой, если

$$x_{max} > \bar{x} + t_{\alpha,n}S,$$

где $t_{\alpha,n}$ определяется по табл. 1.12.4; $\bar{x}$ и S определяются по выборке объема n.

Значение x_{min} считают грубой ошибкой, если

$$x_{min} > \bar{x} - t_{\alpha,n}S,$$

Если параметры генеральной совокупности (математическое ожидание и σ) известны или n достаточно большое, то вместо $t_{\alpha,n}$ подставляют квантиль нормального распределения, отвечающую вероятности $p = (1 - \alpha)^{1/n}$. Ее значение можно найти по табл. 1.12.1, обозначив $t_{\alpha,n} = z$.

1.12.4. Квантили $t_{\alpha,n}$

n \ α	0,10	0,05	0,025	0,01
3	1,406	1,412	1,414	1,414
4	1,645	1,689	1,710	1,723
5	1,791	1,869	1,917	1,955
6	1,894	1,996	2,067	2,130
7	1,974	2,093	2,182	2,265
8	2,041	2,172	2,273	2,374
9	2,097	2,237	2,349	2,464
10	2,146	2,294	2,414	2,540
11	2,190	2,343	2,470	2,606
12	2,229	2,387	2,519	2,663
13	2,264	2,426	2,562	2,714
14	2,297	2,461	2,602	2,759
15	2,326	2,493	2,638	2,800
16	2,354	2,523	2,670	2,837
17	2,380	2,551	2,701	2,871
18	2,404	2,577	2,728	2,903
19	2,426	2,600	2,754	2,932
20	2,447	2,623	2,778	2,959
21	2,467	2,644	2,801	2,984
22	2,486	2,664	2,823	3,008
23	2,504	2,683	2,843	3,030
24	2,520	2,701	2,862	3,051
25	2,537	2,717	2,880	3,071

1.12.2. ПРОВЕРКА ГИПОТЕЗ О ЗАКОНЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ

Критерий согласия Пирсона

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^{k} \frac{(m_i - np_i)}{np_i},$$

где p_i - выравнивающие частоты, n - число измерений в выборке, m_i - число измерений в i-й группе.

Все наблюдения $x_1, \ldots, x_n$ разбиваются на r групп, в каждую из которых попадает какое-то число близких между собой значений x_i. Интервал $\Delta = x_i - x_{i+j}$ значений x для одной группы (разряда) может определяться погрешностью измерения или другими соображениями.

Применение критерия χ^2 требует выделения области значений критериев, вероятность попадания в которую принимается существенной. В табл. 1.12.3. приведены значения χ^2 для выбранной вероятности, если вероятность $p(\chi^2)$ события $\chi_0^2 \geq \chi^2$, где χ_0^2 - вычисленное для данной выборки значение.

Пример. Вычисленное значение χ^2 =0,75, число степеней свободы k = 6. Тогда из табл. 1.12.3 получим $p(\chi^2) > 0{,}99$, что соответствует $\chi_0^2 = 0{,}87 > 0{,}75$. Если это значение вероятности признается существенным, то гипотеза о законе распределения верна.

Число степеней свободы k определяется как разность между числом r групп (разрядов), на которые разделены все измеренные значения в выборке, и числом независимых условий t, наложенных на статистические частоты $p_i^* = m_i / n$, то есть

$$k = r - t.$$

При гипотезе о нормальном распределении $t = 3$, если помимо условия о фиксированном объеме выборки n, наложено требование, чтобы значения среднего и среднеквадратического отклонения выборки равнялись соответствующим параметрам генеральной совокупности.

При гипотезе о биноминальном распределении и распределении Пуассона

$$k = r - 2.$$

Критерий согласия χ^2 рекомендуется применять только в том случае, если ни одна из групповых частот не будет очень мала. Для увеличения частоты крайних групп их объединяют между собой так, чтобы частота объединенной группы была не меньше 5, а число групп равно 8 ... 12.

Критерий согласия χ^2 иногда применяют по следующему правилу:

$$\text{если } \frac{\left|\chi^2 - k\right|}{\sqrt{2k}} \geq 3,$$

то расхождение можно считать существенным,

$$\text{если } \frac{\left|\chi^2 - k\right|}{\sqrt{2k}} < 3,$$

то случайным.

Оценка гипотезы с помощью критерия χ^2 существенно зависит от того, как разделены по группам результаты измерений. Кроме того, для оценки соответствия наблюдаемого распределения предполагаемому используется предельный закон распределения, что при конечных объемах выборки выполняется лишь приближенно.

Критерий согласия Колмогорова

$$D_n = \max\left|F_n(x) - F(x)\right|,$$

где $F_n(x)$ - значение эмпирической функции распределения; $F(x)$ - значения выравнивающей непрерывной интегральной функции распределения (определяется по таблице соответствующего распределения, в частности при определении $F(x)$ для нормального закона можно использовать табл. 1.12.1). Определив D_n, вычисляют

$$\lambda = D_n \sqrt{n}.$$

1.12.5. Вероятности $p(\lambda)$ распределения Колмогорова

λ	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0,3				9999	9998	9997	9995	9992	9987	9981
0,4	0,9972	9960	9945	9926	9903	9874	9840	9800	9753	9700
0,5	9639	9572	9497	9415	9325	9228	9124	9013	8896	8772
0,6	8643	8508	8368	8222	8073	7920	7764	7604	7442	7278
0,7	7112	6945	6777	6609	6440	6272	6104	5936	5770	5605
0,8	5441	5280	5120	4962	4806	4653	4503	4355	4209	40677
0,9	3927	3791	3657	3527	3399	3275	3154	3036	2921	2809
1,0	2700	2594	2492	2392	2296	2202	2111	2024	1939	1857
1,1	1777	1700	1626	1555	1486	1420	1356	1294	1235	1177
1,2	1122	1070	1019	0970	0924	0879	0836	0794	0755	0717
1,3	0681	0646	0613	0582	0551	0522	0495	0469	0444	0420
1,4	0397	0375	0354	0335	0316	0298	0282	0266	0250	0236
1,5	0222	0209	0197	0185	0174	0164	0154	0145	0136	0127
1,6	0120	0112	0105	0098	0092	0086	0081	0076	0071	0066
1,7	0062	0058	0054	0050	0047	0044	0041	0038	0035	0033
1,8	0031	0029	0027	0025	0023	0021	0020	0019	0017	0016
1,9	0015	0014	0013	0012	0011	0010	0009	0009	0008	0007
2,0	0007	0006	0006	0005	0005	0004	0004	0004	0003	0003
2,1	0003	0003	0002	0002	0002	0002	0002	0002	0001	0001
2,2	0001	0001	0001	0001	0001	0001	0001	0001	0001	0001
2,3	0001	0000								

По табл. 1.12.5 для этого значения λ находят $p(\lambda)$. Если 1 - $p(\lambda)$ мало (например, не более 0,05), то расхождение между наблюдаемым рядом и выравнивающим распределением признается существенным.

Критерий Колмогорова можно применять только тогда, когда значения параметров предполагаемого распределения полностью известны. Если применять его, используя статистические параметры, то критерий даст заведомо завышенные значения $p(\lambda)$.

Для приближенной оценки нормальности можно использовать коэффициент ассиметрии и эксцесс. Для этого

S_k сравнивают с $\sigma S_k = \sqrt{\dfrac{6(n-1)}{(n+1)(n+3)}}$,

а E_k сравнивают с $\sigma E_k = \sqrt{\dfrac{24n(n-2)(n-3)}{(n-1)^2(n+3)(n+5)}}$,

где n - объем выборки.

Существенное отличие их значений может служить основанием для непринятия гипотезы нормальности исследуемого распределения.

1.12.3 ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ НАБЛЮДЕНИЙ ПРИ КОСВЕННЫХ ИЗМЕРЕНИЯХ

Для получения результата измерения величины Y в общем случае используют зависимость вида

$$Y = F(X_1, X_2, \ldots, X_n),$$

где X_i - непосредственно измеренные величины.

Если Y в окрестности общего центра $\bar{x} = (\bar{x}_1, \bar{x}_2, \ldots, \bar{x}_n)$ дифференцируемая функция, тогда

$$\bar{y} \cong F(\bar{x}_1, \bar{x}_2, \ldots, \bar{x}_n).$$

При каждом измерении некоррелированных аргументов погрешность результата может быть представлена в виде

$$\Delta y \cong \frac{\partial F}{\partial x_1}\Delta x_1 + \frac{\partial F}{\partial x_2}\Delta x_2 + \ldots + \frac{\partial F}{\partial x_n}\Delta x_n,$$

где Δx_i -- значение погрешности измерения x_i.

Оценка дисперсии измеренной величины:

$$S_y^2 = \left(\frac{\partial F}{\partial x_1}\right)_{\bar{x}}^2 S_1^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial x_2}\right)_{\bar{x}}^2 S_2^2 + \ldots +$$

$$+ 2\left(\frac{\partial F}{\partial x_1}\right)_{\bar{x}}\left(\frac{\partial F}{\partial x_2}\right)_{\bar{x}} \operatorname{cov}(x_1 x_2) + \ldots,$$

где $\left(\frac{\partial F}{\partial x_i}\right)_{\bar{x}}$ - значение частной производной в точке $\bar{x}$; S_i - выборочное среднеквадратическое отклонение x_i; $\operatorname{cov}(x_i\, x_{i+1})$ - ковариация или момент связи x_i и x_{i+1};

$$\operatorname{cov}(x_i x_{i+1}) = \frac{1}{m}\sum_{j=1}^{m}\left(x_{i,j} - \bar{x}_i\right)\left(x_{i+1,j} - \bar{x}_{i+1}\right), \qquad (1.12.3)$$

где m - число пар x_i и x_{i+1}.

Аналогично (1.12.3) определяется ковариация x_i и x_{i+k}.

При несвязанных (некоррелированных) x оценка измеряемой величины:

$$S_y^2 = \sum_{i=1}^{n}\left(\frac{\partial F}{\partial x_i}\right)^2 S_i^2.$$

Для определения тесноты линейной связи между измеряемыми величинами используют коэффициент корреляции

$$\rho_{xy} = \frac{\operatorname{cov}(x,y)}{S_x S_y} \cong \frac{\sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum (x_i - \bar{x})^2 (y_i - \bar{y})^2}}.$$

Для несвязанных величин он равен нулю. При подсчете коэффициента корреляции по выборке, если $|\rho|$ окажется малым, возникает подозрение, что отличие его от нуля определяется малостью выборки. Можно оценивать эту ошибку по вероятности неравенства $|\rho| < \varepsilon$(где ε зависит от заданной вероятности и закона распределения ρ).

При больших выборках доверительный интервал с уровнем значимости q для коэффициента корреляции равен

$$\left(\rho - t_\alpha \frac{1-\rho^2}{\sqrt{n}};\ \rho + t_\alpha \frac{1-\rho^2}{\sqrt{n}}\right).$$

Из этого следует, что гипотеза $\rho = 0$ не верна, если

$$\frac{|\rho|\sqrt{n}}{1-\rho^2} > t_\alpha,$$

где t_α - находят по табл. 1.12.1, приняв $t_\alpha = z$.

Иногда принимают, что с вероятностью 0,95 коэффициент корреляции между измеренными величинами отличен от нуля, если в результате эксперимента получится, что $|\rho| \geq 2 / \sqrt{n-1}$.

Пример. Для выборки $n = 60$ пар расчетное значение $\rho = 0{,}3$. Выяснить, можно ли с вероятностью $p = 0{,}95$ считать, что корреляционная связь имеет место.

Для того, чтобы воспользоваться табл. 1.12.1, обозначим $t_\alpha = z$ и определим, что $\Phi(z) = p / 2 = 0{,}495$. Из табл. 1.12.1 находим, что $t_\alpha = 2{,}58$. Так как $|\rho|\sqrt{n} / \left(1-\rho^2\right) = 0{,}3\sqrt{60} / \left(1 - 0{,}3\right) > 2{,}58$, коэффициент корреляции $\rho = 0{,}3$ с вероятностью $p = 0{,}95$ является значимой величиной.

Следует обратить внимание на то, что рассеяние, а следовательно, доверительный интервал ρ и оценка вероятности гипотезы существенно зависят от n.

1.12.4. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ ПРОЦЕССОВ

Значительная часть задач измерения процессов ограничивается восстановлением зависимости по результатам измерения. При этом если вид функции известен с точностью до постоянных, то задача сводится к косвенным измерениям. Но существует широкий класс задач, когда вид зависимости трудно предположить. В частности, такие задачи возникают при измерении отклонения текущего размера поверхности как изготовленной детали, так и в процессе обработки. Например, при измерении отклонений формы. При решении этого класса задач часто необходимо представить измеряемую зависимость в форме аналитического выражения. В основу такого подхода положено предположение о каких-то свойствах функции, описывающей измеряемую зависимость. Например, о ее периодичности или дифференцируемости. Цель, как

правило, состоит в том, чтобы представить измеряемую зависимость в виде суммы относительно простых функций, постоянные параметры которых определяют в результате измерений. Для этого широко используется представление измеряемой зависимости в форме степенного или тригонометрического полинома. Представление процесса в форме тригонометрического полинома используется и для получения информации о спектральном составе процесса по результатам отдельных измерений. Порядок полиномов ограничивается, как правило, погрешностью измерения. При этом отбрасывают те члены полученных полиномов, максимальное значение которых меньше погрешности измерения.

Тригонометрический полином может быть вида

$$f(x) = a_0 + \sum_{k=1}^{n}\left(a_k \cos kx + b_k \sin kx\right).$$

Одна из типовых задач состоит в том, чтобы по результатам измерения $f(x_i)$ для выбранных x_i ($i = 0, 1, 2, \ldots 2n$) подобрать коэффициенты полинома.

Если принять, что x_i являются узловыми точками полинома, то есть $f(x_i)$ являются значениями $f(x)$ в точке x_i, то ряд с конкретными значениями a_0, a_k и b_k получаем из уравнения

$$\begin{vmatrix} f(x) & 1 & \cos x & \sin x & \ldots & \cos nx & \sin nx \\ f(x_0) & 1 & \cos x_0 & \sin x_0 & \ldots & \cos nx_0 & \sin nx_0 \\ f(x_1) & 1 & \cos x_1 & \sin x_1 & \ldots & \cos nx_1 & \sin nx_1 \\ \ldots\ldots & . & \ldots\ldots & \ldots\ldots & \ldots & \ldots\ldots & \ldots\ldots \\ f(x_{2n}) & 1 & \cos x_{2n} & \sin x_{2n} & \ldots & \cos nx_{2n} & \sin nx_{2n} \end{vmatrix} = 0,$$

раскрывая определитель по элементам первого столбца и решая уравнение относительно $f(x)$. При этом предполагается, что $f(x)$ периодическая функция с периодом $T = 2\pi$ и задана на оси $-\infty < x < +\infty$. Это ограничение оказывается не существенным, если измеренные значения будут повторяться при x равных $x_i \pm mT$ (m =1, 2, ...). В противном случае возникает опасность расхождений действительных значений и аппроксимируемых тригонометрическим полиномом. Причем в первую очередь на краях интервала разложения.

Для ряда задач (например, при измерении частных видов отклонений от круглости) целесообразно использовать полином

$$f(x) = a_0 + \sum_{k=1}^{n} c_k \cos\left(k\varphi + \varphi_k\right),$$

где $c_k = \sqrt{a_k^2 + b_k^2}$ - амплитуда k-й гармоники, определяющая вид отклонения (k = 2 - овальность, k = 3 - трехгранка и т.п.); φ - угол поворота; φ_k = arctg (a_k / b_k)показывает смещение начала k-й гармоники по отношению к выбранному началу координат при измерении.

При измерении некоторых видов отклонений от прямолинейности $f(x)$ целесообразно представить в виде

$$f(x) = \sum_{k=1}^{n}\left(a_k \cos k\pi / l + b_k \sin k\pi / l\right),$$

где $2l$ - период и длина, на которой определяется отклонение от прямолинейности. При определении таких видов отклонений, как вогнутость, бочкообразность, длину детали принимают равной l, полагая, что на второй половине периода результаты измерений можно принять равными полученным с противоположным знаком.

Для гармонического анализа на ЭВМ часто используются следующие соотношения:

$$y(x) = \sum_{k=0}^{m-1}\left(a_k \cos kx + b_k \sin kx\right),$$

где

$$a_0 \cong \frac{2}{n}\sum_{k=0}^{n-1} y\left(k \cdot 2\pi / n\right),$$

$$a_m \cong \frac{2}{n}\sum_{k=0}^{n-1} y\left(k \cdot 2\pi / n\right)\cos m_k 2\pi / n,$$

$$b_m \cong \frac{2}{n}\sum_{k=0}^{n-1} y\left(k \cdot 2\pi / n\right)\sin m_k 2\pi / n,$$

$m = 1,2,\ldots,n/2-1.$

В тех случаях, когда число измеренных значений значительно больше порядка тригонометрического полинома, определяют

средние значения коэффициентов a_0, a_k и b_k, используя метод наименьших квадратов.

Если измеряемая зависимость может быть представлена функцией $f(x)$, имеющей производные до $(n + 1)$-го порядка, то для описания такой зависимости по результатам измерения можно использовать ряд Тейлора

$$f(x) \cong f(a) + (x-a)\frac{f'(a)}{1!} + (x-a)^2\frac{f''(a)}{2!} + \ldots + (x-a)^n\frac{f^{(n)}(a)}{n!},$$

где a - произвольная точка внутри интервала существования производных.

Измеряя при различных x_i значения $f(x_i)$,составляют систему уравнений, из которой определяют неизвестные $f^{(k)}(a)$.

Метод наименьших квадратов используют, если вид зависимости известен с точностью до постоянных. К таким задачам относятся, в частности, задачи сглаживания экспериментальных кривых. Его используют для выбора одной из заданных (с точностью до постоянных) зависимости наилучшим образом описывающей измеряемую. При этом оценка качества приближения определяется минимальной суммой квадратов отклонений результатов наблюдений от значений предполагаемой зависимости.

Методом наименьших квадратов вычисляются коэффициенты корреляционных уравнений.

Один из общих случаев представления измеряемой зависимости (функции) - представление ее полиномом m-й степени (во всех случаях ниже предполагается, что все y имеют равные веса):

$$y = A_0 + A_1x + A_2x^2 + \ldots + A_mx^m.$$

Задача заключается в определении таких значений коэффициентов A_0, A_1, A_2, ... , A_m, для которых:

$$F(A_0, A_1, \ldots, A_m) = \min\sum\delta_i^2,$$

$$i = 1,2,\ldots,k > m+1,$$

где $\delta_i = A_0 + A_1x_i + A_2x_i^2 + \ldots + A_mx_i^m - y_i$, y_i - измеренное значение y при $x = x_i$ или (x_i, y_i) - пара измеренных значений x и y.

Принимая в качестве условия минимума $\partial F/\partial A = 0$, коэффициенты A определяются из системы уравнений:

$$\begin{cases} \sum\left(A_0 + A_1x_1 + A_2x_i^2 + \ldots + A_mx_i^m - y_i\right) = 0; \\ \sum\left(A_0 + A_1x_1 + A_2x_i^2 + \ldots + A_mx_i^m - y_i\right)x_i = 0; \\ \sum\left(A_0 + A_1x_1 + A_2x_i^2 + \ldots + A_mx_i^m - y_i\right)x_i^2 = 0; \\ \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \\ \sum\left(A_0 + A_1x_1 + A_2x_i^2 + \ldots + A_mx_i^m - y_i\right)x_i^m = 0. \end{cases}$$

Типовые случаи восстанавливаемых зависимостей (или виды искомых корреляционных уравнений):

1) $y = ax$.

Вычисляется a по формуле

$$a = \frac{x_1y_1 + x_2y_2 + \ldots + x_ny_n}{x_1^2 + x_2^2 + \ldots + x_n^2},$$

где n - число измеренных пар x и y.

2) $y = ax + b$.

Для определения a и b необходимо решить систему уравнений

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^{n} x_iy_i - a\sum_{i=1}^{n} x_i^2 - b\sum_{i=1}^{n} x_i = 0; \\ \sum_{i=1}^{n} y_i - a\sum_{i=1}^{n} x_i - bn = 0. \end{cases}$$

3) $y = ax^b$.

Постоянные a и b определяются из соотношений:

$$\lg a = \frac{A}{B}, \quad b = \frac{B}{D},$$

где

$$D = \begin{vmatrix} n & \sum_{i=1}^{n}\lg x_i \\ \sum_{i=1}^{n}\lg x_i & \sum_{i=1}^{n}(\lg x_i)^2 \end{vmatrix},$$

$$A = \begin{vmatrix} \sum_{i=1}^{n}\lg y_i & \sum_{i=1}^{n}\lg x_i \\ \sum_{i=1}^{n}\lg x_i\lg y_i & \sum_{i=1}^{n}(\lg x_i)^2 \end{vmatrix},$$

$$B=\begin{vmatrix} n & \sum_{i=1}^{n}\lg y_i \\ \sum_{i=1}^{n}\lg x_i & \sum_{i=1}^{n}\lg x_i \lg y_i \end{vmatrix}$$

4) $y = ab^x$.

Коэффициенты a и b определяются из соотношений:

$$\lg a = \frac{A}{D},\quad \lg b = \frac{B}{D},$$

где

$$D=\begin{vmatrix} n & \sum_{i=1}^{n}x_i \\ \sum_{i=1}^{n}x_i & \sum_{i=1}^{n}x_i^2 \end{vmatrix},$$

$$A=\begin{vmatrix} \sum_{i=1}^{n}\lg y_i & \sum_{i=1}^{n}x_i \\ \sum_{i=1}^{n}x_i \lg y_i & \sum_{i=1}^{n}x_i^2 \end{vmatrix},$$

$$B=\begin{vmatrix} n & \sum_{i=1}^{n}\lg y_i \\ \sum_{i=1}^{n}x_i & \sum_{i=1}^{n}x_i \lg y_i \end{vmatrix}.$$

5) $y = a + b\lg x$.

Коэффициенты a и b определяются из системы уравнений:

$$\begin{cases} an + b\sum_{i=1}^{n}\lg x_i = \sum_{i=1}^{n} y_i \\ a\sum_{i=1}^{n}\lg x_i + b\sum_{i=1}^{n}(\lg x_i)^2 = \sum_{i=1}^{n} y_i \lg x_i . \end{cases}$$

1.12.5. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ ПРИ ВОССТАНОВЛЕНИИ ДИНАМИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

При восстановлении динамических моделей задачи можно разделить на два типа в зависимости от того, что известно о виде динамической модели: вид динамической модели известен в форме дифференциального уравнения с точностью до коэффициентов при производных; вид дифференциального уравнения не известен.

Решение задач первого типа сводится к рассмотренным в 1.12.4. В то же время достаточно часто встречаются ситуации, когда до опыта трудно предположить вид динамической модели. В частности, задачи определения динамической модели возмущенного движения (или возмущенной составляющей движения) в теории точности. Например, в случае механической обработки, при определении динамической модели возмущенного относительного движения инструмента и заготовки, в результате которого появляются отклонения формы обрабатываемой поверхности. В общем виде задача восстановления по результатам измерения динамической модели в форме дифференциального уравнения не имеет единственного решения. Поэтому применение предлагаемого ниже метода ограничено следующими двумя гипотезами:

1. Динамическая модель системы может быть представлена однородным обыкновенным дифференциальным уравнением n-го порядка:

$$P_0(y)d^n z / dy^n + P_1(y)d^{n-1}z / dy^{n-1} + \ldots +$$
$$+P_{n-1}(y)dz / dy + P_n(y)z = 0 \qquad (1.12.4)$$

(или системой n уравнений первого порядка) и точность представления определяется только порядком n дифференциального уравнения.

2. Погрешность измерения траектории пренебрежима мало меняет представление о поведении системы, динамическая модель которой восстанавливается. То есть предполагается, что при измерении траектории движения, определяемой динамическими свойствами системы, удается обеспечить пренебрежимо малую погрешность измерения.

Тогда процедура восстановления динамической модели в форме уравнения (1.12.4) будет состоять в следующем:

1. Результаты измерений представляются в виде суммы n линейно независимых функций вида $z_i = C_i\Phi_i(y)$. Для этого можно использовать изложенные выше методы обработки результатов наблюдений и, в частности, разложение в тригонометрический полином.

2. Составляется следующее уравнение:

$$\begin{vmatrix} z_1(y) & z_2(y) & \ldots & z_n(y) & z(y) \\ dz_1/dy & dz_2/dy & \ldots & dz_n/dy & dz/dy \\ \ldots & \ldots & \ldots & \ldots & \ldots \\ d^n z_1/dy^n & d_2^n z/dy^n & \ldots & d_n^n z/dy^n & d^n z/dy^n \end{vmatrix} = 0. \qquad (1.12.5)$$

Раскрывая определитель по элементам правого столбца, приходим к уравнению (1.12.4).

Пример. Найти модель динамической системы, определяющей возмущенное относительное движение инструмента и заготовки при проточке канавки на валу, если в результате измерений радиуса обрабатываемой поверхности с интервалом в 7,5 с (начиная с некоторого t_0 по t_n) получили следующие значения глубины проточки в мм: 1,6685; 3,5940; 5,4320; 7,9800; 8,3427; 9,0000; 11,6797; 14,1960; 16,2958; 17,7450; 18,3538; 18,0000. А номинальное движение (подача) должно идти по линейной зависимости.

Используя метод наименьших квадратов при обработке результатов наблюдений, получим линейную составляющую изменения радиуса:

$$z = 0{,}1\ y,$$

где для удобства сопоставления с (1.12.4) и (1.12.5) время t обозначено через y.

Очевидно, что возмущенное движение будет отражено отклонениями от полученной зависимости. Тогда проведем гармонический анализ отклонений от вычисленной прямой и получим следующее выражение:

$$z(y) = 1 + \cos 2y + \sin 2y.$$

Если предположить, что результаты измерений получены за последний оборот заготовки (t_n - t_0 - время последнего оборота), то два последних члена показывают вид (овальность) и величину отклонения формы обработанной поверхности. Найдем динамическую модель в форме дифференциального уравнения по изложенной выше методике. Для этого примем

$$z_1 = 1,\ z_2 = \cos 2y,\ z_3 = \sin 2y.$$

Составим в соответствии с (1.12.5) уравнение

$$\begin{vmatrix} 1 & \cos 2y & \sin 2y & z(y) \\ 0 & -2\sin 2y & 2\cos 2y & dz/dy \\ 4 & -4\cos 2y & -4\sin 2y & d^2z/dy^2 \\ 0 & 8\sin 2y & -8\cos 2y & d^3z/dy^3 \end{vmatrix} = 0.$$

Раскрывая определитель, получим дифференциальное уравнение

$$d^3z(y)/dy^3 + 4dz(y)/dy = 0.$$

Естественно, что детальный анализ и выводы из полученного решения должен делать специалист по исследуемым процессам. Но всегда важно обратить внимание на соотношение коэффициентов при производных и на порядок дифференциального уравнения, который совпадает с числом n линейно независимых функций z_i, если при раскрытии определителя в уравнении (1.12.5) коэффициент при высшей производной не обращается в 0 на рассматриваемом интервале y.

1.12.6. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЯ СЛУЧАЙНЫХ ПРОЦЕССОВ

Эти задачи связаны с определением зависимостей между значениями результатов измерений при получении статистических характеристик случайных процессов. Полученные характеристики случайных процессов включают и погрешность измерения из-за сложности ее выделения в измеренной случайной величине. А так как обрабатываются дискретные значения результатов измерения, полученные в различные моменты времени (для различных значений аргументов), то характеристики будут зависеть от шага дискретности при измерении.

Для вычисления **эмпирической ковариации** случайного процесса $x(t)$ используют формулу

$$\operatorname{cov}(t', t'') = 1/n \sum_{i=1}^{n} \left[x_i(t') - \bar{x}(t')\right] \times \left[x_i(t'') - \bar{x}(t'')\right],$$

где n - число реализаций; t' и t'' - выбранные значения параметра t; $x_i(t')$ и $x_i(t'')$ - значения процесса в точке t' и t'' по i-й реализации.

Давая различные значения t' и t'', получают ряд значений $\operatorname{cov}(t', t'')$, и аппроксимируют эти значения какой-либо поверхностью в координатной системе t', t'', $\operatorname{cov}(t', t'')$. Аппроксимирующую поверхность и принимают за статистическую оценку **корреляционной функции.**

Аналогично определяется эмпирическое значение **взаимной корреляционной функции** двух случайных процессов $X(t)$ и $Y(t)$. При этом используется формула:

$$\operatorname{cov}_{xy}(t', t'') = (1/n) \sum_{i=1}^{n} \left[x_i(t') - \bar{x}(t')\right] \times \left[y_i(t'') - \bar{y}(t'')\right],$$

где y - измеренные значения $Y(t)$; x - измеренные значения $X(t)$.

Определение статистических оценок стационарного случайного процесса можно производить путем усреднения данных по неслучайному параметру t, в том числе и по одной реализации процесса, если она охватывает достаточно большой интервал t.

Статистическую оценку **автокорреляционной функции** находят по формуле

$$b(\mu) = \frac{1}{n-\mu}\sum_{i=1}^{n-\mu}\left(x_i - \bar{x}\right)\left(x_{i+\mu} - \bar{x}\right),$$

где $\bar{x}$ - среднее значение x_i, взятых внутри выбранного отрезка случайной функции.

Оценка **нормированной автокорреляционной функции**:

$$r(\mu) = \frac{\sum_{i=1}^{n-\mu}\left(x_i - \bar{x}\right)\left(x_{i+\mu} - \bar{x}\right)}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n-\mu}\left(x_i - \bar{x}\right)^2 \sum_{i=1}^{n-\mu}\left(x_{i+\mu} - \bar{x}\right)^2}}.$$

Оценка **взаимной корреляционной функции** двух стационарных случайных процессов:

$$b_{xy}(\mu) = \frac{1}{n-\mu}\sum_{i=1}^{n-\mu}\left(x_{i+\mu} - \bar{x}\right)\left(y_i - \bar{y}\right).$$

1.12.7. ОБРАБОТКА ДАННЫХ ПРИ ИЗМЕРЕНИИ КАЧЕСТВА

Особенности измерения качества связаны, в первую очередь, с тем, что по определению качество - это совокупность свойств, что обусловливает два этапа решения задачи количественной оценки качества: измерение отдельных свойств (характеристик или показателей); получение совокупного значения количественной оценки качества. В общем случае совокупность свойств (характеристик или показателей) целесообразно разделить на две группы: свойства, полностью определяющиеся величинами, которые выражаются в единицах, имеющих эталоны; свойства, которые не определяются в единицах, имеющих эталоны. Последние можно разделить на свойства (характеристики или показатели), количественные значения которых вычисляются по соотношениям следующим из определения, и на свойства (характеристики или показатели), количественная оценка которых требует создания специальных шкал, что приводит к специфическим задачам обработки данных, полученных при измерении этих свойств. Основным методом количественной оценки последней группы свойств является экспертный метод, в основе которого лежит присвоение экспертом каждому свойству (характеристике или процессу) численного значения по выбранной шкале.

Экспертным методом решаются следующие типовые задачи:

- сравнение двух и более номинально одинаковых изделий (процессов);
- сравнение изделий или процессов одинакового функционального назначения;
- ранжирование характеристик изделия (или процесса) или ранжирование изделий (или процессов).

Для обеспечения качества измерения экспертным методом привлекается группа экспертов и поэтому задача обработки данных разделяется на две, имеющие самостоятельное значение. Обработка данных, полученных от каждого эксперта и объединение результатов оценки всех экспертов с учетом их компетентности.

Обработка данных одного эксперта. При формализации перечисленных задач можно свести их к одной задаче, которую рассмотрим на примере ранжирования свойств (характеристик или показателей).

Предположим, что качество изделия (или процесса) описывается n показателями, которые не выражаются через величины, имеющие эталоны единиц, и требуют создания специальных шкал для их количественной оценки. На первом этапе поставим задачу разделить показатели по их значимости, используя количественные соотношения значимостей.

Одним из эффективных методов экспертной оценки является метод парных сравнений. При этом эксперт по выбранной шкале дает количественную оценку сравнения j-го показателя с k-м. Обозначим значение этой оценки a_{jk}. В этом случае рекомендуется использовать шкалу, построенную по следующему правилу:

$$a_{jk} = \begin{cases} 1, \text{ если } j\text{-й и } k\text{-й показатели имеют одинаковую важность;} \\ 3, \text{ если } j \text{ -й показатель немного важнее } k \text{ -го;} \\ 5, \text{ если } j \text{ -й показатель существенно важнее } k \text{ -го;} \\ 7, \text{ если } j \text{ -й показатель значительно важнее } k \text{ -го;} \\ 9, \text{ если } j \text{ -й показатель абсолютно важнее } k \text{ -го.} \end{cases}$$

$i, j = 1, \ldots, m$, где m - число характеристик. В общем случае $n \neq m$, но это усложняет расчеты. Эксперт может назначить и промежуточные значения a_{jk}, то есть 2, 4, 6 или 8.

На a_{ij} накладываются следующие условия:

1) $a_{ij} = 1$ при $i = j$;

2) $a_{ij} > 0$, $i = 1, \ldots, n$;

3) $a_{ij} = 1 / a_{ji}$, $i, j = 1, \ldots, n$. (1.12.6)

Если эксперт был последовательным в назначении оценок, то они будут удовлетворять условию

$$a_{ij}\, a_{jk} = a_{ik}.$$

После назначения a_{jk} для каждого l-го эксперта составляется матрица парных значений:

$$A^l = \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nn} \end{vmatrix}, \quad l = 1,\dots,n,$$

где n - число экспертов и число показателей качества, оцениваемых каждым экспертом.

Примем, что при ранжировании каждому i-му показателю необходимо поставить в соответствие некоторое положительное число W_i (i=1, ... , m), такое, что

$$0 < W_i < 1 \quad \text{и} \quad \sum_{i=1}^{m} W_i = 1.$$

W_i назовем коэффициентом относительной важности i-го показателя качества. Очевидно, что, придавая W_i другой смысл, будет решаться другая задача. Совокупность W_i для каждого l-го эксперта образует вектор-столбец:

$$W^l = \begin{vmatrix} W_1^l \\ W_2^l \\ \dots \\ W_m^l \end{vmatrix}$$

Элементы a_{jk} матриц парных сравнений являются оценками отношений элементов W_j и W_k вектора-столбца.

Если условие (1.12.6) выполняется, то обеспечивается равенство

$$A \cdot W = m \cdot W.$$

Тогда для оценки коэффициентов относительной важности можно использовать формулу: $W_i = 1 / a_{ki}$, $i = 1, \dots, m$.

(k - номер любой строки).

Если условие (1.12.6) не выполняется, для определения W_i используется уравнение

$$A \cdot W = \lambda_{\max} \cdot W,$$

где $\lambda_{\max}$ - максимальное собственное значение матрицы A.

При решении уравнения последовательно находят $\lambda_{\max}$ и соответствующий этому значению собственный вектор W. Для удобства сопоставления и для дальнейших расчетов W_i нормируют по формуле

$$W_i = W_i \Big/ \sum_{i=1}^{m} W_i.$$

В качестве характеристики согласованности суждений каждого эксперта по методике Саати используется коэффициент согласованности

$$CI = \left(\lambda_{\max} - m\right)/\left(m - 1\right).$$

Полагая, что рассогласованность увеличивает меру случайного, для матриц различной размерности установлены следующие значения случайного индекса RI:

Размерность матрицы	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
RI	0	0	0,58	0,9	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49

Для оценки экспертов используют **отношение соответствия**

$$CR = CI / RI.$$

Если $CR < 0{,}1$, то оценки экспертов можно считать не случайными и матрицу парных сравнений можно использовать без уточнений.

Объединение оценок группы экспертов может проводиться различными методами. Один из наиболее простых состоит в том, что элементы матрицы A вычисляются как среднеквадратические значения:

$$a_{ij} = \sqrt{\sum_{l=1}^{n} \left(a_{ij}^l\right)^2}.$$

Недостаток метода в том, что слабо учитывается различие в компетентности экспертов.

Другой метод основан на использовании $\lambda_{\max}$ как характеристики несогласованности оценок экспертов. Здесь используются оценки коэффициентов CI в виде

$$C_l = \left(\sum_{l=1}^{n} \lambda^l_{\max}\right) \Big/ \lambda^l_{\max}, \quad l = 1,\ldots,n.$$

Эти оценки нормируют по формуле

$$\overline{C}_l = nC_l \Big/ \sum_{l=1}^{n} C_l, \quad l = 1,\ldots,n.$$

Элементы общей матрицы A вычисляют по формуле

$$a_{jk} = \sqrt{\prod_{l=1}^{n} \left(a^l_{jk}\right) \overline{C}_l}.$$

$\overline{C}_l$ характеризует уровень непротиворечивости оценок при составлении матриц парных сравнений.

При выборе изделий (процессов) или при определении предпочтительности взаимозаменяемых или близких по функциональному назначению изделий можно использовать **метод простого аддитивного взвешивания**. При этом для каждого (i-го) изделия составляются обобщенные оценки:

$$\Phi_i = \sum_{l=1}^{m} g_{ji} \cdot W_l,$$

где g_{ji} - количественная оценка i-го изделия (процесса) с точки зрения j-го показателя.

В общем случае для того, чтобы соотношения носили более универсальный характер, исходные оценки g_{ji} нормируют.

Глава 1.13

МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИЗМЕРЕНИЙ

Метрологическое обеспечение измерений включает установление и применение технических средств, правил и норм, необходимых для достижения единства и требуемой точности измерений.

Под **единством измерений** понимают такое состояние измерений, при котором результаты измерений выражены в узаконенных единицах, а погрешности известны с заданной вероятностью.

Государственная система обеспечения единства измерений - это комплекс регламентированных стандартами взаимоувязанных правил и положений, требований и норм, определяющих организацию и методику проведения работ по оценке и обеспечению точности измерений, результаты которых используются государственными органами, предприятиями и учреждениями страны.

Аналогичные задачи стоят перед отраслевой и любой другой системой обеспечения единства измерений.

В государственной системе обеспечения единства измерений регламентации подлежат:

- единицы физических величин;
- методы и средства воспроизведения единиц физических величин (в частности, государственные эталоны);
- методы и средства передачи размеров единиц физических величин рабочим средствам измерений, обеспечивающие необходимую точность передачи (в частности, поверочные схемы);
- номенклатура, способы выражения и количественные значения нормируемых метрологических характеристик средств измерений;
- организация, порядок и методика проведения государственных испытаний средств измерений;
- организация, порядок и методика проведения поверки, ревизии и экспертизы, обеспечивающие необходимый уровень надежности средств измерений и правильность их применения;
- требования к методикам выполнения измерений; номенклатуру и способы выражения показателей точности измерений и формы представления результатов измерений, обеспечивающие возможность их сравнительной оценки и совместного использования.

1.13.1. ФИЗИЧЕСКИЕ ВЕЛИЧИНЫ И АНАЛИЗ РАЗМЕРНОСТЕЙ

Понятие **физическая величина** относят к свойству общему в количественном отношении многим физическим объектам, физическим системам, их состояниям и происходящим в них процессам, но в количественном отношении индивидуальному для каждого объекта системы, состояния или процесса.

Количественное содержание в данном объекте свойства, соответствующего понятию "физическая величина", определяется **размером физической величины**, оценка которого в виде некоторого числа принятых единиц соответствует **значению физической величины**.

Различают **истинное значение** физической величины, которое идеальным образом количественно отражало бы соответствующее свойство, и **действительное значение**, являющееся лишь оценкой истинного значения, но настолько близкое к нему, что для данной цели может быть использовано вместо него.

Совокупность физических величин, связанных между собой зависимостями, относят к **системам физических величин**, которые состоят

из **основных** и **производных** физических величин. Основные выбираются по соглашению и принимаются условно независимыми от других величин этой системы. Производные величины определяются через основные. При этом **размерность физической величины** представляет собой выражение, отражающее связь производной величины с основными при коэффициенте пропорциональности равном 1.

Размерность любой физической величины представляет собой произведение возведенных в степень размерностей первичных величин. Конкретные практические ситуации обычно ограничиваются использованием трех основных единиц системы. Тогда размерность любой величины

$$[Q] = [M]^{\mu} \cdot [L]^{\lambda} \cdot [T]^{\tau}.$$

Это основная формула размерности (в данном случае для трех основных единиц).

Переход от одной системы единиц к другой должен быть таким, чтобы обеспечивались два условия:

1) размерности новых основных единиц должны быть независимыми функциями размерностей основных единиц начальной системы;

2) размерности основных единиц начальной системы единственным образом могут быть выражены через размерности основных единиц новой системы, то есть обратное преобразование единственно.

Предположим, что необходимо перейти к новой системе, где размерности основных единиц

$$[p_1];\ [p_2];\ [p_3].$$

Тогда размерности $[p_1]$, $[p_2]$ и $[p_3]$ будут соответственно равны:

$$[p_1] = [M]^{\mu 1} \cdot [L]^{\lambda 1} \cdot [T]^{\tau 1},$$
$$[p_2] = [M]^{\mu 2} \cdot [L]^{\lambda 2} \cdot [T]^{\tau 2},$$
$$[p_3] = [M]^{\mu 3} \cdot [L]^{\lambda 3} \cdot [T]^{\tau 3}$$

при условии, что

$$\begin{vmatrix} \mu_1 & \lambda_1 & \tau_1 \\ \mu_2 & \lambda_2 & \tau_2 \\ \mu_3 & \lambda_3 & \tau_3 \end{vmatrix} \neq 0.$$

Производные единицы, имеющие специальные наименования, представлены в табл. 1.13.1.

Последовательность значений, присвоенная последовательности одноименных физических величин различного размера в соответствии с правилами, принятыми по соглашению, называют **шкалой физической величины**. **Единица физической величины** - это физическая величина, которой по определению присвоено числовое значение, равное 1. Совокупность основных и производных единиц, относящаяся к некоторой системе величин и образованная в соответствии с принятыми принципами, образует **систему единиц физических величин**.

СИ - международная система единиц с основными единицами: метр, килограмм, секунда, ампер, кельвин, кандела, моль; дополнительными - радиан, стерадиан и неограниченным числом производных единиц. К основным относятся единицы физических величин длины, массы, времени, силы электрического тока, термодинамической температуры, силы света и количества вещества. К дополнительным относятся единицы плоского и телесного углов.

Наиболее предпочтительной и рекомендуемой для использования в технике является система СИ. Все основные единицы этой системы имеют **первичные эталоны**, представляющие собой средства измерений (комплексы средств измерений), обеспечивающие воспроизведение и хранение единиц физических величин с наивысшей доступной точностью. Первичные эталоны основных единиц воспроизводят единицу в соответствии с ее определением.

1.13.2. ЕДИНИЦЫ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН И ИХ ЭТАЛОНЫ

За **единицу длины** - метр (русское обозначение - м, международное - m) принята (в 1983 году XVIII Генеральной конференцией мер и весов) длина пути, проходимого в вакууме светом за 1/299792458 долю секунды. Государственный первичный эталон для воспроизведения единицы длины - метра как 1650763,73 длин волн в вакууме излучения, соответствующего переходу между уровнями $2p_{10}$ и $5d_5$ атома криптона-86 (определение 1960 г, ГОСТ 8.020-75), воспроизводит его со среднеквадратическим отклонением результата измерения $S_0 = 5 \cdot 10^{-9}$. Для реализации нового определения метра в системе СИ введена вторая константа (первая - это магнитная постоянная $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м) - это установленная по соглашению скорость света в вакууме c = 299792458 м/с. Это определение метра повысило точность его воспроизводства до 10^{-12}.

Единица времени - секунда (русское обозначение - с, международное - s) равна 9 192 631 770 периодам излучения, соответствующего переходу между двумя сверхтонкими уровнями основного состояния атома цезия-133. Государственный первичный эталон времени и частоты, используя в качестве репера частоты генератор колебаний на атомном водороде, имеет погрешность воспроизведения $3 \cdot 10^{-12}$.

1.13.1. Производные единицы, имеющие специальные наименования

Величина		Единица		
Наименование	Размерность	Наименование	Обозначение	Выражение через др. ед.
Частота	T^{-1}	герц	Гц; Hz	s^{-1}
Сила, вес	LMT^{-2}	ньютон	Н, N	$m \cdot kg \cdot s^{-2}$
Давление, механическое напряжение, модуль упругости	$L^{-1}MT^{-2}$	паскаль	Па; Pa	$m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-2}$
Энергия, работа, количество теплоты	L^2MT^{-2}	джоуль	Дж; J	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2}$
Мощность, поток энергии	L^2MT^{-3}	ватт	Вт; W	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3}$
Количество электричества (электрический заряд)	TI	кулон	Кл; C	$s \cdot A$
Электрическое напряжение, электрический потенциал, разность электрических потенциалов, электродвижущая сила	$L^2MT^{-3}I^{-1}$	вольт	В, V	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-1}$
Электрическая емкость	$L^{-2}M^{-1}T^4I^2$	фарад	Ф, F	$m^{-2} \cdot kg^{-1} \cdot s^4 \cdot A^2$
Электрическое сопротивление	$L^2MT^{-3}I^{-2}$	ом	Ом; Ω	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-2}$
Электрическая проводимость	$L^{-2}M^{-1}T^3I^2$	сименс	См; S	$m^{-2} \cdot kg^{-1} \cdot s^3 \cdot A^2$
Поток магнитной индукции, магнитный поток	$L^2MT^{-3}I^{-1}$	вебер	Вб, Wb	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-1}$
Плотность магнитного потока, магнитная индукция	$MT^{-2}I^{-1}$	тесла	Тл; T	$kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-1}$
Индуктивность, взаимная индуктивность	$L^2MT^{-2}I^{-2}$	генри	Гн; H	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-2}$
Световой поток	J	люмен	лм; lm	$cd \cdot sr$
Освещенность	$L^{-2}J$	люкс	лк; lx	$m^{-2} \cdot cd \cdot sr$
Активность нуклида в радиоактивном источнике	T^{-1}	беккерель	Бк; Bg	s^{-1}
Поглощенная доза излучения, керма, показатель поглощенной дозы излучения	L^2T^{-2}	грей	Гр; Gy	$m^2 \cdot s^{-2}$

Единица массы - килограмм (русское обозначение - кг, международное - kg) равен массе международного прототипа килограмма. Погрешность воспроизведения единицы государственным первичным эталоном - $3 \cdot 10^{-8}$. Государственный первичный эталон массы состоит из копии международного прототипа килограмма (прототип N 12), эталонных весов на 1 кг N 1 и N 2, служащих для передачи единицы массы от прототипа N 12 эталонам-копиям и от эталонов-копий рабочим эталонам.

Единица термодинамической температуры - Кельвин (русское обозначение - K, международное - K) равен 1/273,16 термодинамической температуры тройной точки воды. Погрешность воспроизведения с помощью государственного первичного эталона 0,0001 K ($0{,}0001^0$C). Установлено равенство единиц 1^0C= 1K. Соотношение между температурой Кельвина и Цельсия: $t^0C = T[K] - 273[K]$.

Международная практическая температурная шкала (МПТШ-68) основана на 12 воспроизводимых равновесных температурных состояниях - определяющих точках. В интервалах между определяющими точками значения температуры основываются на показаниях эталонных термометров и рассчитываются по предписанным интерполяционным формулам, устанавливающим связь между показаниями эталонных приборов и МПТШ-68.

В качестве эталонного термометра в области от 13,81 до 903,89 K принят платиновый термометр сопротивления. Эта область разбита на 5 подобластей, для каждой из которых определены формулы интерполяции в виде полиномов 4-й степени. В области от 903,89 до 1337,58 K эталонным термометром является термопара с электродами из платины и платинородия, содержащего 10% родия. Выше 1337,58 K Международная практическая температура определяется спектральным термометром в соответствии с законом излучения Планка:

$$\frac{L_\lambda(\lambda, T_{68})}{L_\lambda(\lambda, T_{68}(Au))} = \frac{\exp\left(c/(\lambda, T_{68}(Au))\right) - 1}{\exp\left(c/(\lambda, T_{68})\right) - 1},$$

где c = 0,014388 м·K; $L_\lambda(\lambda, T_{68})$ - спектральная плотность излучения черного тела при длине волны λ и подлежащей измерению температуре T_{68}; $L_\lambda(\lambda, T_{68}(Au))$ - спектральная плотность черного тела при исходной температуре $T_{68}(Au)$ = 1337,58 K (точка затвердевания золота) при той же длине волны λ.

Область температур ниже 13,81 K (тройной точки водорода) в МПТШ-68 не определена.

Единица силы электрического тока - ампер (русское обозначение - A, международное-A) равен силе неизменяющегося тока, который при прохождении по двум параллельным прямолинейным проводникам бесконечной длины и ничтожно малой площади кругового поперечного сечения, расположенным в вакууме на расстоянии 1 м один от другого, вызвал бы на каждом участке проводника длиной 1 м силу взаимодействия, равную $2 \cdot 10^{-7}$ Н. Государственный первичный эталон воспроизводит единицу с погрешностью 0,001%, измеряя взаимодействие с помощью токовых весов.

Единица силы света - кандела (русское обозначение - кд, международное - cd) равна силе света, испускаемого с поверхности площадью 1/600000 $м^2$ полного излучателя в перпендикулярном направлении, при температуре излучателя, равной температуре затвердевания платины при давлении 101325 Па. Единица воспроизводится при помощи излучателя - цилиндрической трубы из окиси тория, открытой с одной стороны и помещенной в расплавленную платину. Погрешность воспроизведения 0,5%.

Единица количества вещества - моль (русское обозначение - моль, международное - mol) равен количеству вещества системы, содержащей столько же структурных элементов, сколько содержится атомов в углероде-12 массой 0,012 кг.

Единица плоского угла - радиан (русское обозначение - рад, международное - rad) равен углу между двумя радиусами окружности, длина дуги между которыми равна радиусу. Государственный эталон воспроизводит углы в диапазоне 0 - 360^0 и состоит из набора многогранных призм и автоматизированной измерительной системы, которая служит для наведения на изображение марок двух автоколлиматоров и измерения разности смещения этих марок, пропорциональной углу между гранями многогранной призмы. Погрешность воспроизведения единицы: среднее квадратическое отклонение S_0 = 0,01" и неисключенная систематическая θ_0 = 0,02". При значении измеряемого угла 10" абсолютная погрешность Δ = 0,008.

Для специальных задач измерений созданы государственные специальные эталоны. В линейных измерениях специальными областями являются измерения параметров шероховатости поверхности и отклонений формы. Для метрологического обеспечения этих измерений созданы государственные специальные эталоны единицы длины.

Государственный специальный эталон единицы длины в области измерения R_{max} (наибольшая высота профиля неровностей - расстояние между линией выступов и линией впадин профиля неровностей) и Rz (высота неровностей профиля по десяти точкам - сум-

ма средних абсолютных значений высот пяти наибольших выступов профиля и глубин пяти наибольших впадин профиля) основан на использовании эталонной меры шероховатости. Погрешности воспроизведения (результатов измерений) параметров R_{max} и Rz в диапазоне 0,1 - 1 мкм составляет $S_0 = 0{,}005$ мкм и $\theta_0 = 0{,}005$ мкм и в диапазоне 1 - 1000 мкм $S_0 = 0{,}05$ мкм и $\theta_0 = 0{,}05$ мкм.

Государственный специальный эталон единицы длины в области измерений отклонений от прямолинейности и плоскостности воспроизводит отклонение от прямолинейности и от плоскостности в диапазоне 0 - 50 мкм с погрешностью $S_0 = 0{,}1L$ мкм и $\theta_0 = 0{,}1L$ мкм, где $L = 0 \div 5$ м.

1.13.3. ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ. КЛАССИФИКАЦИЯ

Качество измерений, отражающее близость их результатов к истинному значению измеряемой величины (точность), соразмеряют отклонениями результатов измерений от истинных значений измеряемых величин **погрешностями измерений**. На практике за погрешность измерения принимают:

$$\Delta = d_{изм} - d_д,$$

где $d_{изм}$ - измеренное значение величины; $d_д$ - действительное значение измеряемой величины.

При этом за действительное значение измеряемой величины принимают измеренное значение, но с погрешностью пренебрежимо малой в сравнении с определяемой для решения поставленной задачи измерения. Погрешность измерения сложная величина. В общем случае выделяют следующие группы составляющих погрешности измерения:

1. **Методические погрешности**, возникающие из-за несовершенства метода измерения; допущений, принятых при обосновании метода; ограниченной точности формул, используемых для описания тех явлений, которые положены в основу вычисления результатов измерений и т. п.

2. **Воздействие средства измерения на измеряемую величину**.

3. **Инструментальные погрешности**.

4. **Погрешности отсчитывания и квантования**. Первые обусловлены субъективными особенностями оператора, вторые - дискретностью представления результата измерений.

5. **Погрешности обработки данных измерений (наблюдений)**.

В зависимости от поставленной задачи измерения, от выбора классификационного признака принимают одну из следующих структур погрешности измерения:

I. $\Delta = \Delta_{сл} + \Delta_{сист}$,

где $\Delta_{сл}$ - случайная составляющая погрешности измерения; $\Delta_{сист}$ - систематическая составляющая погрешности измерения.

Такое разделение погрешности связано с тем, что при измерении существенна случайная составляющая. Оно используется и совместно с другими классификационными признаками. К систематическим относят составляющие, которые закономерно изменяются (в том числе могут оставаться постоянными) при повторных измерениях одной и той же величины. К случайным относят составляющие, о появлении значений которых (в частности, при повторных измерениях) можно говорить только с какой-либо вероятностью.

II. $\Delta = \Delta_{ми} + \Delta_{си} + \Delta_{ои}$,

где $\Delta_{ми}$ - методическая составляющая погрешности измерения; $\Delta_{си}$ - инструментальная составляющая погрешности измерения; $\Delta_{ои}$ - составляющая погрешности измерения, обусловленная отсчитыванием (или квантованием) измеряемой величины.

Этот подход используется при аттестации методик измерения, при выборе средств измерения, особенно тогда, когда существенна методическая составляющая погрешности измерения. В частности, это характерно для линейных измерений.

III. $\Delta = \Delta_{си} + \Delta_{фв} + \Delta_{вв} + \Delta_{дин}$,

где $\Delta_{фв}$ - составляющая погрешности, обусловленная влиянием на измеряемую величину (или объект исследования) различных факторов; $\Delta_{си}$ - инструментальная составляющая погрешности измерения; $\Delta_{вв}$ - составляющая погрешности измерения, обусловленная влиянием средства измерения на измеряемую величину; $\Delta_{дин}$ - динамическая составляющая погрешности измерения.

Такая классификация связана с необходимостью определять влияние различных известных факторов на точность измерения. Обычно и погрешность средства измерения представляют в этом случае как сумму **основной и дополнительной погрешности средства измерения**. При этом дополнительная погрешность рассматривается как составляющая погрешности средства измерения, возникающая при отклонении условий эксплуатации средств измерений от нормальных (см. 2.3). Детализация факторов приводит к необходимости разложения на составляющие и дополнительной погрешности средства измерения, и $\Delta_{фв}$.

IV. $\Delta = \Delta_{ст} + \Delta_{кин} + \Delta_{дин}$,

где $\Delta_{ст}$ - статическая составляющая погрешности измерения: $\Delta_{кин}$ - кинематическая составляющая погрешности измерения; $\Delta_{дин}$ - динамическая составляющая погрешности измерения.

Эта классификация используется тогда, когда погрешность измерения определяется в основном изменением измеряемой величины во времени и, в частности, движением объекта исследования. Например, при измерении размеров (или отклонений формы) деталей в процессе механообработки или при контактных измерениях толщины листа в процессе прокатки.

V. $\Delta = \Delta_{мульт} + \Delta_{аддит}$,

где $\Delta_{мульт}$ - мультипликативная составляющая погрешности измерения; $\Delta_{аддит}$ - аддитивная составляющая погрешности измерения.

Аддитивная составляющая по определению не зависит от значения измеряемой величины. Используют такое разделение при линейной характеристике измерительного преобразования и поэтому мультипликативную составляющую, по определению зависящую от значения измеряемой величины, представляют в форме $kd_{изм}$. Разделение погрешности на мультипликативную и аддитивную составляющие удобно при выборе методов коррекции.

1.13.4. ПОКАЗАТЕЛИ ТОЧНОСТИ И ФОРМА ПРЕДСТАВЛЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

Точность измерений может быть представлена следующими показателями:

1. Интервалом значений от нижней $\Delta_н$ до верхней $\Delta_в$ границы, в котором результат измерения находится с заданной вероятностью. Например, 10,000 мм Δ от 0,010 до 0,015 мм, $P = 0,99$.

2. Интервалом значений от нижней $\Delta_{сн}$ до верхней $\Delta_{св}$ границы, в котором систематическая составляющая находится с заданной вероятностью P_c и средним квадратическим отклонением случайной составляющей погрешности $\sigma(\Delta^0)$, стандартной аппроксимацией функции распределения случайной составляющей погрешности. Например, 10,20 м^2/с Δ_c от 0,15 до 25 м^2/с, P_c =0,95, $\sigma(\Delta^0)$= =0,20 м^2/с, равновероятный.

3. Стандартными аппроксимациями функции распределения систематической и случайной составляющих погрешности и их средними квадратическими отклонениями $\sigma(\Delta_c)$ и $\sigma(\Delta^0)$. Например, 153,07 В, $\sigma(\Delta_c)$ = 0,03 В, равновероятный, $\sigma(\Delta^0)$ = 0,01 В, нормальный.

4. Функциями распределения систематической и случайной составляющих погрешности измерения задаваемыми таблицами, графиками (с указанием масштаба) или формулами (с указанием численных значений параметров), причем обе функции распределения должны задаваться в одинаковой форме.

Перечисленные формы представления характерны для однократных измерений. При многократных наблюдениях вместе со значением результата измерений в единицах измеряемой величины точность результата измерения может быть представлена:

- доверительными границами (доверительным интервалом) случайной составляющей погрешности результата измерений;

- доверительными границами неисключенной систематической составляющей погрешности результата измерений;

- доверительными границами погрешности результата измерений.

Помимо точности качество измерений характеризуют такие параметры, как **правильность, сходимость и воспроизводимость** измерений. Правильность отражает близость к нулю систематических погрешностей; сходимость - близость друг к другу результатов измерений, выполненных в одинаковых условиях; воспроизводимость - близость друг к другу результатов измерений, выполненных в различных условиях (в различное время, различными методами и средствами). Для правильности, сходимости и воспроизводимости показатели не установлены.

1.13.5. НОРМИРУЕМЫЕ МЕТРОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Номенклатура метрологических характеристик и их назначение регламентируются стандартом только для средств измерения (т.е. регламентируется лишь инструментальная составляющая погрешности измерения). Выделено шесть групп метрологических характеристик средств измерений:

1) для определения результатов измерения;

2) погрешностей средств измерения;

3) чувствительности средств измерения к влияющим величинам (функции влияния);

4) динамические;

5) характеристики влияния взаимодействия средства и объекта измерений;

6) неинформативные параметры выходных сигналов.

Первая группа регламентирует функцию преобразования, значения мер, цену деления или единицу наименьшего разряда кода, в

котором представляется результат измерения, вид выходного кода и число разрядов кода.

Вторая группа определяет основную погрешность без учета динамики процесса измерения.

Третья группа определяет дополнительную погрешность средства измерения.

Четвертая группа может включать такие характеристики, как переходная функция, амплитудно-частотная характеристика, фазочастотная характеристика, передаточная функция, постоянная времени, время запаздывания и др. Она используется для регламентации точности средств измерений для динамических измерений или работающих в динамических условиях.

Пятая группа характеристик в зависимости от измеряемой величины может быть представлена входными и выходными полными сопротивлениями (для электрических измерений), измерительной силой для контактных линейных измерений и т.п.

Шестая группа характеристик предназначена для регламентации диапазонов тех параметров выходного сигнала, которые могут влиять на точность измерений, не являясь непосредственно связанными с измеряемой величиной.

1.13.6. МЕТРОЛОГИЧЕСКАЯ АТТЕСТАЦИЯ СРЕДСТВ И МЕТОДОВ ИЗМЕРЕНИЯ

Основной формой метрологической аттестации и надзора за средствами измерения является **проверка средства измерения** - определение метрологическим органом погрешностей средства измерения и установление его пригодности к измерению.

В результате поверки на исправный прибор выдается свидетельство или ставится клеймо поверителя. Поверка средств измерения проводится с заранее установленной периодичностью в соответствии с **поверочной схемой**. Поверочная схема регламентирует средства, методы и точность передачи размера единицы физической величины от эталона или образцового средства к рабочим средствам измерений.

В ряде случаев допускается использование средств измерений, если вместо поверки проведена **градуировка средства измерения**, т.е. определена градуировочная характеристика средства измерения.

Градуировка средств измерений представляет собой экспериментальное определение параметров их функций преобразования, с помощью которых судят о действительном размере измеряемой (или контролируемой) физической величины и о возможной погрешности определения этого размера. В зависимости от характера изменения измеряемой величины во времени различают статическую и динамическую градуировку. Статическую градуировку проводят с помощью образцовых мер. При динамической градуировке - экспериментальном определении динамических характеристик средств измерений - на вход средства измерения подаются испытательные сигналы.

При определении динамических характеристик, представляющих собой функции, вид которых известен, допускается определять только постоянные (коэффициенты) указанных функций. При контроле динамических характеристик последние не должны выходить за установленные нормативными документами пределы с учетом погрешности определения характеристик. Требования к испытательным сигналам устанавливают в стандартах или технических условиях на средства измерений.

При сложных измерениях, когда погрешность измерения может заметно превышать погрешность средства измерения, необходимо проводить аттестацию методик измерения.

Метрологическая аттестация методики выполнения измерений - это исследования, направленные на определение значений показателей точности измерений, выполняемых в соответствии с данной методикой.

В аттестате методики измерения должны указываться: назначение и область применения методики; типы и номера экземпляров средств измерений, используемых для проведения измерений; технические характеристики вспомогательных устройств, необходимых для выполнения измерений; метод измерений; алгоритм операции подготовки и выполнения измерений; численные значения показателей точности измерений; межповерочные интервалы для средств измерений и номенклатура нормативных документов, согласно которым должна проводиться их поверка; требования к квалификации операторов; требования техники безопасности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Воздвиженский В. М., Жуков А. А., Бастроков В. К.** Контроль качества отливок. - М.: Машиностроение, 1990, 240 с.

2. **Измерения** в промышленности: Справочник. В 3 кн. / Под ред. П. Профоса. Т. 1. Теоретические основы. - М.: Металлургия, 1990, 492 с.

3. **Измерения** в промышленности: Справочник. В 3 кн. / Под ред. П. Профоса. Т. 2. Способы измерения и аппаратура. М.: Металлургия, 1990, 384 с.

4. **Круглова С. П., Футорян А. Э., Гаузова Г. Н.** Приборы времени. М.: Машиностроение, 1986, 272 с.

5. **Коси Т.** и др. Волоконно-оптические датчики. Пер. с японского. Л.: Энергоатомиздат, 1990, 256 с.

6. **Ландсберг Т. С.** Оптика. М.: Наука, 1990, 928 с.

7. **Митропольский А. К.** Техника статистических вычислений. Изд. 2-е. М.: Наука, 1981, 503 с.

8. **Надежность** и эффективность в технике: Справочник. В 10 томах. Т. 9. Техническая диагностика. / Под ред. В. В. Клюева. М.: Машиностроение, 1987, 352 с.

9. **Пушкин С. Б.** Государственный первичный эталон времени и частоты по результа там аттестации в 1983 г. Исследования в области измерения времени и частоты. М.: ВНИИОФТРИ, 1984, с. 4 - 9.

10. **Смирнов И. В., Дунин-Барковский И. В.** Курс теории вероятностей и математической статистики. Изд-е 3-е. М.: Наука, 1969, 500 с.

11. **Температурные** измерения: Справочник / Под ред. О. А. Терещенко. Киев: Наукова думка, 1989, 704 с.

12. **Технические** средства диагностирования: Справочник / Под ред. В. В. Клюева, - М.: Машиностроение, 1989, 672 с.

РАЗДЕЛ 2

ИСПЫТАНИЯ

Глава 2.1

ОСНОВНЫЕ ТЕРМИНЫ

Испытание - экспериментальное определение количественных или качественных характеристик продукции в результате воздействия на нее при ее функционировании. Испытания проводятся на образцах продукции, макетах или моделях, способных заменить продукцию при испытаниях.

Анализ проектирования, изготовления и эксплуатации объектов производства показывает, что можно выделить (четыре) разновидности задач, которые решаются при проведении технологических испытаний изделий:

1) выбор оптимального материала деталей конструкций и их комплектующих, конструктивно-геометрических параметров изделий и области его рациональной эксплуатации;

2) оптимизация и надёжность технологического процесса изготовления изделий;

3) проверка соответствия изделий стандартам или технологическим условиям (ТУ);

4) контроль качества серийно выпускаемых изделий.

Виды испытаний, их объем, программа испытаний и содержание в первую очередь зависят от целей испытаний и типа производства.

Опытные образцы (партии) подвергаются предварительным, а затем приемочным испытаниям.

Предварительные испытания - контрольные испытания опытных образцов продукции с целью определения возможности предъявления ее на приемочные испытания.

Приемочные испытания - испытания, проводимые для контроля качества образцов продукции, а также изделий единичного производства с целью решения вопроса о возможности постановки на производство продукции или передачи ее в эксплуатацию. В процессе приемочных испытаний используемые средства измерений и испытаний подлежат метрологической аттестации.

В зависимости от характера связей между разработчиками, потребителями и изготовителями приемочные испытания опытного образца продукции могут быть ведомственными, межведомственными и государственными.

Ведомственные испытания - испытания, проводимые комиссией, состоящей из представителей заказчика и исполнителя.

Межведомственные испытания - испытания, проводимые комиссией, состоящей из представителей заказчика, исполнителя и представителя заинтересованных ведомств, предприятий и др.

Государственные испытания - испытания, проводимые комиссией или испытательной организацией, которой предоставлено право их проведения для проверки количественных значений выходных характеристик изделия на соответствие требованиям, установленным в стандартах или программе испытаний для данного вида изделий. Государственные испытания обычно проводят на месте установки изделий для эксплуатации. В зависимости от места испытаний они носят названия лабораторных, полигонных, летных, эксплуатационных испытаний.

Продукцию, выпуск которой уже налажен, подвергают приведенным ниже испытаниям.

Периодические испытания - проводят с целью периодического контроля уровня качества выпускаемой продукции. Периодические испытания проводит отдел технического контроля (ОТК) предприятия изготовителя в объеме и сроки, установленные нормативно-технической документацией (НТД), утвержденной руководителем предприятия изготовителя. Результаты периодических испытаний оформляют протоколом.

При отрицательных результатах периодических испытаний к акту прилагается перечень дефектов с анализом их причин и указанием мер, принятых по установлению причин дефектов.

Параметрические испытания выполняют с целью соответствия выходных параметров изделия техническим требованиям (ТУ) и конструкторско-технологической документации. Эти испытания проводят в нормальных условиях: при температуре $(25 \pm 10)\,^{\circ}C$, влажности (65 ± 15) %, давлении 84 + 106 кПа (630 + 800 мм рт. ст.), при отсутствии механических воздействий, радиации и других факторов.

Параметрические испытания могут входить в состав всех видов испытаний: предварительных, приемочных, приемосдаточных, периодических и типовых.

Испытания на надежность проводят для определения значений показателей надежности изделия в заданных условиях.

Показатели надежности оценивают по методике, разработанной в соответствии с программой и методиками приемочных, периодических и типовых испытаний.

Методика оценки показателя надежности должна содержать: условия, режимы и объем испытаний, перечень показателей, подлежащих определению, методику расчета точности и достоверности оценки показателей надежности и требования к ним, формы ее представления, методы обработки основной и дополнительной информации, правила принятия решения о соответствии программы испытаний (ПИ) требованиям НТД.

Основная информация о надежности изделия содержит все сведения, получаемые непосредственно при испытаниях, включая данные о техническом состоянии изделия при постановке на испытания и результаты технической экспертизы, проводимой на последнем испытании.

Дополнительная информация о надежности изделия содержит данные: статистического анализа результатов нормальных испытаний продукции, продукции-аналогов, сборочных единиц; наблюдений за изделиями в эксплуатации; исследований физико-статистических моделей процессов, описывающих развитие отказов, полученных по результатам испытаний; исследований причин отказов и процессов, приводящих к их возникновению; конструкторских расчетов. Основные правила и методы оценки надежности при приемочных, периодических и типовых испытаниях, минимально необходимые номенклатурные формы учета и обобщение информации о надежности должны быть приведены в формулярах и утверждены руководителем.

Ускоренные испытания - испытания продукции, методы и условия проведения которых обеспечивают получение необходимого объема информации в более короткий срок, чем в предусмотренных условиях и режимах эксплуатации. Сокращение времени испытаний достигается путем повышения уровня воздействующих факторов, в результате чего соответственно возрастает интенсивность отказов изделия.

Исследовательские испытания проводятся для изучения определенных свойств объекта контроля.

Термины и определения основных понятий в области исследовательских испытаний, относящихся к разделу математического планирования эксперимента, устанавливает заказчик.

Типовые испытания проводят для оценки эффективности и целесообразности внесенных изменений в конструкцию, рецептуру или технологию изготовления продукции. Типовым испытаниям подвергают изделия, прошедшие приемочные испытания. Результаты типовых испытаний оформляют актом приемки изделия, подписанным участниками испытаний и утвержденным руководителем.

Климатические испытания проводят для проверки работоспособности и сохранности внешнего вида изделия в условиях и после воздействия климатических факторов.

Цель проведения испытаний на воздействие климатических факторов, требования к объектам и подготовке испытаний, виды проведения, контроль, измерение, обработка и оформление результатов устанавливает акт, подписанный заинтересованными сторонами.

Электрические испытания проводят при испытании опытных и серийных образцов для проверки электрического сопротивления изоляции. Основным видом воздействия являются электрические нагрузки.

Механические испытания определяют способность изделия выполнять заданные функции в условиях воздействия механических факторов и после них. Цель проведения испытаний на воздействие механических факторов, виды, требования к объектам, подготовка, проведение, контроль, измерения, обработку и оформление результатов испытаний устанавливает стандарт или ТУ на данное изделие.

Сравнительные испытания - испытания, проведенные в идентичных условиях для сравнения характеристик качества двух или более изделий. Эти испытания позволяют без значительных затрат непрерывно контролировать производственный процесс, выявлять конструктивно-технологические недоработки, непрерывно оценивать эффективность разрабатываемых мероприятий и прогнозировать интенсивность внезапных и постепенных метрологических отказов изделий.

Разновидностью сравнительных испытаний являются *эквивалентные испытания* двух или более групп изделий с одинаковыми свойствами при одинаковых или различных воздействиях на них.

Если после окончания испытаний из строя выйдет одинаковое число изделий, то оба воздействия называют эквивалентными. Если во второй группе вышло из строя больше или меньше изделий, то соответственно воздействие считают более сильным или слабым.

Глава 2.2

ВИДЫ ВНЕШНИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

Современные машины, агрегаты и приборы эксплуатируют в сложных условиях, характеризуемых широким диапазоном режимов работы, температуры, влажности, давления, уровней радиации, непрерывным ростом нагрузок, скоростей и длительности эксплуатации.

Задача испытательной техники состоит в том, чтобы максимально приблизить условия испытаний к экстремальным условиям эксплуатации и количественно определить изменение в этих условиях основных свойств, функций и характеристик изделий и материалов.

Виды воздействующих факторов и их значения в зависимости от условий эксплуатации материалов и изделий устанавливаются в стандартах и технических условиях, а для вновь создаваемой продукции - в технических заданиях на их разработку. К основным воздействующим факторам относят механические, климатические, биологические, специальные среды, ионизирующие и электромагнитные излучения.

Испытаниям подвергают образцы, изготовляемые на всех стадиях создания изделия, то есть при НИР и ОКР, поставке изделия на производство и в ходе серийного и массового производств.

Под испытанием на *воздействие окружающей среды* понимают испытания, проводимые в нормальных условиях, имеющих место обычно в лаборатории или заводском помещении. Такие испытания проводят на предприятиях вследствие их простоты и низкой себестоимости.

Под испытаниями на *воздействие внешних факторов* или *особых условий* подразумевают испытания, при которых изделие и материалы подвергаются воздействию факторов, не относящихся к нормальным окружающим условиям.

Изделия серийного и массового производств испытывают *периодически*, через определенный срок или после выпуска определенной партии изделий в зависимости от группы исполнения, стабильности производства и конструкторско-технологических особенностей изделия. При проведении испытаний через определенный срок периодичность выбирают из ряда 1, 3, 6, 12, 18, 24 месяцев. Периодичность испытаний определяется технологическим процессом изготовления, качеством основных материалов, обусловливающих стойкость к воздействию внешних факторов, а также вводимыми изменениями конструкции изделия.

Необходимость проведения различных испытаний на одних и тех же образцах и последовательность проведения испытаний в этом случае устанавливается соответствующей документацией.

Механические воздействия представляют собой статические, вибрационные и ударные нагрузки, линейные ускорения и акустический шум. Они вызывают разрушения вследствие растяжения, сжатия, изгиба, кручения, среза, вдавливания и усталости материала изделий.

Изделия, представленные для функционирования в условиях воздействия механических нагрузок, должны быть прочными и устойчивыми для воздействия этих нагрузок. Изделия, не представленные для функционирования в условиях воздействия механических нагрузок, должны быть только прочными при воздействии этих нагрузок.

Прочность к воздействию механических факторов - это способность изделий выполнять свои функции и сохранять свои параметры в пределах установленных норм после воздействия механических факторов.

Устойчивость к воздействию механических факторов - это способность изделий выполнять свои функции и сохранять свои параметры в пределах установленных норм во время воздействия механических факторов.

Основные параметры, подлежащие контролю, в большинстве случаев характеризуют механические свойства материалов - прочность, эластичность, твердость, ударную вязкость и выносливость.

Физический предел упругости σ_x - максимальное напряжение, до которого металл деформируется без остаточных деформаций.

Условный предел упругости $\sigma_{усл}$ - максимальное напряжение, при котором в металле появляются остаточные деформации наперед заданной величины (обычно 0,05 %, допускается до 0,005 %); обозначается соответственно $\sigma_{0,05}$ или $\sigma_{0,005}$.

Физический предел пропорциональности $\sigma_{пц}$ - максимальное напряжение, до которого между напряжениями и деформациями в металле сохраняется прямая зависимость, то есть когда равным приращениям напряжений или нагрузок соответствуют равные приращения деформаций металла.

Условный предел пропорциональности $\sigma_{п\,ц.\,усл.}$ - максимальное напряжение, при котором отклонение от линейной зависимости деформаций от напряжений соответствует наперед заданной величине (увеличению тангенса угла наклона прямолинейного участка кривой деформации к оси напряжений на 10, 25 или 50%); обозначается соответственно $\sigma_{п\,ц10}$; $\sigma_{п\,ц25}$; $\sigma_{п\,ц50}$.

Физический предел текучести $\sigma_т$ - максимальное напряжение, при котором металл пластически деформируется без увеличения нагрузки (т.е. "течет").

Условный предел текучести $\sigma_{0,2}$ - механическое напряжение, при котором остаточная деформация металла достигает наперед заданной величины (обычно 0,2 %); допускается иная величина остаточной деформации, например $\sigma_{0,1}$.

Предел прочности $\sigma_в$ (или *временное сопротивление*) - напряжение, соответствующее максимальной нагрузке, приложенной к образцу (или максимальное напряжение, выдерживаемое образцом).

Сопротивление разрушению $S_к$ (или истинное сопротивление разрыву) - напряжение, действующее в образце в момент его разрушения (разрыва).

Свойство металлов и сплавов пластически деформироваться принято оценивать относительным удлинением δ (%) и относительным сужением ψ (%) после разрыва.

Под *относительным удлинением* понимают абсолютное увеличение длины образца после разрыва, отнесенное к его первоначальной длине. Под *относительным сужением* - абсолютное уменьшение площади поперечного сечения образца после разрыва, отнесенное к его первоначальной площади.

Твердость металлов и сплавов - мера сопротивления их пластической деформации. Она связана в определенной степени (для некоторых сплавов) с характеристиками прочности, пластичности или разрушения.

Ударная вязкость характеризует динамическую прочность металлов и сплавов, то есть их способность сопротивляться разрушению при динамическом положении нагрузок.

Выносливость металла - способность сопротивляться действию циклических нагрузок. Она характеризуется пределом выносливости, под которым понимают наибольшее напряжение, которое может выдерживать материал без разрушения заданное число циклов нагружения.

В общем случае все механические свойства изделий тесно связаны с механическими свойствами материалов, из которых изготовлены узлы и детали, особенностями конструкций и условиями нагружения.

Под действием внешних нагрузок все материалы претерпевают деформации, либо исчезающие после удаления нагрузки (*упругие*), либо остающиеся после прекращения воздействия на материал внешних нагрузок (*остаточные*).

Основными видами разрушения являются: *отрыв* - разрушение отрыва под действием растягивающих напряжений или удлинений; *срез* - разрушение вследствие среза под действием касательных напряжений и *излом*.

Наиболее часто встречающийся вид нагрузки - растяжение. **Испытания на растяжение** - основной и наиболее распространенный метод исследования и контроля механических свойств материалов. Их используют при разработке новых материалов, для оценки однородности свойств металла различных плавок и полуфабрикатов, идентичности режимов термической обработки деталей и т.д. Они позволяют определить количественно $\sigma_{пц}$, $\sigma_{0,05}$, $\sigma_{0,2}$ и $\sigma_т$, $\sigma_в$, $S_к$, δ и ψ. Можно определять также и модуль упругости E, коэффициент Пуассона μ и другие важные характеристики конструкционных материалов. При испытаниях на растяжение строят диаграммы "нагрузка P - приращение длины Δl". Испытания на растяжение служат для исследования поведения материала при одноосном нагружении, когда растягивающая нагрузка (до 10^8 Н и более) равномерно распределена по всему сечению образца.

Определенные материалы, особенно строительные (кирпич, бетон, древесина, камень), малопластичные материалы (чугун, инструментальные стали и др.) в процессе эксплуатации подвергаются **сжатию.** Испытания, при которых изучают поведение материала при одноосном сжатии, можно рассматривать как обратные испытания на растяжение. Большое практическое значение имеют случаи неравномерного трехосного сжатия, при которых величины главных напряжений одинаковы. Нагрузки при испытаниях на сжатие достигают 10^8 Н. При испытаниях на сжатие определяют следующие механические характеристики материалов: модуль нормальной упругости $E_{сж}$, $\sigma_{пц}$, $\sigma_{0,2}$, $\sigma_в$ и относительное сужение h.

Скорость испытаний на сжатие устанавливают в тех же пределах, что и при испытаниях на растяжение. При сжатии предельной силой проводят испытания на устойчивость тонкостенных элементов - стоек, профилей, труб и т.п. Испытания проводят при однократном и длительном сжатии до разрушения (потери устойчивости) или до достижения определенной степени деформации. В момент выпучивания стержня, когда прогиб растет без заметного увеличения нагрузки, определяют критическое напряжение потери устойчивости стержня

$$\sigma_{кр} = P_{кр}/F.$$

где $P_{кр}$ - критическая сила; F - площадь поперечного сечения стержня.

При длительных статических испытаниях на устойчивость строят кривые "напряжение - время" и "деформация - время", оценивая устойчивость стержня по значению критического времени, в течение которого стержень под действием некоторого постоянного напряжения сохраняет несущую способность.

Изгиб используется для определения механических свойств хрупких и малопластичных при растяжении материалов, чувствительных к перекосу. Исходной кривой служит диаграмма "нагрузка - изгиб", по которой определяют пределы пропорциональности $\sigma_{\text{пц. и}}$, упругости $\sigma_{\text{усл. и}}$, прочности $\sigma_{\text{в. и}}$ и текучести $\sigma_{0,2\text{ и}}$. Применяют два способа испытаний на изгиб - с нагружением образца через жесткую траверсу двумя одинаковыми силами, приложенными на одинаковых расстояниях от опор (чистый изгиб), и с нагружением сосредоточенной силой, приложенной к середине пролета образца между опорами. Изгибное нагружение вызывает неравномерное распределение напряжений по сечению образца.

При изгибе образца с симметричным поперечным сечением на одной его стороне возникают растягивающие, а на противоположной - сжимающие напряжения. Напряжения увеличиваются по мере удаления в обе стороны от нейтральной оси, где они равны нулю, и достигают максимальных значений на наружных сторонах образца. Если напряжения достигают при этом предела текучести, то наступает пластическое течение. Нагрузка при испытаниях на изгиб достигает 10^8 Н.

Кручение - нагрузка, испытываемая деталями, передающими крутящий момент. На кручение, как правило, испытывают цилиндрические образцы сплошного, реже трубчатого сечения, иногда квадратной или иной формы сечения. Предельный крутящий момент при испытаниях на кручение достигает 6000 Н · м. При кручении в поперечных и продольных сечениях образца, проходящих через его ось, действуют только касательные напряжения, наибольшие по поверхности. В сечениях, наклоненных к оси, возникают нормальные напряжения (растягивающие - в одном направлении и сжимающие - в перпендикулярном ему); наибольшие, главные (нормальные) напряжения действуют у поверхности по площадкам, наклоненным под углом 45° к оси, где они равны наибольшим касательным напряжениям. Различно ориентированные при кручении плоскости действия наибольших касательных и нормальных напряжений позволяют различать разрушения от среза и от отрыва.

При испытаниях на кручение строят диаграмму в координатах "момент кручения M - относительный угол закручивания θ" [$\theta = \varphi / l_0$, где φ - угол закручивания (рад), определяемый как разность углов закручивания крайних сечений рабочей длины l_0 образца] или в координатах "момент кручения - относительный максимальный сдвиг $\gamma_{\max}$" ($\gamma_{\max} = \theta \frac{d}{2}$; d - диаметр образца). Кручение вызывает неравномерное распределение напряжений по сечению образца уже в упругой области. Переход в упругопластическую область происходит неодновременно по всему сечению. Пластически деформированная зона возникает у поверхности образца и распространяется к центру по мере роста крутящего момента.

При штамповке, пробивке отверстий, продавливании и других технологических операциях используют срезающие нагрузки, которые приводят к срезу образцов и материалов в плоскости поперечного их сечения. Разрушение путем **среза** может наблюдаться у всех металлических монокристаллов после предшествующей пластической деформации. Многие процессы разрушения в технике и при резании, износе, царапании и т.д. представляют собой многократное разрушение путем среза.

Условное сопротивление срезу определяют по формулам:

$$\tau_{\text{ср}} = \frac{2P}{\pi d^2}$$ - при испытании на двойной срез в приспособлении типа вилка - проушина;

$$\tau_{\text{кр}} = \frac{4P}{\pi d^2}$$ - при испытании на одинарный срез (P - максимальная нагрузка на срезе; d - начальный диаметр образца).

Для отожженных сталей и сплавов

$$\tau_{\text{ср}} = 0{,}7\,\sigma_{\text{в}};$$

для высокопрочных и среднепрочных сталей

$$\tau_{\text{кр}} \approx (0{,}6 + 0{,}65)\,\sigma_{\text{в}};$$

для алюминиевых и магниевых сплавов

$$\tau_{\text{ср}} \approx 0{,}5\,\sigma_{\text{в}}.$$

Истинное сопротивление срезу $\tau_{\text{к}}$ определяют по формуле

$$\tau_{\text{к}} = \frac{P_{\text{к}}}{F_{\text{ср}}},$$

где $P_{\text{к}}$ - разрушающая нагрузка при испытании; $F_{\text{ср}}$ - фактическая площадь среза в сечении образца после испытания.

Обычно условное сопротивление срезу ниже истинного на 10 - 15 %.

Вдавливание широко используется для определения твердости материалов путем создания контактных напряжений при воздействии на поверхности образца твердого малодеформирующегося наконечника. Как правило, при вдавливании растягивающие напряжения и удлинения малы по сравнению с касательными напряжениями и сдвигами, создающимися в деформируемом материале.

На практике обычно имеют дело со сложным нагружением, при котором на изделие воздействует комплекс механических нагрузок: статических и динамических. Характер, величина, направление и распределение усилий, напряжений и других факторов могут изменяться по времени. Без должного учета всего комплекса нагрузок и их изменений во времени невозможна правильная оценка прочностных свойств изделий. В процессе эксплуатации, при транспортировании, перемещении и хранении изделия и материалы подвергаются воздействию динамических нагрузок.

Наиболее распространенными факторами динамического механического воздействия являются **вибрационные нагрузки.** Возникающие при вибрациях инерционные силы могут вызвать напряжения, превышающие пределы прочности и выносливости конструкции. Интенсивность воздействия вибрации характеризуется частотой и амплитудой колебания, а также величиной максимального ускорения. Вибрации представляют собой механические колебания в диапазоне частот 0,1 - 20000 Гц и более, амплитуд перемещения 0,001 мкм - 1000 мм и более, амплитуд ускорений до 1000 м/с^2 и более. Большая часть колебаний, встречающихся на практике, имеет форму искаженной синусоиды.

К параметрам *линейной вибрации* относятся перемещение, скорость, ускорение, резкость (третья производная перемещения по времени), сила, мощность; к параметрам *угловой вибрации*: угол поворота, угловая скорость, угловое ускорение, угловая резкость, момент сил. К параметрам обоих видов вибраций относят также фазу, частоту и коэффициент нелинейных искажений. Характер вибраций как по частоте, так и по амплитуде может значительно изменяться от конструкции к конструкции, условий эксплуатации изделий, других воздействующих факторов. Наибольшая опасность - умножение колебаний, возникающих на резонансных частотах упругих конструкций.

Вибрационные нагрузки, создаваемые различными энергетическими установками, оборудованием, а также несбалансированными вращающимися и перемещающимися частями машин, вызывают разрушение конструкции усталостного характера, выводят из строя крепежные приспособления, способствуют появлению "микрофонного эффекта", вызывают замыкание и обрывы электрических цепей элементов радиоэлектронных и электротехнических устройств, приводят к разгерметизации блоков.

В зависимости от величины и вида вибрационных нагрузок устанавливают степень жесткости изделия и проводят испытания на вибропрочность, виброустойчивость и обнаружение резонансов конструкции. При испытаниях на воздействие вибраций используют синусоидальную широкополосную или предварительно измеренную на прототипе вибрацию.

Ударные нагрузки. Механические удары могут быть одиночными, многократными и комплексными. Одиночные и многократные ударные процессы могут воздействовать на объект в горизонтальной, вертикальной и наклонной плоскостях. Комплексные ударные нагрузки оказывают воздействие на объект в двух или трех взаимно перпендикулярных плоскостях одновременно. Основными параметрами ударного процесса являются ускорение, перемещение, скорость, деформация рассматриваемой точки тела при ударном воздействии. Важное значение имеет форма ударного импульса. Величина перегрузки при ударе, характер и скорость распространения напряжений по изделию определяются силой и продолжительностью удара и характером изменения ускорения.

Удар, воздействуя на материал и изделие, может вызывать механическое разрушение. В зависимости от длительности ударного процесса и его максимального ускорения при испытаниях устанавливают степень жесткости той или иной конструкции. С помощью одиночного и многократных ударов определяют устойчивость и механическую прочность изделия к ним. Испытания на ударную прочность и ударную устойчивость рекомендуется совмещать. Длительность ударных импульсов 1 мкс + 1000 мс и более, а амплитуды ускорений 1 + 10^6 м/с^2 и выше.

Разрушающее воздействие могут оказывать также **нагрузки от линейных ускорений,** возникающие в узлах вращающихся механизмов. Воздействие центробежного ускорения определяют в каждом из трех взаимно перпендикулярных направлений по отношению к изделию. Линейные ускорения изменяются до 10^4 м/с^2 и более.

Акустический шум в большинстве случаев мешающий фактор, который также может влиять на способность изделий выполнять свои функции. Наиболее распространенные частоты шума 125 + 10000 Гц, максимальный уровень звукового давления 200 дБ и более. Для определения воздействия на изделия изменения частоты шума проводят соответственно испытания током меняющейся частоты 125 + 10000 Гц.

Акустический шум оказывает значительное действие на относительно крупные изделия. Поэтому полупроводниковые приборы, изделия микроэлектроники мало подвержены разрушительному воздействию звукового давления. Действие акустического шума на изделия зависит от величины усилия на изделия, определяемого уровня звукового давления и площади изделия. Механизм разрушительного воздействия звукового давления аналогичен разрушительному воздействию вибрации. При этом в результате действия энергии колебания звуковой частоты в радиоэлектронных устройствах возникает микрофонный эффект и появляются резонансные явления.

Глава 2.3

МЕХАНИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ

Механические испытания предназначены для определения механических свойств материалов и конструкций, исследования закономерностей деформирования и разрушения материалов. В связи с большим количеством видов и типов механических испытаний существует обширный класс испытательных машин и стендов, работа которых основана на различных принципах. В силовых схемах испытательного оборудования используют механический привод, гидравлические нагружения, электромагнитные и вибрационные возбуждения.

Машины для испытаний на растяжение-сжатие разделяют на простые и универсальные. При испытаниях на простых машинах можно прикладывать к образцу нагрузку только одного знака (растяжение или сжатие).

На универсальных знакопостоянных машинах во время испытаний образец нагружается только в одном направлении (на сжатие или растяжение). Знакопеременные универсальные машины позволяют изменять знак нагрузки на образце при испытаниях без переналадки.

Машины для испытаний на растяжение-сжатие разделяют по назначению на машины широкого применения, специализированные и целевые. Машины широкого применения предназначены в основном для научных исследований. На специализированных машинах проводят контрольные и приемочные испытания материалов для определения стандартных механических характеристик, поверочные и контрольные испытания однотипных изделий.

На целевых машинах проводят испытания строго определенных видов, как правило, при экстремальных значениях параметров (скоростные машины для испытания с наивысшей достижимой мощностью, разрывные машины для определения высоких нагрузок и др.).

Для уменьшения зависимости результатов испытаний от субъективных особенностей проверяющего и качества поверочного оборудования, обеспечения идентичности условий проверки метрологического обеспечения и повышения надежности испытаний осуществляют автоматизацию испытаний.

Автоматизация процессов испытаний проводится по двум независимым направлениям. Первое характерно для массовых видов испытаний и связано с созданием специализированных машин и комплексов для контроля качества или статистической оценки свойств материалов по стандартизованным методикам, обеспечивающим автоматическое управление режимами испытаний, централизованный сбор информации в многоточечных системах и обработку однотипных результатов испытаний.

Второе направление характерно для решения сложных инженерных и научных задач при проведении многофакторных испытаний по программам, которые могут изменяться или совершенствоваться в процессе испытаний, для чего необходимо универсальное оборудование с мобильной структурой, легко приспособляемой для решения различных задач.

Механизация и автоматизация технологических испытаний изделий дает возможность в случае применения программных устройств приблизить режим испытаний к реальным условиям работы изделия и более полно выявить его эксплуатационные характеристики.

Важными составными частями автоматизированных контрольно-испытательных установок являются механизмы, выполняющие следующие функции:

- передачу объекта к месту контроля и испытания;
- ориентацию и закрепление аппаратуры и объекта испытаний;
- включение в измерительную и контрольную схему;
- выполнение заданной программы испытания;
- фиксацию (печатание) результатов испытаний;
- выключение испытуемого объекта из измерительной и контрольной схем;
- съем с места испытания и транспортирование объекта на следующую операцию.

Автоматизация испытательных операций позволяет автоматически задавать и поддерживать регламентированные программой режимы и входные сигналы, подаваемые на испытательные объекты. Автоматизация регистрации измерительной программы, получаемой в результате испытаний объекта, дает возможность фиксировать ее в цифровой форме на бумажной ленте или на дискетах.

2.3.1. ИСПЫТАНИЯ НА РАСТЯЖЕНИЕ

Методы статических испытаний на растяжение черных и цветных металлов и изделий из них для определения характеристик механических свойств при температуре 20^{+15}_{-10} °С устанавливает стандарт. В документации указываются места вырезки заготовок для образцов, их количество, направление продольной оси образцов по отношению к заготовке, величины припусков при вырезке.

При изготовлении из заготовок образцов принимают меры, исключающие возможность изменения свойств металла от нагрева или наклепа. Плоские образцы должны сохранять поверхностные слои проката, если нет других указаний. Стрела прогиба плоских образцов на длине 200 мм не должна превышать 10 % толщины образца, но не более 4 мм. Шероховатость обработанных поверхностей *Ra* рабочей части цилиндрических образцов не должна быть более 1,25 мкм, а шероховатость *Rz* боковых поверхностей рабочей части плоских образцов не более 20 мкм.

Допускается испытывать сортовой прокат, литые образцы и готовые изделия без предварительной механической обработки.

Для испытания на растяжение применяют пропорциональные цилиндрические или плоские образцы диаметром или толщиной в рабочей части 3 мм и более с начальной расчетной длиной

$$l_0 = 5{,}65\sqrt{F_0} \quad \text{или} \quad l_0 = 11{,}3\sqrt{F_0}\ .$$

Литые образцы и образцы из хрупких материалов допускается изготавливать с начальной расчетной длиной

$$l_0 = 2{,}82\sqrt{F_0}\ ,$$

где F_0 - начальная площадь поперечного сечения образца.

Допускается применять пропорциональные образцы других размеров и непропорциональные образцы.

Для плоских образцов соотношение между шириной и толщиной в рабочей части не должно превышать 8:1.

Рабочая длина l образцов должна составлять:

от $l_0 + 0{,}5d_0$ до $l_0 + 2d_0$ - для цилиндрических образцов;

от $l_0 + 1{,}5\sqrt{F_0}$ до $l_0 + 2{,}5\sqrt{F_0}$ - для плоских образцов.

Перед испытаниями образцы обязательно измеряют, определяют F_0; по всей рабочей длине образца рекомендуется наносить метки, например через каждые 5 или 10 мм; на хрупких образцах метки наносят карандашом, красителем и т.п.

Предел пропорциональности $\sigma_{пц}$ - наибольшее напряжение, до которого материал следует закону Гука, можно определять расчетным или графическим способами.

Тензометр или электрической измеритель деформации устанавливают на образец после приложения к нему начальной нагрузки P_0, соответствующей напряжению, равному 5 - 10% от предполагаемого предела пропорциональности.

Расчетный способ. Нагружают образец не менее чем четырьмя равными ступенями до нагрузки, соответствующей напряжению, равному 70 - 80 % предполагаемого $\sigma_{пц}$, выдерживают на каждой ступени 5 - 7 с, продолжают нагружать более мелкими ступенями $P_{мал}$ и, когда приращение удлинения Δl для малой ступени нагружения превысит в 2 + 3 раза среднее значение приращения удлинения $\Delta l_{ср}$, дальнейшее нагружение прекращают:

$$(2+3)\Delta l_{n+1} \approx \frac{\Delta l_1 + \Delta l_n}{n} = \Delta l_{ср},$$

где n - число мелких ступеней нагружения. Далее определяют среднюю величину приращения удлинения на малую ступень нагружения $\Delta l_{P_{мал}}$.

За нагрузку $P_{пц}$, соответствующую $\sigma_{пц}$, принимают нагрузку, соответствующую $\Delta l_{P_{мал}}$.

Графический способ. Записывают диаграмму растяжения образца в координатах "нагрузка (ордината) - удлинение (абсцисса)" с масштабом по нагрузке не более 10 МПа на 1 мм диаграммы и масштабом по удлинению не более 100:1 при базе измерителя деформации 50 мм и более и не менее 200:1 при базе менее 50 мм. От начала координат (рис. 2.3.1) проводят прямую, совпадающую с начальным линейным участком диаграммы растяжения. На произвольном уровне нагрузки проводят прямую *AB*, параллельную оси абсцисс, и на этой прямой откладывают отрезок *kn*, равный половине отрезка *mk*. Через точку *n* и начало координат проводят прямую *0n* и параллельно ей проводят касательную *CD* к диаграмме растяжения. Точка касания определяет искомую нагрузку $P_{пц}$.

Предел пропорциональности вычисляют по формуле

$$\sigma_{пц} = P_{пц}/F_0\ .$$

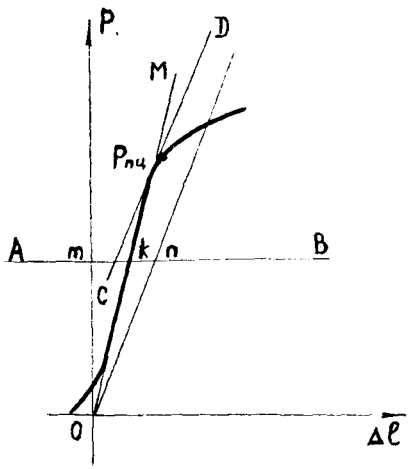


Рис. 2.3.1. Определение предела пропорциональности

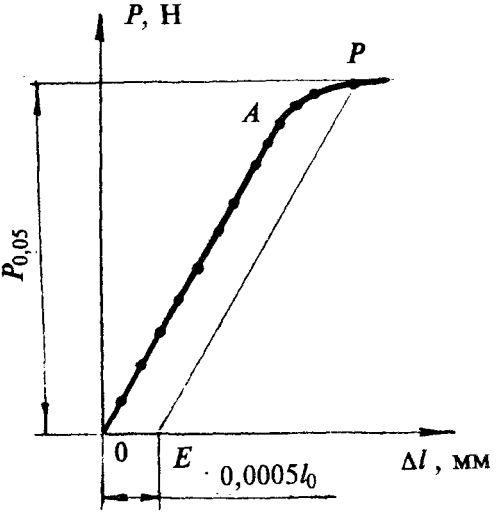


Рис. 2.3.2. Определение предела упругости

Предел упругости $\sigma_{0,05}$ - наибольшее напряжение, до которого материал не получает остаточных деформаций. Так как пластические деформации в отдельных кристаллах появляются уже в самой ранней стадии нагружения, величина предела упругости (как и $\sigma_{пц}$) зависит от требований точности, которые налагаются на производимые измерения.

Расчетный способ. Образец нагружают до величины в два раза большей начальной P_0, и после выдержки в течение 5 - 7 с разгружают до P_0. Затем образец нагружают до величины, соответствующей 70 - 80 % от предполагаемого $\sigma_{0,05}$. Дальнейшее нагружение проводят ступенями с выдержкой на каждой ступени 5 - 7 с и последующей разгрузкой до P_0 с измерением остаточного удлинения. Испытания прекращают, если остаточное удлинение превысит установленный допуск. По результатам испытаний определяют нагрузку $P_{0,05}$.

Графический способ. $\sigma_{0,05}$ определяют по начальному участку диаграммы "нагрузка-деформация" (рис. 2.3.2.). Удлинение определяют на участке, равном базе измерителя деформации.

Для определения $P_{0,05}$ вычисляют соответствующую величину остаточного удлинения с учетом базы измерителя деформации. Найденную величину увеличивают пропорционально масштабу диаграммы по оси деформаций; отрезок полученной длины OE откладывают по оси абсцисс вправо от начала координат O. Из точки E проводят прямую EP, параллельную прямой OA. Точка пересечения P с диаграммой растяжения определяет нагрузку $P_{0,05}$.

Масштаб по оси деформации должен быть не менее 100:1 при базе измерителя деформаций 50 мм и более и не менее 200:1 при базе измерителя менее 50 мм; по оси нагрузки 1 мм диаграммы должен соответствовать не более 10 МПа.

Предел упругости вычисляют по формуле

$$\sigma_{0,05} = P_{0,05} / F_0 .$$

Предел текучести физический $\sigma_т$, верхний предел текучести $\sigma_{тв}$ и нижний предел текучести $\sigma_{тн}$ определяют по диаграмме растяжения.

Скорость относительной деформации на площадке текучести устанавливают в пределах 0,00025 + 0,0025 $с^{-1}$. Если такая скорость на площадке текучести не может быть установлена, то до начала текучести устанавливают скорость нагружения от 1 до 30 МПа/с.

Допускается определять нагрузку $P_т$ по явно выраженной остановке стрелки силоизмерителя машины, обусловленной удлинением образца без заметного увеличения нагрузки.

Пределы текучести вычисляют по формуле

$$\sigma_{т, тв, тн} = P_т, P_{тв}, P_{тн} / F_0 .$$

В тех случаях, когда на диаграмме отсутствует явно выраженная площадка текучести (или явно выраженный начальный переходный эффект), за предел текучести принимается условно величина напряжения, при котором остаточная деформация $\varepsilon_{ост} = 0{,}002$ или 0,2%.

Предел текучести условный $\sigma_{0,2}$ можно определять расчетным или графическим способом. Расчетный способ определения $\sigma_{0,2}$

аналогичен расчетному способу определения предела упругости $\sigma_{0,05}$, графический способ аналогичен графическому способу определения $\sigma_{0,05}$ при применении измерителя деформации. Условный предел текучести можно определять графически по диаграмме, записанной на машине, если масштаб ее диаграммного аппарата по оси деформаций не менее 50:1.

При определении $\sigma_{0,2}$ скорость нагружения должна быть от 1 до 30 МПа/с.

Предел текучести условный вычисляют по формуле

$$\sigma_{0,2} = P_{0,2}/F_0$$

при отсутствии площадки текучести.

Временное сопротивление или предел прочности $\sigma_в$. Для определения $\sigma_в$ образец растягивают под действием плавно возрастающей нагрузки до разрушения. Наибольшая нагрузка, предшествующая разрушению образца, P_{max} соответствует временному сопротивлению.

Временное сопротивление вычисляется по формуле

$$\sigma_в = P_{max}/F_0.$$

Модуль упругости первого рода E - физическая константа материала, определяемая путем эксперимента и являющаяся коэффициентом пропорциональности между напряжениями и деформациями:

$$\sigma = \varepsilon E.$$

Модуль упругости можно определять измерением деформации образца тензометром (расчетный способ) или графическим способом по начальному участку диаграммы растяжения.

Расчетный способ. Нагружают образец равными ступенями до нагрузки, соответствующей напряжению, равному 70 - 80 % от предполагаемого $\sigma_{пц}$. Величина ступени нагружения должна составлять 5 - 10 % от предполагаемого $\sigma_{пц}$. По результатам испытаний определяют среднюю величину приращения удлинения образца $\Delta l_{c\,p}$ на ступень нагружения ΔP.

Графический способ. Записывают диаграмму нагружения образца в координатах "нагрузка (ордината) - деформация (абсцисса)". ΔP и $\Delta l_{c\,p}$ определяют по диаграмме на участке от нагрузки P_0 до нагрузки, соответствующей напряжению, равному 70 - 80 % от предполагаемого $\sigma_{пц}$.

Модуль упругости вычисляют по формуле

$$E = \Delta P l_0 / \Delta l_{c\,p} F_0.$$

Стандарты регламентируют также определение относительного равномерного удлинения $\delta_р$, конечной расчетной длины образца $l_к$, относительного удлинения образца после разрыва δ, относительного сужения ψ.

Испытания при нагреве. Для измерения **температуры** образца применяют:

1) две термопары, установленные у меток, ограничивающих начальную расчетную длину образца l_0 при $l_0 \le 100$ мм;

2) три термопары при $l_0 > 100$ мм, причем третью ставят в середине между метками.

Допускается при $l_0 < 50$ мм устанавливать одну термопару в средней части l_0.

Рабочий конец термопары должен иметь надежный контакт с поверхностью образца и быть изолированным от радиационного нагрева.

Испытанию подвергают образец, нагретый до заданной температуры в течение не более 1 ч и выдержанный при этой температуре от 20 до 30 мин: Испытания могут проводиться в атмосфере нейтральных газов. Температуру испытаний указывают, добавляя соответствующий индекс к обозначению определяемой характеристики, например $\sigma_{0,2/450}$, $\sigma_{в/1200}$, Ψ_{1000}.

Испытания при охлаждении. Конструкция криокамеры, устанавливаемой в испытательную машину, должна обеспечивать равномерное охлаждение рабочей части образца.

Охлаждение образца до заданной температуры и испытание образца проводят в жидкой или газообразной средах.

Для охлаждения до -70 °С в качестве жидкой среды используют этиловый ректификационный спирт, охлажденный твердой двуокисью углерода или жидким азотом, а от -70 до -100 °С жидкий азот.

Охлаждение газообразной среды (воздух, нейтральный газ) проводят испарением жидкого азота в рабочем пространстве криокамеры.

Испытанию подвергают образцы, охлажденные до заданной температуры и выдержанные при ней в жидкой среде.

Время выдержки образцов: цилиндрических диаметром до 6 мм и плоских толщиной до 4 мм - 10 мин; цилиндрических диаметром более 4 мм - 15 мин.

Температуру испытаний указывают, добавляя соответствующий индекс к обозначению определяемой характеристики, например $\sigma_{0,2(-60)}$, $\sigma_{в(-100)}$, $\Psi_{(-40)}$.

К испытаниям на растяжение относят и испытания на ползучесть, в результате которых определяют условный **предел ползучести,** т.е. напряжение, при котором скорость или деформация ползучести за определенный промежуток времени не превышает заданной величины.

Сущность метода в том, что на образец воздействуют постоянной нагрузкой при постоянной температуре и измеряют его деформацию.

Образец нагружают до заданной температуры (время нагрева не более 8 ч) и выдерживают не менее 1 ч. К образцу плавно прикладывают предварительную нагрузку $P_0 \approx 10$ % от заданной общей нагрузки, но при этом предварительная нагрузка не должна вызывать в образце напряжение не более 10 МПа. Затем образец плавно нагружают до заданной нагрузки и одновременно измеряют и регистрируют его удлинение.

Перерывы при испытании небольшой длительности не допускаются. При длительных испытаниях возможны перерывы, при которых образцы не разгружают. Не допускаются дополнительные напряжения в образце при его охлаждении во время перерыва.

При определении ползучести по скорости ползучести продолжительность испытаний должна составлять не менее 2000 - 3000 ч.

После окончания испытания на ползучесть образец разгружают до P_0 и определяют абсолютную величину остаточного удлинения.

Результаты испытания представляют в виде кривой ползучести в координатах "относительное удлинение - время", по которой определяют напряжение - нагрузку, отнесенную к начальной площади поперечного сечения образца, соответствующее условному пределу ползучести.

Типичная кривая ползучести при растяжении, характеризующая зависимость удлинения от величины длительной статической нагрузки при постоянной температуре, приведена на рис. 2.3.3.

На кривых ползучести различают обычно три стадии: *I* - неустановившуюся, когда скорость ползучести убывает вследствие процессов упрочнения при деформации (участок *ab*); *II* - установившуюся, когда скорость ползучести постоянна (участок *bc*); *III* - ускоренную, когда скорость ползучести возрастает до полного разрушения образца (участок *cd*). Скорость ползучести v обычно определяют дифференцированием кривой ползучести. Таким образом, при малых нагрузках удлинение практически увеличивается со временем только до определенной величины; при больших нагрузках удлинение увеличивается практически равномерно; наконец при еще больших нагрузках удлинение растет с возрастающей скоростью вплоть до разрушения образца.

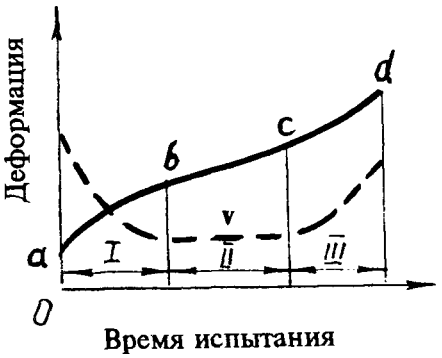


Рис. 2.3.3. Типичная кривая ползучести при растяжении

Пример обозначения условного предела ползучести при допуске на деформацию 0,2 % за 100 ч испытания при температуре 700 ^{0}С:

$$\sigma^{700}_{0,2/100}.$$

При этом необходимо указать δ_c или δ_0, по которым определили предел ползучести.

Пример обозначения предела ползучести при скорости ползучести $1 \cdot 10^{-5}$ %/ч при температуре 600 ^{0}С:

$$\sigma^{600}_{1\cdot10^{-5}}.$$

При этом необходимо указать время испытания, за которое была достигнута заданная скорость ползучести.

2.3.2. ИСПЫТАНИЯ НА СЖАТИЕ

Для испытаний на сжатие используют цилиндрические образцы четырех типов:

I - для определения модуля упругости с начальным диаметром d_0 = 20 мм и рабочей начальной высотой $h(h_0)$ = 160 мм;

II - для определения предела пропорциональности и предела упругости с d_0 от 10 до 30 мм и $h(h_0)$ = от 30 до 90 мм;

III - для определения физического предела текучести, условного предела текучести, построения кривой упрочнения до значений логарифмических деформаций

$$\varepsilon l \le 2 / 3 \ln h_0 / d_0,$$

образцы с d_0 от 10 до 30 мм и высотой

$$h_0 = 2{,}24 d_0 \left(\sqrt{n}/\nu\right),$$

где n - показатель деформационного упрочнения; ν - коэффициент приведения высоты, равный 0,5 для образцов III типа;

IV - цилиндр с торцевыми выточками для построения кривой упрочнения с d_0 от 10 до 30 мм и h_0 по вышеприведенной формуле, но с $\nu = 0{,}76$. Для образцов IV типа допускается $h_0/d_0 = 0$. Высоту h_0 округляют до целых значений.

При испытаниях погрешность измерения сжимающей силы F^c не должна превышать ± 1 % значения измеряемой величины, начиная с 0,2 наибольшего значения каждого диапазона измерения. Класс точности тензометров 1. Суммарная погрешность измерения и регистрации силы F^c и абсолютной деформации Δh самопишущим прибором не должна превышать ± 2 % измеряемой величины.

Испытание образцов на сжатие проводят в приспособлениях, устанавливаемых в рабочее пространство испытательной машины. Приспособления имеют деформирующие плиты, между которыми устанавливают испытуемый образец, и шариковые направляющие для устранения перекосов. При испытании торцы образцов I и II типов обезжиривают. Торцы образцов III типа допускается смазывать машинным маслом с графитом, жидкостью марки В-32 К или Укринолом. При испытании образцов IV типа торцы обязательно смазываются стеарином, парафином или воском. Толщина смазочного материала должна соответствовать высоте буртиков в торцевой выточке.

Предел пропорциональности при сжатии $\sigma^c_{п\,ц}$ определяют аналогично $\sigma_{п\,ц}$ - расчетным или графическим способами.

При расчетном способе, когда значение абсолютной деформации образца Δh на степени напряжения $\Delta\sigma = 0{,}02$ от ожидаемого предела пропорциональности превысит среднее значение абсолютной деформации Δh (при той же ступени нагружения) на начальном линейном упругом участке в 2 - 3 раза, испытания прекращают. По результатам испытания находят нагрузку $F^c_{п\,ц}$.

Предел пропорциональности вычисляют по формуле

$$\sigma^c_{п\,ц} = F^c_{п\,ц}/S_0 .$$

Предел упругости при сжатии $\sigma^c_{0,05}$ определяют аналогично $\sigma_{0,05}$ (расчетным или графическим способами) при нагрузке с допуском на величину остаточного укорочения образца.

Образец нагружают до напряжения, соответствующего 10 % от ожидаемого $\sigma^c_{0,05}$. При этом напряжении на образец устанавливают тензометр. Нагружают образец ступенчато-возрастающим напряжением до 70 - 80 % от ожидаемого $\sigma^c_{0,05}$. Перепад между соседними ступенями 10 - 15 % от ожидаемого $\sigma^c_{0,05}$. Продолжают нагружать, уменьшая величину ступеней до 5 % от ожидаемого $\sigma^c_{0,05}$. Испытания прекращают, когда остаточное укорочение образца превысит величину допуска.

По результатам испытаний строят диаграмму и определяют предел упругости при сжатии (рис. 2.3.4). Масштаб записи по оси абсолютной деформации должен быть не менее 200:1 и по оси нагрузок не более $S_0 \cdot 10$ МПа на 1 мм.

Для определения нагрузки $F_{0,05}$ вычисляют деформацию Δh, исходя из базы тензометра. Найденное значение увеличивают пропорционально масштабу диаграммы по оси абсолютной деформации от точки O. Из точки E проводят прямую EP, параллельную прямой OA. Точка пересечения P с диаграммой определяет высоту ординаты, т.е. нагрузку $F^c_{0,05}$, соответствующую пределу упругости, который вычисляют по формуле

$$\sigma^c_{0,05} = \frac{F^c_{0,05}}{S_0},$$

где S_0 - начальная площадь поперечного сечения образца.

Физический предел текучести при сжатии $\sigma^c_т$ определяют по диаграмме, записанной в масштабе: Δh не менее 200:1 и $F^c_т$ не более $S_0 \cdot 20$ МПа на 1 мм (рис. 2.3.5).

Физический предел текучести определяют по формуле

$$\sigma^c_т = \frac{F^c_т}{S_0}.$$

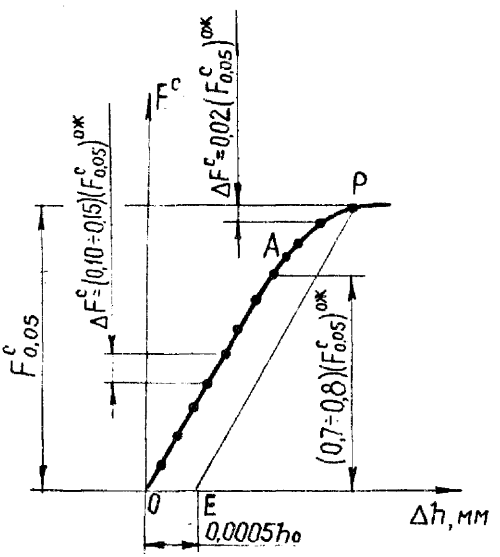


Рис. 2.3.4. Определение предела упругости при сжатии

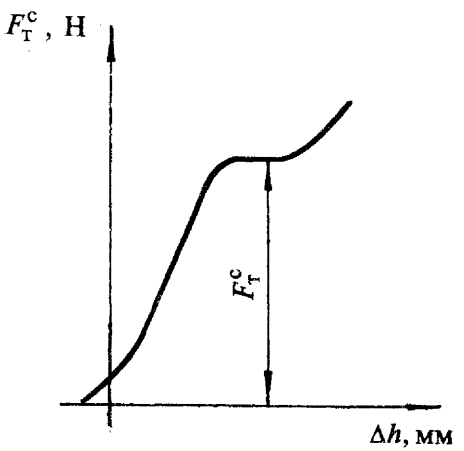


Рис. 2.3.5. Определение физического предела текучести при сжатии

Условный предел текучести при сжатии $\sigma^c_{0,2}$ определяют на образцах, которые нагружают непрерывно до напряжения, превышающего ожидаемое значение условного предела текучести $\left(\sigma^c_{0,2}\right)^{ож}$, и записывают диаграмму.

Масштаб по оси абсолютной деформации Δh не менее 200:1 и по оси нагрузок не более $S_0 \cdot 20$ МПа на 1 мм. Полученную диаграмму перестраивают с учетом жесткости испытательной машины. По диаграмме (рис. 2.3.6) определяют нагрузку, соответствующую условному пределу текучести при сжатии $F^c_{0,2}$, который вычисляют по формуле

$$\sigma^c_{0,2} = \frac{F^c_{0,2}}{S_0}.$$

Построение кривой упрочнения ведут на основе результатов испытания серии одинаковых образцов III или IV типов.

Нагружают образец непрерывно до заданного значения нагрузки. Разгружают образец до нулевой нагрузки. Измеряют конечный диаметр образца $d_к$ в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Для образцов III типа измеряют конечную высоту образца $h_к$.

Для образцов IV типа при логарифмической деформации $\varepsilon_l > 1,2 + 1,4$ применяют двухступенчатую осадку с переточкой образца. Логарифмическая деформация между осадками должна быть не менее 0,6.

Кривую упрочнения строят в координатах "напряжение течения σ_s - логарифмическая деформация ε_l", либо в двойных координатах $\lg \sigma_s - \lg \varepsilon_l$.

Напряжения течения вычисляют по формуле

$$\sigma_s = F^c / S_к,$$

где $S_к = \pi d^2_к / 4$ - конечная площадь поперечного сечения образца после испытания до заданной деформации или при разрушении; $d_к$ - конечный диаметр образца после испытания до заданной деформации или при разрушении.

Логарифмическую деформацию ε_l вычисляют по формулам:

$\varepsilon_l = \ln h_0 / h_к$ - для образцов III типа;

$\varepsilon_l = \ln S_к / S_0$ - для образцов IV типа.

Кривую упрочнения строят методом корреляционного анализа.

Испытания образцов считают недействительными при отрыве буртиков, разрушении по дефектам металлургического производства (расслои, раковины, плены и т.д.).

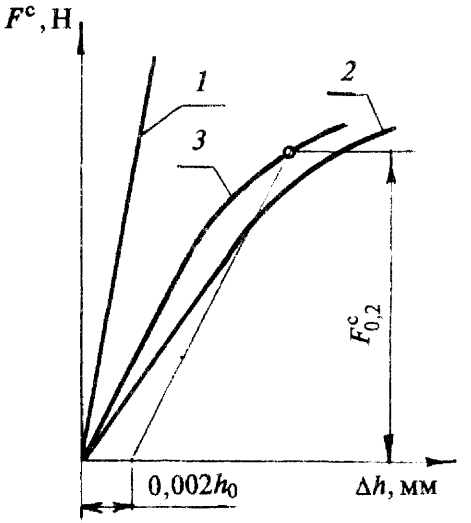


Рис. 2.3.6. Определение условного предела текучести при сжатии:
1 - характеристика жесткости испытательной машины; *2* - диаграмма $F^c = f(\Delta h)$, записанная на самопишущем приборе; *3* - диаграмма $F^c = f(\Delta h)$, построенная с учетом жесткости испытательной машины

2.3.3. ИСПЫТАНИЯ НА УСТАЛОСТЬ.

Усталость - процесс постепенного накопления повреждений материала под действием повторно-переменных напряжений, приводящий к изменению свойств, образованию трещин и разрушению.

Выносливость - свойство материала противостоять усталости.

Зарождение трещины усталости происходит уже после нескольких циклов нагружения, когда движение дислокаций концентрируется на нескольких постепенно углубляющихся и расширяющихся усталостных полосах скольжения. В этих полосах скольжения образуются выдавливания (экструзии) и углубления (интрузии), которые рассматривают как первую стадию образования субмикроскопической трещины. При повышенных температурах происходит образование микротрещин по границам зерен и поверхностям раздела фаз.

При увеличении продолжительности циклического нагружения микротрещины в отдельных кристаллах растут по углом 45 ^{0}С к направлению действия внешних нормальных напряжений.

Продолжительность стадии зарождения составляет обычно от 1 до 5 % срока службы до разрушения. Наличие концентраторов напряжения, а также образовавшихся по технологическим причинам или из-за неоднородностей структуры, эквивалентно стадии зарождения трещины усталости.

Постепенно растущая усталостная трещина после 50 - 60 % срока службы становится видимой невооруженным глазом. После того, как усталостная трещина займет достаточно большую часть сечения образца или детали в оставшейся части поперечного сечения, действующие напряжения превысят статическую прочность материала и произойдет излом образца или детали. На поверхности излома различают две макроскопические зоны: зону постепенного распространения трещины с относительно ровной поверхностью и зону долома при последних циклах нагружения с шероховатой поверхностью.

Испытания на усталость проводят при напряжениях (деформациях), близких к синусоидальному закону их изменения во времени. Нагружение образцов осуществляют при постоянстве заданных максимальных σ_{max} или амплитудных σ_a напряжений (деформаций) цикла в процессе всего испытания образца. В пределах намеченной серии испытаний вид нагружения должен быть одинаковым. В пределах от 10 до 300 Гц частота циклов не регламентируется, если испытания проводят в обычных атмосферных условиях или температура образца при испытаниях не поднимается выше 50 ^{0}С. Для образцов из сплавов, обнаруживающих ползучесть при 50 ^{0}С, допускаемую температуру испытаний устанавливают особо.

Процесс нагружения образца характеризуется циклом напряжений (рис. 2.3.7):

$$\sigma = (\sigma_m + \sigma_a) f(t);$$

$$\tau = (\tau_m + \tau_a) f(t),$$

где σ_m, τ_m - средние напряжения цикла; σ_a, τ_a - амплитуды цикла; $f(t)$ - непрерывная периодическая функция, характеризующая форму цикла, изменяющаяся в пределах: $-1 < f(t) < +1$ и, как правило, близкая к синусоиде.

Справедливы следующие соотношения:

$$\sigma_m = 0{,}5(\sigma_{max} + \sigma_{min});$$

$$\tau_m = 0{,}5(\tau_{max} + \tau_{min});$$

$$2\sigma_a = \pm(\sigma_{max} - \sigma_{min});$$

$$2\tau_a = \pm(\tau_{max} - \tau_{min}),$$

где σ_{max}, σ_{min} - максимальное и минимальное напряжения цикла; $2\sigma_a$ - размах напряжения цикла.

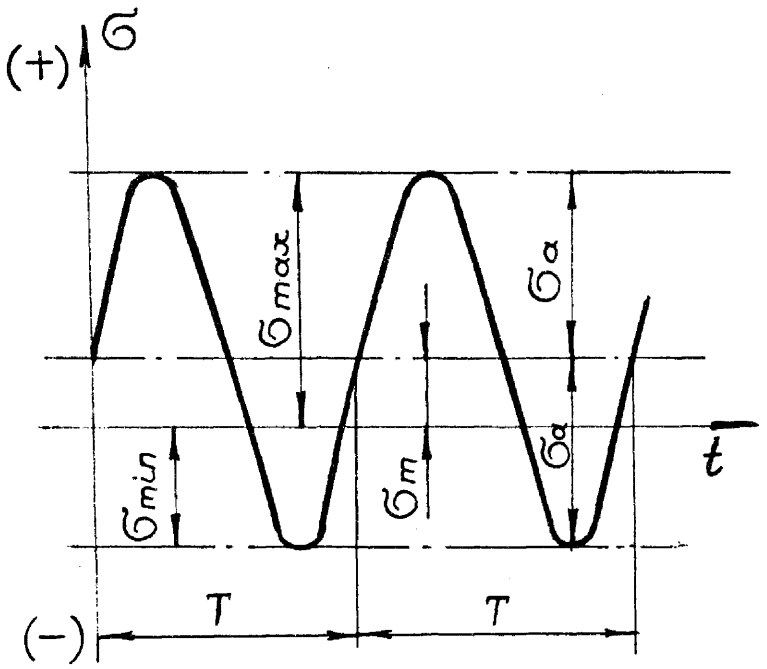


Рис. 2.3.7. Цикл напряжений

Симметричный цикл напряжений:

$$\sigma_{max} = -\sigma_{min};$$

$$\tau_{max} = -\tau_{min}.$$

Различают знакопостоянный, знакопеременный, асимметричный и отнулевой циклы напряжений.

Коэффициент асимметрии цикла - характеристика степени асимметрии:

$$R_\sigma = \sigma_{min}/\sigma_{max};$$

$$R_\sigma = \tau_{min}/\tau_{max}.$$

Для подобных циклов:

$$\sigma'_{max}/\sigma''_{max} = \sigma'_m/\sigma''_m = \sigma'_a/\sigma''_a;$$

$$\tau'_{max}/\tau''_{max} = \tau'_m/\tau''_m = \tau'_a/\tau''_a.$$

При испытании образцов с постоянным коэффициентом асимметрии цикла напряжений предел выносливости определяют как наибольшее значение максимального (по величине) напряжения цикла, при действии которого не происходит усталостного разрушения образца после произвольно большого числа циклов.

При испытании с постоянным средним напряжением цикла предел выносливости определяют как наибольшее значение амплитуды напряжений цикла, при действии которой не происходит усталостного разрушения после произвольно большого числа циклов.

Пределы выносливости выражают в номинальных напряжениях и обозначают σ_R, τ_R, где R - коэффициент асимметрии цикла.

Для определения предела выносливости проводят серию испытаний с различными нагрузками. Величины напряжений наносят на график зависимости их от числа циклов N нагружений, которые при данном напряжении образец выдержал до разрушения. График можно строить в линейной, полулогарифмической или двойной логарифмической системах координат: ордината - напряжение, абсцисса - число циклов нагружения. Соединяя отдельные точки, получают кривую усталости (кривую Велера).

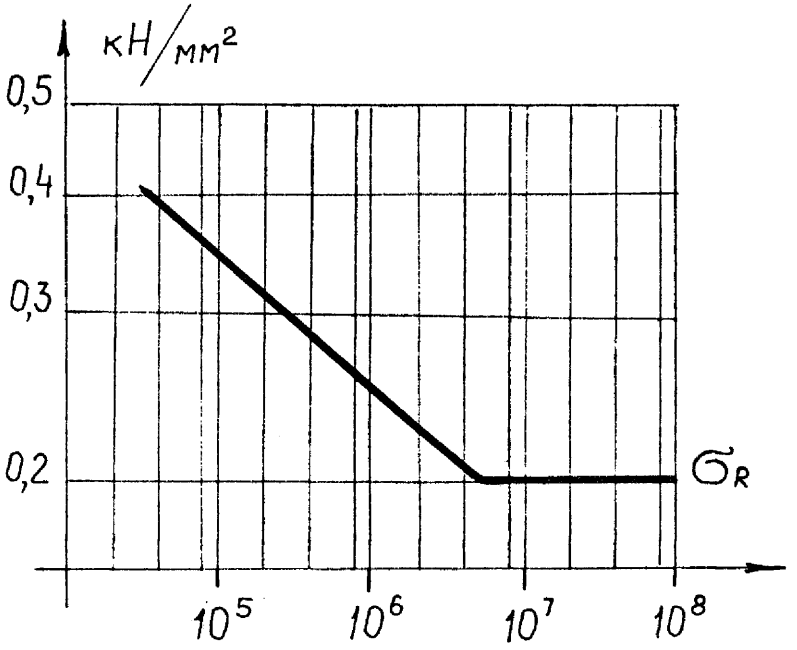


Рис. 2.3.8. Определение предела выносливости при испытании на усталость

Для конструкционных сталей кривая усталости при N более определенного значения приближается к прямой, параллельной оси абсцисс. Особенно ясно виден этот переход при построении кривой усталости в двойной логарифмической системе координат (рис. 2.3.8). Этому граничному значению напряжения, при котором после бесконечно большого числа циклов нагружения не происходит разрушения, соответствует предел выносливости σ_R.

Для определения σ_R испытания на усталость по Велеру нужно проводить вплоть до достижения определенного предельного числа циклов нагружения - базы испытания.

Значения базы испытаний для некоторых материалов: сталь 10^7; медь и медные сплавы $5 \cdot 10^7$; легкие металлы 10^8.

Для полимеров или металлических материалов кривая усталости даже при очень большом числе циклов продолжает оставаться наклонной, что не дает возможности определить предел выносливости.

Предел ограниченной выносливости σ_{RN} - максимальное по абсолютному значению напряжение цикла, соответствующее задаваемой циклической долговечности; σ_{RN} выражают в номинальных напряжениях.

Испытания на усталость дают значительный разброс результатов. При определении долговечности сталей число циклов до разрушения может различаться в 10 раз, а значения σ_R могут отклоняться на ± 25 % от его средней величины. Исходя из этого, при проведении испытаний на усталость и обработке их результатов целесообразно применять статистические методы. Тогда зависимость между амплитудой и числом циклов до разрушения, полученную по кривой усталости, можно дополнить значениями, характеризующими вероятность разрушения.

По кривой усталости получают значения предела выносливости только для данного определенного вида нагружения. Чтобы охарактеризовать поведение материала при всех видах нагружения, суммируют результаты, представленные различными кривыми усталости, в полную диаграмму усталости - диаграмму предельных напряжений (**диаграмму Смита**) (рис. 2.3.9).

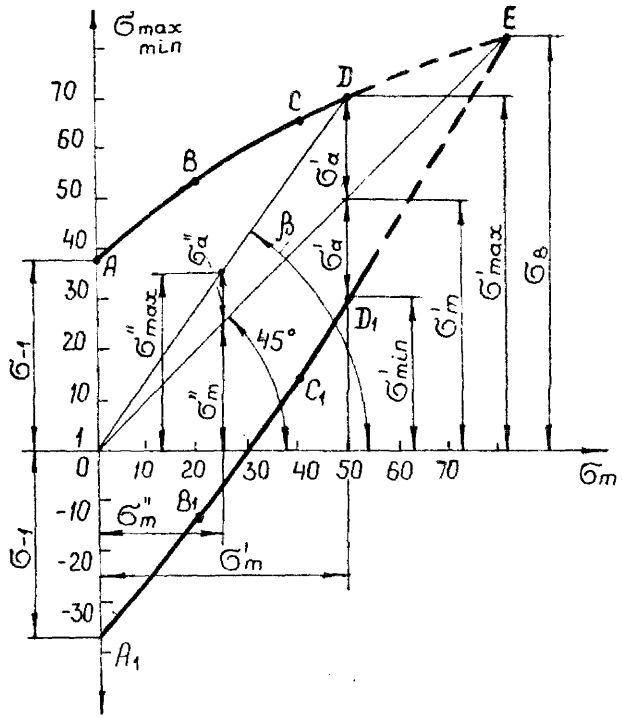


Рис. 2.3.9. Диаграмма предельных напряжений цикла

Кривая $ABCDE$ дает значение предела выносливости σ_R для различных случаев режима переменной нагрузки, начиная от наиболее опасного симметричного цикла (ордината OA) и кончая постоянной статической нагрузкой (ордината точки E). Промежуточные ординаты диаграммы соответствуют асимметричным циклам. Ордината точки E равна пределу прочности $\sigma_в$ материала. Абсцисса точки E также равна $\sigma_в$. Согласно диаграмме ординаты кривой $ABCDE$ дают изменение σ_{max}, а ординаты кривой $A_1B_1C_1D_1E$ дают изменение σ_{min}. Всякий цикл напряжений, для которого $\sigma_{max} < \sigma_R$, будет безопасным, и, следовательно, напряженное состояние, не вызывающее разрушения в результате усталости материала, будет изображаться на диаграмме точками, лежащими ниже кривой усталости $ABCDE$.

Основным критерием разрушения при определении пределов выносливости и построении кривых усталости является *полное разрушение образца.*

Для оценки момента начала разрушения могут применяться и другие критерии: начало образования макротрещин определенной протяженности, обнаруживаемых дефектоскопическими средствами или лупой; резкое падение нагрузки или частоты циклов; значительный рост деформаций и др. В пределах намеченной серии испытаний критерии разрушения должны быть одинаковыми.

Нагружение образцов при испытании на усталость проводят по одной из схем:

чистый изгиб при вращении круглых образцов;

чистый изгиб в одной плоскости круглых и некруглых образцов;

поперечный изгиб при вращении консольных круглых образцов;

поперечный изгиб в одной плоскости консольных круглых и некруглых образцов;

поперечный изгиб консольных круглых образцов при вращении вектора нагружающей силы;

переменное растяжение - сжатие круглых и некруглых образцов;

переменное кручение круглых образцов.

Форма и размеры образцов установлены стандартом. Тип и размеры образцов выбирают в зависимости от сечения и размеров заготовок. Образцы изготавливают по точности не ниже 7-го квалитета. Поверхность рабочей части гладких и надрезанных образцов не должна иметь следов коррозии, окалины, литейных корок, вальцовочных хлопьев и цветов побежалости, если это не предусмотрено условиями испытаний. В пределах намеченной серии испытаний технология изготовления образцов должна быть одинаковой. Все образцы одной серии испытывают на однотипных машинах. Нагружение производят медленно, плавно и по возможности после того, как будет достигнута заданная частота циклов. Испытание образцов производят без пауз. Суммарная погрешность при нагружении не должна превышать 3 % величины задаваемых напряжений. На уровне предела выносливости должно быть испытано не менее двух образцов.

Испытания на усталость при повышенной и пониженной температурах производят при тех же видах деформации и на тех же образцах, что и при нормальной температуре.

Температуру испытания контролируют с учетом влияния тепла самим образцом. Термопары, как правило, закрепляют на образце. Неравномерность нагрева образца на рабочем участке не должна превышать 1° на 10 мм. Образцы испытывают без перерыва до разрушения или до базового числа циклов. В протоколе испытания указывают число пройденных циклов и время испытания каждого образца.

Испытания на усталость в условиях агрессивной среды проводят при тех же видах деформации и на тех же образцах, что и при отсутствии агрессивной среды. Образец должен непрерывно находиться в газовой или жидкостной агрессивной среде. Испытания проводят без перерывов до разрушения или до базового числа циклов.

Параметры агрессивной среды и ее взаимодействия с поверхностью образца должны быть стабильными.

Испытания на усталость в малоцикловой области производят на переменный изгиб, растяжение-сжатие и кручение. Нагружение испытуемого образца осуществляют по заданным деформациям (перемещениям) либо по заданным напряжениям или нагрузкам. Частоту циклов нагружения устанавливают в зависимости от предъявляемых требований, но не более 50 циклов в минуту. Верхний уровень напряжений (усилий) или деформаций (перемещений) выбирают на уровне 0,7 соответствующего разрушающего фактора, приложенного однократно, или на уровне 0,7 предела прочности при растяжении исследуемого материала. Испытывают не менее пяти образцов на одном уровне нагружения.

Малоцикловая усталость при термомеханическом нагружении - разрушение в результате циклического упругопластического деформирования, сопровождаемого изменением температуры.

Малоцикловая термическая усталость - частный случай малоцикловой термомеханической усталости, при котором нагружение обусловлено стеснением тепловых деформаций при циклическом нагреве (охлаждении).

Длительное малоцикловое нагружение - малоцикловое нагружение при длительностях цикла и суммарных временах, достаточных для проявления температурно-временных эффектов (ползучесть, достраивание материала и т.п.).

Кратковременное малоцикловое нагружение - малоцикловое нагружение при длительностях цикла и суммарных временах, исключающих проявление температурно-временных эффектов.

Основными типами образцов для испытаний при термомеханическом и термоусталостном нагружениях в условиях растяжения (сжатия) являются гладкие цилиндрические трубчатые или сплошные, трубчатые корсетные, сплошные корсетные образцы с рабочей частью круглого сечения. Образцы изготавливают в соответствии со стандартом.

Машины для испытаний на термическую усталость должны иметь варьируемую жесткость в пределах 60 - 300 кН/мм.

Для регистрации деформаций и нагрузок во времени и по числу циклов используют автоматические самопишущие приборы. Запись диаграммы деформирования, с исключением в соответствующих случаях свободной температурной деформации образца, производят с использованием двухкоординатных приборов.

Для исключения свободной температурной деформации образца применяют системы автоматической компенсации, позволяющие выделить для записи и управления режимом нагружения собственно механическую деформацию.

Погрешность измерений, регистрации и поддержания температур не должна превышать ± 1,0 % заданного максимального значения температуры в течение всего процесса испытаний.

Измерение и регистрацию температуры производят в течение всего процесса испытаний.

Форму цикла нагружения и нагрева выбирают с учетом эксплуатационных условий, причем максимальная продолжительность испытаний должна быть не менее 10 % эксплуатационного временного ресурса.

Основным типом нагружения является жесткое нагружение - нагружение в режиме заданных деформаций или приращений.

Испытания проводят до момента образования поверхностной трещины размером 5 - 10 % диаметра образца, определяемой, например, оптическим методом.

По результатам испытаний строят кривые усталости, кривые изменения деформаций и напряжения во времени и по числу циклов, а также диаграммы упругопластического деформирования.

2.3.4. ИСПЫТАНИЯ НА УДАР

Основная задача ударных испытаний - проверка способности изделия выполнять свои функции во время ударного воздействия и после него, т.е. сохранять основные параметры при ударном воздействии (и после него) в пределах, указанных в нормативных документах на изделие.

При испытаниях ударные воздействия имитируют таким образом, чтобы они достаточно точно соответствовали ударным воздействиям при эксплуатации изделия.

Для имитации ударных воздействий в лабораторных условиях применяют три основных метода.

Первый метод. Точно имитируют ударное воздействие, действующее на изделие в условиях его эксплуатации. Когда ударное воздействие имеет сложный вид, допускают его преобразование в простое ударное воздействие, удобное для воспроизведения в лабораторных условиях. Метод требует в большинстве случаев либо создания новых ударных установок, либо доработки уже имеющихся испытательных средств для воспроизведения заданных характеристик ударного воздействия.

Второй метод. Имитация реакции изделия на ударное воздействие, которое оно испытывает в реальных условиях. В этом случае не важен вид ударного воздействия при эксплуатации изделия, а важно, какую реакцию у изделия вызвало это воздействие. Под реакцией изделия на ударное воздействие понимают либо ударный спектр, либо переходную характеристику.

Третий метод. Имитация ударного воздействия в лабораторных условиях предусматривает воспроизведение ударного воздействия, которое позволяло бы в испытательном объекте иметь такие же повреждения, как и в реальных условиях эксплуатации. Метод наименее выгоден, однако в некоторых случаях он может оказаться единственным для решения поставленной задачи.

Различают следующие виды ударных испытаний изделий:

1) на ударную прочность при многократном ударном воздействии, транспортировке и падении, воздействии одиночных ударов большой интенсивности;

2) на ударную устойчивость при воздействии многократных ударов;

3) для определения частотных характеристик изделия методом ударного нагружения;

4) модельные испытания.

Наиболее важный момент при составлении методики проведения испытания - оценка условия воспроизведения заданного ударного воздействия. Такая оценка должна быть основана на изучении внутренних закономерностей удара, поскольку только в этом случае можно обоснованно реализовать заданные характеристики ударного нагружения. В первую очередь определяют скорость и перемещения соударяющихся тел в процессе удара. Это позволяет определить возможность формирования заданного ударного нагружения либо на стандартном оборудовании, либо на вибростенде. Если на имеющемся оборудовании невозможно сформировать параметры заданного ударного воздействия, то создают специальный стенд для проведения необходимых испытаний.

Для изучения склонности материала к хрупкому излому, его испытывают в условиях действия ударных нагрузок. Причиной хрупкого излома наряду с повышенной скоростью деформации могут быть также низкие температуры и многоосное напряженное состояние. Хрупкий излом в наибольшей степени стимулируют концентраторы напряжения: надрезы, трещины и т.п.

Испытание на ударное растяжение используют для определения механических свойств (прочности и пластичности) материала при высоких скоростях деформирования.

Эти испытания проводят на электрических разрывных машинах со скоростью перемещения захвата 10 м/с и более. Для более высоких скоростей деформирования используют машины с пневматическим приводом, маятниковые и ротационные копры, копры с магнито- динамическими нагружающими устройствами, установки с нагружением при взрыве и т.п.

Определение относительного удлинения при ударном растяжении часто затруднено из-за образования нескольких шеек на образце. Поэтому испытания проводят на образцах с надрезом, имеющим угол 60°.

Метод испытания на ударный изгиб при пониженной, комнатной и повышенной температурах основан на разрушении образца с концентратором посередине одним ударом маятникового копра.

Концы образца располагают на опорах. В результате испытания определяют полную работу, затраченную при ударе (работу удара), или ударную вязкость.

Под ударной вязкостью следует понимать работу удара, отнесенную к начальной площади поперечного сечения образца в месте концентратора.

Форма и размеры образцов для испытаний должны соответствовать указанным в табл. 2.3.1. и на рис. 2.3.10.

2.3.1. Форма, размеры (мм) и область применения образцов

Вид концентратора	Радиус концентратора R	Тип образца	Длина L (пред. откл. ±0,6)	Ширина B	Высота H	Глубина надреза h_1 (пред. откл. ±0,1)	Глубина концентратора h (пред. откл. ±0,6)	Высота рабочего сечения H_1	Область применения
U	1 ± 0,07*	1	55	10 ± 0,10	10	-	-	8 ± 0,1	При выборе, приемосдаточных испытаниях металлов и сплавов
		2		7,5 ± 0,10					
		3		5 ± 0,05					
		4		2 ± 0,05	8			6 ± 0,1	
		5		10 ± 0,10	10			7 ± 0,1	
		6		7,5 ± 0,10					
		7		5 ± 0,05					
		8		10 ± 0,10				5 ± 0,1	
		9		7,5 ± 0,10					
		10		5 ± 0,05					
V	0,25 ± 0,025	11	55	10 ± 0,10	10	-	-	8 ± 0,05*	При выборе, приемосдаточных испытаниях металлов и сплавов для конструкций повышенной степени надежности (летательные аппараты, транспортные средства, трубопроводы, сосуды давления и т.п.).
		12		7,5 ± 0,10					
		13		5 ± 0,05					
		14		2 ± 0,05	8			6 ± 0,05	
T	Трещина	15	55	10 ± 0,10	11	1,5	3,0	-	При выборе и приемочном контроле металлов и сплавов для особо ответственных конструкций, для эксплуатации которых оценка сопротивления развитию трещины имеет первостепенное значение. При исследовании причин разрушения ответственных конструкций
		16		7,5 ± 0,10					
		17		5 ± 0,05					
		18		2 ± 0,05	9				
		19		10 ± 0,10	10	3,5	5,0		

*При контрольных массовых испытаниях допускается изготовление образцов с предельным отклонением ±0,10 мм.

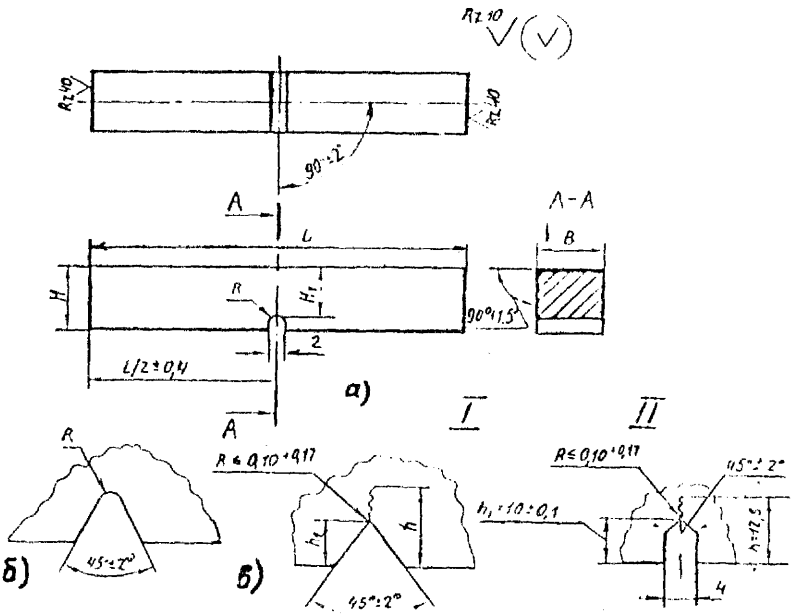


Рис. 2.3.10. Образцы с концентраторами:
а - вида *U*; *б* - вида V; *в* - вида *T* (усталостная трещина);
I - образцы типов 15 - 19; *II* - типа 20

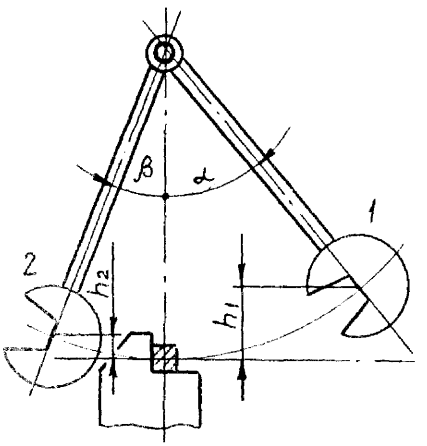


Рис. 2.3.11. Схема работы маятника:
1 - маятник взведен;
2 - маятник после разрушения образца

Допускается использовать образцы без надреза и с одной и двумя необработанными поверхностями, размеры которых по ширине отличаются от указанных в таблице.

Испытания образцов типов 4, 14, 18 проводят по требованию потребителя для изделий специального назначения.

Место вырезки заготовки для изготовления образцов, ориентация оси концентратора, технология вырезки заготовок и изготовления образцов - по ГОСТу для черных металлов, если иное не предусмотрено в нормативно-технической документации на продукцию.

Для цветных металлов и сплавов все это должно быть указано в нормативно-технической документации на продукцию.

Образец располагают на двух опорах (по Шарпи) либо зажимают консольно (по Изоду). Ниже рассматриваются испытания по Шарпи.

Положение образца и схема нанесения удара показаны на рис. 2.3.11.

Образец с надрезом свободно помещают на опоры, причем смещение плоскости симметрии опор не должно превышать 0,5 мм. Удар маятника должен приходиться по стороне образца без надреза.

Скорость маятникового копра в момент соударения определяют по формуле

$$v = \sqrt{2gl(1-\cos\alpha)} \approx \sqrt{2gh_1},$$

где g - ускорение свободного падения; l - расстояние между центром вращения и серединой образца; α - угол падения маятника; h_1 - высота падения маятника.

В маятниковых копрах с запасом работы от 150 до 300 Дж скорость соударения маятника лежит в интервале от 5 до 7 м/с.

Выпускаемые маятниковые копры имеют шкалу, по которой стрелка, соединенная с маятником, показывает расходуемую на разрушение работу.

Для определения склонности материала к хрупкому разрушению проводят испытания на ударный изгиб при различных температурах. Измеренные параметры представляют в виде диаграммы: ордината - ударная вязкость, абсцисса - температура. С этой целью образцы нагревают и сразу же разрушают. Для того, чтобы в момент разрушения отклонение температуры образца от заданной температуры испытаний не превышало + 2 °С, предусматривают перегрев или переохлаждение образца, зависящее от разности между комнатной температурой и температурой испытаний и от времени до разрушения образца. Время нагрева или охлаждения образца должно быть не менее 10 - 15 мин, а время от извлечения образцов из нагревательного или охлаждающего устройства до разрушения не должно быть более 5 с.

За результат испытания принимают работу удара или ударную вязкость для образцов с концентраторами видов *U* и V и ударную вязкость для образцов с концентратором вида *T*.

Работу удара обозначают двумя буквами *KU, KV* или *KT* и цифрами. Первая буква *K* - символ работы удара, вторая буква (*U*, V или *T*) - вид концентратора. Последующие цифры обозначают максимальную энергию удара маятника, глубину концентратора и ширину образца. Цифры не указывают при определении работы удара на копре с максимальной энергией удара маятника 300 Дж, при глубине концентратора 2 мм для концентраторов видов *U* и V и 3 мм для концентратора вида *T* и ширине образца 10 мм (образцы 1, 11 и 15 типов).

Допускается обозначать работу удара двумя индексами A_i: первый *A* - символ работы удара, второй *i* - символ типа образца в соответствии с таблицей.

Ударную вязкость обозначают сочетанием букв и цифр.

Первые две буквы *KC* обозначают символ ударной вязкости, третья буква - вид концентратора; первая цифра - максимальную энергию удара маятника, вторая - глубину концентратора и третья - ширину образца. Цифры не указывают в случае, оговоренном выше.

Допускается обозначать ударную вязкость двумя индексами a_i: первый *a* - символ ударной вязкости; второй *i* - символ типа образца в соответствии с таблицей.

Для обозначения работы удара и ударной вязкости при пониженной и повышенной температурах вводится цифровой индекс, указывающий температуру испытания. Цифровой индекс ставят вверху после буквенных составляющих.

Примеры обозначения:

KV^{-40} 50/2/2 - работа удара, определенная на образце с концентратором вида V при температуре минус 40 °С. Максимальная энергия удара маятника 50 Дж, глубина концентратора 2 мм, ширина образца 2 мм.

a_{11}^{-60} - ударная вязкость, определенная на образце типа 11 при температуре минус 60 °С. Максимальная энергия удара маятника 300 Дж.

Ударную вязкость (*KC*) в Дж/см^2 вычисляют по формуле

$$KC = \frac{K}{S_0},$$

где *K* - работа удара, Дж; S_0 - начальная площадь поперечного сечения образца в месте концентратора, см^2, вычисляемая по формуле

$$S_0 = H_1' B,$$

где H_1' - начальная работа рабочей части образца, см; *B* - начальная ширина образца, см.

H_1' и B измеряют с погрешностью не более ±0,05 мм (±0,005 см). S_0 округляют: по ширине образца 5 мм и менее - до третьей значащей цифры, при ширине образца более 5 мм - до второй значащей цифры.

Для образцов с концентратором вида *T* значение H_1' определяют как разность между полной высотой *H*, измеренной до испытания с погрешностью не более ±0,05 мм и расчетной глубиной концентратора h_p, измеренной с помощью любых оптических средств с увеличением не менее 7 на поверхности излома образца после его испытания с погрешностью не более ±0,05 мм.

Значение KC записывают в протоколе с округлением: до 1 Дж/см^2 - при значении KC более 10 Дж/см^2; до 0,1 Дж/см^2 - при значении KC - менее 10 Дж/см^2.

Если в результате испытания образец не разрушился полностью, то показатель качества материала считается не установленным. В этом случае в протоколе испытания указывают, что образец при максимальной энергии удара маятника не был разрушен.

Результаты испытаний не учитывают при изломе образцов по дефектам металлургического производства.

Определяемая при обычных испытаниях работа удара является интегральной величиной, зависящей от прочности и пластичности материала образца.

При записи диаграмм: сила удара - смещение (прогиб), сила удара - время удара, получают дополнительную информацию, из которой определяют силу при переходе от упругого к упругопластическому состоянию, максимальную силу при разрушении, прогиб в начале нестабильного распространения трещины.

По диаграммам деформаций определяют максимальную нагрузку в килограммах и прогиб образца до разрушения в метрах, характеризующие динамическую прочность и пластичность материалов при ударном изгибе.

Для испытаний на ударный изгиб при температуре до минус 269 °С применяют специальные копры, оснащенные датчиками для измерения динамической нагрузки и прогиба образца, а также регистрирующей аппаратурой для записи диаграмм деформации. В качестве хладоагентов применяют жидкий азот с содержанием кислорода не более 10 %, жидкий водород и жидкий гелий.

Время установки образца на опоры копра, начиная с момента извлечения из криостата до удара ножа маятника, не должно превышать 5 с. Силу, приложенную к образцу при ударе, измеряют с помощью тензорезисторов, прогиб образца - оптическим методом.

Средства испытаний изделий на ударные нагрузки различают по назначению, виду воспроизводимого ударного нагружения, конструктивному исполнению, а также способам формирования ударного воздействия, получения требуемой скорости соударения или разгона, крепления испытуемого изделия. Чаще всего ударные испытания проводят на специальных ударных стендах, однако в некоторых случаях ударное воздействие воспроизводят на вибростендах. В общем виде в состав ударного стенда входят ударная установка, система управления и питания, контрольно-измерительная и анализирующая аппаратура, а также вспомогательные принадлежности и приспособления.

В зависимости от принципа создания ударного воздействия ударные стенды можно разделить на два основных вида:

1) стенды, действие которых основано на принципе торможения предварительно разгоняемого до требуемой скорости тела;

2) стенды, действие которых основано на принципе разгона тела до требуемой скорости.

В практике ударных испытаний наибольшее распространение получили ударные стенды первого вида. Кинетическая энергия, приобретенная телом в процессе разгона, гасится в результате соударения с неподвижной преградой. Длительность ударного воздействия складывается из длительности торможения ударяющего тела (активный этап удара) и длительности восстановления упругих деформаций соударяющихся тел (пассивный этап удара). В конце торможения ударяющего тела скорость соударения падает до нуля, ударное ускорение и перемещение тел относительно друг друга достигают максимальных значений. Начальная скорость соударения тел, максимальное перемещение в процессе соударения и максимальное ударное ускорение взаимосвязаны при известных массах соударяющихся тел и определяют условия воспроизведения заданного закона изменения ударного ускорения во времени.

Ударные установки, действие которых основано на принципе торможения, могут иметь вертикальное, наклонное или горизонтальное конструкционное исполнение. Основные узлы установки: подвижная ударная платформа, тормозное устройство и наковальня либо ударник, тормозное устройство и неподвижная до начала удара ударная платформа.

Конструкция ударной платформы должна обеспечивать передачу воспроизводимого ударного нагружения на испытуемое изделие с минимальными искажениями, поэтому форму и размеры ее выбирают из условий максимальной прочности и жесткости.

В зависимости от вида воспроизводимого ударного нагружения различают стенды для воспроизведения одиночного и многократно повторяющегося ударного воздействия, а также сложных видов и специфических условий ударного нагружения.

На ударных стендах можно воспроизводить ударное воздействие заданного вида с достаточной степенью точности, изменять характер ударного воздействия и многократно воспроизводить его, изменять основные параметры ударного воздействия, затем анализировать результаты изменения, оценивать реакцию испытуемого изделия на ударное воздействие, определять частотные характеристики испытуемого изделия, устанавливать его прочностные характеристики и способность функционировать в процессе и после ударного воздействия. С экономической точки зрения испытания на ударном стенде значительно выгоднее натурных испытаний изделия.

2.3.5. ИСПЫТАНИЯ НА ИЗГИБ

Испытания на изгиб применяют для исследования сравнительно хрупких материалов, например чугунов с пластинчатым графитом, инструментальной стали или керамики. Для вязких металлических материалов изгибающую нагрузку можно продолжать прикладывать за пределом текучести без разрушения материала.

При изгибе образца с симметричным поперечным сечением, в одной из наружных зон возникают растягивающие, а в противоположной - сжимающие напряжения. Напряжения увеличиваются по мере удаления в обе стороны от нейтральной оси, так что самые высокие их значения приходятся на наружные зоны. Если напряжения при этом достигают предела текучести, наступает пластическое течение.

В упругой области напряжения в поперечном сечении образца распределяются по линейному закону и максимальное значение напряжений в точках z и d выражается как

$$\sigma_z = M_b l_z / I \text{ и } \sigma_d = M_b l_d / I ,$$

где M_b - изгибающий момент; I - момент инерции относительно горизонтальной оси; l_z, l_d - расстояния точек z и d от горизонтальной оси.

Характеристики прочности и пластичности при изгибе определяют при двух модификациях этого испытания: трехточечном и четырехточечном изгибе.

При трехточечном изгибе (рис. 2.3.12, *а*) наибольший изгибающий момент возникает под влиянием сосредоточенной силы F в середине образца

$$M_{b\max} = FL_s / 4 ,$$

где L_s - расстояние между опорами.

В точке приложения нагрузки появляется наибольший упругий прогиб (мм)

$$f = FL_s^3 / 48EI = \sigma_{\max} L_s^2 / 12EI ,$$

где E - модуль упругости.

Так как при испытании полимерных материалов, разрушение образцов часто не достигается, определяют предельный прогиб при условии, что величина прогиба в точке приложения силы в 1,5 раза превышает толщину образца.

Прочностной характеристикой, соответствующей этому прогибу, является условное временное сопротивление при изгибе. В случае четко выраженного зуба (площадки) текучести определяют условный предел текучести при изгибе.

При четырехточечном изгибе (см. рис. 2.12, *б*) действующая на образец нагрузка F приложена в двух местах на расстоянии m от опор. При таком нагружении между точками приложения нагрузки не возникает усилий среза. Изгибающий момент между точками приложения нагрузки постоянен, т.е.

$$M_{b\max} = Fm .$$

Максимальные напряжения между точками приложения нагрузки

$$\sigma_{\max} = Fm / W .$$

Наибольший прогиб в середине между точками приложения нагрузки при четырехточечном изгибе относительно линии опор

$$f_{\max} = Fm\left(3L_s^2 - 4m^2\right) / 14EI .$$

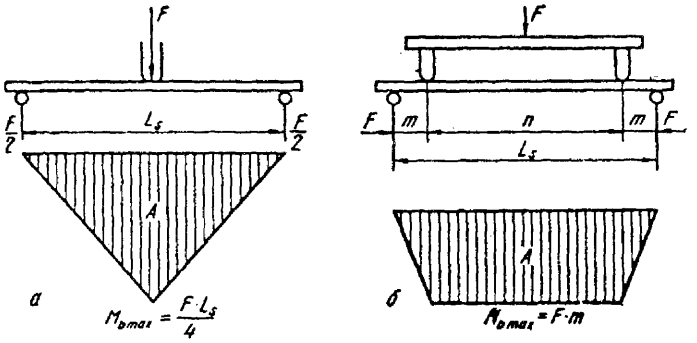


Рис. 2.3.12. Характеристики прочности и пластичности при изгибе

В отличие от трехточечного при четырехточечном изгибе вследствие постоянства изгибающего момента между точками приложения нагрузки создаются условия, при которых получаемые результаты испытаний правильно характеризуют материал и не зависят от возможных неоднородностей образца (в частности, структурных) в области максимального изгибающего момента.

Для проведения испытания на изгиб применяют только цилиндрические или призматические образцы.

Образцы кладут на гладкие цилиндрические опоры и равномерно нагружают в соответствии с выбранной схемой испытаний с помощью одного или двух пуансонов.

Перед началом испытания точно устанавливают расстояние между опорами (для цилиндрических образцов $L_s = 20d_0$).

Испытания на загиб и на плоский изгиб используют для контроля способности металлического материала или сварного соединения деформироваться при комнатной температуре. Предварительно определяют влияние свойств самого материала (твердости или прочности) и влияние толщины материала, так как с увеличением этих характеристик снижается способность к изменению формы.

При проведении испытаний образцы (в большинстве случаев полосы шириной b = 30 + 50 мм и длиной 20 - 300 мм) медленно изгибают в специальном изгибающем приспособлении. В результате испытания определяют угол загиба α, на который был изогнут материал в момент появления первой трещины на растягиваемой стороне. Испытание можно также закончить по достижении предварительного угла загиба, при котором еще не образовалось ни одной трещины. Максимальный угол загиба при этом испытании 180°.

В большинстве случаев испытания проводят с помощью соответствующих приспособлений в универсальных разрывных машинах, обеспечивающих непрерывный и медленный изгиб образца. В простейшем случае испытание на плоский изгиб можно провести на наковальне или валу. Испытываемый материал сначала оттибают до угла 90°, а затем продолжают изгибать с помощью ударов молота до появления первой трещины.

При испытании на плоский изгиб образцов с надрезом последний наносят на одну сторону образца (геометрия надреза: угол 60°, глубина 20 % толщины листа). Эти испытания должны характеризовать влияние надреза на способность к деформации.

Испытаниями на плоский изгиб контролируют дефекты прокатки, ликвацию и неоднородность по толщине листа. Для этого вырезают полосы шириной 20 мм в направлении прокатки, сначала изгибают их под прямым углом, затем между концами полосы закладывают полоску материала той же толщины и окончательно сгибают под прессом. На внешней стороне не должно быть никаких трещин.

Испытания на изгиб применяют также для контроля сварных швов при сварке встык. Поперек направленного шва вырезают полосу шириной 2 мм так, чтобы шов находился в центре образца. Корень шва изгибают нажимным пуансоном и определяют угол α, при котором наблюдается появление первой трещины на растягиваемой стороне. Если ставится целью получение разрушения при изгибе, то можно сделать надрез для подавления деформации на растягиваемой стороне шва.

При статическом кратковременном нагружении определяют характеристики трещиностойкости металлов по образцам с предварительно нанесенной усталостной трещиной толщиной не менее 1 мм при температуре от минус 269 до плюс 600° С.

При записи диаграмм "нагрузка - смещение" или "нагрузка - прогиб" определяют основные характеристики трещиностойкости: силовые, деформационные и энергетические. Трещиностойкость оценивают по одной или нескольким силовым, деформационным и энергетическим величинам, полученным с помощью испытательных машин с механическим, гидравлическим или электрогидравлическим приводом.

2.3.6. ИСПЫТАНИЯ НА КРУЧЕНИЕ

При испытании на кручение определяют следующие механические характеристики металлов: модуль сдвига, предел пропорциональности, предел текучести, предел прочности (условный), предел прочности (истинный), максимальный остаточный сдвиг, характер разрушения (срез или отрыв).

Модуль сдвига - отношение касательного напряжения к упругой угловой деформации в точке. Обозначение G (МПа).

Предел пропорциональности при кручении - касательное напряжение в периферийных точках поперечного сечения образца, вычисленное по формуле для упругого кручения, при котором отклонение от линейной зависимости между нагрузкой и углом закручивания достигает такой величины, что тангенс угла наклона, образованного касательной к кривой деформации и осью нагрузок, увеличивается на 50 % своего значения на линейном участке. Обозначение $\tau_{п\,ц}$ (МПа).

Предел текучести при кручении - касательное напряжение, вычисленное по формуле для упругого кручения, при котором образец получает остаточный сдвиг, равный 0,3 %. Обозначение $\tau_{0,3}$ (МПа).

Предел прочности при кручении - касательное напряжение, равное отношению наибольшего момента при кручении, предшествующего разрушению, к полярному моменту сопротивления сечения образца для испытания. Обозначение $\tau_{пч}$ (МПа).

Истинный предел прочности при кручении - наибольшее истинное касательное напряжение при разрушении образца, вычисленное с учетом перераспределения напряжений при пластической деформации. Обозначение $\tau_к$ (МПа).

Максимальный остаточный сдвиг при кручении - максимальная угловая деформация в точке на поверхности образца в момент разрушения. Обозначение γ_{max} (радиан).

Срез или отрыв - характер разрушения при кручении.

Для испытания на кручение в качестве основных принимают цилиндрические образцы с диаметром рабочей части 10 мм и расчетной длиной 100 и 50 мм, с головками на концах для закрепления в захватах испытательной машины.

Определение модуля сдвига при кручении. Образец устанавливают и закрепляют в захватах испытательной машины. Нагружают образец крутящим моментом, соответствующим касательному напряжению τ_0, составляющему 10 % ожидаемого предела пропорциональности материала, закрепляют на рабочей части образца угломер и отмечают первоначальное показание угломера, принимаемое за нулевое.

Нагружение образца крутящим моментом осуществляют равными ступенями.

Модуль сдвига при кручении вычисляют по формуле

$$G = \frac{\Delta T\, l}{\Delta\varphi\, I_p},$$

где ΔT - ступень нагружения; l - расчетная длина образца, мм; $\Delta\varphi$ - среднее арифметическое значение углов закручивания на расчетной длине образца, приходящихся на одну ступень нагружения, рад; I_p - полярный момент инерции, мм^4.

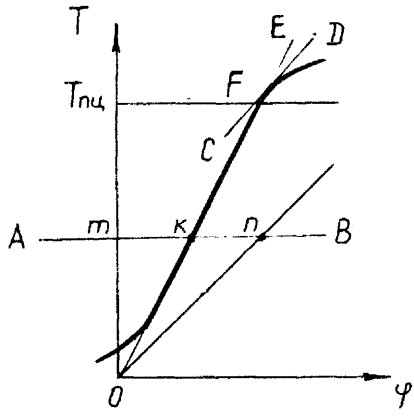


Рис. 2.3.13. Определение предела пропорциональности при кручении

Определение предела пропорциональности при кручении. Нагружают образец вначале большими, а затем малыми ступенями, отмечая после каждой ступени нагружения угловую деформацию. Нагружение ступенями осуществляют до 80 % ожидаемого предела пропорциональности. Значение малой ступени нагружения должно соответствовать увеличению касательного напряжения не более 10 МПа.

Испытания прекращают, когда угловая деформация от нагружения на малую ступень превысит не менее чем в два раза среднее значение угловой деформации, полученное на предыдущих ступенях нагружения на линейном участке. Значения приращения угла закручивания на малую ступень нагружения определяют на линейном участке.

По результатам испытаний находят нагрузку $T_{пц}$, соответствующую подсчитанному значению приращения угла закручивания.

Нагрузка $T_{пц}$ может быть также определена по диаграмме деформации (рис. 2.3.13), если масштаб диаграммы обеспечивает не более 0,05 % относительно сдвига на 1 мм оси абсцисс и не более 5 МПа касательного напряжения на 1 мм оси ординат. Для определения $T_{пц}$ по диаграмме проводят прямую OE, совпадающую с начальным прямолинейным участком кривой деформации. Через точку O проводят ось ординат OT, затем прямую AB, параллельную оси абсцисс на произвольном уровне, и на этой прямой откладывают отрезок kn, равный половине отрезка mn. Через точку n и начало координат проводят прямую On и параллельно ей касательную CD к кривой деформации. Ордината точки касания F

соответствует $T_{пц}$. Предел пропорциональности при кручении вычисляют по формуле

$$\tau_{пц} = \frac{T_{пц}}{W_p},$$

где W_p - полярный момент сопротивления, мм^3.

Для образца круглого сечения момент сопротивления вычисляют по формуле

$$W_p = \frac{\pi D^3}{16}.$$

Определение предела текучести при кручении. Деформацию до предела пропорциональности считают упругой, а за пределом пропорциональности - остаточной. Вычисляют относительный сдвиг в процентах по формуле

$$\gamma_{пц} = \frac{\varphi_{пц} D}{2l} 100,$$

где $\varphi_{пц}$ - угол закручивания образца на его расчетной длине, соответствующий пределу пропорциональности при кручении, рад; D - диаметр рабочей части образца, мм; l - расчетная длина образца, мм.

Прибавляют к относительному сдвигу $\gamma_{пц}$ допуск на остаточный сдвиг 0,3 % и по величине $\gamma_{пц}$ + 0,3 % находят соответствующий пределу текучести угол закручивания расчетной длины образца.

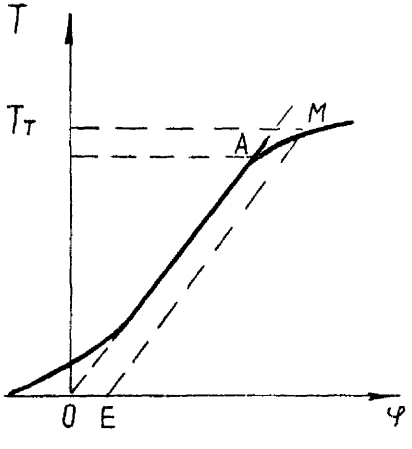


Рис. 2.3.14. Определение предела текучести при кручении

Продолжают нагружение образца за пределом пропорциональности до тех пор, пока не будет достигнут угол закручивания $\varphi_т$, соответствующий значению $\gamma_{пц}$ + 0,3 %, и фиксируют нагрузку $T_т$, соответствующую пределу текучести.

Нагрузка $T_т$ может быть также определена по диаграмме деформаций (рис. 2.3.14), если масштаб диаграммы обеспечивает не более 0,05 % относительного сдвига на 1 мм оси абсцисс и не более 5 МПа касательного напряжения на 1 мм оси ординат. Для определения $T_т$ от начала координат O откладывают по оси абсцисс отрезок OE, соответствующий остаточному сдвигу γ = 0,3 %. Начальная криволинейная часть диаграммы исключается. Параллельно прямой OA проводится прямая EM до пересечения с кривой (точка M). Ордината точки M пересечения прямой с кривой диаграммы является значением нагрузки $T_т$, соответствующей пределу текучести. Предел текучести при кручении $\tau_{0,3}$ в МПа вычисляют по формуле

$$\tau_{0,3} = \frac{T_т}{W_p}.$$

Определение условного предела прочности при кручении. Устанавливают и закрепляют образец в захватах испытательной машины и нагружают до разрушения, фиксируя разрушающую нагрузку $T_к$. Одновременно регистрируют максимальный угол закручивания φ_{max} на расчетной длине образца, который используется при подсчете γ_{max}. Условный предел прочности при кручении $\tau_{пц}$ в МПа вычисляют по формуле

$$\tau_{пц} = \frac{T_к}{W_p}.$$

Определение истинного предела прочности при кручении. Устанавливают и закрепляют образец в захватах испытательной машины и нагружают до появления пластических деформаций. Ступенчато догружают образец до разрушения, фиксируя нагрузки T_i и соответствующие им углы закручивания φ_i на расчетной длине образца в процессе монотонного

деформирования образца с заданной скоростью.

Относительные углы закручивания вычисляют в рад/мм по формуле

$$\nu_l = \frac{\varphi_l}{l}.$$

Истинный предел прочности при кручении $\tau_к$ в МПа

$$\tau_к = \frac{4}{\pi D^3}\left[3T_к + \nu_к\left(\frac{dT}{d\nu}\right)_к\right],$$

где $T_к$ - крутящий момент при разрушении образца; $\nu_к$ - относительный угол закручивания при разрушении образца, рад/мм; $\left(\frac{dT}{d\nu}\right)_к$ - величина, определяемая графически.

Максимальный остаточный сдвиг при кручении

$$\gamma_{max} = \frac{\varphi_{max} D}{2l},$$

если величина сдвига не превышает 0,1 рад.

При большой деформации максимальный остаточный сдвиг определяют по формуле

$$\gamma_{max} = arctg\left(\frac{\varphi_{max} P}{2l}\right),$$

где φ_{max} - максимальный угол закручивания на расчетной длине образца, рад. Допускается выражать γ_{max} в процентах, путем умножения подсчитанной величины на 100.

2.3.7. ИСПЫТАНИЯ НА ТВЕРДОСТЬ

2.3.7.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Твердость - характеристика материала, зависящая от совокупности его пластических и упругих свойств и характера напряженного состояния, проявляющаяся в способности оказывать сопротивление при деформации участка поверхности тела из этого материала.

Из определения следует связь твердости с другими параметрами механического состояния, позволяющая количественно характеризовать твердость.

Герц впервые в свое время предложил абсолютной твердостью назвать наибольшее нормальное напряжение, действующее на участке соприкосновения двух шаров, изготовленных из испытуемого материала, при сжатии их до появления остаточных деформаций. В дальнейшем оказалось, что твердость по Герцу зависит от диаметра испытуемых шаров и, следовательно, не может рассматриваться как характеристика материала. Возобладала точка зрения, что мерой твердости следует считать отношение напряжения к образующейся деформации.

Твердость материала, определенная любым способом, является вторичной механической характеристикой, закономерно связанной с первичными характеристиками - параметрами диаграммы одноосного растяжения, а также параметрами условий измерения (усилие вдавливания, угол индентора и т.д.).

Для количественного определения твердости металлов и сплавов применяют как методы механического нагружения образца, так и косвенные методы контроля (схема 2.3.1).

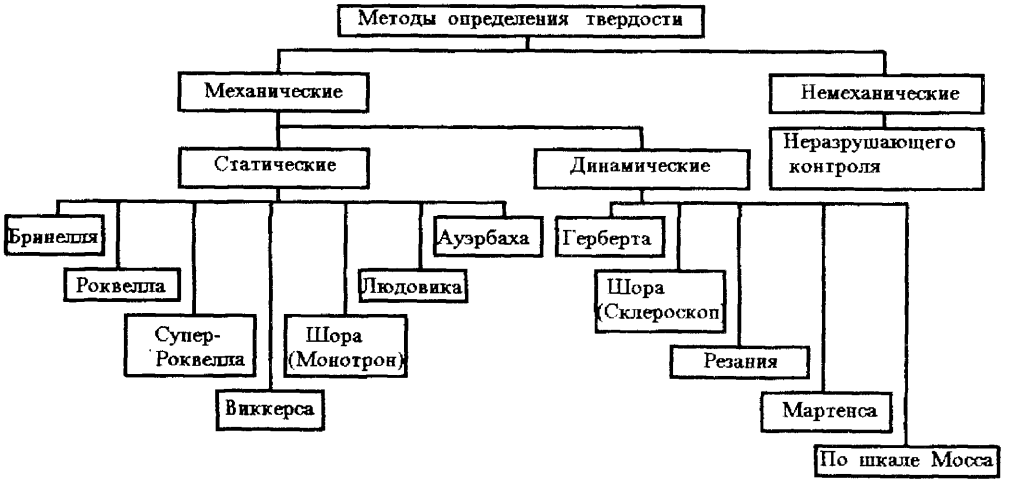


Схема 2.3.1.

Наибольшее применение получили статические методы определения твердости. Стандартными методами являются в первую очередь методы Бринелля, Роквелла и Виккерса. Из динамических методов получили применение, особенно в цеховых условиях, методы царапания (Мартенса, по минералогической шкале Мосса), по длительности качания коромысла индентора (Герберта), методы ударного отскока и ударного отпечатка (последние, в частности, применяются для контроля крупногабаритных деталей). Резание сверлом или напильником является неточным методом определения твердости.

Перспективным и высокоточным методом является метод непрерывного вдавливания, при котором записывается диаграмма перемещения, возникающего при внедрении индентора, с одновременной регистрацией усилий. Этот метод аналогичен прочностным методам, применяемым при растяжении образцов. Его применение ограничено сравнительно высокой стоимостью испытуемого оборудования.

Акустические, магнитные, электромагнитные, рентгеновские методы неразрушающего контроля для определения твердости пока еще не получили широкого применения. Особенности основных методов измерения твердости сравниваются в табл. 2.3.2.

2.3.2. Особенности различных методов измерения твердости

Методы	Способ измерения и форма индентора	Нагружение F, Н	Допустимая шероховатость поверхности Ra	Примечание
Бринелля	По диаметру отпечатка от шарика (d = 1,0 + 10 мм)	Статическое, 24,5 - 29430	1,25 - 2,5	Широко применяемый метод, в частности, для чугунных деталей HB = 18,5 + 5 884 МПа
Роквелла	По глубине вдавливания, алмазный конусный наконечник или шариковый стальной (d = 1,588 мм; 3,175 мм)	Статическое, 490,3 - 1373	0,38 - 0,63	Широко применяемый метод, легко автоматизируется
Супер-Роквелла	По глубине вдавливания, алмазный конус, шарик d = 1,588 мм	Статическое, 147,1 - 441,3	0,08 - 0,16	Применяется для нежестких деталей
Виккерса	По глубине вдавливания или по диагонали отпечатка; алмазный наконечник в форме правильной четырехгранной пирамиды	Статическое, 9,807 - 980,7	0,02 - 0,04	Наиболее универсальный - точный метод, широко применяется в том числе и для нежестких деталей
Людвика	По диаметру отпечатка, победитовый конус	Статическое, 20000		НЛ не зависит от нагрузки
Шора (Монотрон)	При заданной глубине отпечатка h = 0,045 мм, стальной или алмазный шарик	Статическое	0,63 - 1,25	HB = (5 + 10) HШ
Мартенса	По ширине царапины, алмазный конус или пирамида	Динамическое		Определяется сопротивление разрыву

2.3.7.2. ИСПЫТАНИЯ НА ТВЕРДОСТЬ ПО БРИНЕЛЛЮ

Сущность метода заключается во вдавливании шарика (стального или из твердого сплава) в образец (изделие) под действием нагрузки, приложенной перпендикулярно поверхности образца, в течение определенного времени, и измерении диаметра отпечатка после снятия нагрузки (рис. 2.3.15).

Твердость по Бринеллю - HB (HBW) - твердость, выраженная отношением приложенной нагрузки F к площади поверхности сферического отпечатка A:

HB - при применении стального шарика (для металлов и сплавов с твердостью не более 450 единиц);

HBW - при применении шарика из твердого сплава (для металлов и сплавов с твердостью не более 650 единиц).

Обозначения параметров приведены ниже:

D - диаметр шарика;

F - испытательная нагрузка, Н;

K - соотношение между нагрузкой и квадратом диаметра шарика $\frac{0{,}102F}{D^2}\left(\frac{F}{D^2}\right)$, Н/мм^2;

h - глубина отпечатка, мм;

d - диаметр отпечатка, мм:

A - площадь отпечатка, мм^2;

s - толщина образца, мм;

HB - твердость по Бринеллю.

Испытания проводят при температуре $\left(20^{+15}_{-10}\right)$°С. Во время испытаний прибор должен быть защищен от ударов и вибраций. Опорные поверхности рабочего столика и образца должны быть очищены от посторонних веществ. Образец должен лежать на подставке устойчиво, исключая возможность его смещения и прогиба во время испытаний.

Шарик с подготовленной площадкой должен соприкасаться без удара в направлении, перпендикулярном к испытуемой площадке. Продолжительность выдержки под нагрузкой должна быть от 10 до 15 с для черных металлов, для цветных металлов и сплавов - от 10 до 180 с, в зависимости от материала и его твердости.

Расстояние между центрами двух соседних отпечатков должно быть не менее $4d$, а расстояние от центра отпечатка до края образца (изделия) - не менее $2{,}5d$; для металлов с твердостью менее 35 HB эти расстояния должны быть соответственно $6d$ и $3d$.

Поверхность образца или испытуемого изделия должна быть ровной, гладкой и свободной от окисной пленки. При подготовке поверхности образца необходимо принять меры, исключающие изменение свойств металла из-за нагрева или наклепа.

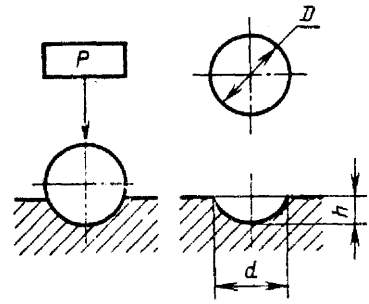


Рис. 2.3.15. Схема проведения измерения твердости по Бринеллю стальным шариком

При определении твердости шариком диаметром 1 мм поверхность образца должна быть отполирована.

Толщину образца (изделия), подвергаемого испытанию, выбирают таким образом, чтобы на противоположной стороне образца после испытания не было заметно следов деформации.

Отклонение среднего диаметра, шероховатость поверхности и отклонение от сферической формы шариков из твердого сплава должны соответствовать третьей степени точности шариков по соответствующему ГОСТу.

Испытания проводят с применением нагрузок, зависящих от соотношения K и D (табл. 2.3.3).

Диаметр шарика и соответствующую нагрузку следует выбирать так, чтобы диаметр отпечатка находился в пределах от 0,25 до $0{,}6D$. При несоблюдении этих требований необходимо изменить условия испытания (диаметр шарика и нагрузку).

Для выбора K - соотношения между нагрузкой и квадратом диаметра шарика - рекомендуется пользоваться данными табл. 2.3.4.

Минимальная толщина образца должна быть не менее 8-кратной глубины отпечатка и определяться по формулам:

$$s \geq 8\frac{0{,}102F}{\pi D\,\mathrm{HB}} \quad (F \text{ в Н});$$

$$s \geq 8\frac{F}{\pi D\,\mathrm{HB}} \quad (F \text{ в кгс}).$$

Диаметр отпечатка измеряют с помощью микроскопа или других приборов с погрешностью измерения:

±0,25 % - для шариков диаметром 5 и 10 мм;

±0,5 % - для шариков диаметром 1,2 и 2,5 мм.

Диаметр отпечатка измеряют в двух взаимно перпендикулярных направлениях и определяют как среднее арифметическое значение двух измерений. При этом разность измерений диаметров одного отпечатка не должна превышать 2 % меньшего из них.

Число твердости определяется по формулам:

$$\text{НВ} = \frac{0{,}102F}{A} = \frac{0{,}102 \cdot 2F}{\pi D\left(D - \sqrt{D^2 - d^2}\right)},$$

когда F выражена в Н;

$$\text{НВ} = \frac{F}{A} = \frac{2F}{\pi D\left(D - \sqrt{D^2 - d^2}\right)},$$

когда F выражена в кгс.

При твердости металлов менее 450 единиц применяют стальные шарики или шарики из твердого сплава, при твердости более 450 единиц - из твердого сплава.

При измерении твердости обозначение НВ дополняется индексами, указывающими условия измерения в следующем порядке: первая цифра перед НВ указывает твердость в МПа (кгс/мм^2), первая цифра после НВ указывает диаметр шара в миллиметрах, вторая - нагрузку в Н (кгс) и третья - продолжительность выдержки под нагрузкой в секундах.

Например: 3000 НВ 2,5/1838,7/10 означает твердость по Бринеллю, равную 3000 МПа, при испытании шаром диаметром 2,5 мм под нагрузкой 1838,7 Н при выдержке в течение 10 с.

При испытании на твердость шаром из карбида вольфрама обозначение НВ дополняется буквой W с сохранением указанных индексов.

По значениям твердости по Бринеллю НВ можно определить временное сопротивление при растяжении $\sigma_в$ в месте испытания.

2.3.3. Значения испытательной нагрузки F

Диаметр шарика D, мм	Нагрузка F, Н(кгс), для K					
	30	15	10	5	2,5	1
1,0	294,2 (30)	-	98,07 (10)	49,03 (5)	24,52 (2,5)	9,807 (1)
2,0	1177 (120)	-	392,3 (40)	196,1 (20)	98,07 (10)	39,23 (4)
2,5	1839 (187,5)	-	612,9 (62,5)	306,0 (31,2)	153,0 (15,6)	60,80 (6,2)
5,0	7355 (750)	-	2452 (250)	1226 (125)	612,9 (62,5)	245,2 (25)
10,0	29420 (3000)	14710 (1500)	9807 (1000)	4903 (500)	2452 (250)	980,7 (100)

2.3.4. Значения K

Материал	Твердость по Бринеллю	K
Сталь, чугун, высокопрочные сплавы (на основе никеля, кобальта и др.)	До 140 140 и более	10 30
Титан и сплавы на его основе	От 50	15
Медь и сплавы на ее основе, легкие металлы и их сплавы	Менее 35 От 35	5 10
Подшипниковые сплавы	От 8 до 50	2,5
Свинец, олово и другие мягкие металлы	До 20	1

2.3.7.3. ИСПЫТАНИЯ НА ТВЕРДОСТЬ ПО РОКВЕЛЛУ

Твердость по Роквеллу определяется разностью между условной максимальной глубиной проникновения индентора и остаточной глубиной его внедрения под действием основной нагрузки F_1, после снятия этой нагрузки, но при сохранении предварительной нагрузки F_0.

Сущность метода заключается во внедрении в поверхность образца (или изделия) алмазного конусного (шкалы *A, C, D*) или стального сферического наконечника (шкалы *B, E, F, G, H, K*) под действием последовательно прилагаемых предварительного F_0 и основного F_1 усилий и в определении глубины внедрения наконечника после снятия основного усилия F_1.

Обозначения параметров, их определения и схемы приложения нагрузки при определении твердости приведены ниже:

α - угол при вершине алмазного конусного наконечника, градус;

R - радиус сферической части алмазного конусного наконечника, мм;

D - диаметр шарика, мм;

F_0 - предварительная нагрузка, Н (кгс);

F_1 - основная нагрузка, Н (кгс);

F - общая нагрузка $F_0 + F_1$, Н (кгс);

h_0 и h_1 - глубина внедрения наконечника под действием предварительной нагрузки и основной нагрузки, мм;

e - глубина внедрения наконечника после снятия основной нагрузки в единицах измерения 0,002 мм;

HRA, HRC, HRD - твердость по Роквеллу по шкалам *A, C* и *D* - (100-е) единиц твердости;

HRB, HRE, HRF, HRG, HRH, HRK - твердость по Роквеллу по шкалам *B, E, F, G, H, K* - (130-е) единиц твердости.

Твердость по Роквеллу обозначают символом HR с указанием шкалы твердости, которому предшествует числовое значение твердости из трех значащих цифр. Например, 61,5HRC - твердость по Роквеллу 61,5 единиц по шкале *C*.

Схема измерения твердости при применении алмазного наконечника показана на рис. 2.3.16, стального наконечника - на рис. 2.3.17.

Наконечник алмазный конусный имеет угол при вершине 120°, радиус сферической части 0,2 мм. Наконечник шариковый стальной имеет диаметр 1,588 (шкалы *B, F, G*) и 3,175 мм (шкалы *E, H, K*). Шероховатость поверхности шарика *Ra* не более 0,040 мкм.

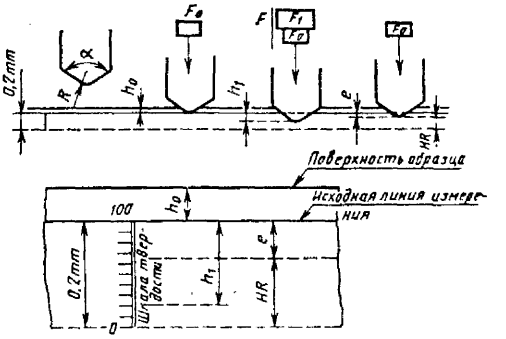


Рис. 2.3.16. Схема проведения измерения твердости при применении алмазного наконечника

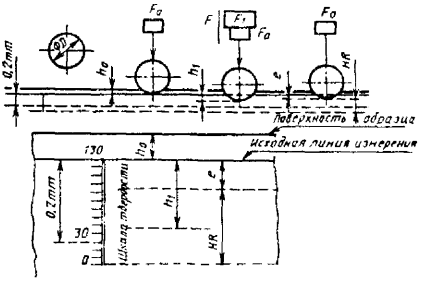


Рис. 2.3.17. Схема проведения измерения твердости при применении стального наконечника

Предельные отклонения диаметров шарика не должны превышать:

±0,003 мм - для шарика диаметром 1,588 мм;

±0,004 мм - для шарика диаметром 3,175 мм.

У метода Роквелла по сравнению с методом Бринелля следующие преимущества:

возможность проводить испытания высокой твердости путем отсчета по шкале индикатора без вычисления или пользования специальными таблицами;

малая повреждаемость поверхности в результате его применения;

высокая производительность измерения.

В методе Роквелла за единицу твердости *C* принимают перемещение 0,002 мм.

Нагрузки по методу Роквелла строго регламентированы (табл. 2.3.5).

Толщина образца (или изделия) должна не менее чем в 10 раз превышать глубину внедрения наконечника после снятия основной нагрузки F_1.

2.3.5. Значения нагрузок при испытании по методу Роквелла

Шкала твердости	Обозначение единицы измерения	Нагрузка, Н (кгс)			Диапазон измерений, ед. твердости
		предварительная, F_0	основная, F_1	общая F	
A	HRA	98,07 (10)	490,3 (50)	588,4 (60)	20 - 88
B	HRB	98,07 (10)	882,6 (90)	980,7 (100)	20 - 100
C	HRC	98,07 (10)	1373 (140)	1471 (150)	20 - 70
D	HRD	98,07 (10)	882,6 (90)	980,7 (100)	40 - 77
E	HRE	98,07 (10)	882,6 (90)	980,7 (100)	70 - 100
F	HRF	98,07 (10)	490,3 (50)	588,4 (60)	60 - 100
G	HRG	98,07 (10)	1373 (140)	1471 (150)	30 - 94
H	HRH	98,07 (10)	490,3 (50)	588,4 (60)	80 - 100
K	HRK	98,07 (10)	1373 (140)	1471 (150)	40 - 100

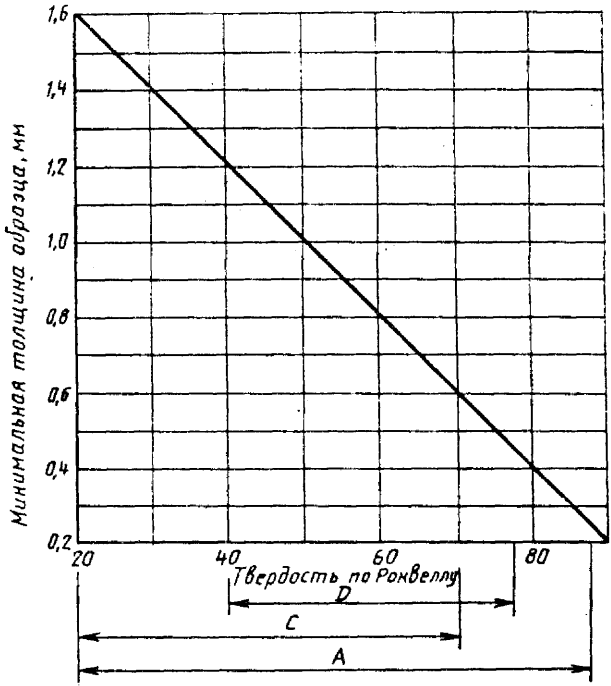


Рис. 2.3.18. Минимальная толщина образца в зависимости от шкалы и ожидаемой твердости при измерении твердости по шкалам *A, C, D*

Минимальная толщина образца или изделия определяется в соответствии с рис. 2.3.18 или 2.3.19.

Шероховатость поверхности образца (или участка для измерения твердости изделия) *Ra* должна быть не более 2,5 мкм.

При измерении твердости прибор должен быть защищен от вибрации и ударов.

При испытании должны соблюдаться следующие условия:

плавное приведение наконечника в контакт с рабочей поверхностью образца (или изделия);

плавное приложение предварительной F_0 и основной F_1 (в течение 2 - 8 с) нагрузки;

плавное снятие основной нагрузки F_1 через 1 - 3 с после резкого замедления или остановки стрелки индикатора (или изменения показаний цифрового отсчетного устройства).

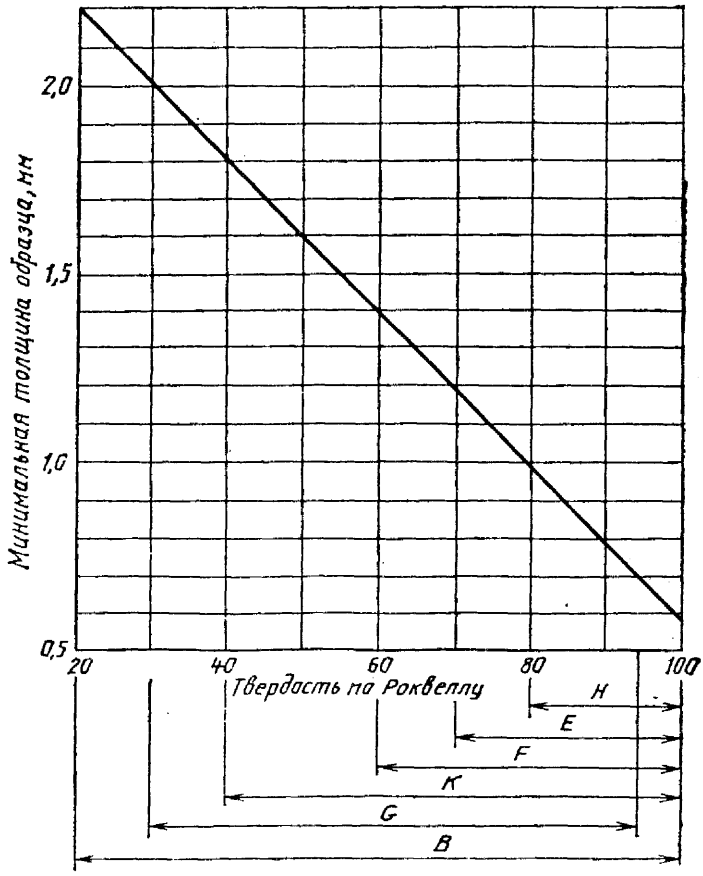


Рис. 2.3.19. Минимальная толщина образца в зависимости от шкалы и ожидаемой твердости при измерении по шкалам *B, F, E*

Для металлов, при измерении твердости которых резкого замедления или остановки стрелки индикатора (или изменения показаний цифрового отсчетного устройства) не наблюдается, время выдержки под общим усилием F должно составлять 10 - 15 с.

Расстояние между центрами двух соседних отпечатков должно быть не менее четырех диаметров отпечатка (но не менее 2 мм). Расстояние от центра отпечатка до края образца должно быть не менее 2,5 диаметра отпечатка (но не менее 1 мм).

Число твердости по Роквеллу определяется по шкале индикатора или показателя цифрового отсчетного устройства с округлением до 0,5 единицы твердости.

При измерении твердости на выпуклых цилиндрических и сферических поверхностях по шкалам *A, B, C, D, F, G* в результате измерения твердости должны быть введены поправки. Поправки прибавляются к полученным значениям твердости.

Поправки, добавляемые к величинам твердости по Роквеллу, при измерениях на выпуклых цилиндрических поверхностях определяются по табл. 2.3.6 и 2.3.7.

При измерениях на сферических поверхностях по шкале C к показаниям добавляется поправка (табл. 2.3.8)

$$\Delta H = 59\frac{\left(1-\frac{HR}{160}\right)^2}{d},$$

где HR - значение твердости по Роквеллу, определенное на приборе; d - диаметр сферы, мм

2.3.6. Поправки к величинам твердости по Роквеллу при измерении по шкалам *A, C, D*

Твердость по Роквеллу	Радиус кривизны *R*, мм								
	3	5	6,5	8	9,5	11	12,5	16	19
20				2,5	2,0	1,5	1,5	1,0	1,0
25			3,0	2,5	2,0	1,5	1,0	1,0	1,0
30			2,5	2,0	1,5	1,5	1,0	1,0	0,5
35		3,0	2,0	1,5	1,5	1,0	1,0	0,5	0,5
40		2,5	2,0	1,5	1,0	1,0	0,5	0,5	0,5
45	3,0	2,0	1,5	1,0	1,0	1,0	0,5	0,5	0,5
50	2,5	2,0	1,5	1,0	1,0	0,5	0,5	0,5	0,5
55	2,0	1,5	1,0	1,0	0,5	0,5	0,5	0,5	0
60	1,5	1,0	1,0	0,5	0,5	0,5	0,5	0	0
65	1,5	1,0	1,0	0,5	0,5	0,5	0,5	0	0
70	1,0	1,0	0,5	0,5	0,5	0,5	0	0	0
75	1,0	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0	0	0
80	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0	0	0	0
85	0,5	0,5	0,5	0	0	0	0	0	0
90	0,5	0	0	0	0	0	0	0	0

Примечание. Поправки более 3 единиц твердости по шкалам *A, C, D* не допускаются.

2.3.7. Поправки к величинам твердости по Роквеллу при измерении по шкалам *B, F, G*

Твердость по Роквеллу	Радиус кривизны, *R*, мм						
	3	5	6,5	8	9,5	11	12,5
20				4,5	4,0	3,5	3,0
30			5,0	4,5	3,5	3,0	2,5
40			4,5	4,0	3,0	2,5	2,5
50			4,0	3,5	3,0	2,5	2,0
60		5,0	3,5	3,0	2,5	2,0	2,0
70		4,0	3,0	2,5	2,0	2,0	1,5
80	5,0	3,5	2,5	2,0	1,5	1,5	1,5
90	4,0	3,0	2,0	1,5	1,5	1,5	1,0
100	3,5	2,5	1,5	1,5	1,0	1,0	0,5

Примечание. Поправки более 5 единиц твердости по шкалам *B, F, G* не допускаются.

2.3.8. Поправки при измерении твердости на сферических поверхностях

Твердость по Роквеллу	Диаметр сферы *d*, мм								
	4	6,5	8	9,5	11	12,5	15	20	25
55 HRC	6,4	3,9	3,2	2,7	2,3	2,0	1,7	1,3	1,0
60 HRC	5,8	3,6	2,9	2,4	2,1	1,8	1,5	1,2	0,9
65 HRC	5,2	3,2	2,6	2,2	1,9	1,7	1,4	1,0	0,9

2.3.7.4. ИСПЫТАНИЯ НА ТВЕРДОСТЬ ПО ВИККЕРСУ

Метод измерения твердости по Виккерсу черных и цветных металлов и сплавов при нагрузках от 9,807 Н (1 кгс) до 980,8 Н (100 кгс) основан на вдавливании алмазного наконечника в форме правильной четырехгранной пирамиды в образец (изделие) под действием нагрузки F, приложенной в течение определенного времени, и измерении диагоналей отпечатка d_1, d_2, оставшихся на поверхности рабочего образца после снятия нагрузки (рис. 2.3.20).

Твердость по Виккерсу (HV) вычисляют по формулам:

$$HV = \frac{0{,}102 \cdot 2F\sin\frac{\alpha}{2}}{d^2} = 0{,}189\frac{F}{d^2},$$

где F - нагрузка, Н;

$$HV = \frac{2F\sin\frac{\alpha}{2}}{d^2} = 1{,}854\frac{F}{d^2},$$

где F - нагрузка, кгс; α - угол между противоположными гранями пирамиды при вершине, равный 136°; d - среднее арифметическое значение длин обеих диагоналей отпечатка после снятия нагрузки, мм.

Для определения твердости по Виккерсу берут среднее арифметическое значение длин обеих диагоналей. Разность диагоналей одного отпечатка не должна превышать 2 % меньшей из них.

Для анизотропных материалов получаемая разность длин двух диагоналей одного отпечатка может не укладываться в указанный допуск. Допуск на эту разность должен быть указан в стандартах или технических условиях на металлопродукцию.

Измерение диагоналей длиной до 0,2 мм включительно должно производиться с погрешностью не более ±0,01 мм и для диагоналей длиной более 0,2 мм - с погрешностью не более ±0,5 %.

Твердость по Виккерсу при условиях испытания F = 294,2 Н (30 кгс) и времени выдержки под нагрузкой 10 - 15 с обозначается цифрами, характеризующими величину твердости и буквами HV. При других условиях испытания после букв HV указывается нагрузка и время выдержки.

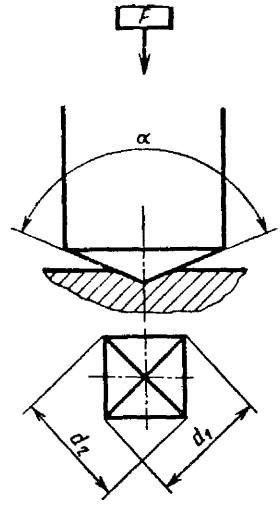


Рис. 2.3.20. Способ измерения твердости по Виккерсу с помощью алмазной пирамиды

Примеры обозначения:

500 HV - твердость по Виккерсу, полученная при нагрузке F = 30 кгс и времени выдержки 10 - 15 с;

220 HV 10/40 - твердость по Виккерсу, полученная при нагрузке 98,07 Н (10 кгс) и времени выдержки 40 с.

Поверхность испытуемого образца должна иметь шероховатость не более 0,16 мкм и быть свободной от окисной пленки и посторонних веществ.

При измерении твердости должна быть обеспечена перпендикулярность приложения действующего усилия к испытуемой поверхности.

При измерении твердости алмазной пирамидой применяются следующие нагрузки Н (кгс): 9,807 (1); 19,61 (2); 24,52 (2,5); 29,42 (3); 49,03 (5); 98,07 (10); 196,1 (20); 294,2 (30); 490,3 (50); 980,7 (100).

Для получения более точного результата измерения твердости нагрузка должна быть возможно больше, причем на обратной стороне образца не должно быть заметно следов деформации.

Для определения твердости черных металлов и сплавов применяют нагрузки от 49,03 Н (5 кгс) до 980,7 Н (100 кгс); для меди и ее сплавов - от 24,52 (2,5 кгс) до 490,3 Н (50 кгс);для алюминиевых сплавов - от 9,807 Н (1 кгс) до 980,7 (100 кгс).

При измерении твердости должны быть соблюдены следующие условия:

плавное возрастание нагрузки до необходимого значения;

поддержание постоянства приложенной нагрузки в течение установленного времени.

Продолжительность выдержки под нагрузкой должна составлять 10 - 15 с.

Расстояние между центром отпечатка и краем образца или краем соседнего отпечатка должно быть не менее 2,5 длины диагонали отпечатка. Минимальная толщина образца должна быть для стальных изделий больше диагонали отпечатка в 1,2 раза; для изделий из цветных металлов - в 1,5 раза.

При неизвестной толщине испытуемого слоя следует произвести несколько измерений при различных нагрузках. Если при этом твердость будет изменяться, то следует уменьшать нагрузки до тех пор, пока при двух смежных нагрузках твердость не будет близка по своим значениям или совпадать.

Испытания проводят при температуре $\left(20^{+15}_{-10}\right)$ °С.

2.3.7.5. ИСПЫТАНИЯ НА ТВЕРДОСТЬ МЕТОДОМ УДАРНОГО ОТПЕЧАТКА

Метод основан на внедрении в поверхности испытуемого объекта твердосплавного конического индентора (для испытания стали с твердостью ≤ HV 850) или стального шара (для испытания стали с твердостью ≤ НВ 350).

Измерение сравнительной твердости стали по Виккерсу, Бринеллю и пластической твердости осуществляется с помощью переносных твердомеров ударного действия при начальной скорости удара от 1 до 5 м/с.

При измерении сравнительной твердости стали по Виккерсу твердосплавный наконечник в форме двустороннего или одностороннего конуса с углами φ = 136° при вершинах внедряют в поверхности испытуемого объекта под действием кратковременной динамической нагрузки $P_д$, создаваемой ударным механизмом. После снятия индентора с испытуемой поверхности измеряют диаметры отпечатков конуса на поверхностях контрольного бруска $d_э$ и испытуемого образца (объекта) d_0 (рис. 2.3.21).

Число сравнительной твердости испытуемого объекта по Виккерсу (HV_c) вычисляют по формуле

$$HV_c = HV_э\left(\frac{d_э}{d_o}\right)^2 \frac{\eta_{к\,э}}{\eta_{к\,o}},$$

где $HV_э$ - среднее значение твердости контрольного бруска по Виккерсу, измеренное посредством статического стационарного прибора; $d_э$ и d_0 - диаметры ударных отпечатков конуса на поверхностях стального контрольного бруска и испытуемого объекта, мм; $\eta_{кэ}$ и $\eta_{ко}$ - динамические коэффициенты твердости материалов стального контрольного бруска и испытуемого объекта при ударном внедрении конуса (со скоростью внедрения 1 - 5 м/с).

При измерении этим методом сравнительной твердости по Бринеллю стальной шарик диаметром D одновременно внедряют в поверхности стального контрольного бруска и испытуемого объекта под действием кратковременной нагрузки $P_д$, создаваемой ударным механизмом.

После снятия индентора с испытуемой поверхности измеряют диаметры отпечатков шарика на поверхностях контрольного бруска и испытуемого объекта или глубины восстановленных отпечатков на поверхностях объекта h_0 и стального контрольного бруска $h_э$ (рис. 2.3.22).

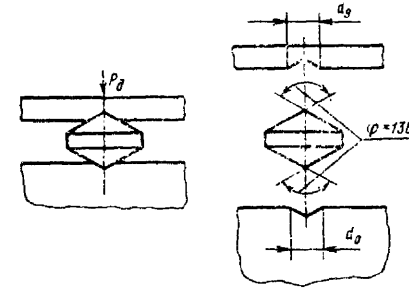


Рис. 2.3.21 Схема измерения твердости по Виккерсу с помощью двустороннего конуса

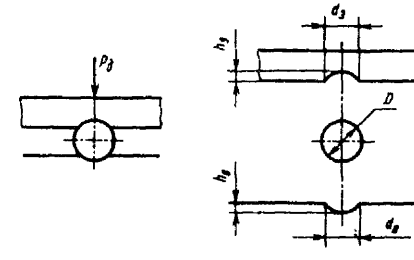


Рис. 2.3.22. Схема измерения твердости методом ударного отпечатка с помощью стального шарика

Число сравнительной твердости испытуемого объекта по Бринеллю ($НВ_с$) вычисляют по формуле

$$НВ_с = НВ_э \frac{D - \sqrt{D^2 - d_э^2}}{D - \sqrt{D^2 - d_о^2}} \frac{\eta_{шэ}}{\eta_{шо}},$$

где $НВ_э$ - среднее значение твердости по Бринеллю стального контрольного бруска, измеренное посредством стационарных статических приборов ТШ или ТК; D - диаметр шарика, мм; $d_э$ и $h_э$ - диаметр и глубина восстановленного ударного отпечатка на поверхности контрольного бруска, мм; $d_о$ и $h_о$ - диаметр и глубина восстановленного ударного отпечатка на поверхности испытуемого образца, мм; $\eta_{шэ}$ и $\eta_{шо}$ - динамические коэффициенты твердости стального контрольного бруска и испытуемого образца (объекта) при ударном внедрении шарика со скоростью 0,72 ÷ 2 м/с.

Диаметры отпечатков измеряют в двух взаимно перпендикулярных направлениях и определяют как среднее арифметическое результатов двух измерений. Разность измерений диаметров одного отпечатка не должна превышать 2 % меньшего из них.

Измерение диаметров ударных отпечатков конического индентора на испытуемой поверхности и поверхности контрольного бруска должно осуществляться с помощью отсчетного оптического микроскопа, погрешность которого не должна превышать ±0,01 мм на одно наименьшее деление шкалы.

Измерение диаметров ударных отпечатков шарика на испытуемой поверхности и поверхности контрольного бруска должно осуществляться с помощью отсчетного оптического микроскопа, погрешность которого не должна превышать ±0,5 мм на одно наименьшее деление шкалы.

Измерение глубины отпечатков шарика на испытуемой поверхности и поверхности контрольного бруска должно осуществляться индикаторным глубиномером с ценой деления 0,01 мм.

Применяемые при измерении сравнительной твердости по Бринеллю и пластической твердости стальные шарики должны соответствовать следующим требованиям:

материал для шариков - термически обработанная сталь с твердостью не менее HV 850;

диаметры шариков 5 и 10 мм;

поверхность шарика не должна иметь пороков, видимых с помощью лупы при 5-кратном увеличении.

Применяемый при измерении сравнительной твердости по Виккерсу двусторонний или односторонний конус из твердого сплава должен иметь образующие углы 136±10° при вершинах и закругленные вершины с радиусом сферы не более 0,2 мм.

Поверхности конусов на протяжении 0,3 мм от вершины, считая по его оси, должны быть тщательно отполированы и свободны от трещин и других пороков, видимых с помощью лупы при 30-кратном увеличении.

Минимальная толщина испытуемого образца должна быть не менее 10-кратной глубины отпечатка.

При испытаниях приборами с шаровым индентором применяют стальные контрольные бруски сечением 10×10 мм любой твердости в интервале $НВ_э$ 120 - 200.

При испытаниях приборами с двусторонним конусом применяются стальные контрольные бруски сечением 4,5×4,5 мм любой твердости в интервале HV 100 - 320.

2.3.7.6. ДРУГИЕ МЕТОДЫ ИСПЫТАНИЙ НА ТВЕРДОСТЬ

Метод измерения твердости металлов и сплавов по Шору. Боек определенной массы с алмазным наконечником свободно и вертикально падает с определенной высоты на испытуемую поверхность. Высота отскока бойка принимается за характеристику твердости и измеряется в условных единицах.

Масса изделия при измерении твердомерами, установленными непосредственно на изделие, должна быть не менее 5 кг. Образцы, устанавливаемые на столик твердомера, должны иметь массу не менее 0,1 кг и толщину не менее 10 мм.

Прибор для измерения твердости должен обеспечивать:

высоту отскока бойка h_1 для 100 единиц твердости по Шору - 13,6 ± 0,3 мм;

высоту падения бойка h_2 - 19,0 ± 0,5 мм;

цену деления индикатора (измерителя высоты отскока бойка) не более 1 единицы шкалы HSP.

Масса бойка с алмазным наконечником должна быть 36 г.

Твердость по Шору указывают с округлением до целой единицы. В шкале Шора за 100 единиц принята максимальная твердость стабилизированного после закалки на мартенсит образца из углеродистой инструментальной стали, что соответствует высоте падения бойка h_2 = 13,6 ± 0,3 мм.

Акустический метод определения твердости образца основан на измерении относительных изменений механического импеданса колебательной системы преобразователя в зависимости от механических свойств поверхности образца.

Акустический преобразователь представляет собой стержень из магнитострикционного материала (например, никеля), на конце которого укреплен индентор в виде алмазной призмы. На стержень надета катушка индуктивности, возбуждающая в преобразователе продольные упругие колебания частотой 30 - 40 кГц. Стержень с индентором прижимают к контролируемому изделию с постоянной силой. При этом индентор внедряется в поверхность изделия тем глубже, чем меньше твердость его материала. Площадь зоны соприкосновения индентора с изделием с уменьшением твердости растет, а модуль упругого сопротивления увеличивается.

Изменение импеданса определяют по изменению собственной частоты нагруженного преобразователя, используемого в качестве колебательной системы автогенератора. Частоту последнего измеряют частотомером. Шкалу индикатора градуируют в единицах твердости по Роквеллу.

В отличие от обычных методов измерения твердости индентор прижимается к изделию с небольшой (4 - 6 Н) силой и внедряется в материал на глубину в несколько микрон, в связи с чем акустический импедансный способ максимально приближается к способу определения микротвердости.

2.3.8. ИСПЫТАНИЯ НА ВИБРАЦИЮ

2.3.8.1. ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ

В зависимости от целей испытания различают испытания на вибропрочность и виброустойчивость. *Испытания изделия на вибропрочность* - это проверка способности изделия противостоять разрушающему влиянию вибрационных воздействий и нормально функционировать после прекращения воздействий. Целью *испытаний изделия на виброустойчивость* является установление способности изделия выполнять свои функции и сохранять свои основные параметры при вибрационных воздействиях в пределах, указанных в нормативных документах на изделие. Испытания, как правило, проводят в лабораторных условиях на специальных установках.

Основные требования к испытаниям различных изделий и средствам испытаний сформулированы в рекомендациях МЭК и государственных стандартах.

В общем виде эти требования можно свести к следующим:

1) возможность проведения испытаний на гармоническую (синусоидальную и полигармоническую), случайную (узкополосную и широкополосную) и смешанную (гармоническую и случайную) вибрацию;

2) обеспечение воспроизводимости результатов испытаний, исключающей неоднозначность заключения;

3) возможность учета особенностей характеристик испытуемого изделия и способов его крепления;

4) простота и удобство в управлении заданным испытательным режимом; возможность ручного и автоматического управления;

5) обеспечение воспроизведения и измерения параметров вибрации в диапазоне частот 0 - 10 кГц, ускорений до 1000 м/с^2, перемещений от 0,1 мкм до 1 м, спектральной плотности ускорения до 1,0 g^2/Гц;

6) обеспечение точности измерения частоты < 50 Гц ± (1 - 2) Гц и > 50 Гц ± (2 - 3)%; перемещения ± (10 - 20) %; ускорения ± (10 - 20) %; спектральной плотности ускорения - ± (1,5 - 3,0) дБ;

7) обеспечение точности (0,5 - 2 дБ) поддержания ускорения (перемещения) постоянным при динамическом диапазоне регулирования 10 - 60 дБ.

Используют **три вида испытаний** изделий на воздействие вибрации: *стендовые, полунатурные* и *натурные.*

Стендовые или лабораторные вибрационные испытания осуществляют на вибростендах, которые приближенно воспроизводят реальные динамические нагрузки, действующие на изделия. При таких испытаниях проверяют качество изготовления и долговечность изделия.

Стендовые испытания должны проводиться при динамических нагрузках, соответствующих реальным условиям эксплуатации изделия. Если таких нет, то при стендовых испытаниях принимают ориентировочные, несколько повышенные нормы нагрузок, которые определят по прототипам, исходя из условий эксплуатации изделия.

Например, радиоэлектронное изделие, которое должно эксплуатироваться при вибрационных нагрузках, должно выдерживать воздействие вибрации с амплитудой ускорений до 200 м/с^2 в диапазоне частот 5 - 5000 Гц.

Порядок проведения лабораторных вибрационных испытаний следующий: сначала определяют резонансы в заданном диапазоне частот и испытывают на вибропрочность на фиксированных частотах (контрольные испытания), затем изделие испытывают на вибропрочность в диапазоне частот и затем на виброустойчивость.

После конструктивной доработки изделие вновь подвергают вибрационным испытаниям. При определении резонансных частот изделие подвергают воздействию гармонической вибрации при пониженных ускорениях, как правило, не превышающих 20 м/с^2 в диапазоне частот 10 - 150 Гц. Резонансные частоты регистрируют и строят спектральный график. Затем назначают одну или несколько нерезонансных частот, при которых проводят контрольные испытания изделия на воздействие ускорения при различной длительности испытания.

Испытания на одной частоте предусматривают выявление производственных дефектов изготовления изделия, поэтому при контрольных испытаниях его не следует испытывать на резонансной частоте. Если испытания проводились на резонансной частоте, то в случае обнаружения какого-либо дефекта трудно установить причину разрушения, так как при длительных испытаниях разрушение может быть вызвано действием резонансных эффектов, а не дефектом изготовления изделия. Поэтому испытания рекомендуется начинать с определения резонансных частот при пониженных воздействующих ускорениях гармонической вибрации.

При испытаниях на вибропрочность в диапазоне частот изделие подвергается воздействию гармонической вибрации с плавной разверткой частоты, а также широкополосной, узкополосной или смешанной вибрации.

Общее время испытаний разделяют на равные промежутки, в течение которых осуществляют испытания на каждой выбранной частоте. Во время испытаний на виброустойчивость в диапазоне частот изделие и его отдельные элементы периодически проверяют на отсутствие механических повреждений.

Испытания на виброустойчивость проводят при включенном изделии подключенными измерительными приборами, с помощью которых контролируют работоспособность и измеряют параметры изделия при воздействии на него вибрации.

Наиболее адекватными являются натурные испытания изделия, однако их организация наиболее сложна и дорогостоящa.

Из-за сложности возмущающих колебаний возникают также трудности анализа вибрации и выявления причин, вызывающих поломки и нарушения в работе изделия.

Применяют также полунатурные испытания, используя магнитофонные записи натурных испытаний на объекте, а также данные, переданные по каналам телеметрии, для дальнейшего воспроизведения этих условий при стендовых испытаниях.

2.3.8.2. МЕТОДЫ ВИБРАЦИОННЫХ ИСПЫТАНИЙ

Основными методами виброиспытаний являются методы фиксированной и качающейся частоты, полигармонического возбуждения, узкополосного и широкополосного случайного возбуждения, смешанной вибрации (синусоидальной и случайной), многокомпонентной вибрации и многоканального возбуждения вибрации.

Методы испытаний на воздействие гармонической вибрации

Метод фиксированных частот позволяет выявить резонансы изделия, механические дефекты и ухудшение заданных характеристик на стадии разработки и выпуска изделия.

Сущность метода заключается в последовательном воздействии механических колебаний определенной частоты и амплитуды на испытуемое изделие в требуемом диапазоне частот. Частоту и амплитуду регулируют вручную. Испытание выполняют в три этапа:

1) первоначально выявляют резонансы изделия;

2) испытывают его на вибропрочность;

3) окончательно выявляют резонансы.

Перед началом и в конце испытаний проверяют основные параметры изделия. При определении резонансных частот плавно изменяют частоту вибрации от низшего значения до высшего и обратно с заданной амплитудой. При этом регистрируют механические резонансы и нестабильность технических характеристик изделия, т.е. проверяют виброустойчивость.

Испытания на вибропрочность проводят на выявленных резонансных частотах или на конкретных частотах (если не удалось определить резонансные частоты) с заданными амплитудой колебаний и продолжительностью. После испытаний на вибропрочность проверяют рабочие характеристики изделия и проводят испытания, аналогичные испытаниям, проводимым по первому этапу. Результаты проверки по первому и третьему этапам сравнивают.

Метод имеет ряд существенных недостатков, основными из которых являются следующие:

1) сложность контроля амплитуды и частоты колебаний и их регулировки вручную из-за значительной неравномерности амплитудно-частотной характеристики тракта виброиспытательной системы с изделием при испытаниях в широком диапазоне частот;

2) невозможность выявления неявных резонансов изделия, в результате чего изделие может быть недоиспытано при испытании на вибропрочность;

3) возбуждение различных резонансов в изделии происходит последовательно, а не одновременно, как в реальных условиях;

4) допущение ошибки от неэквивалентности реакции изделия на синусоидальную и случайную вибрацию.

Метод качающей частоты или метод плавной развертки частоты является более совершенным методом вибрационных испытаний. Он позволяет автоматизировать процедуру испытаний и проводить их на всех частотах в заданном диапазоне частот.

Сущность этого метода заключается в циклическом прохождении заданного диапазона частот от нижней частоты до верхней и обратно при постоянстве заданных параметров вибрации в течении определенного времени.

Испытания методом качающейся частоты обычно проводят при замкнутой системе управления и постоянном уровне ускорения, скорости или перемещения рабочего стола вибратора. При этом иногда такие испытания сначала проводят при постоянном уровне перемещения на низких частотах, а затем при постоянном уровне ускорения на более высоких частотах. Частота перехода от режима вибрации при постоянном перемещении к режиму вибрации при постоянном ускорении зависит от условий эксплуатации изделия и обычно находится в диапазоне 10 - 500 Гц.

Метод управления режимом испытаний с компенсацией влияния импеданса. При испытании изделий методом качающейся частоты не учитывают влияния механических импедансов испытуемого изделия и подвижной части вибратора. При этом предполагают, что импеданс изделия нулевой или импеданс основания бесконечно большой, поэтому испытуемое изделие не оказывает никакого влияния на источник возбуждения. В действительности при эксплуатации изделия и его испытании в лабораторных условиях импедансы имеют конечные значения.

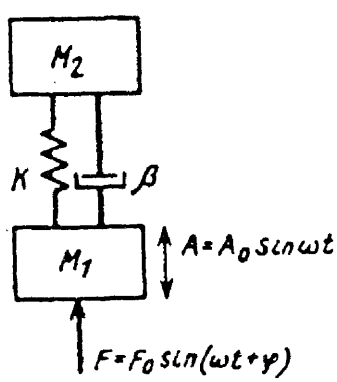


Рис. 2.3.23. Схема испытания двухмассовой системы

С целью приближения условий испытаний к реальным и учета взаимного влияния импедансов заданным режимом испытания управляют не по ускорению (скорости, перемещению), а по ускорению и силе. В качестве примера рассмотрим модель испытания изделия, представляющего собой двухмассовую систему (рис. 2.3.23. Здесь M_1 - масса подвижной части возбудителя; M_2 - масса изделия; k - жесткость соединения масс; β - коэффициент демпфирования).

Пусть $M_1 = M_2$; критический коэффициент относительного демпфирования $\beta/\beta_{кр} = 0{,}05$; добротность системы $Q = 10$; вынуждающая сила

$$F = F_0 \sin(\omega t + \varphi)$$

приложена к массе M_1.

Для этой системы на рис. 2.3.24 приведены кривые зависимостей импеданса Z и кажущегося веса W ($W_1 + W_2$ - действительный вес системы) от частоты.

На рис. 2.3.25, *а* изображены амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) для масс M_1 и M_2 при постоянном входном ускорении

$$a = A_0 \sin \omega t,$$

приложенном к массе M_1; на рис. 2.3.25, *б* дана зависимость силы F_0 от частоты, необходимой для возбуждения постоянной амплитуды ускорения массы M_1. На рис. 2.3.26, *а* и *б* приведены АЧХ для масс M_1 и M_2 при постоянном входном усилии F_0. Здесь

$$f_1 = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{k}{M_2}};$$

$$f_2 = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{k(M_1 + M_2)}{M_1 M_2}}.$$

Импеданс Z и кажущийся вес W имеют пик на частоте f_1 и провал на частоте f_2. В соответствии с этим при управлении по входному ускорению $(a = \text{const})$ для поддержания постоянного ускорения массы M_1 (основания) необходимо приложить в 10 раз ($Q = 10$) большие усилия на частоте f_1, что приведет к пропорциональному увеличению ускорения массы M_2 и, следовательно, к переиспытанию изделия. При управлении по усилию $(F_0 = \text{const})$ на частоте f_1 ускорение массы M_1 небольшое (антирезонанс) - недоиспытание, а на частоте f_2 ускорение масс M_1 и M_2 - большое (переиспытание).

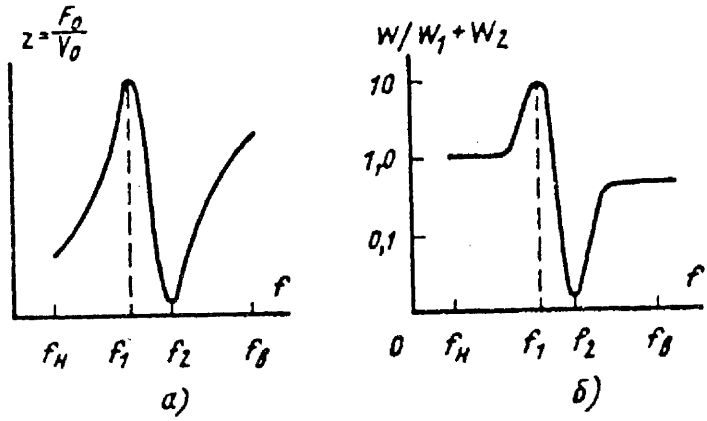


Рис. 2.3.24. Частотные зависимости импеданса (*а*) и кажущегося веса (*б*) двухмассовой системы от частоты

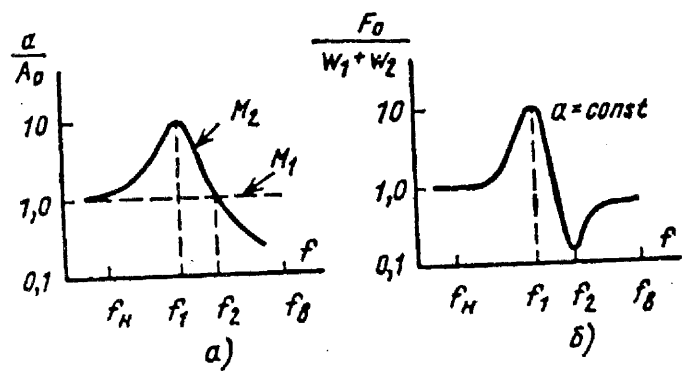


Рис. 2.3.25. Частотные характеристики двухмассовой системы при постоянном входном ускорении

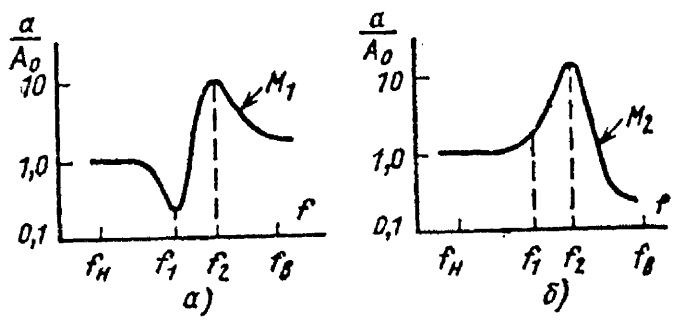


Рис. 2.3.26. Частотные характеристики двухмассовой системы при постоянном входном усилии

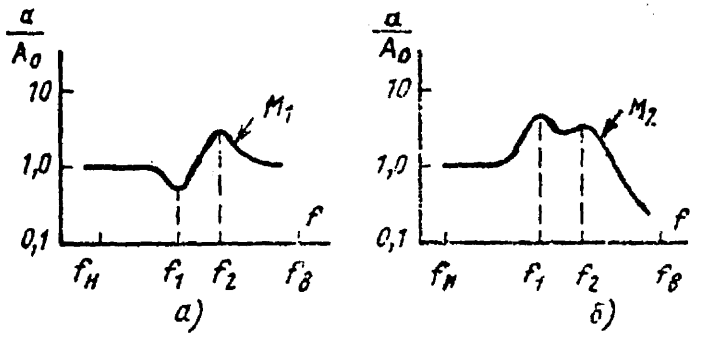


Рис. 2.3.27. Зависимости ускорения масс двухмассовой системы от частоты при постоянном произведении ускорения на силу

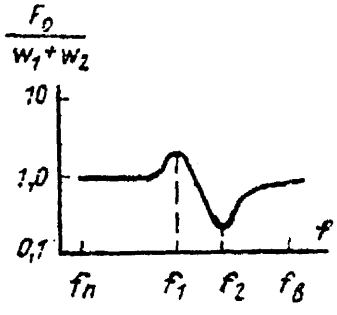


Рис. 2.3.28. Зависимость требуемой силы от частоты при постоянном произведении ускорения на силу

Одним из компромиссных решений является управление сигналом, пропорциональным произведению ускорения на силу $(F_0 A_0 = \text{const})$, существенно уменьшающим эффект взаимного влияния импедансов. На рис. 2.3.27, *а, б* и рис. 2.3.28 приведены АЧХ по ускорению для масс M_1 и M_2 и зависимость силы от частоты при управлении по произведению ускорения на силу. АЧХ ускорения массы M_1 имеет вид, аналогичный кривой при управлении по усилию, но с выравненным провалом при f_1 и уменьшенным пиком при f_2. Ускорение массы M_2 имеет два пика при f_1 и f_2, но высота их значительно меньше, чем при управлении по ускорению или силе. Сила, действующая на массу M_1, имеет характеристику, близкую к той, которая получается при управлении по ускорению, однако пик при f_1 снижается, а провал при f_2 выравнивается. Преимущество описанного метода управления - его нечувствительность к изменению фазовых сдвигов.

Метод виброиспытаний на полигармоническую вибрацию является дальнейшим развитием метода испытаний на синусоидальную вибрацию. При этом предусматривается воспроизведение сложногармонических вибрационных воздействий, наиболее часто встречающихся в условиях эксплуатации объектов. Метод основан на том, что все периодические сложногармонические процессы раскладываются в ряд Фурье. Такой процесс можно воспроизвести, задаваясь значениями амплитуд, частот и фазовых сдвигов синусоидальных составляющих. Метод достаточно прост и отличается от метода испытаний на синусоидальную вибрацию в основном числом задающих генераторов синусоидальных сигналов и необходимостью регулировки фазовых сдвигов между этими сигналами. Метод является переходным этапом между испытаниями на синусоидальную и случайную вибрацию. Однако во многих случаях (турбомашины, насосы, генераторы и т.д.) реальная вибрация имеет детерминированный периодический характер. При этом испытания проводят методом полигармонической вибрации.

Методы испытаний на воздействие случайной вибрации. В большинстве случаев реальные вибрационные процессы имеют случайный характер. Спектры реальной вибрации непрерывны, мгновенные значения амплитуд спектральных составляющих могут быть описаны только статистически.

Метод испытаний на воздействие случайной широкополосной вибрации. При случайной широкополосной вибрации все резонансные частоты испытуемого изделия возбуждаются одновременно. Это позволяет выявить их взаимное влияние, что невозможно при других видах испытаний.

В контрольной точке изделия создают широкополосную случайную вибрацию, числовые характеристики которой должны быть близки к заданным программой испытаний. Эти характеристики определяют по результатам обработки ограниченного числа реализаций случайного процесса, полученных при экспериментальном исследовании условий эксплуатации изделий.

При испытаниях изделия на вибростенде в лаборатории воспроизводят одну из реализаций случайного процесса или числовые характеристики, полученные в результате статистической обработки этих реализаций. За критерий подобия обычно принимают спектральную плотность мощности или дисперсию вибрационных ускорений в заданной полосе частот, так как эти величины характеризуют реакцию изделия.

Для испытаний этим методом требуется относительно сложное и дорогостоящее оборудование.

Метод испытаний на воздействие случайной узкополосной вибрации основан на принципе замены широкополосного случайного возбуждения с низким уровнем спектральной плотности ускорений более интенсивным узкополосным возбуждением с медленной перестройкой одного полосового фильтра по частоте.

Системы, воспроизводящие узкополосную случайную вибрацию, менее дороги и позволяют имитировать широкополосную вибрацию.

Критерием замены испытаний на широкополосную случайную вибрацию испытаниями на узкополосную с переменной средней частотой (сканирование узкополосного сигнала по частоте) является идентичность распределения пиковых ускорений и напряжений на изделии.

Установлено, что идентичность в распределении ускорений и напряжений можно получить, если средняя частота сканирующего узкополосного сигнала изменяется по логарифмическому закону и среднеквадратичное значение ускорения узкополосного спектра возрастает как корень квадратный из частоты. При постоянной полосе сканирования шумового сигнала это увеличение будет соответствовать 3 дБ/окт. В этом случае необходимо поддерживать постоянным закон изменения первоначального заданного уровня ускорения от частоты. Контролировать и поддерживать постоянным закон изменения ускорения на вибростоле неудобно и трудно. Для удобства вводят параметр - градиент ускорения $a_{\text{г рад}}$, который определяют как частное от деления ускорения, вызванного узкополосным спектром возбуждения, на корень квадратный из частоты в радианах:

$$a_{\text{г рад}} = a/\sqrt{\omega}\,.$$

Заданный режим контролируют по градиенту ускорения, а не по спектральной плотности ускорения, при этом градиент ускорения $a_{\text{г рад}}$ поддерживают постоянным.

Наиболее важное преимущество этого метода по сравнению с методом испытаний на широкополосную случайную вибрацию - в возможности снижения уровня возбуждения приблизительно в 3 раза. Другое важное преимущество при переменной средней частоте состоит в значительно более низкой стоимости приборов контроля и системы усиления сигнала до требуемого уровня возбуждения вибраций.

Третье преимущество - возможность быстрого установления и измерения полосы частот, в которой возможны повреждения объекта, поскольку при возбуждении узкополосным спектром с переменной частотой резонансные состояния объекта возбуждаются последовательно.

Основной недостаток испытания при возбуждении узкополосным спектром состоит в медленном изменении средней частоты спектра, что приводит к возбуждению последовательных резонансов испытуемого изделия, тогда как в случае возбуждения широкополосным спектром эти резонансы возбуждаются одновременно.

2.3.8.3. ВИБРОИСПЫТАТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ

Виброиспытательные системы, действие которых основано на использовании рассмотренных методов испытаний, представляют собой сложные комплексы, включающие подсистемы задания, воспроизведения, управления и измерения, анализа и регистрации параметров вибрации.

Основным звеном испытательных систем является вибратор - исполнительный элемент, предназначенный для воспроизведения заданных колебаний. В зависимости от принципа действия вибратора в системе используют различные способы задания испытательного режима. Самое широкое распространение получили электродинамические, электрогидравлические и механические вибраторы. Первые два типа вибраторов применяют в вибрационных системах, реализующих все современные методы испытаний. В этом случае в качестве задающего устройства используют генераторы электрических сигналов.

Электродинамические вибраторы позволяют создавать колебания более высокочастотные (5 - 10000 Гц), чем электрогидравлические (0 - 1000 Гц). Механические вибраторы применяют в системах, предназначенных для испытания методом фиксированных частот.

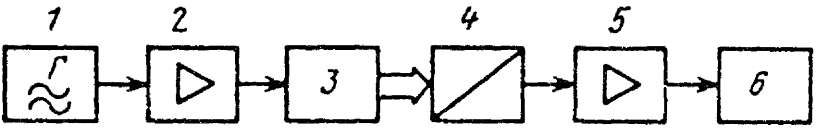


Рис. 2.3.29. Структурная схема системы для испытаний методом фиксированных частот с электродинамическим возбуждением

Основным недостатком всех типов вибраторов является зависимость их передаточной функции от частоты и нагрузки, что существенно усложняет задачу воспроизведения заданных параметров вибрации при испытаниях в широком диапазоне частот. Поэтому для реализации любого метода испытаний требуются специальные способы компенсации изменений передаточной функции при изменении частоты и нагрузок.

Системы для испытаний на гармонические воздействия

Системы для испытаний методом фиксированных частот. Структурная схема виброиспытательной системы для проведения испытаний на фиксированных режимах гармонической вибрации для электродинамического принципа возбуждения приведена на рис. 2.3.29. Она содержит задающий генератор *1*, синусоидальное напряжение определенной частоты и амплитуды с которого подается на усилитель мощности *2* и подвижную катушку вибратора *3*, в котором электрические колебания преобразуются в механические. С помощью измерительного преобразователя *4*, согласующего усилителя *5* и вторичного прибора *6* контролируют заданный уровень колебаний. При переходе с одной частоты на другую уровень колебаний устанавливается регулировкой напряжения задающего генератора.

Генератор работает в широком диапазоне частот (5 - 10000 Гц и более).

Мощность усилителей, применяемых в виброиспытательных системах, необходимая для создания тяговых усилий вибратора от десятков до сотен тысяч ньютон, находится в диапазоне от десятков ватт до сотен киловатт. Нагрузкой усилителей является комплексное сопротивление подвижной катушки вибратора, которое, как правило, низкоомное и существенно зависит от частоты.

Основные требования, которые предъявляют к усилителям мощности:

нелинейные искажения < 3 - 5 %;

возможность непрерывной работы в течение 8 ч;

динамический диапазон порядка 60 дБ и малый уровень шумов (отношение сигнала к шуму ≥ 50 Дб).

Исполнительным элементом служат электродинамические вибраторы, создающие выталкивающую силу до сотен тысяч ньютон при грузоподъемности до сотен килограммов в диапазоне частот от единиц герц до десятков килогерц и амплитуд колебаний ≥ 1000 м/с^2.

В виброиспытательных системах, действие которых основано на гидравлическом принципе возбуждения колебаний, могут быть использованы два способа формирования колебаний: электрический и механический. Механический способ генерирования заданных колебаний наиболее простой. Он позволяет создавать только гармонические колебания. В качестве возбудителей колебаний, как правило, используют гидропульсаторы.

Виброиспытательные системы с гидропульсаторами позволяют создавать знакопеременные усилия < 10^6 Н при амплитуде колебаний < 25 мм в диапазоне частот < 100 Гц.

Гидравлические виброиспытательные системы целесообразно использовать для испытания большегрузных конструкций, выявления резонансов больших объектов испытаний при больших амплитудах перемещения или высоких выталкивающих усилиях, имитации условий транспортирования, при большой амплитуде и низкой частоте колебаний.

Особенности гидравлических систем обусловливаются в основном электрогидравлическим вибратором.

Системы для испытаний изделий методом качающейся частоты. На рис. 2.3.30 дана типовая структурная схема системы испытаний методом качающейся частоты, которая отличается от схемы, приведенной на рис. 2.3.29 тем, что в ней имеется устройство для автоматического прохождения частотного диапазона и автоматического регулирования уровня (АРУ) заданных параметров вибрации. Оно является неотъемлемой частью вибрационной системы, предназначенной для испытания методом качающейся частоты. Все электродинамические и некоторые электрогидравлические системы комплектуются такими устройствами.

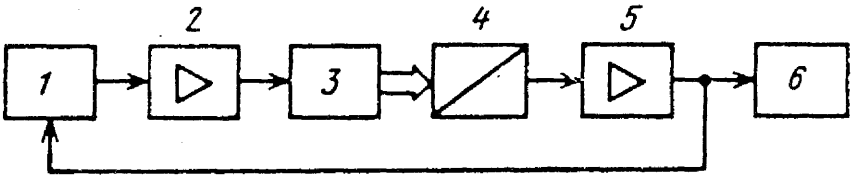


Рис. 2.3.30. Структурная схема системы для испытаний на гармоническую вибрацию методом качающейся частоты

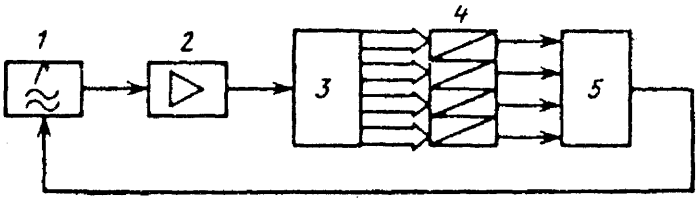


Рис. 2.3.31. Структурная схема системы для испытаний методом качающейся частоты с использованием селектора:
1 - управляющий генератор; *2* - усилитель мощности; *3* - вибратор; *4* - вибропреобразователь; *5* - селектор

Виброиспытательные системы, реализующие метод качающейся частоты, являются замкнутыми системами и содержат задающий блок *1*, в который входят генератор, блок качания частоты и автоматический регулятор уровня (АРУ), усилитель мощности *2*, вибратор *3*, преобразователь *4*, согласующий усилитель *5* и виброизмерительный прибор *6*.

Вибрационные испытания при постоянной скорости сканирования имеют следующие недостатки:

большое время проведения эксперимента;

опасность повреждения изделия при малой скорости;

большие погрешности в определении частотных характеристик при большой скорости сканирования.

В связи с этим известны системы, скорость сканирования которых зависит от амплитудно-частотной характеристики: при подходе к резонансу она уменьшается, при удалении от него увеличивается.

Часто требуется в определенной части рабочего диапазона сохранять постоянным заданное перемещение, а в другой его части - скорость или ускорение. При гармоническом колебании эти параметры связаны определенной зависимостью: скорость является первой производной от перемещения по времени, ускорение - второй, резкость - третьей производной. Поэтому при использовании в управляющей цепи виброизмерительного преобразователя ускорения для получения сигнала, пропорционального скорости необходимо провести однократное интегрирование; для сигнала, пропорционального перемещению, - двукратное; для получения сигнала, пропорционального резкости, - однократное дифференцирование. В качестве интегрирующих и дифференцирующих цепей в автоматических устройствах обычно используют пассивные *RC*-цепи (в последнее время и активные фильтры).

Системы с селекторами. При испытаниях методом качающейся частоты управление заданным режимом испытаний производится по информации, полученной в одной (контрольной) точке крепления изделия к столу вибратора. Амплитуды колебаний в других точках крепления изделия могут существенно отличаться от заданной амплитуды колебаний. Это может привести к значительному снижению достоверности результатов испытаний. Изделие в этом случае может быть недоиспытано или переиспытано.

С целью повышения достоверности результатов испытаний в виброиспытательных системах рекомендуется использовать специальные устройства - селекторы (иногда их называют усреднителями). Они позволяют управлять режимом испытаний по информации, полученной в результате одновременного измерения параметров режима испытаний в нескольких точках крепления изделия. В системе используют несколько преобразователей *4*, сигналы с которых через согласующие усилители поступают на селектор *5*, формирующий сигнал управления (рис. 2.3.31).

Существует много способов формирования сигнала управления с помощью селектора. Они диктуются требованиями к вибрационным испытаниям конкретного изделия. Среди основных способов можно назвать следующие:

способы максимального, минимального и среднего уровней;

векторного усреднения мгновенных пиковых значений сигналов;

усреднения абсолютных мгновенных пиковых средних или среднеквадратичных значений сигналов;

векторного усреднения мгновенных пиковых значений ускорений трехкомпонентного виброизмерительного преобразователя;

усреднения сигналов, полученных с нескольких трехкомпонентных преобразователей.

Для реализации способа максимального уровня необходимо, чтобы селектор автоматически одновременно сравнивал сигналы, поступающие от всех преобразователей, и выбирал наибольший из них. Далее этот сигнал поступает на схему управления.

Широкое распространение получил метод усреднения средних значений сигналов. Он заключается в определении среднего значения для каждого сигнала, суммировании их и делении полученной суммы на число контролируемых точек.

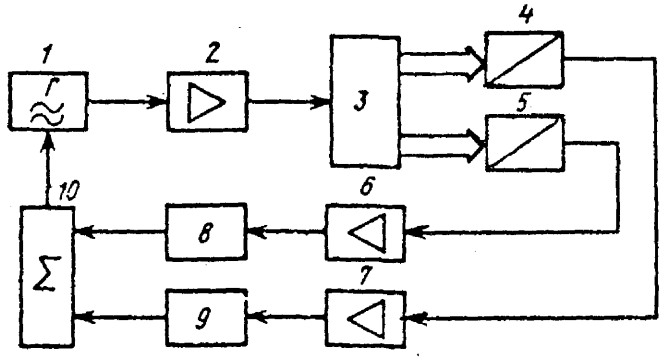


Рис. 2.3.32. Структурная схема системы для испытаний методом качающейся частоты с компенсацией механического импеданса:
1 - управляющий генератор; *2* - усилитель мощности; *3* - вибратор с изделием; *4* - преобразователь ускорения; *5* - преобразователь силы; *6, 7* - согласующие усилители; *8, 9* - логарифмические преобразователи; *10* - сумматор

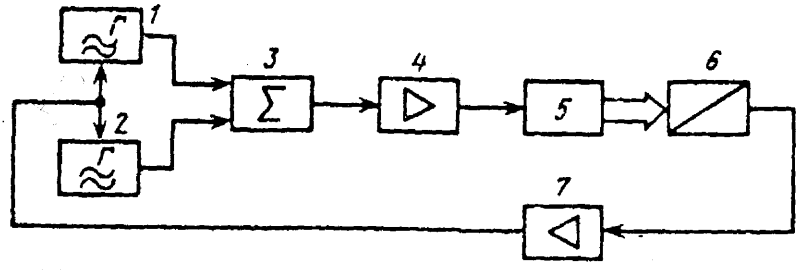


Рис. 2.3.33. Структурная схема системы для испытаний на полигармоническую вибрацию методом качающейся частоты:
1, 2 - управляющие генераторы; *3* - сумматор; *4* - усилитель мощности; *5* - вибратор; *6* - вибропреобразователь; *7* - согласующий усилитель

Системы с управлением режимом испытаний при компенсации влияния импеданса. Способ компенсации основан на управлении заданным режимом испытаний сигналом, пропорциональным произведению силы и ускорения. Для его реализации в состав обычной виброиспытательной системы, предназначенной для испытаний методом качающейся частоты, необходимо дополнительно ввести преобразователь силы *5*, два логарифмических преобразователя *8, 9* и операционный усилитель *10*, производящий суммирование логарифмов ускорения и силы (рис. 2.3.32).

Системы испытаний на полигармоническую вибрацию. Для виброиспытаний изделий на полигармоническую вибрацию используют в основном системы с электродинамическим принципом возбуждения. Для получения сложного полигармонического сигнала применяют несколько стандартных задающих генераторов. Напряжения соответствующих частот с генераторов непосредственно поступают на вход усилителя обычного вибростенда. Структурная схема такой системы приведена на рис. 2.3.33.

Суммарный сигнал в подобных системах получается нестационарным по форме из-за непрерывного изменения сдвига фаз между составляющими. Этот недостаток можно исключить, если задающий генератор, используемый в вибрационной системе, предназначенной для испытаний на синусоидальные вибрации, заменить генератором сложных напряжений, позволяющим получать сумму гармоник с 1-й по 6-ю с регулируемыми амплитудами и фазами каждой гармоники. При наличии в вибрационной системе генератора сложных напряжений испытания можно проводить при строго синусоидальном сигнале на выходе вибратора, так как появляется возможность компенсации нелинейных искажений.

Система для испытаний на случайную вибрацию

Системы для испытаний на широкополостную случайную вибрацию. Передаточная функция механической системы вибратор-изделие изменяется с изменением частоты вибрации и свойств изделия.

Для компенсации неравномерности АЧХ вибратора требуются корректирующие устройства, частотная характеристика которых обратна частотной характеристике вибратора с установленным на его столе изделием. Для компенсации резонансов системы вибратор-изделие необходимы аналогичные корректирующие устройства с частотной характеристикой, обратной частотной характеристике системы вибратор-изделие. Поэтому в виброиспытательных системах с целью компенсации резонансов (пиков), антирезонансов (провалов), кроме устройств, задающих, воспроизводящих и анализирующих режим испытаний, вводят специальные устройства - выравниватели.

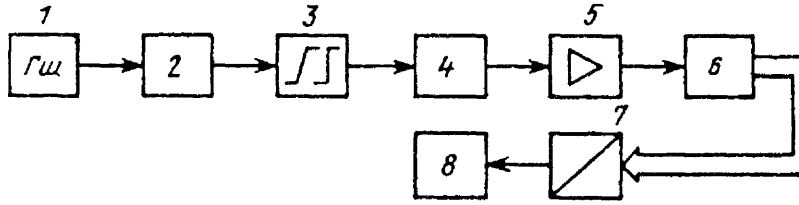


Рис. 2.3.34. Структурная схема системы для испытаний на широкополосную случайную вибрацию с перестраиваемыми фильтрами:
1 - генератор шума; *2* - программатор спектральной плотности ускорения; *3* - выравниватель; *4* - стабилизатор уровня возбуждения; *5* - усилитель мощности; *6* - вибратор с изделием; *7* - вибропреобразователь; *8* - анализатор спектра

Выравниватели АЧХ с перестраиваемыми фильтрами. На рис. 2.3.34 приведена структурная схема системы с перестраиваемыми фильтрами. В таких системах каждый из компенсаторов выравнивателя *3* представляет собой устройство, содержащее перестраиваемые фильтры с переменной добротностью и элементы аналоговой вычислительной техники, реализующие обратные математические зависимости. Фильтры позволяют создавать пики и провалы в частотной характеристике. Настроив их на пики и провалы в частотной характеристике механической системы, снятой вручную или с помощью записывающего устройства, и введя определенное затухание в каждый фильтр, можно добиться полного выравнивания частотной характеристики системы вибратор-изделие.

Такой метод коррекции частотной характеристики эффективен, и с его помощью можно получить хорошее выравнивание (с точностью до ± 3 дБ). Однако он не получил широкого распространения в связи с существенными недостатками. К ним следует отнести:

необходимость снятия АЧХ системы перед проведением испытаний;

сложность настройки, особенно при наличии значительного числа резонансов;

невозможность формирования спектра случайного вибрационного процесса, отличающегося от плоского;

необходимость перестройки выравнивателя при изменении резонансных частот объекта в процессе испытаний.

Ручные выравниватели АЧХ с гребенчатыми фильтрами. Коррекцию частотной характеристики механической системы вибратор-изделие и формирование заданной спектральной плотности ускорения удобно проводить путем разделения спектра входного сигнала на большое число узких частотных полос с помощью набора узкополосных фильтров, включенных параллельно, или так называемых гребенчатых фильтров. Широкополосный выравниватель с гребенчатыми фильтрами разбивает спектр случайного сигнала, поступающего с генератора шума, на n смежных полос с регулируемым затуханием в каждой полосе.

В виброиспытательных системах с автоматическим управлением широкополосной случайной вибрацией используют принцип разделения спектра входного сигнала на ряд узких

частотных полос с помощью гребенчатых фильтров, как и при ручном управлении. Однако в состав систем с автоматическим управлением дополнительно включают устройства автоматической регулировки уровня (АРУ) в каждой полосе частот.

Основная задача, которая ставится при проектировании устройств управления широкополосными случайными вибрациями, состоит в том, чтобы сформировать на входе управляемого объекта (вибратор с изделием) такой спектр, который бы на выходе объекта отличался от заданного не больше чем на допустимую суммарную ошибку:

$$\varepsilon_{\Sigma} \geq \frac{\left|G_y(f) - G_x(f)\right|}{G_x(f)},$$

где $G_y(f)$ - спектральная плотность на выходе объекта управления; $G_x(f)$ - заданная спектральная плотность.

Суммарная допустимая ошибка ε_{Σ} включает погрешности аппроксимации и анализа, статистическую и аппаратурную погрешности.

Погрешность аппроксимации $\varepsilon_{\text{аппр}}$ обусловлена способом формирования функции спектральной плотности с помощью генератора шума и набора полосовых фильтров. Она характеризует модуль отклонения функции спектральной плотности на выходе блока формирования от приведенной функции задания $G_{x1}(f)$ (спектральная плотность на входе объекта управления) и является убывающей функцией числа формирующих фильтров:

$$G_{x1}(f) = \frac{G_x(f)}{\left|\Phi_0(jf)\right|^2},$$

где $\Phi_0(jf)$ - передаточная функция объекта управления.

Погрешность аппроксимации для i-го канала выражается соотношением

$$\varepsilon_{\text{аппр}} = \frac{\Delta f^2}{24}\ddot{G}_x(f),$$

где Δf - ширина полосы пропускания узкополосного фильтра; $\ddot{G}_x(f)$ - вторая производная спектральной плотности (мера гладкости спектра).

На погрешность аппроксимации существенно влияет шаг дискретизации спектра и форма АЧХ узкополосного фильтра. При идеальном фильтре с прямоугольной АЧХ заданная спектральная плотность аппроксимируется ступенчатой линией с шагом Δ. Наилучшим отношением шага Δ к полосе пропускания Δf является отношение, лежащее в интервале

$$0{,}5 \leq \frac{\Delta}{\Delta f} \leq 0{,}7.$$

Погрешность анализа $\varepsilon_{\text{ан}}$ связана с конечной избирательностью анализирующих фильтров, поэтому обычно измеряют не дисперсию на определенной частоте f, а среднюю дисперсию в полосе пропускания фильтра. Она уменьшается с увеличением избирательности анализирующих фильтров, т.е. также является убывающей функцией числа каналов управления.

Статистическая погрешность $\varepsilon_{\text{стат}}$ обусловлена тем, что длительность усреднения сигналов на выходе детекторов блока анализа является конечной величиной, т.е. продолжительностью измерения дисперсии на выходе узкополосных фильтров. Для i-го канала статистическая погрешность

$$\varepsilon_{\text{стат}} \approx \frac{1}{\sqrt{\Delta f_i T_i}},$$

где T_i - время анализа. Она возникает при уменьшении полосы пропускания фильтра, т.е. является возрастающей функцией числа каналов управления.

Аппаратурная погрешность $\varepsilon_{\text{ап}}$ обусловлена погрешностью преобразователей системы управления (виброизмерительного преобразования, погрешности выполнения математических операций, обработки сигнала рассогласования и т.д.) и не зависит от числа каналов.

Системы для испытания изделий на узкополосную случайную вибрацию. Виброиспытательные системы, предназначенные для воспроизведения широкополосной случайной вибрации, позволяют имитировать механические воздействия, наиболее близкие к реальным. Аппаратура управления такими системами сложна и дорогостояща, поэтому ее используют в крупных испытательных центрах. В заводских условиях применяют аппаратуру, позволяющую в основном имитировать широкополосную случайную вибрацию. Для этой цели используют виброиспытательные системы, осуществляющие испытания изделий на узкополосную случайную вибрацию со сканированием сигнала по частоте. Обычно ее строят по такому же принципу, как и системы для испытания методом качающейся частоты. Однако вместо генератора качающейся частоты синусоидального сигнала используют специальный генератор узкополосного шума со сканированием средней частоты и в систему АРУ дополнительно вводят функциональный блок, увеличивающий уровень шумового сигнала в зависимости от частоты на 3 дБ/окт.

Системы для испытаний на смешанную вибрацию

Многоканальные виброиспытательные системы. Если деформация неоднотипная и конструкция имеет достаточно разнесенные частоты и пренебрежимо малую связь между деформациями, один вибратор не обеспечивает достоверных результатов. Анализ значительно усложняется, если конструкция имеет близко расположенные собственные частоты и (или) жесткосвязанные деформации.

В таких случаях механическую многоступенную систему сводят к одностепенной путем подбора такого вектора обобщенных сил возбуждения, при котором траектории движения точек конструкции имеют синусоидальный характер (чистый тон). С помощью дополнительных возбуждающих сил исключают все мешающие колебания и для этого тона определяют собственную частоту, демпфирование, обобщенную массу (или жесткость). Одним из критериев правильного подбора вектора обобщенных сил является отсутствие фазовых сдвигов между возбуждением и скоростью колебания отдельных точек конструкции.

В связи с необходимостью управления дополнительными вибраторами для возбуждения дополнительных сил требуется многоканальная система. Очевидно, что систему, содержащую несколько вибраторов одного типа, питаемых от одного или нескольких параллельно работающих источников, управляемых одним генератором, следует рассматривать как многоканальную по применяемой аппаратуре, так как она сравнительно просто сводится к системе с одним вибратором.

Таким образом, признаком многоканальной системы служит не только число вибраторов в ней, но и наличие управления уровнем и фазой возбуждаемой силы каждого вибратора.

Многоканальные системы применяют при вибрационных испытаниях больших конструкций, при исследовании собственных форм колебаний конструкции и для получения многокомпонентной вибрации.

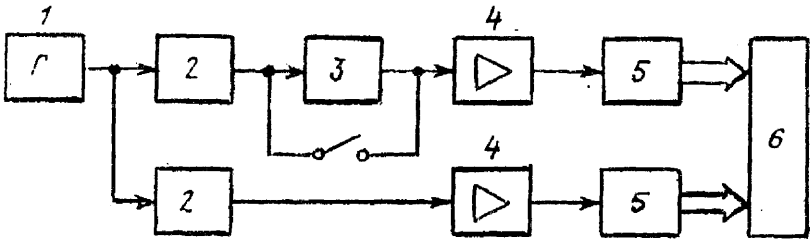


Рис. 2.3.35. Структурная схема двухканальной виброиспытательной системы:
1 - генератор; *2* - аттенюатор; *3* - инвертор; *4* - усилитель мощности; *5* - вибратор; *6* - изделие

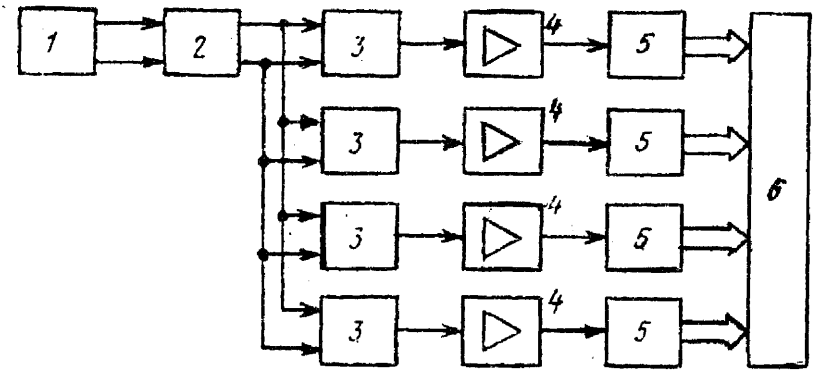


Рис. 2.3.36. Структурная схема многоканальной виброиспытательной системы:
1 - двухфазный генератор; *2* - блок общего управления уровнем и фазой; *3* - блоки управления уровнем и фазой колебаний каждого вибратора; *4* - усилитель мощности; *5* - вибраторы; *6* - изделие

Простейшей многоканальной системой является двухканальная система, оба вибратора которой возбуждают силы, совпадающие по фазе либо находящиеся в противофазе (рис. 2.3.35).

В многоканальных системах необходимо управлять не только амплитудой, но и фазой колебаний каждого возбудителя с целью создания синфазных колебаний возбуждаемых точек конструкции испытуемого изделия. Для этого в состав каждого канала системы включают различного типа фазовращатели.

На рис. 2.3.36 приведена структурная схема многоканальной системы для исследования сложных механических конструкций. Число каналов такой системы определяется числом вибраторов, необходимых для исследования конструкции испытуемого изделия.

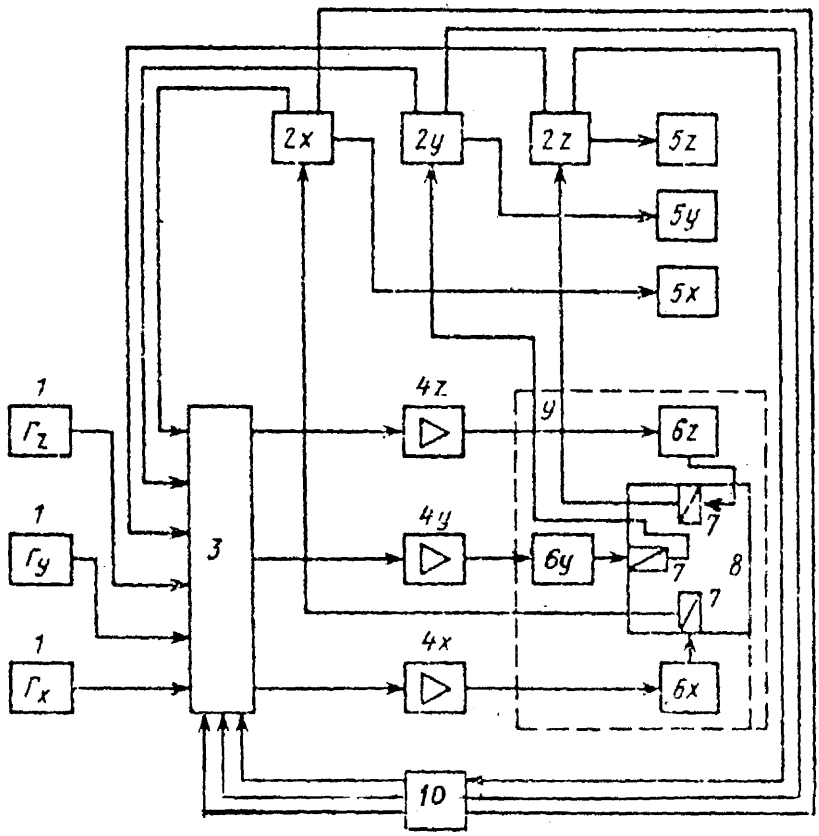


Рис. 2.3.37. Структурная схема системы для испытаний на многокомпонентную вибрацию

Регуляторы уровня представляют собой либо аттенюаторы (управляемые или ручные), либо усилители с регулируемым коэффициентом передачи.

Фазовращатели обеспечивают плавное изменение на фазы $\pm 180^0$ во всем частотном диапазоне. В случае применения фазовращателей в многоканальных виброиспытательных системах требуется генератор, имеющий двухфазное либо четырехфазное выходное напряжение.

Системы для испытаний на воздействие многокомпонентной вибрации. Рассмотренные виброиспытательные системы предназначены для создания вибрации в одном направлении. В реальных условиях большинство изделий испытывают вибрационные нагрузки в нескольких направлениях. Вибрации вдоль каждой оси произвольно выбранной пространственной системы координат имеют различный характер изменения во времени и различную степень взаимокорреляции между ними. С целью приближения условий испытаний к реальным необходимо иметь многокомпонентные вибростенды, воспроизводящие пространственную вибрацию с обеспечением вышеизложенных требований.

Движение твердого тела в пространстве определяется шестью степенями свободы: тремя поступательными в трех взаимно перпендикулярных направлениях и тремя вращательными вокруг координатных осей поступательного движения.

В виброиспытательных системах обычно используют стенды, ограничивающие возможности перемещения тела двумя-тремя степенями свободы (поступательное движение тела в двух-трех взаимно перпендикулярных направлениях или поступательное движение по одной оси совместно с вращением вокруг этой оси и т.д.). С увеличением числа компонент конструкция вибраторов значительно усложняется. Это связано с необходимостью исключения взаимовлияния между отдельными компонентами, что достигается за счет существенного усложнения конструкции вибратора. Кроме того, при увеличении числа компонент резко снижается эксплуатационная надежность и возникает необходимость в автоматизации процесса управления и регистрации измеряе-

мых параметров в связи с большой трудоемкостью ручного управления и регистрации параметров.

Многокомпонентные вибраторы могут быть электромеханическими, электрогидравлическими, электродинамическими и смешанными. В соответствии с этим аппаратура питания и управления такими вибраторами разнообразна по составу. Она может включать пульты управления электродвигателями, насосные станции, усилители мощности постоянного и переменного тока и т.п. Такие вибраторы обычно предназначены для решения конкретных задач и редко бывают универсальными. Они, как правило, имеют сложную конструкцию и ограниченный рабочий диапазон частот и амплитуд.

Виброиспытательные системы с многокомпонентными стендами состоят из однокомпонентных электродинамических вибраторов, имеющих общую виброплатформу.

На рис. 2.3.37 приведена структурная схема системы для воспроизведения трехкомпонентной вибрации с использованием электродинамических вибраторов, воспроизводящих колебания в трех взаимно перпендикулярных направлениях по осям X, Y и Z. Работой электродинамических вибраторов 6x, 6y, 6z управляют от задающих генераторов *1* или стоек программирования 2x, 2y, 2z через пульт дистанционного управления *3*. Каждым вибратором можно управлять от задающих устройств обоих видов независимо друг от друга. При задании вибрации от стоек программирования управление осуществляют через прибор взаимной корреляции вибропроцессов *10*, в котором регулировка уровня взаимокорреляции вибрации производится вдоль осей X, Y и Z. Питание подвижных катушек вибраторов осуществляется от усилителей мощности 4x, 4y, 4z. Кроме аппаратуры управления в эту систему входят анализаторы спектра для определения спектральных плотностей вибрационных ускорений вдоль осей, а также анализаторы спектров взаимокорреляционных функций 5x, 5y, 5z.

Сигналы на анализаторы подаются от преобразователей *7* через соответствующие измерительные приборы, входящие в состав стоек программирования.

Основным узлом этой установки является виброплатформа, конструкция которой исключает взаимовлияние между компонентами. Она выполнена в виде куба или трех жестко скрепленных взаимно перпендикулярных стенок. Внешние поверхности виброплатформы через специальные диски соединены с вибраторами. Поверхности, которыми сопряжены платформа и диски, притерты и между ними имеется слой масла. Между такими поверхностями возникают достаточно большие силы притяжения и в то же время эти поверхности легко перемещаются относительно друг друга. Влияние сил трения невелико. Оно заметно сказывается только на частотах < 40 Гц и отсутствует на частотах > 100 Гц.

К преимуществам рассмотренной системы следует отнести наличие широких диапазонов эксплуатационных параметров, которые в основном определяются техническими характеристиками используемых в системе электродинамических вибраторов; возможность испытания изделий по любому заданному закону; универсальность системы (возможность создания строго однонаправленной, плоскостной и пространственной вибрации); возможность задания и управления взаимной корреляцией; отсутствие необходимости синхронизации колебаний по каждой компоненте.

2.3.9. ИСПЫТАНИЯ НА ТРЕНИЕ И ИЗНОС

2.3.9.1. ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ

Внешнее трение твердых тел представляет сопротивление относительному перемещению, возникающее между двумя телами в зонах соприкосновения поверхностей по касательной к ним, сопровождаемое диссипацией энергии.

Основными факторами, влияющими на трение и износ, являются:

- материалы трущихся деталей и их микроструктура;
- состояние поверхности (волнистость, шероховатость);
- твердость, упругость, теплопроводность фрикционной пары;
- виды смазки, методы смазывания;
- характеристики окружающей среды;
- кинематика и динамические условия движения деталей.

При испытаниях для конкретных пар трения определяют:

- характеристики трения, прирабатываемость, способность к поглощению твердых частиц;
- износостойкость (свойство материала оказывать сопротивление изнашиванию в определенных условиях трения, оцениваемое величиной, обратной скорости изнашивания или интенсивности изнашивания);
- износ за заданный период испытаний или в момент выхода испытуемого объекта из строя; он может выражаться в единицах длины, объема, массы и др.; в ряде случаев изучается геометрия износа;
- влияние смазки на условия трения и изнашивания;
- влияние окружающей среды на условия трения и изнашивания.

При лабораторных и эксплуатационных испытаниях определяются виды изнашивания: механическое, коррозионно-механическое, абразивное, эрозионное, гидроэрозионное, гидроабразивное, усталостное, кавитационное, окислительное, электроэрозионное, при заедании, фреттинге или реттинг-коррозии.

Важной задачей испытаний является определение свойств и выбор марок жидких, газообразных и твердых смазочных материалов, присадок и связующих к ним.

Стенды для испытаний должны обеспечивать заданные условия проведения испытаний образцов: гидродинамическую, гидростатическую, эластогидродинамическую, граничную, полужидкостную смазку при непрерывном или периодическом смазывании и при заданных способах подачи смазочного материала к поверхностям трения.

Многообразие задач и физических условий испытаний вызывает необходимость в разработке и исследовании различных математических моделей и специальных экспериментальных методов, в тщательном анализе и сопоставления полученных триботехнических характеристик.

Силы трения. Коэффициенты трения. При испытаниях определяются силы трения, скольжения или качения, представляющие силы сопротивления при относительном перемещении одного тела по поверхности другого под действием внешней силы, тангенциально направленной к общей границе между этими телами. Различают и определяют экспериментально силы трения покоя (наибольшая сила трения) и силы трения при движении. При испытаниях определяют также коэффициенты трения и сцепления.

Под *коэффициентом трения* понимается отношение силы трения двух тел к нормальной силе, прижимающей эти тела друг к другу. При определении коэффициента сцепления в этом отношении используют наибольшую силу трения покоя.

При испытании пар скольжения определяют влияние на силы и коэффициенты трения *скорости скольжения* (разности скоростей тел в точках касания), твердости, упругости и геометрических параметров образцов. Другим фактором, существенно влияющим на эти характеристики и на интенсивность изнашивания, являются свойства смазочных материалов, вводимых на поверхности трения (в частности, их динамическая вязкость).

При испытаниях на стенде для пар скольжения с коэффициентом трения $f = 0{,}02 \div 0{,}1$ была получена следующая эмпирическая зависимость f от нагрузки N, средней скорости скольжения v_s и твердости более твердого тела по Бринеллю HB:

$$f = A \lg \frac{NHB}{\mu v_s R_{\text{п р}} E'} + B,$$

где A, B - постоянные числа;

μ - динамическая вязкость при средней температуре трущихся тел;

$R_{\text{п р}} = \dfrac{R_1 R_2}{R_1 \pm R_2}$ - исходный приведенный радиус кривизны;

R_1, R_2 - соответственно радиусы ролика и сферы ползуна;

E' - приведенный модуль упругости материалов.

2.3.9.2. МЕТОДЫ ИСПЫТАНИЙ

Испытания на трение. Условия, в которых проводятся испытания пар трения скольжения и качения, разнообразны, так же как и ожидаемые результаты. Для подшипников и направляющих скольжения увеличение сил трения вредно, для тормозных устройств и фрикционных муфт - полезно. Работа машин при наличии абразивных частиц в воздушной среде приводит к увеличению сил трения и абразивному изнашиванию. Такие условия характерны для работы многих сельскохозяйственных и транспортных машин. Испытания в этих условиях, так же как и при работе пар трения в вакууме и газовых средах, требуют специального оснащения машин трения.

На рис. 2.3.38 приведены схемы образцов, используемые при испытании материалов на различных машинах трения. По схеме *а* диски вращаются в разные стороны. Образец прижимается к ведущему диску усилием P. В схемах *б*, *в*, *г* и *д* приведены различные формы контактной поверхности образца и (или) способы нагружения.

В схемах *е*, *ж* трение образцов происходит по торцевым поверхностям, по схеме *з* - испытывается соединение вал-втулка, схема *и* применяется при испытании на абразивное трение и изнашивание. С помощью воронки подается кварцевый песок, а вращающийся резиновый диск (из неопрена) снабжен канавками для размещения песчинок.

При испытаниях на износ, проводимых методом акустической эмиссии, используется образец со сферической поверхностью, контактирующей с торцом диска, что устраняет влияние перекосов образца.

В установках для испытания образцов в вакууме и газовых средах, при пониженных (ниже 60^0 С) и повышенных (выше 300^0 С) температурах условия испытаний существенно изменяются в связи с необходимостью обеспечения постоянства (или ступенчатого изменения) соответствующих параметров среды, а

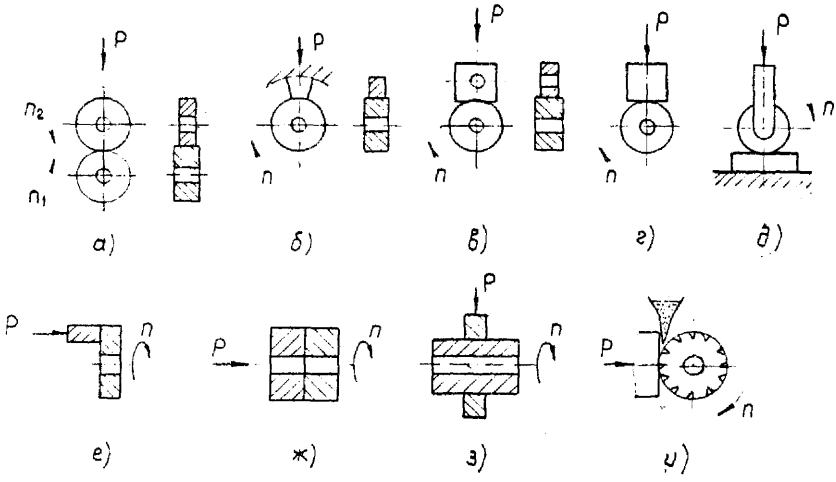


Рис. 2.3.38. Схемы образцов для различных машин трения

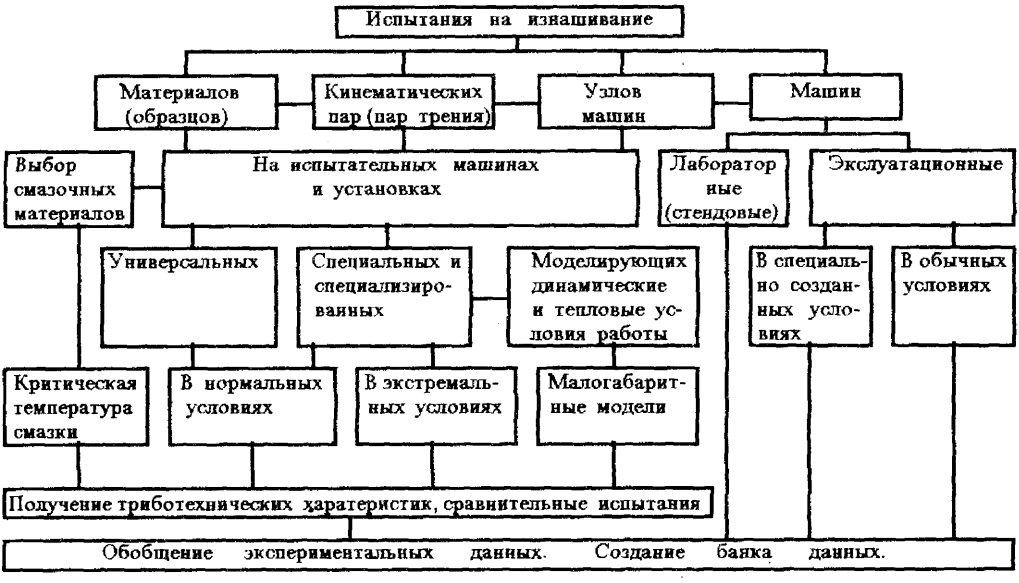


Рис. 2.3.39. Классификация испытаний на изнашивание

также в связи с повышенной опасностью схватывания контактирующих материалов из-за разрушения масляных пленок и покрытий. В ряде случаев дополнительно требуется обеспечить геометрическое подобие испытываемых образцов и деталей проектируемой машины.

Задачами испытаний на трение являются:

- определение усилий трения и расчет с их помощью коэффициентов трения;
- совершенствование способов расчета коэффициентов трения и сцепления, более точный учет влияния на трение твердости, микро- и макроструктуры поверхностного слоя, скорости скольжения, температурных характеристик, упругости контактирующих образцов, характеристик смазочных материалов и покрытий;
- изучение явлений схватывания, определение наибольшей и граничной величин сил трения. Под наибольшей силой здесь понимается сила трения покоя, любое превышение которой ведет к возникновению движения.

Испытания на изнашивание проводятся с целью получения данных для совершенствования методов расчета и моделирования процес-

сов трения и изнашивания, определения конструктивных параметров пар трения, сравнения различных конструкций с целью выбора оптимальных вариантов, а также для уточнения оптимальных условий эксплуатации, сроков и объема ремонтных работ.

На практике проводят испытания на изнашивание: материалов (образцов), климатических пар трения, отдельных узлов машин, а также фрикционных пар машин в процессе их эксплуатации в обычных или специально созданных стендовых условиях (рис. 2.3.39).

Имитация материалов на образцах проводится в лабораторных условиях, не имитирующих или имитирующих условия их службы - они предназначены для изучения самого процесса трения и изнашивания, определения классов износостойкости (табл. 2.3.14) характеристик материалов трущихся пар, применяемой смазки или абразивной среды.

2.3.14. Шкала классов износостойкости

Класс	Скорость изнашивания v, мкм/с	Износостойкость I_h
3	10^{0} - 10^{-1}	10^{-4} - 10^{-3}
4	10^{-1} - 10^{0}	10^{-3} - 10^{-4}
5	10^{-2} - 10^{-1}	10^{-6} - 10^{-5}
6	10^{-3} - 10^{-2}	10^{-7} - 10^{-6}
7	10^{-4} - 10^{-3}	10^{-8} - 10^{-7}
8	10^{-5} - 10^{-4}	10^{-9} - 10^{-8}
9	10^{-6} - 10^{-5}	10^{-10} - 10^{-9}
10	10^{-7} - 10^{-6}	10^{-11} - 10^{-10}
11	10^{-8} - 10^{-7}	10^{-12} - 10^{-11}
12	10^{-9} - 10^{-8}	10^{-13} - 10^{-12}

Нередко проводятся испытания климатических пар или узлов трения (например, шариковых и роликовых подшипников) на специально созданных установках. Эти испытания позволяют более подробно изучить виды изнашивания и дают более близкие результаты к эксплуатационным испытаниям, например позволяют выявить условия возникновения отслаивания или выкрашивания материала. Однако они не учитывают динамические и тепловые условия работы узла в машине.

Этот недостаток устраняется при применении установок, построенных с использованием критериев подобия и воспроизводящих с помощью этих критериев более привычные условия испытаний.

Для воспроизведения динамических условий работы узла в машине измеряются упругие свойства и моменты инерции многомассовой системы стенда. При этом получают данные, существенно приближенные к условиям стендовых испытаний машины. Испытания машин в лабораторных условиях дорогостоящи и не всегда возможны (особенно для больших по размерам машин). В этих случаях их заменяют эксплуатационными испытаниями. При специально созданных условиях и заранее заданных режимах эти испытания дают более однородные данные (например, для автомобиля), чем чисто эксплуатационные, где условия работы часто трудно регламентировать и точно зафиксировать.

Автоматизация сложных машин и включение в их системы управления большого числа датчиков создают для этого более благоприятные условия.

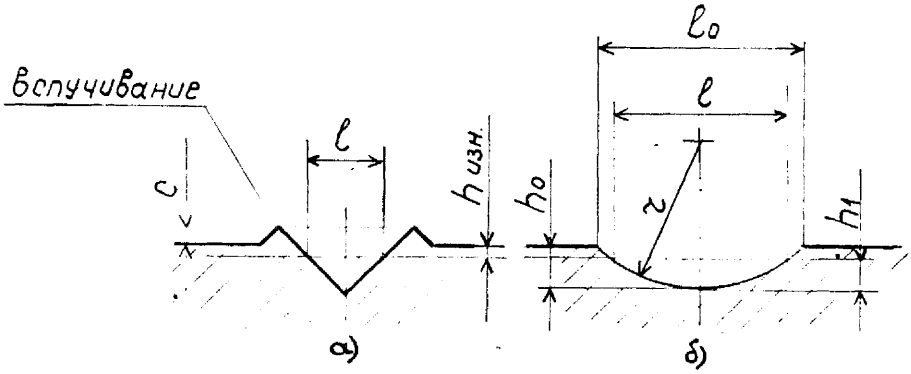


Рис. 2.3.40. Метод отпечатков (пирамида Виккерса) (*а*) и метод вырезанных лунок (резцом) (*б*):

$$h_0 = r - \sqrt{r^2 - \frac{l_0^2}{4}};\quad h_1 = r - \sqrt{r^2 - \frac{l_1^2}{4}};\quad h_{изм} = h_0 - h_1$$

Износ фрикционных пар периодически (или непрерывно) измеряется по сближению изношенных поверхностей. Однако неравномерность износа (например, направляющих скольжения) делает необходимым измерение местного износа. Местный износ измеряют, применяя методы отпечаток или вырезанных лунок (рис. 2.3.40).

При применении методов отпечатков возникает выпучивание материала и для точного измерения диагонали полученного отпечатка (до начала износа) необходимо удаление части материала (размер C).

При вырезании лунки резцом по радиусу r такого выпучивания не происходит и подготовки поверхности трения не требуется. По длинам лунки до и после износа (l_0 и l_1) рассчитывается глубина изношенного слоя $h_{изн}$.

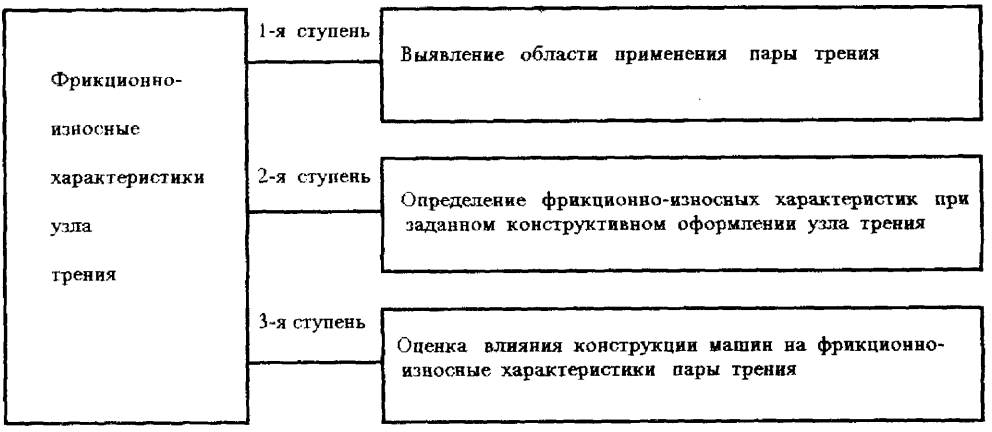


Рис. 2.3.41. Рациональный цикл последовательных испытаний триботехнических материалов

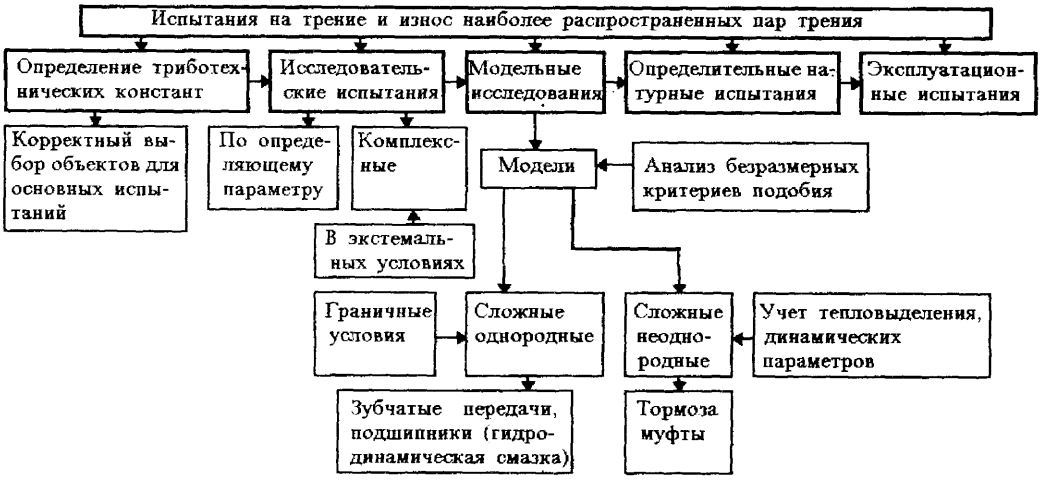


Рис. 2.3.42. Виды и последовательность испытаний

Для решения более частных задач ограничиваются трехступенчатым построением цикла испытаний. В данном случае (рис. 2.3.41) определяется и уточняется область применения пары трения из исследуемого материала. Результаты каждого этапа влияют на постановку задач для последующих этапов.

При оценке влияния срока службы по износу машин следует учитывать случайность изменения усилий нагружения триботехнических деталей и их несущей способности. Изменение этих параметров, связанное с условиями эксплуатации и качеством изготовления и сборки деталей, может значительно уменьшить срок службы и затруднить получение объективной информации в ремонтных подразделениях машиностроительных заводов и в ремонтных мастерских различного профиля. Поэто-

му испытания триботехнических узлов в специально созданных условиях, соответствующих условиям их работы в машине, имеет большое значение для оценки рациональной области их применения.

На рис. 2.3.42 приведены виды и последовательность испытаний для широко применяемых пар трения: зубчатых передач и подшипников с гидродинамической смазкой, для которых пригодны сложные однородные модели, и для тормозов и муфт, для которых характерны сложные неоднородные модели, требующие учета влияния на процесс изнашивания технологических и динамических параметров.

Ускоренные испытания на изнашивание позволяют в короткие сроки получить данные, необходимые для проектирования узлов трения и дают возможность понизить стоимость эксперимента.

Рис. 2.3.43. Способы ускорения испытаний

Ускорение испытаний наиболее часто достигается двумя способами (рис. 2.3.43): 1) управлением циклом испытаний с исключением участков пониженного износа, что обычно обеспечивается применением многократного повторяемого цикла пуск-остановка; 2) интенсификацией режимов: скорости и нагрузок (давлений). Под критической (предельной) нагрузкой понимается нагрузка, при которой сохраняется вид износа, характерный для обычных условий эксплуатации. Определение этих нагрузок при физическом моделировании до начала ускоренных испытаний позволяет повысить их достоверность, исключая участки катастрофического износа.

Важным направлением физического моделирования, ускоряющим проведение испытаний, является построение рациональных циклов последовательных испытаний. Оно основано на системном подходе к проведению испытаний и включает три основных этапа:

- выявление области применения пары трения;
- определение фрикционно-износных характеристик при заданном конструктивном оформлении узла трения;
- оценку влияния конструкции машины на фрикционно-износные характеристики пары трения.

При использовании малогабаритных образцов существенно уменьшается не только стоимость, но и продолжительность основных этапов этих испытаний.

Ускоренные испытания смазочных материалов по критериям нагрузки заедания и величины износа проводятся с помощью математической модели разрушения адсорбционных слоев, что значительно уменьшает длительность испытаний. Для проведения ускоренных испытаний применяют физические методы. Преимуществом *метода акустической эмиссии* (АЭ) при исследовании процессов трения и износа является его универсальность (рис. 2.3.44). Он пригоден для многих пар трения, в том числе из пластмасс, твердых сплавов, бронз, хромоникелевых сталей. Хорошие результаты были получены при контро-

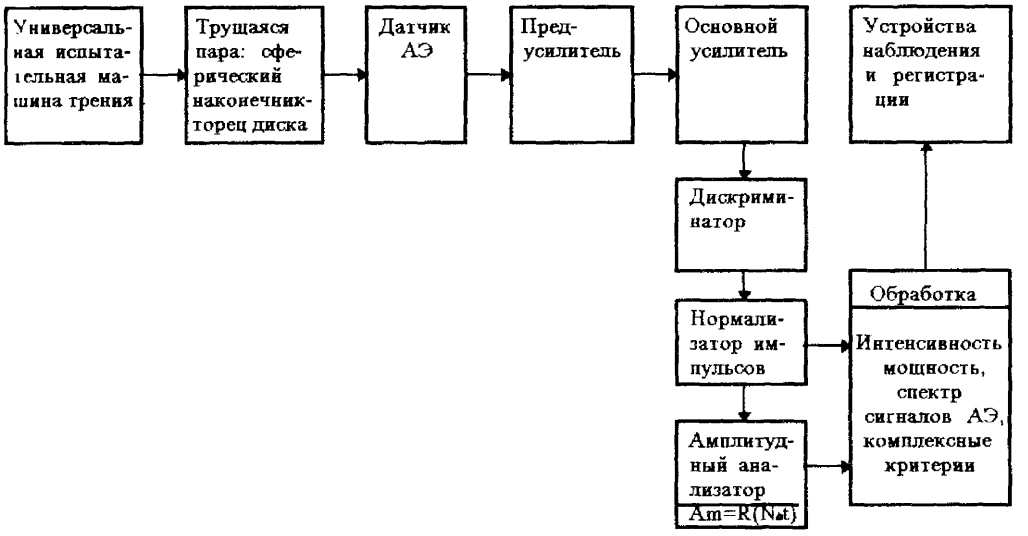


Рис. 2.3.44. Система АЭ для исследования процесса изнашивания образцов

ле за приработкой пар трения и при диагностировании инструмента. Недостатком, препятствующим широкому применению, является сложность аппаратуры и недостаточная изученность рациональных областей применения и методов обработки экспериментальных данных для различных триботехнических объектов.

При испытании режущего инструмента в зависимости от вида технологического процесса, условий обработки и имеющейся аппаратуры АЭ определяют:

- суммарный счет АЭ - N (количество импульсов, зависящее от выбора порогового напряжения);
- интенсивность (скорость счета сигналов АЭ) - $\dot{N}_э$;
- амплитуду АЭ - A;
- амплитудное распределение

$$A_м = f(N_{\Delta t}),$$

где Δt - исследуемый интервал времени;

- суммарный импульс сигнала АЭ

$$W' = A\dot{N}_\Sigma,$$

где $\dot{N}_\Sigma$ - суммарная интенсивность;

- коэффициент относительного динамического возмущения;

$W_н = A\dot{N}_\Sigma / v_{рез}$ - импульс волн, генерируемых при обработке в зоне резания в единицу времени на единице пути;

$v_{рез}$ - скорость резания;

$$W_н = f\left(\frac{d\omega}{dL}\right),$$

где $\frac{d\omega}{dL}$ - интенсивность изменения технологической повреждаемости; L - путь резания;

- мощность акустического излучения

$$W_м = A^2\dot{N}_\Sigma / N_{рез},$$

где $N_{рез} = P_z v_{рез}$ - мощность резания, где P_z - составляющая силы резания.

Ускоренные испытания машин с помощью изотопов (активированных деталей машин и инструмента) не получили большого развития в производственных условиях из-за сложности получения образцов и ужесточающихся условий техники безопасности. Они успешно применяются в лабораторных условиях для исследования трущихся пар двигателей и при токарной обработке на металлорежущих станках. Интенсивность износа инструмента определяют по активности стружки. Одним из возможных путей применения является установка свидетелей износа (рис. 2.3.45). Для контроля показаний иногда применяется взвешивание образцов.

Взвешивание образцов показало, что метод измерения радиоактивности продуктов износа при резании позволяет оценить интенсивность изнашивания по начальным участкам кривой износа.

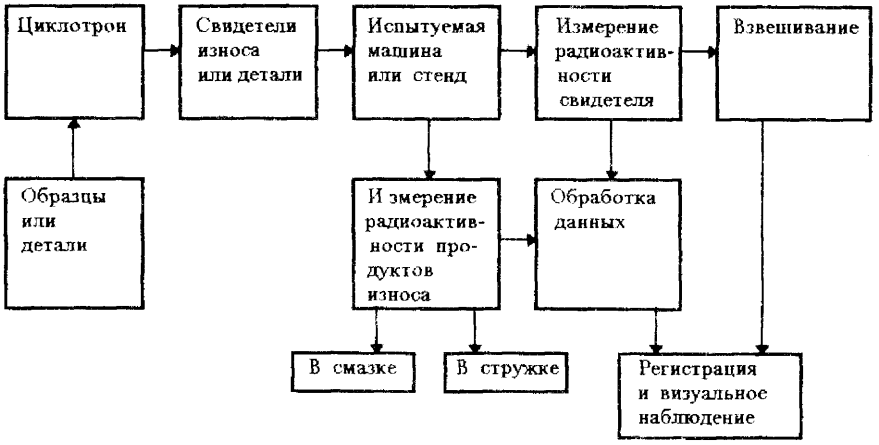


Рис. 2.3.45. Контроль износа с помощью радиоактивных изотопов (облученные детали машин, свидетели износа, инструмент)

Применение твердосплавного инструмента, облученного на циклотроне, позволило также определить характер его износа по радиоактивности продуктов износа на обрабатываемой детали. Было обнаружено дискретное их отделение и внедрение в поверхность детали. Работа с таким инструментом позволяла сравнивать весовой износ твердосплавных пластинок с измерениями радиоактивности порций стружки в течение всего периода стойкости инструмента. Однако проведение таких испытаний требует выполнения особых условий техники безопасности в хорошо оснащенных специальных лабораториях.

Машины и стенды для испытаний на трение и изнашивание. Универсальные машины для испытаний на трение и изнашивание допускают широкое варьирование условий трения. Это достигается благодаря следующему:

- применению образцов различной формы;
- изменению кинематики движения образцов, в частности бесступенчатого регулирования скорости;
- управлению условиями нагружения;
- ряд машин снабжается приспособлениями для проведения испытаний в вакууме или специально подобранной газовой среде, устройствами для измерения температурных условий.

Специализированные машины служат для испытаний применительно к типовым условиям трения отдельных групп деталей, например шариковых подшипников.

Специальные машины воспроизводят частично условия эксплуатации для определенных пар трения. Примеры специализированных стендов и их приборное оснащение, связанное с применением физических методов исследования износа, были приведены выше. Для современных машин и стендов характерна автоматизация процессов сбора, обработки и регистрации данных об условиях испытаний и полученных результатов испытаний на трение и износ.

Глава 2.4

ИСПЫТАНИЯ НА АКУСТИЧЕСКИЙ ШУМ И ГЕРМЕТИЧНОСТЬ

2.4.1. ИСПЫТАНИЯ НА АКУСТИЧЕСКИЙ ШУМ

Акустический шум представляет собой беспорядочные механические колебания, амплитуды и фазы которых изменяются во времени. Эти колебания распространяются в газообразной, жидкой и твердой средах.

Источниками акустического шума являются выхлопные струи газотурбинных двигателей, ракетных двигателей, аэрогазодинамические эффекты, вызванные обтеканием летательного аппарата внешним потоком, и т.д.

Возникновение акустического шума приводит к возбуждению механических колебаний соответствующих изделий. Акустический шум может быть вызван вибрацией объектов. Это явление называют *акустической вибрацией*.

Кратковременные акустические импульсы могут вызываться взрывами, газовыми потоками при прохождении звукового барьера. Воздействие акустического шума на различные изделия вызывает их механическое возбуждение.

Акустический шум может быть случайным, распределенным в широком или узком диапазонах частот, а также содержать дискретные тона или иметь импульсный характер. В общем случае акустический шум состоит из

большого числа колебаний различных частот со случайной фазой. Частотный диапазон акустических колебаний включает в себя инфразвуковые (ниже 20 Гц), звуковые (20 ... 20 000 Гц) и ультразвуковые (свыше 20 000 Гц) частоты.

При испытаниях рассматривают механические колебания среды в основном в звуковом диапазоне частот. Звуковые частоты делят на низкие (ниже 500 Гц), средние (свыше 500 Гц) и высокие (свыше 2 000 Гц).

Акустический шум чаще всего имеет непрерывно изменяющиеся формы и составы спектров, которые могут быть дискретными, сплошными и смешанными. Периодические акустические шумы имеют дискретные спектры, и их можно представить в виде ряда Фурье.

Простейшим акустическим шумом является чистый тон. Для характеристики воздействия звукового поля пользуются понятием *звукового давления*, представляющего собой силу F, действующую на единицу поверхности S:

$$P = F / S .$$

Звуковым давлением в газах (в воздухе) называют разность между мгновенным значением давления $P_з$ в точке среды при прохождении через нее звуковой волны и статическим атмосферным давлением $P_с$ в той же точке:

$$P = P_с - P_з .$$

На распространение звуковых волн в атмосфере большое влияние оказывают температура, влажность, а также направление и сила ветра.

Скорость распространения звуковых волн (м/с) в воздухе существенно зависит от температуры:

$$c \approx 331 \sqrt{\frac{T}{273}} ,$$

где T - абсолютная температура по Кельвину.

В отличие от воздействия вибрации, когда колебательная энергия передается к изделию через точки крепления, при наличии акустических шумов имеет место распределенное пространственное воздействие механических колебаний среды, эффективность которого зависит от формы и площади поверхности.

Акустическое свободное поле характеризуется распространением свободных бегущих волн в пространстве, не имеющем отражающих преград. Свободные бегущие волны могут быть плоскими, сферическими и др.

Одной из важнейших энергетических характеристик звукового поля является его *интенсивность, или сила звука.*

Интенсивность (Вт/м^2) измеряется пропорционально квадрату звукового давления или колебательной скорости:

$$I = \frac{p^2}{2\rho_0 C_0} = \rho^2 \frac{v^2}{2} C_0 ,$$

где ρ_0 - статическая плотность воздуха; $\rho_0 C_0$ - постоянная величина, характеризующая акустическое сопротивление, для нормальных атмосферных условий равная $1{,}20 \cdot 343 \approx 413$ кг/(м$^2 \cdot$ с) при температуре $20\,^{\circ}\mathrm{C}$; p - звуковое давление.

В случае свободной сферической волны интенсивность звука

$$I = \frac{E}{4\pi r^2} ,$$

где E - полная излучаемая энергия; r - непрерывно возрастающий радиус сферы.

На большом расстоянии от источника средняя интенсивность звука I пропорциональна p^2 в точке на радиусе r, т.е.

$$p = \mathrm{const} \frac{1}{r} .$$

Приведенное соотношение называется *законом обратных радиусов*, и ему подчиняется распространение колебаний в "дальнем" акустическом поле. Под "дальним" понимают акустическое поле в достаточно удаленной от источника области, где направление скорости распространения частиц совпадает с направлением распространения звука, а его интенсивность пропорциональна квадрату звукового давления.

В "ближнем" поле направления колебаний частиц среды не обязательно совпадают с направлением распространения волны.

Стандартному порогу слышимости соответствует минимально допустимое эффективное звуковое давление $2 \cdot 10^{-5}$ Па при гармоническом звуковом колебании с частотой 1 000 Гц, когда еще имеет место слуховое восприятие.

Стандартному болевому порогу соответствует максимально допустимое эффективное звуковое давление 20 Па при гармоническом колебании с частотой 1 000 Гц, когда наступает болевое ощущение. Уровень звукового давления выражают в децибелах и относят к порогу слышимости:

$$L_p = 20 \lg (p / p_0).$$

Звуковое поле, образующееся большим числом волн, все направления потоков звуковой энергии которых равновероятны, а плотности звуковой энергии по всему объему постоянны, называется *диффузным* (*реверберационным*). Диффузное поле является изотропным и однородным.

В диффузном поле вместо понятия интенсивности звука, характеризующего свободное поле, используют понятие *потока звуковой мощности*, падающей на единицу площади во всех направлениях полупространства. Эту величину называют удельной мощностью облучения границ I_p.

Спектральной плотностью по интенсивности $I_{(\omega)} = k A^2_{(\omega)}$ принято называть интенсивность звука в полосе частот шириной в 1 Гц:

$$I_{(\omega)} = I_{\Delta f} / \Delta f,$$

где $I_{\Delta f}$ - интенсивность, измеренная в узкой полосе частот Δf.

Акустический шум, имеющий одинаковую спектральную плотность во всем частотном диапазоне, называют "*белым*" *шумом*. Если акустический шум имеет тенденцию к спаду на 3 Дб/октаву в сторону высоких частот, то его называют "*розовым*".

Удельная мощность облучения границ диффузного поля в 4 раза меньше интенсивности бегущих звуковых волн при той же плотности акустической энергии $\varepsilon(t)$.

В звуковом диапазоне частот коэффициенты поглощения неупругих материалов больше, чем упругих. В камере со слабым звукопоглощением стен наблюдается *явление послезвучания*, когда после прекращения действия источника звук исчезает не мгновенно, а постепенно замирая. Это явление называют *реверберацией*, а время замирания звука - *временем реверберации*. Время, в течение которого плотность звуковой энергии в данной точке камеры уменьшается в 10^6 раз (или на 60 дБ), называют *стандартным временем реверберации*.

Для выявления степени воздействия акустического шума на изделия проводят испытания, целью которых является определение способности изделий выполнять свои функции и сохранять параметры в пределах норм, указанных в стандартах.

Условия испытаний и применяемое оборудование. Установка для воспроизведения случайного акустического шума и акустического тона меняющейся частоты в заданном частотном и динамическом диапазонах с возможностью осуществления ручного и автоматического управления (рис. 2.4.1) состоит из источника акустического шума *1*; рупора *2*, являющегося устройством, обеспечивающим согласование сопротивления излучения источника с акустическим сопротивлением окружающей среды; камеры *6*; системы *5* формирования и управления спектром акустического шума; измерительного микрофона *3*; средств *4* измерения значений параметров испытательных режимов.

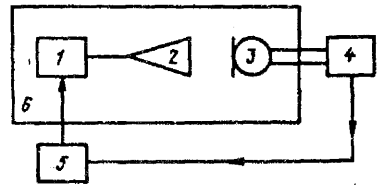


Рис. 2.4.1. Структурная схема установки для испытаний на воздействие акустического шума

Основные параметры установок акустического шума:

1. *Уровень звукового давления* - до 170 дБ с плавной регулировкой в пределах 90 ... 170 дБ.

2. *Отклонение уровня звукового давления от заданного* - не более ± 3 дБ.

3. *Случайный акустический шум* - в диапазоне частот 125 ... 10 000 Гц (белый шум).

4. *Акустический тон меняющейся частоты* - в диапазоне частот 125 ... 10 000 Гц.

5. *Продолжительность воздействия звукового давления* - не менее 5 мин.

В качестве источников акустического шума наибольшее применение получили *акустические генераторы*, принцип действия которых основан на преобразовании энергии сжатого воздуха в акустическую энергию, на осуществлении модуляции воздушного потока электропневматическим возбудителем, на использовании электродинамических громкоговорителей.

Акустические генераторы, преобразующие энергию сжатого воздуха в акустическую энергию, подразделяются на две основные группы: с дискретным спектром частот и с непрерывным (широкополосным).

Принцип действия указанных акустических генераторов заключается в том, что непрерывный воздушный поток модулируется путем попеременного открывания и закрывания отверстий на его пути, в результате чего изменяется уровень звукового давления. Указанная модуляция может реализоваться с помощью сирен и электропневматических возбудителей.

Схема *акустического генератора с дискретным спектром* частот, получаемым с помощью одноротorной сирены, приведена на

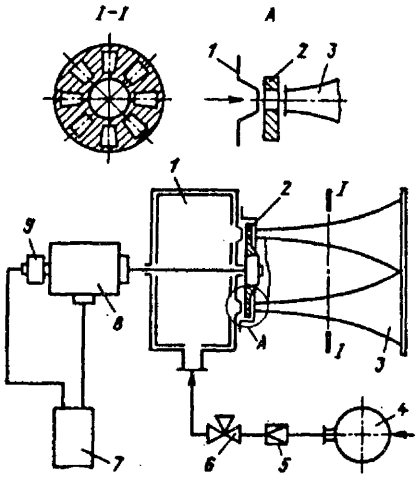


Рис. 2.4.2. Одноротория сирена

рис. 2.4.2. Воздух под давлением подводится к форкамере *1*, по одной из стенок которой располагаются сопла. Число сопл и шаг их распределения по окружности соответствуют числу и шагу отверстий в роторе (диске) *2*. От их числа зависит диапазон частот звуковых давлений. Между ротором и торцевой частью сопла имеется зазор.

При вращении ротора электродвигателем *8*, питаемым источником *7*, площадь сечения струй воздуха, истекающего из сопл, периодически изменяется, в результате чего изменяются газодинамические параметры струй, приводящие к пульсации давления в рупоре *3* и появлению колебаний воздушной среды. Частота колебаний f определяется числом оборотов ротора и числом сопл в форкамере. Изменение частоты (тона) достигается изменением числа оборотов привода ротора, а ее поддержание - с помощью системы автоматического управления электродвигателем, получающей исходную информацию с датчика *9* числа оборотов.

Рабочий диапазон давления воздуха в форкамере порядка 10^4 ... $3 \cdot 10^5$ Па.

Следует иметь в виду, что в одноротор-ной сирене может возникать акустический резонанс, собственная частота которого определяется геометрическими размерами форкамеры.

В систему воздухоснабжения сирены входят источники сжатого воздуха, ресивер *4* - устройство, обеспечивающее снижение давления до рабочего значения, дроссель *5* для регулирования пропуска воздуха, задвижка *6*, датчик и элементы автоматического регулирования давления воздуха в подводящей магистрали.

Акустический генератор с широкополосным спектром частот, реализуемым с помощью многороторной сирены, позволяет получить случайный акустический шум в заданном диапазоне частот с требуемым уровнем давления.

Недостатком многороторных сирен является сложность автоматического управления, обеспечивающего воспроизведение требуемого спектра шумов.

Акустические генераторы высокоинтенсивных звуковых полей, осуществляющие модуляцию воздушного потока электропневматическим модулятором, обеспечивают получение регулируемого спектра колебаний в диапазоне частот 20 ... 5 000 Гц.

В основе принципа действия модулятора лежит возбуждение механических колебаний модулирующей конструкции с помощью электрогидравлического или электродинамического вибровозбудителя.

Использование электродинамического возбудителя позволяет реализовать *высокочастотные акустические генераторы*.

Для создания акустических шумов могут использоваться электродинамические громкоговорители, различающиеся по способу излучения (диффузорные с непосредственным излучением и рупорные) и по воспроизводимому диапазону частот (узкодиапазонные и широкодиапазонные).

Диффузорные громкоговорители требуют специального оформления, образующего акустическую излучающую систему. Важными показателями, характеризующими электродинамические громкоговорители, являются КПД η, стандартное звуковое давление $p_{ст}$, оцениваемое на расстоянии 1 м от громкоговорителя по направлению его рабочей оси при подведении мощности 0,1 Вт, а также его АЧХ.

У электродинамических громкоговорителей возможно возникновение нелинейных искажений, основными причинами которых являются нелинейная зависимость деформации (сжатия и растяжения) подвеса диффузора и центрирующей гайки от приложенной силы, а также неоднородность магнитного поля в воздушном зазоре, проявляющаяся в ее уменьшении к краям зазора.

Диффузорный громкоговоритель в простейшем случае устанавливается на плоский экран, выполненный из доски или фанеры толщиной 10 ... 20 мм, что улучшает воспроизведение низких частот и не оказывает влияния в области средних и высоких частот.

Для одновременного увеличения звукового давления и получения заданной направленности создают акустические системы, состоящие из нескольких диффузорных громкоговорителей, расположенных на расстоянии друг от друга, которое в несколько раз меньше

расстояния до объекта испытаний. При этом звуковые давления всех громкоговорителей складываются:

$$p_{\Sigma}=p_1+p_2+\ldots+p_n .$$

Для воспроизведения свободного и диффузного полей шума в лабораторных условиях необходимо создание специальных камер. Камеры, позволяющие воспроизвести свободное поле, называют *камерами бегущей волны*, или *безэховыми*, а камеры, позволяющие воспроизвести диффузное поле, - *реверберационными*, или *камерами отраженных волн*.

Испытательная камера бегущей звуковой волны представляет собой трубу (акустический волновод) с жесткими стенками прямоугольного или круглого сечения, обеспечивающую распространение плоской бегущей волны.

Для исключения отражения звуковых волн в торце трубы устанавливают звукопоглощающие клинья, обеспечивающие максимальное поглощение звуковой энергии в области частот от 60 Гц и выше за счет плавного увеличения акустического сопротивления. Клинья изготавливаются из волокнистопористых материалов, помещаемых в специальные чехлы. При этом рекомендуется следующее соотношение высоты, ширины и толщины: 1 : 0,4 : 0,13.

Реверберационные камеры характеризуются образованием в них сложного колебательного движения воздуха.

Главным является получение в камере диффузного поля, средняя плотность энергии звуковых колебаний которого была бы одинаковой по всему объему камеры.

Для повышения равномерности звукового поля в камере в форме параллелепипеда рекомендуется брать следующие соотношения линейных размеров высоты, ширины и длины: 2 : 3 : 5 или $l_x = 1$; $l_y = \sqrt[3]{2}\, l_x$; $l_z = \sqrt[3]{4}\, l_x$.

Все внутренние поверхности камер полируют и красят. Для повышения диффузности поля за счет изменения времени реверберации применяют звукопоглощающие или рассеивающие конструкции. В качестве звукопоглощающих используют деревянные щиты, площадь которых может быть определена по формуле

$$S = 0{,}161\frac{V}{\alpha' T},$$

где V - объем помещения; α' - реверберационный коэффициент поглощения; T - время реверберации.

Время реверберации камеры T должно быть по возможности велико ($T > 1{,}5$ с). Наиболее целесообразным расстоянием между источником шума и изделием является $2V^{1/3}/3$.

Хорошие результаты дает размещение источника вблизи одного из углов камеры, а испытуемого изделия на расстоянии $\approx \lambda / 4$ от всех стен.

Кроме рассмотренных принципов конструкций камер возможно создание камеры с воспроизведением звукового давления в "ближнем" поле с использованием так называемых "поверхностей излучения". В этом случае в качестве источника акустического шума могут использоваться громкоговорители, располагаемые в шахматном порядке на потолке и на стенах камеры. Места, свободные от громкоговорителей, заполняются звукопоглощающим материалом. Испытуемое изделие располагается в центре камеры.

Площадь "поверхности излучения" можно условно считать равной поверхности "эквивалентной" полусферы с радиусом

$$r = \sqrt{S / 2\pi},$$

где S - площадь поверхности излучения.

При размещении источников излучения на "поверхности излучения" должны соблюдаться следующие условия. Отсчетное расстояние d и расстояние между источниками излучения h выбирают в зависимости от размеров испытуемых изделий l. При максимальном размере изделия $l \geq 0{,}25$ м $d = 1$; 3; 10 м, а при $l < 0{,}25$ м $4l \leq d \leq 1$ м.

При высоте испытуемого изделия H или при расположении его в пределах указанной высоты расстояние между источниками излучения h выбирают равным $H/4$, но не менее 0,25 м.

Средства измерений акустического шума. Источниками сигналов измерительной информации о значениях параметров акустических шумов являются измерительные микрофоны, напряжения с выходов которых через предусилители подводятся к средствам измерения и анализа.

Измерительные микрофоны представляют собой электроакустические преобразователи, преобразующие в широком динамическом и частотном диапазонах акустические колебания в электрические.

Классификация измерительных микрофонов может проводиться по следующим признакам.

1. *По физическому принципу* - электрические (конденсаторные, электретные и пьезоэлектрические) и электромагнитные (электродинамические).

2. *По принципу преобразования энергии* акустических колебаний в электрические -

активные, требующие дополнительной энергии от постороннего источника (конденсаторные), и пассивные (пьезоэлектрические, электретные и электродинамические).

3. *По направленности* - ненаправленные, двусторонне направленные (восьмерочные), односторонне направленные и остронаправленные.

Основными параметрами измерительных микрофонов являются следующие.

1. *Чувствительность* (В/Па, мВ/Па) - отношение напряжения холостого хода на выходе микрофона к звуковому давлению, действующему на микрофон. Различают два основных вида чувствительности: номинальную чувствительность по напряжению (отношение напряжения на номинальной нагрузке к звуковому давлению), чувствительность по звуковому давлению в свободном поле (отношение напряжения на номинальном сопротивлении к звуковому давлению в точке свободного поля до помещения в нее микрофона).

2. *Номинальный диапазон частот* оценивается диапазоном частот, в котором определяются параметры микрофона.

3. *Неравномерность частотной характеристики чувствительности* оценивается отношением максимальной чувствительности к минимальной в номинальном диапазоне частот микрофона. Она не должна превышать ± 3 дБ.

4. *Динамический диапазон* микрофона оценивается диапазоном звуковых давлений, воспринимаемых микрофоном, нижний предел которого ограничен уровнем собственных шумов микрофона, а верхний предел определяется максимально допустимыми нелинейными искажениями.

5. *Характеристика направленности* оценивается зависимостью чувствительности микрофона на частоте f или в полосе частот со средней частотой f_0 в свободном поле от угла между рабочей осью микрофона и направлением на источник звука.

Чем меньше размеры микрофона, тем шире его частотный диапазон и тем меньше влияние направленности. Однако при этом снижается чувствительность.

Для записи сигнала шума в целях его дальнейшего анализа целесообразно использовать *магнитофоны*. При записи акустического шума на магнитную ленту необходимо осуществить ее калибровку с помощью эталонного сигнала, создаваемого пистонфоном или микрофонным акустическим калибратором. Пистонфон является малогабаритным батарейным источником звука, предназначенным для акустической калибровки аппаратуры.

Недостатком пистонфона является ограниченный уровень звукового давления (~ 124 дБ) практически на одной частоте (250 или 320 Гц).

В связи с этим находит применение микрофонный калибратор высокого давления, дающий возможность проведения абсолютной поверки и поверки методом сравнения микрофонов при давлениях до 180 дБ в области частот до 1 кГц.

Частотный анализ шума может осуществляться двумя способами:

- последовательным, когда выходные сигналы анализирующих фильтров передаются по одному каналу в среднеквадратичный выпрямитель и индикаторное устройство;
- параллельным, когда выходной сигнал одновременно подводится к ряду фильтров и с их выходов поступает к соответствующему индикаторному устройству.

При последовательном способе требуется некоторое время для анализа, и, следовательно, лишь сравнительно медленные изменения частотного спектра во времени могут быть обнаружены. При параллельном способе можно "мгновенно" воспроизводить полный частотный спектр шума и обнаруживать очень быстрые изменения спектра во времени.

Для измерения импульсных акустических шумов необходимо использовать измерительные схемы, содержащие детектор пикового значения, позволяющий измерить импульсный звук.

Испытания на воздействие акустического шума. Испытаниям подвергаются изделия, имеющие немонолитную структуру. Испытания могут проводиться двумя основными методами: *методом воздействия на изделие случайного акустического шума и методом воздействия на изделие акустического тона меняющейся частоты.*

При *выборе камеры* необходимо учитывать, что ее максимальный требуемый объем, обеспечивающий воспроизведение диффузного поля, зависит от геометрических размеров источника и от длины волны самой низкой частоты, рассматриваемой при испытаниях.

Малогабаритные изделия, наибольший габаритный размер которых в закрепленном состоянии меньше 40 мм, крепятся на приспособлениях в положении, соответствующем наиболее опасному способу крепления из всех предусмотренных для эксплуатации.

При этом для испытаний некоторых изделий могут использоваться специальные монтажные платы. Резонансные частоты приспособлений или других средств крепления должны быть вне диапазона акустических шумов, т.е. не ниже 20 кГц и не выше 16 Гц. Крепление изделий, габаритные размеры которых не превышают 300 мм, может выполняться с помощью системы подвески на эластичных растяжках (резиновые шнуры, полосы и т.д.). Крупногабаритные изделия с наибольшими размерами (более 300 мм) могут устанавли-

ваться на рамы и специальные столы с амортизаторными опорами. Изделия, имеющие собственные амортизаторы, крепятся непосредственно на них. При этом резонансная частота системы изделие-амортизатор не должна превышать 25 Гц, что обеспечивается жесткостью монтажных плат и крепежных приспособлений.

Звуковое давление, создаваемое в камере, измеряется с помощью измерительных микрофонов, которые могут иметь два функциональных назначения. Для поддержания заданного уровня звукового давления при испытаниях в камере может быть установлен контрольный микрофон, включенный в замкнутую систему автоматического регулирования.

Выбор расстояния l от источника звука до микрофона в основном определяется свойствами камеры. Оно может быть определено по эмпирической формуле:

$$l = \frac{1}{T}\sqrt{\frac{kV}{300}},$$

где T - время стандартной реверберации камеры; k - коэффициент объемности звука (для симфонического оркестра 10 ... 20); V - объем камеры, м^3.

При испытании изделия на *воздействие случайного акустического шума* установка должна обеспечивать получение случайного акустического шума в диапазоне частот 125 ... 10 000 Гц при уровне звукового давления, соответствующем требуемой степени жесткости (табл. 2.4.1).

2.4.1. Уровни звукового давления, дБ

Степень жесткости	Акустический шум	Акустический тон меняющейся частоты
I	130	120
II	140	130
III	150	140
IV	160	150
V	170	160

При использовании реверберационной камеры изделие располагают в ее средней части. Число измерительных микрофонов, устанавливаемых в камере, зависит от размеров и формы изделия. Для изделий больших габаритных размеров рекомендуется проводить измерение в шести точках, а для изделий, у которых наибольший габаритный размер не превышает 20 % длины наименьшей стенки камеры, допускается проводить измерения в трех точках. Измерения проводят в точках, отстоящих на 0,3 м от изделия, при условии, что изделие находится на расстоянии более 0,6 м от стенок камеры или посередине между изделиями и стенкой камеры.

Значение звукового давления определяют как среднее арифметическое результатов измерений.

При испытании на *воздействие акустического тона меняющейся частоты* используется камера бегущей волны. Изделие располагают по геометрической оси излучателя так, чтобы сторона изделия с большей площадью поверхности была бы направлена к излучателю. Изделие закрепляется на гладкой, плохо отражающей поверхности, выше которой не имеется отражающих преград.

При испытании указанным методом функции контрольного и измерительного микрофонов объединяются. Микрофон устанавливается на расстоянии 5 см от изделия в плоскости, перпендикулярной к геометрической оси изделия, проходящей через его середину. При этом параметры испытательных режимов должны поддерживаться постоянными с допускаемым отклонением ± 3 дБ. Испытания проводят воздействием тона плавно изменяющейся частоты в диапазоне 125 ... 10 000 Гц от низшей к высшей и обратно (один цикл). При этом в диапазоне частот 200 ... 10 000 Гц уровень звукового давления должен соответствовать указанному в табл. 2.4.1. На частотах ниже 200 и выше 1 000 Гц должно быть снижение, равное 6 дБ на октаву, относительно уровня на частоте 1 000 Гц. Продолжительность испытаний 30 мин, если для контроля параметров изделия не требуется большего времени.

2.4.2. ИСПЫТАНИЯ НА ГЕРМЕТИЧНОСТЬ

Герметичность - свойство конструкции или материала препятствовать проникновению жидкости, газа или пара.

Испытания на герметичность проводят с целью определения степени герметичности изделий и (или) их элементов, а также выявления отдельных течей.

Требования к степени негерметичности должны быть определены при разработке конструкции. *Степень негерметичности* характеризуется потоком газа, расходом или наличием истечения жидкости, падением давления за единицу времени, размером пятна и тому подобными величинами, приведенными к рабочим условиям.

Выбор **метода испытаний на герметичность**, а также установление требований к подготовке изделий к испытаниям на герметичность должны осуществляться при разработке конструкции изделия и (или) технологии его изготовления.

Испытания на герметичность должны включаться в технологический процесс изготовления изделия таким образом, чтобы пред-

шествующие технологические операции не приводили к случайному перекрытию течей. При невозможности исключить опасность случайного перекрытия течей, в технологическом процессе необходимо предусмотреть операции, обеспечивающие освобождение течей от закупорки.

Метод и (или) программа испытаний на герметичность должны быть указаны в технологических условиях на изделие конкретного вида.

При испытаниях на герметичность используют пробные вещества.

Пробное вещество - газ, пар или жидкость, проникновение которых через течь регистрируют при испытаниях на герметичность.

В зависимости от рода пробного вещества методы испытаний на герметичность подразделяются на две группы: газовые и жидкостные. Каждая из групп включает в себя подгруппы, различающиеся по принципу регистрации пробного вещества. Подгруппы делятся на способы, различающиеся по условиям реализации методов.

Метод испытаний необходимо выбирать в зависимости от назначения изделий, их конструктивно-технологических особенностей, требований к степени герметичности, а также технико-экономических характеристик испытаний.

Метод должен обеспечивать проведение испытаний в условиях, отвечающих требованиям действующей нормативно-технической документации по технике безопасности и промышленной санитарии.

Метод должен характеризоваться пределами индикации, обеспечиваемыми при конкретных способах испытаний.

Предел индикации - наименьшее или наибольшее значение определяемой величины, которое может быть зафиксировано при заданном способе реализации метода.

Пробное вещество, используемое для испытаний на герметичность, не должно вредно воздействовать на испытуемое изделие и людей.

Подготовка изделий к испытаниям на герметичность должна предусматривать устранение последствий случайного перекрытия течей после хранения, транспортирования и операций, предшествующих испытаниям.

Для испытаний на герметичность следует использовать оборудование, укомплектованное специальными приспособлениями и установочными деталями и калиброванными течами в соответствии с техническими условиями на изделия конкретного вида.

К *газовым методам* относятся методы:
- радиоактивный манометрический,
- масс-спектрометрический,
- галогенный,
- пузырьковый,
- ультразвуковой,
- катарометрический,
- химический,
- инфракрасный,
- параметрический.

Способы реализации методов:
- компрессионный,
- камерный,
- вакуумный,
- накопления при атмосферном давлении,
- опрессовки в камере,
- опрессовки замкнутых оболочек,
- обдува,
- щупа,
- нагреванием,
- обмыливанием.

Радиоактивный метод, осуществляемый компрессионным способом, заключается в том, что изделие заполняют под давлением смесью газов, содержащей радиоактивные изотопы. Негерметичность определяют по показаниям индикатора радиоактивного излучения.

При камерном способе изделие помещают в камеру, заполненную под давлением смесью газов, содержащих радиоактивные изотопы, и выдерживают в течение определенного времени. О негерметичности судят по показаниям индикатора радиоактивного излучения.

Манометрический метод, осуществляемый компрессионным способом, заключается в том, что изделие заполняют пробным газом под давлением, отсекают подачу газа и выдерживают в течение определенного времени. Негерметичность определяют по величине понижения давления в изделии.

Формула для оценки порога чувствительности A при индикации потока газа

$$A = V_{\text{и}} \Delta p_{\min} / t,$$

где $V_{\text{и}}$ - объем изделия; $\Delta p_{\min}$ - нижний предел измерения манометра; t - продолжительность испытания.

При вакуумном способе изделие вакуумируют, затем прекращают откачку газа и выдерживают в течение определенного времени. Негерметичность определяют по повышению давления в изделии.

При камерном способе изделие или его часть помещают в камеру, заполняют его пробным газом под давлением и выдерживают в течение определенного времени.

Порог чувствительности определяют по формуле

$$A = V_{\text{к}} \Delta p_{\min} / t,$$

где $V_{\text{к}}$ - объем камеры.

Масс-спектрометрический метод осуществляется по принципу вакуумной камеры. Изделие помещают в вакуумированную камеру, подают в него пробный газ или смесь газов под давлением, утечку пробного газа в камере регистрируют масс-спектрометрическим течеискателем.

Порог чувствительности течеискателя $5 \cdot 10^{-11} + 5 \cdot 10^{-13}$ м$^3 \cdot$ Па/с.

В случае использования способа накопления при атмосферном давлении изделие помещают в чехол или камеру, заполненную атмосферным воздухом, и подают в него пробный газ или смесь газов под давлением, выдерживают в течение определенного времени, затем в камеру вводят щуп, соединенный с масс-спектрометрическим течеискателем. Негерметичность определяют по показаниям течеискателя.

Пузырьковый метод, реализуемый по компрессионному принципу, заключается в том, что изделие погружают в ванну с индикаторной жидкостью и заполняют его пробным газом под давлением. Негерметичность определяют по появлению пузырьков газа.

Формула для оценки порога чувствительности при индикации потока газа

$$A = \frac{\pi d_{\min}^3}{\tau}\left(\frac{4\sigma}{d_{\min}} + \rho g h + p_a\right),$$

где σ - коэффициент поверхностного натяжения; $d_{\min}$ - наименьший регистрируемый диаметр пузырька; ρ - плотность индикаторной жидкости; g - ускорение свободного падения; h - высота слоя индикаторной жидкости; p_a - атмосферное давление; τ - время от момента образования пузырьков до его отрыва.

Жидкостные методы (гидростатический, люминесцентный, электрический, параметрический) осуществляются следующим образом: компрессионным, внешней опрессовки, капиллярным.

При *гидростатическом методе*, осуществляемом:

1) компрессионным способом, изделие заполняют пробной жидкостью и выдерживают в течение определенного времени. О негерметичности судят по появлению капель или пятен на поверхности изделия или индикаторной массе, нанесенной на эту поверхность;

2) способом внешней опрессовки, изделие погружают в ванну с пробной жидкостью, создают в ванне избыточное давление и выдерживают изделие в течение определенного времени. О негерметичности судят по появлению капель или пятен на внутренней поверхности изделия;

3) капиллярным способом, контролируемые участки оболочки изделия покрывают индикаторной массой, противоположную сторону оболочки смачивают пробной жидкостью. О негерметичности судят по появлению пятен на индикаторной массе.

При *люминесцентном методе*, осуществляемом:

1) компрессионным способом, изделие заполняют под давлением пробной жидкостью, содержащей люминесцирующие (красящие) вещества и выдерживают в течение определенного времени, после чего освещают контролируемые участки ультрафиолетовым (видимым) светом. О негерметичности судят по появлению на поверхности изделия светящихся (цветных) точек или линий;

2) капиллярным способом, на оболочку изделия наносят слой жидкости, содержащей люминесцирующие (красящие) вещества или погружают в эту жидкость, выдерживают в течение определенного времени, после чего освещают противоположную сторону оболочки ультрафиолетовым (видимым) светом. О негерметичности судят по появлению на поверхности светящихся (цветных) точек или линий.

При *электрическом методе* изделие заполняют пробной жидкостью под давлением и выдерживают в течение определенного времени. На контролируемый участок устанавливают два электрода, разделенных пластинкой или лентой из непроводящего пористого материала. О негерметичности судят по появлению тока в цепи, соединяющей электроды.

При *параметрическом методе* изделие помещают в ванну с пробной жидкостью и выдерживают в течение определенного времени. Негерметичность определяют по отклонению функциональных характеристик изделия от их номинальных значений.

Глава 2.5

КЛИМАТИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ

2.5.1. ОСНОВНЫЕ КЛИМАТИЧЕСКИЕ ФАКТОРЫ

Температура - один из наиболее важных климатических факторов. Для различных климатических поясов Земли она колеблется от -75 до +50 °С. Однако большое число изделий работает в условиях нагрева (до 500 °С и выше) или охлаждения (-100 °С и ниже) их элементов. Тепловое воздействие может быть стационарным, периодическим и непериодическим. Установившийся режим теплообмена как внутри изделия, так и изделия с внешней

средой создает стационарное тепловое воздействие. Периодическое тепловое воздействие происходит при повторно-кратковременной работе изделий, суточном изменении температуры окружающей среды, регулярном солнечном облучении и т.д.; непериодическое тепловое воздействие вызывается единичными или сравнительно редкими случайными действиями тепла и холода.

Изменение температуры окружающей среды может изменить физико-химические свойства материалов.

При повышении температуры ускоряется развитие некоторых дефектов в материалах, понижающих прочность соединений и конструкций, ухудшающих функциональные и электрические характеристики изделий. При одновременном воздействии тепла и механических нагрузок многие материалы легко деформируются. У ряда материалов при нагреве происходит химическое разложение и ускоряется старение, что приводит к изменению их характеристик.

В зонах с холодным климатом могут быть резкие колебания температуры изделий, вызываемые их нагревом в период работы и охлаждением после выключения. При резком изменении окружающей температуры на поверхности и внутри изделия конденсируется влага. Периодические расширения и сжатия соприкасающихся металлических и пластмассовых деталей могут вызывать нарушение герметичности изделия и разрушение деталей. Резкие колебания температуры приводят к разрушению паяных, сварных, клепаных и других соединений, отслоению и растрескиванию покрытий, появлению утечки наполнителей.

Радиационный режим характеризуется распределением радиационного баланса, учитывающего приход-расход энергии солнечной радиации. Солнечное излучение достигает земной поверхности в виде прямой и рассеянной радиации. Прямая солнечная радиация зависит от продолжительности солнечного сияния, определяемого широтой места, прозрачности атмосферы и облачности. На значение рассеянной радиации оказывают влияние: высота Солнца над горизонтом, прозрачность и влагосодержание атмосферы, альбедо земной поверхности (альбедо $\alpha = E_{отр} / E_{пад}$ - отношение отраженной энергии $E_{отр}$ к падающей $E_{пад}$; значение альбедо зависит от характера подстилающей поверхности).

На основании многочисленных исследований радиационных условий отдельных пунктов Земли разработаны мировые карты составляющих радиационного баланса. Установлено, что среднемесячные суточные значения суммарной солнечной радиации при безоблачном небе являются сравнительно устойчивыми и в основном определяются широтой места и временем года.

Суточный ход и часовые суммы солнечной радиации зависят от места расположения климатической области и характерных для нее погодных условий.

Влажность - один из наиболее опасных воздействующих климатических факторов. Она ускоряет коррозию материалов, изменяет электрические характеристики диэлектриков, вызывает тепловой распад материалов, гидролиз, рост плесени и многие другие механические повреждения изделий.

Воздействие влажности на изделия существенно зависит от свойств воды, которая может находиться в трех состояниях: жидком, твердом (лед) и газообразном (пар).

В жидком состоянии вода характеризуется следующими основными физическими параметрами: плотностью, вязкостью и поверхностным натяжением. При увеличении температуры от 20 до 100 °С значения всех перечисленных факторов уменьшаются: плотность от 0,998 до 0,985 $г \cdot см^{-3}$; вязкость от 10 до 2,5 Па·с; поверхностное натяжение от $76 \cdot 10^3$ до $60 \cdot 10^3$ $Н \cdot см^{-1}$. Абсолютно чистой воды в природе не бывает. Она представляет собой химически активное соединение, легко вступающее в реакции со многими веществами. По количеству содержащихся примесей различают дождевую воду (осадки), воду рек и озер, морскую и подземную воду.

Основными компонентами воды являются анионы SO_4 (сульфаты), HCO_3 (гидрокарбонаты), Cl^+ (хлор), катионы Ca^{++}, Na^{++} и ионы (NO_3^-, NH_4^-, K^+, Mg^{++}). В состав воды входят углекислые соли кальция $Ca(HCO_3)_2$ и магния $Mg(HCO_3)_2$, которые придают ей временную жесткость, устраняемую кипячением. Постоянную жесткость воде придают сульфаты кальция $CaSO_4$ и магния $MgCO_4$. Кроме того, в состав воды входят углекислые и сернистые соли железа, хлористый натрий, органические и неорганические частицы.

Для **характеристики содержания водяного пара в воздухе и других газах, т.е. оценки влажности**, пользуются следующими основными параметрами:

1. *Абсолютная влажность*, под которой понимают выраженную в граммах массу водяного пара ($M_{в.п}$, г), содержащегося в единице объема (V, $м^3$) влажного воздуха:

$$E = M_{в.п} / V .$$

Сложность определения массы водяного пара приводит к тому, что в большинстве случаев абсолютную влажность воздуха выражают

давлением упругости водяного пара (парциальным давлением $p_{в.п}$), содержащегося в воздухе. Упругость водяного пара выражают в единицах давления (в паскалях, в миллиметрах ртутного столба или в миллибарах).

2. *Влагосодержание* d, т.е. отношение массы водяного пара к массе сухого воздуха (газа), в том же объеме:

$$d = M_{в.п} / M_{с.в}.$$

При этом d пропорционально барометрическому давлению и является функцией только парциального давления пара.

3. *Температура точки росы*, т.е. температура, которую будет иметь влажный воздух (газ), если охладить его до полного насыщения по отношению к плоской поверхности воды.

4. *Относительная влажность* φ - отношение давления $p_{в.п}$ водяного пара, содержащегося в воздухе, к давлению $p_{н.п,t}$ насыщенного пара при данной температуре или отношение действительной влажности E к максимально возможной $E_н$ при данной температуре. Относительная влажность выражается в относительных единицах $(\varphi = E / E_н \le 1)$ или в процентах $(\varphi \le 100\,\%)$. Относительная влажность характеризует степень насыщения газа водяным паром.

Влажность воздуха следует рассматривать во взаимосвязи с другими параметрами, характеризующими состояние газа (давлением, температурой, плотностью). При постоянной относительной влажности абсолютная влажность является функцией температуры.

Атмосферные конденсированные осадки, такие, как роса, иней, изморозь и гололед, оказывают существенное влияние на различные изделия; для оценки атмосферных конденсированных осадков рекомендуется пользоваться такими характеристиками, как толщина отложения, плотность осадков, продолжительность воздействия и ряд других.

Если температура падает ниже точки росы, при которой абсолютная влажность равна 100 %, и содержащийся в воздухе водяной пар достигает состояния насыщения, то выпадают о с а д к и в виде воды, снега, росы, инея, тумана.

Количество осадков измеряют в миллиметрах. Осадкам в 1 мм соответствует 1 л воды, распределенный на поверхности 1 м^2. Свежевыпавший снег занимает, примерно десятикратный объем. 1 см снега соответствует примерно 1 мм осадков. Осадки воздействуют своей механической энергией, понижают температуру изделий, повышают влажность.

Наличие осадков и тумана обычно ухудшает условия работы изделий. Осадки и туман действуют на материалы и изделия так же, как и повышенная влажность воздуха.

Влага, оставшаяся на изделии после дождя, может способствовать коррозии металлов, так как в дождевой воде содержится некоторое количество растворенных кислот и солей.

Резкие перепады температур, возникающие при внезапном выпадении дождя на разогретые солнцем поверхности изделий из керамики или стекла, могут привести к их растрескиванию.

Особенно сильное разрушающее воздействие на изделия могут оказывать м о р с к а я в о д а и м о р с к о й т у м а н, резко ускоряющие коррозию вследствие содержащихся в них солей хлора, магния и других элементов.

Туман с капельками морской воды также усиливает коррозию металлов и может ухудшить электрические свойства изоляционных материалов.

Интенсивно протекает коррозия металлов, вызываемая попаданием на них морской воды в виде брызг, а также при периодическом его погружении в морскую воду. В связи со свободным доступом кислорода воздуха коррозия в этих условиях идет значительно быстрее, чем при постоянном погружении изделия в воду.

Примеси в воздухе. Примеси в воздухе могут вызывать нарушения функционирования электрических элементов, изменять режимы теплообмена, вызывать механические повреждения (пыль, песок), усиливать коррозионные процессы и т.п.

Пыль - смесь твердых частиц в воздухе. Естественная пыль состоит из космической и земной частей. В свободную атмосферу оседает 120 - 150 мм пыли за 100 лет. Техническая пыль образуется при сжигании топлива, износе и обработке деталей. Технической пыли осаждается на два порядка больше, чем естественной. Серьезную проблему представляют для больших городов дымовые газы, содержащие в сравнительно больших количествах серу, из которой образуются в итоге сернистая и серная кислоты, соединения фтора, аммиак, цианистый водород, пары ртути и другие активные вредные химические соединения.

Аэрозоли представляют собой мельчайшие частицы неорганического и органического происхождения с различными физико-химическими свойствами.

Неорганическая пыль, составляющая 65 ... 75 % всех аэрозолей, представляет собой частицы, имеющие форму пластинок, иголочек, круглых чешуек, размеры которых в среднем колеблются от 5 до 200 мкм. В состав

неорганической минеральной пыли в основном входят кварц, полевой шпат, а также иногда слюда, хлориды и долomиты.

Частицы пыли, имеющие острые грани, могут быть абразивными, а иногда и гигроскопичными. В некоторых районах в качестве примесей к песку встречается большое количество водорастворимых солей (хлористых соединений натрия и магния, а также сульфатов натрия, кальция и магния), попадающих в атмосферу из почвы под действием ветра.

Органическая пыль представляет собой споры растений, плесневые грибы, бактерии, частицы волокон шерсти и хлопка, мельчайшие остатки насекомых и растений. В городах органическая пыль содержит около 40 % веществ, состоящих из сажи и смол. Особенностью органической пыли является ее способность при наличии влаги служить хорошей питательной средой для развития плесени.

Концентрация аэрозолей в единице воздуха убывает с высотой по экспоненциальному закону.

Помимо пыли в воздухе содержатся *дым* и *индустриальные газы*. Мельчайшие частицы дыма способны достигать высоты более 5.000 м и перемещаться на большие расстояния. Дымовые газы индустриальных предприятий содержат углерод, смолы и значительный процент золы (до 90 %). Наиболее вредными и распространенными составными частями дымовых газов являются сера и ее соединения (в частности, сернистый ангидрид SO_2). В воздухе сернистый ангидрид окисляется, превращаясь в серный ангидрид SO_3, который, соединяясь с водой, образует сернистую кислоту H_2SO_3 и серную кислоту H_2SO_4. Возможно образование и других газообразных соединений, обладающих разрушающим действием. Такими свойствами характеризуются, например, угарный газ CO, ненасыщенные углеводороды (этилен C_2H_4, ацетилен C_2H_2 и др.), хлор Cl_2, аммиак NH_3, соединения фтора, мышьяка, паров ртути и целый ряд других. В индустриальных районах дымовые газы могут оседать в виде твердых частиц, а также, растворяясь в воде, выпадать с осадками.

Солнечное излучение представляет собой электромагнитные волны с длинами 0,2 - 5 мкм. На ультрафиолетовую область (длина волны до 0,4 мкм) приходится 9 % энергии, на видимую (длина волны 0,4 - 0,7 мкм) - 41 % и на инфракрасную область с длинами волн 0,72 мкм - 50 % солнечной энергии. Влияние солнечного излучения на изделие заключается в его нагреве и химическом разложении некоторых органических материалов. Наибольшее воздействие оказывают ультрафиолетовые лучи, которые обладают высокой энергией. Под действием этих лучей происходит поверхностное окисление материалов, частичное разложение полимеров, содержащих хлор, расщепление органических молекул, быстрое старение пластмасс, изменение важнейших органических компонентов и цвета у некоторых типов термореактивных пластмасс, образование корки на поверхности резины и ее растрескивание.

Атмосферное давление создается массой воздуха в данном месте. Колебания атмосферного давления вследствие изменения погоды ± 7 %, а при тропических бурях превышают 10 %. Ряд изделий по своему функциональному назначению может работать в условиях резко повышенного и резко пониженного атмосферного давления, что следует учитывать при проведении соответствующих испытаний.

Изменение давления вызывает опасность пробоев воздушных промежутков электрических установок в связи с изменением диэлектрической проницаемости воздуха, может изменять диаграмму направленности излучения электромагнитных антенн, влияет на режим теплообмена изделия, нарушает в ряде случаев герметичность изделий и расположение подвижных деталей.

Выше 11 км располагается так называемая *стандартная атмосфера*, в пределах которой температура считается постоянной.

Плотность атмосферы $N_м$ характеризуется числом молекул, содержащихся в 1 $см^3$ воздуха на данной высоте над уровнем моря. Она пропорциональна давлению лежащего выше слоя. Если предположить состав атмосферы однородным, а температуру постоянной, то плотность и давление будут равномерно изменяться с высотой. При этом давление определяется по барометрической формуле

$$p = p_0 \, e^{-\frac{Mgh}{RT}},$$

где p_0 - давление вблизи поверхности Земли; M - масса грамм-молекулы газа; g - ускорение свободного падения; h - высота над поверхностью моря; $R = 8{,}32$ Дж/(град · моль) - универсальная газовая постоянная; T - абсолютная температура.

Плотность атмосферы на данной высоте

$$N_м = P / (kT),$$

где $k = 1{,}38 \cdot 10^{-23}$ Дж/град - постоянная Больцмана.

В действительности состав воздуха и температура изменяются с высотой, что приводит к отклонению распределения плотности и давления от определяемого по формулам. При подъеме на первые 1 000 мм в пределах тропосферы давление убывает на 133,32 Па на

2.5.1. Числовые значения барометрического давления

Высота над уровнем моря, м	Давление		Высота над уровнем моря, м	Давление	
	мм рт. ст.	кПа		мм рт. ст.	КПа
- 1 000	854,58	114,0	9 000	230,46	30,8
- 100	769,06	103,0	10 000	198,16	26;4
0	760,00	101,5	11 000	169,63	22,6
50	755,50	101,0	12 000	144,87	19,3
100	751,03	100,0	13 000	123,72	16,5
200	742,14	98,6	14 000	105,67	14,1
500	716,00	95,5	15 000	90,24	12,0
1 000	674,08	89,6	16 000	77,07	12,9
2 000	596,20	79,4	17 000	65,82	8,8
3 000	525,77	70,0	18 000	56,21	7,47
4 000	462,24	61,5	19 000	48,01	6,40
5 000	405,07	54,0	20 000	41,00	5,47
6 000	353,76	47,2	25 000	18,63	2,48
7 000	307,85	42,1	30 000	8,46	1,13
8 000	266,89	35,5	40 000	2,15	0,29

каждые 10 м. Дальнейшее увеличение высоты приводит к убыванию давлений примерно в геометрической прогрессии. Числовые значения барометрического давления, принятые за международную стандартную атмосферу, приведены в табл. 2.5.1.

2.5.2. ИСПЫТАНИЯ НА ТЕПЛОУСТОЙЧИВОСТЬ

2.5.2.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Повышение температуры изделий происходит под воздействием *внешних* и *внутренних факторов*, причем это воздействие может быть непрерывным (стационарным), периодическим или апериодическим.

Действие внешних факторов определяется климатическими условиями, местом установки (на самолете, корабле, автомобиле и т.д.) и назначением изделия. Климатические условия характеризуются, в частности, температурой окружающей среды и интенсивностью солнечной радиации, которые могут изменяться в широких пределах. Указанные факторы определяют *предельную температуру нагрева*, по достижении которой поверхность изделий начинает переизлучать принятую теплоту.

Действие внутренних факторов определяется схемой и конструкцией изделия.

Непрерывному тепловому воздействию подвергаются изделия, эксплуатирующиеся или хранящиеся в стационарных температурных условиях (в помещении). Длительность установления стационарного режима определяется назначением изделия и принятым схемно-конструкторским решением и составляет 0,5 ... 2, 5 ч.

Периодическому тепловому воздействию подвергаются транспортируемые изделия или изделия, эксплуатируемые на открытом воздухе. Такой вид воздействия связан с быстрыми изменениями условий эксплуатации (взлет и посадка самолета, работа в полевых условиях и т.д.), а также при суточном изменении температуры (циклическое воздействие температуры). Периодические изменения температуры приводят к многократным деформациям различных элементов.

Апериодическому тепловому воздействию подвергаются изделия, устанавливаемые на ракетах (в моменты запуска и вхождения в плотные слои атмосферы) и в ряде других случаев. Резкое изменение температуры может приводить к внезапному возникновению отказов, вызванному изменением электрофизических, физико-химических и механических свойств материалов и элементов.

Таким образом, повышение температуры изделий при эксплуатации, хранении и транспортировании может вызывать появление

постепенных и внезапных отказов изделий. Поскольку повышение температуры происходит под воздействием внешних и внутренних факторов, то важное значение приобретает *состояние изделия*. Состояние изделия определяется тем, является ли оно *тепловыделяющим* (*теплорассеивающим*) или *нетепловыделяющим* (*нетеплорассеивающим*). Температура тепловыделяющего изделия зависит не только от условий окружающей среды, но и от количества рассеиваемой им теплоты, что следует учитывать при испытании.

Воспроизведение условий испытаний, близких к реальным, возможно в климатических испытательных камерах, габаритные размеры которых во много раз превышают габаритные размеры изделия. В этом случае в камере создаются условия, примерно аналогичные свободному обмену воздуха в пространстве. Однако реализация таких испытаний весьма затруднительна, поэтому широкое распространение получили *камеры с принудительной циркуляцией воздуха*, что существенно облегчает установление и поддержание определенного температурного режима.

Нагрев (термостатирование) камер может осуществляться двумя основными способами: прямым (непосредственным) и косвенным.

Прямой нагрев воздуха в камере может осуществляться за счет расположения электронагревателей за внутренней стенкой (за рубашкой) камеры, окружающей ее рабочий объем со всех сторон (рис. 2.5.1), а также за счет принудительной циркуляции воздуха, предварительно нагретого электронагревателями, расположенными внутри камеры со специальным экраном (рис. 2.5.2).

В первом случае обеспечиваются равномерность пространственного распределения температуры и высокая ее стабильность при сравнительно небольшой скорости движения воздуха, что создает условия, близкие к свободному обмену воздуха в камере. Высокая равномерность нагрева обеспечивается за счет большой поверхности нагрева и достаточно большой мощности электронагревательных элементов, обеспечивающих получение высокой температуры.

К достоинствам данных камер можно отнести минимальное время достижения предельных температур и восстановления температурного режима камеры после помещения в нее испытуемых изделий. Однако необходимость при большом объеме иметь большую мощность нагревателей ограничивает применение данного способа нагрева. В связи с этим получили применение камеры с принудительной циркуляцией воздуха.

Осуществление прямого нагрева за счет циркуляции воздуха, предварительно нагретого электронагревателями, расположенными внутри камеры, несколько упрощает конструкцию камеры. В этом случае для получения однородного потока воздуха вентилятор, создающий повышенное давление, размещают в форкамере, откуда выход воздуха может осуществляться через фильтр (например, из стекловолокна).

Практически достаточная для всех случаев скорость воздушного потока составляет 0,5 м · с$^{-1}$. Однако при одновременном испытании группы изделий в одной камере следует уделять большее внимание выбору скорости и направления воздушного потока.

К недостаткам данной конструкции камеры можно отнести большую продолжительность нагрева и большой потребляемый объем воздуха.

Существуют камеры, сочетающие циркуляцию и нагрев воздуха в пространстве за рубашкой камеры.

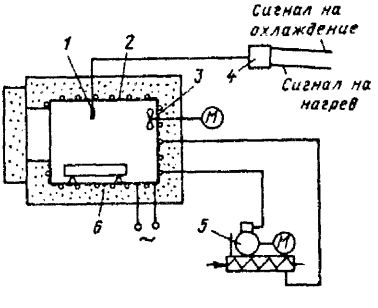


Рис. 2.5.1. Испытательная камера тепла и холода с прямым нагревом (охлаждением) электронагревателями (испарителями), размещенными за внутренней металлической стенкой (рубашкой) камеры:
1 - контрольный датчик температуры; *2* - рубашка камеры; *3* - вентилятор; *4* - регулятор температуры; *5* - холодильная установка; *6* - электронагреватель

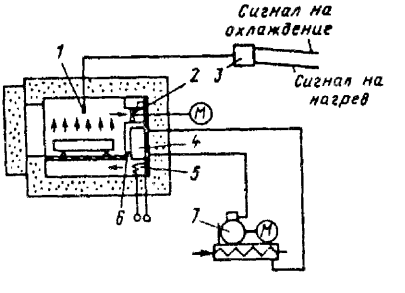


Рис. 2.5.2. Испытательная камера тепла и холода с прямым нагревом и охлаждением за счет циркуляции воздуха:
1 - контрольный датчик температуры; *2* - вентилятор; *3* - регулятор температуры; *4* - охладитель (испаритель); *5* - электронагреватель; *6* - канал циркуляции воздуха; *7* - холодильная установка

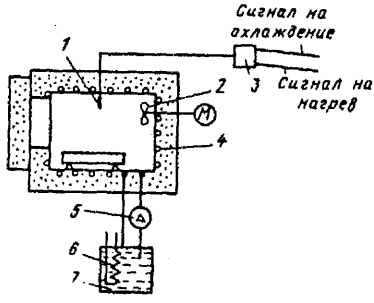


Рис. 2.5.3. Испытательная камера тепла с косвенным нагревом за счет циркуляции теплоносителя в "зарубашечном" пространстве:
1 - контрольный датчик температуры; *2* - вентилятор; *3* - регулятор температуры; *4* - нагреватель; *5* - циркуляционный насос; *6* - нагреватель; *7* - термостат (емкость с теплоносителем)

К преимуществам камер с прямым способом нагрева можно отнести их относительную простоту и невысокую стоимость. Однако у них имеются и существенные недостатки:

- наличие больших колебаний температуры за счет ее скачков при включении и выключении нагрева регулятором;
- необходимость частых включений, вызванных низкой теплоемкостью воздуха;
- трудность точной установки заданной температуры.

В *камере с косвенным нагревом* (рис. 2.5.3) (термостатированием) для осуществления интенсивного теплообмена, при котором происходит передача тепла от одной среды к другой, используется специальная промежуточная среда, обеспечивающая перенос теплоты от нагревателя к нагреваемому телу или от охлаждаемого тела к охладителю, называемая теплоносителем (в камерах теплоты - теплоносителем, а в камерах холода - холодоносителем).

Термоносители могут быть жидкими и газообразными веществами. В испытательных камерах в основном применяются жидкие термоносители. В камерах теплоты или комбинированных камерах нагреватель располагается в теплообменном аппарате - термостате, в котором происходит нагрев термоносителя.

Термостат представляет собой бак с расположенным в нем радиатором нагревателя. Применяемый способ изготовления внутренних стенок камер с косвенным нагревом обеспечивает образование в них системы каналов, служащих теплообменником для термоносителя, что обеспечивает хорошее распределение температуры в рабочем объеме камеры. Наружную поверхность стенок камеры часто полируют.

Для поддержания определенного температурного режима внутри камеры и для исключения влияния окружающей температуры на ее работу между стенками камеры располагают термоизоляционный материал с малым коэффициентом теплопроводности ($\lambda \approx 0{,}035 + 0{,}14$ Вт·м$^{-1}$·К$^{-1}$) и малой плотностью ($\rho = 25 + 300$ кг·м$^{-3}$).

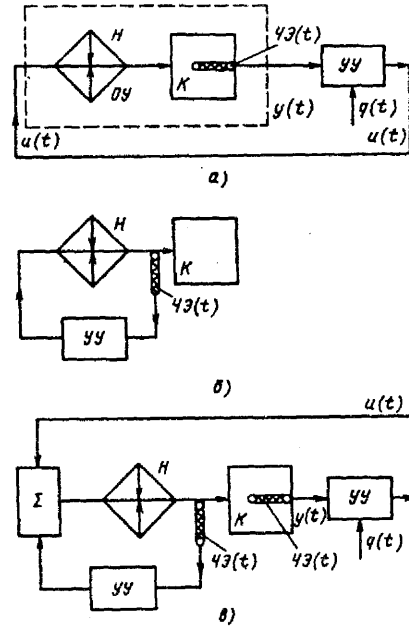


Рис. 2.5.4. Структурные схемы САР температуры воздуха в испытательной камере:
а - замкнутая; *б* - разомкнутая; *в* - комбинированная с алгебраическим суммированием

Принудительная циркуляция воздуха в камере зависит от ее аэродинамики, определяемой местом расположения вентилятора и конструкцией воздуховодов.

В конструкциях камер предусматривается внутреннее освещение, специальные проходные отверстия для подведения по проводам (кабелям) сигналов и питающих напряжений к испытуемым изделиям.

В камере размещаются чувствительные элементы (ЧЭ) - термопреобразователи, сигналы с которых подаются к системе автоматического регулирования (САР) (рис. 2.5.4). САР температуры воздуха в основном состоит из объекта управления (ОУ) и управляющего устройства (УУ).

Возможны три основных типа САР температуры воздуха в камере:

при установке контрольного термопреобразователя (чувствительного элемента ЧЭ) воздуха в камере (после теплообменника) - *замкнутая система* регулирования (рис. 2.5.4, *а*);

при установке контрольного термопреобразователя в воздуховоде - *разомкнутая систе-*

ма регулирования, так как изменение температуры в камере не вызывает изменений в управляющем устройстве (рис. 2.5.4, *б*);

при установке двух контрольных термопреобразователей в местах, соответствующих указанным в рассмотренных выше системах, - *комбинированная система с последующим алгебраическим суммированием воздействий* (рис. 2.5.4, *в*).

2.5.2.2. СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА В КАМЕРАХ

Температура воздуха в испытательных камерах измеряется с помощью термометров. Она характеризует как качественную, так и количественную сторону процесса теплообмена. Непосредственно измерить температуру нельзя, но можно определить ее значение по однозначному изменению некоторых физических параметров тела. Такими параметрами, зависящими от температуры, являются, например, объем, длина, электрическое сопротивление, термоэлектродвижущая сила, энергетическая яркость излучения и др.

Температуру измеряют с помощью термоизмерительных преобразователей (датчиков), которые получили название *термометров*. Термометры предназначены для выработки сигнала в форме, удобной для восприятия наблюдателем, автоматической обработки, передачи и использования в автоматических системах управления.

Термопреобразователи классифицируются по ряду признаков.

1. *По физическому явлению, положенному в основе принципа действия*, различают термометры расширения, термометры сопротивления, термоэлектрические термометры, пирометры и т.д.

2. *По связи с объектом измерения* термопреобразователи могут быть контактными и бесконтактными.

3. *По классу точности* термопреобразователи определяются пределами допустимых основных и дополнительных погрешностей, а также другими влияющими на точность измерения свойствами, значения которых устанавливаются специальными стандартами.

2.5.2.3. МЕТОДЫ ИСПЫТАНИЙ НА ВОЗДЕЙСТВИЕ ПОВЫШЕННОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ

Целью испытаний является определение пригодности изделий к эксплуатации или хранению при воздействии повышенной температуры. В условиях воздействия повышенной температуры и (или) после пребывания в указанных условиях проводят проверку значений параметров и (или) внешнего вида изделий для установления их соответствия требованиям. Метод испытаний зависит от того, является ли изделие тепловыводящим или нет, а также от того, находится ли оно под электрической нагрузкой. Существуют определенные различия в методах и температурных режимах испытаний радиоэлектронной аппаратуры (средств измерений) и ее элементов.

Испытания изделий проводят в термокамерах, обеспечивающих воспроизведение температурных режимов, предусмотренных НТД. В соответствии с требованиями стандартов при испытаниях рекомендуется выбирать значения повышенных температур из следующего ряда: 200, 175, 155, 125, 100, 85, 70, 55, 40, 30 °С с допустимым отклонением ± 2 °С.

При значениях температур выше 200 °С отклонение температуры от нормированных значений также не должно превышать ± 2 %.

Продолжительность выдержки при испытаниях элементов РЭА должна составлять 16 ч, а при испытаниях аппаратуры на хранение - 96 ч и при испытаниях на функционирование - не менее 2 ч. Во время данных испытаний абсолютная влажность воздуха в камере не должна превышать значения, соответствующего нормальным климатическим условиям.

В процессе установления (повышения) в камере заданной температуры скорость ее изменения не должна превышать 1 °С · мин$^{-1}$, причем берется среднее значение температуры за период не более 5 мин.

Метод испытаний тепловыводящих и нетепловыводящих изделий без электрической нагрузки. После выдержки изделия в нормальных климатических условиях проводят его осмотр и первоначальные измерения значений параметров. Изделие помещают в камеру, в которой устанавливают заданную повышенную температуру. В зависимости от требований стандартов и ТУ повышенная температура в камере может быть установлена заранее или в процессе последующего нагрева. Продолжительность выдержки изделия при заданной температуре определяется с момента установления стационарного температурного режима в камере. После достижения теплового равновесия изделие выдерживают в камере при заданной температуре в течение установленного времени. По окончании выдержки проводят заключительные измерения значений параметров изделий.

Указанные измерения можно проводить непосредственно в камере, а если это невозможно, то изделие извлекают из камеры и выполняют измерения. В ряде случаев оговаривается время, в течение которого должны быть проведены указанные измерения, или температура изделия, при которой они должны быть проведены. Возможны случаи, когда осмотр и измерение значений параметров осуществляют после выдержки изделия в тече-

ние 1 ... 2 ч в нормальных атмосферных условиях восстановления.

Испытания тепловыделяющих изделий без электрической нагрузки проводят при несколько другом порядке установки температуры в камере. В приведенную методику вводят изменения, связанные с тем, что температура контролируемого участка (узла) изделия определяется не только температурой окружающей среды, но и теплотой, выделяемой изделием. В связи с этим при испытаниях в камере устанавливают температуру, которая была бы у контролируемого участка при условии тепловыделения испытуемого изделия, находящегося в условиях свободного обмена воздуха при заданной температуре.

В качестве контролируемого участка изделия выбирают участок с наибольшей температурой или с температурой, наиболее критичной для работоспособности изделия. Температуру контролируемого участка изделия определяют путем предварительного испытания изделия. В камеру, имитирующую условия свободного обмена воздуха, помещают одно или несколько изделий и повышают температуру до заданного значения. Устанавливают режим, обеспечивающий номинальную или максимально допустимую электрическую нагрузку. В стационарном тепловом состоянии изделия определяют контролируемый участок.

Реализация указанных методов измерений температуры встречает определенные трудности, поэтому если повышенная рабочая температура изделия не превышает 100 °С и температура перегрева изделия, равная разности температур контролируемого участка (узла) изделия и окружающей среды, не превышает 80 °С, то температуру контролируемого участка можно определить в нормальных климатических условиях. Изделие устанавливают в помещении (вне камеры), исключающем воздействие солнечного излучения и сквозняков, подают электрическую нагрузку и после достижения предполагаемых критических точек определяют контролируемый участок. Для измерения температуры следует воспользоваться переносным термометром. Причем в случае, если габаритные размеры и масса изделия малы, целесообразно воспользоваться бесконтактным термоизмерительным прибором.

Испытания тепловыделяющих изделий под электрической нагрузкой могут проводиться в двух режимах: при контроле температуры в камере или на поверхности изделия. Указанные испытания могут осуществляться в камере, позволяющей имитировать условия свободного обмена воздуха, или в камере с принудительной циркуляцией воздуха. Известно, что воспроизведение условий свободного обмена воздуха в камере при испытаниях весьма затруднительно, так как даже в очень больших камерах циркуляция воздуха и распределение температуры вокруг изделия не соответствуют условиям реальной эксплуатации. Однако экспериментально установлено, что при обеспечении выполнения определенных ограничений возможно воспроизведение в камере условий, близких к условиям свободного обмена воздуха.

В первом случае указанные ограничения заключаются в том, что полезный объем камеры после размещения в нем испытуемого изделия должен обеспечить указанные в НТД минимально допустимые расстояния между испытуемыми изделиями, а также между изделиями и стенками камеры.

Во втором случае ограничения заключаются в том, что температура перегрева, определяемая как разность температур контролируемого участка (узла) изделия и окружающей среды, определенная в нормальных климатических условиях, не превышает 25 °С и разность между указанной в НТД на изделие повышенной рабочей температурой и температурой нормальных климатических условий испытаний не превышает 35 °С.

Для изделий с объемом не более 10^{-3} м^3, у которых рассеиваемая мощность не превышает 50 Вт, рекомендуемое минимально допустимое расстояние между поверхностью изделия и стенкой камеры должно составлять 0,1 м. Для изделий того же объема, но с большей рассеиваемой мощностью (50 ... 100 Вт) рекомендуемое минимально допустимое расстояние между любой поверхностью изделия и соответствующей стенкой камеры должно быть не менее 0,2 м.

Если размеры камеры по сравнению с размерами изделия недостаточно велики и теплорассеяние изделия нарушает тепловой режим камеры, то применяют камеры с принудительной циркуляцией воздуха.

При скорости воздушного потока, не превышающей 2 м · с$^{-1}$, распределение температуры по испытуемому изделию зависит не только от системы нагрева, но и от скорости воздушного потока, а также от расположения изделия по отношению к направлению циркуляции воздуха. В связи с этим целесообразно помимо контроля температуры камеры, осуществляемого термодатчиками, входящими в ее конструкцию, помещать в камеру измерительные термодатчики. Их располагают в точках на условной горизонтальной плоскости, находящейся ниже изделия на расстоянии, не превышающем 5 см, на середине расстояния между изделием и боковой стенкой камеры, что уменьшает влияние на них восходящих конвективных потоков. Минимально допустимое расстояние между тепловыводящими изделиями и стенками камеры выбирают в соот-

ветствии с изложенными выше рекомендациями.

Определение минимально допустимого расстояния между тепловыделяющими изделиями основано на учете зависимости теплообмена от одновременно протекающих процессов конвекции и теплового излучения. Рекомендуется следующая методика определения указанного расстояния. Изделия устанавливают в камеру, как при испытаниях. Включают принудительную циркуляцию воздуха без системы обогрева, если это позволяет конструкция камеры. Включают питание и поддерживают изделия до установления стационарного теплового режима, при котором температура поверхности изделий остается неизменной. Измеряют температуру поверхности изделий в идентичных точках. Изменяя расстояния между изделиями, измеряют разность температур между идентичными точками на поверхностях изделий. За минимально допустимое расстояние между тепловыделяющими изделиями принимают расстояние, при котором эта разность температур не превышает 5 °С .

Особенностью метода испытаний тепловыделяющих изделий под электрической нагрузкой в камере с принудительной циркуляцией воздуха является необходимость измерения температуры в определенных точках на поверхности изделия, а иногда даже внутри него. В связи с этим оказывается целесообразным, во-первых, устанавливать в камере измерительные термопреобразователи на расстоянии 5 см от контрольного участка (узла) изделия, во-вторых, осуществлять такую регулировку температуры в камере, при которой рабочая температура контролируемого участка изделия определяется совместным нагревом, вызванным работой камеры и электрической нагрузкой изделия.

Если в изделиях имеются узлы, которые при испытании на воздействие повышенной рабочей температуры приобретают температуру ниже, чем некоторая предельная опасная для них температура, то проводят испытания на воздействие повышенной предельной температуры среды. Указанные испытания осуществляют в камере под электрической нагрузкой или без нее по рассмотренным выше методикам, проводя нагрев до установления предельных температур, предусмотренных НТД. Выполнение указанных испытаний позволяет проверить способность изделия и определенных узлов выдерживать воздействие опасной для них повышенной предельной температуры.

Особенностью метода испытаний является то, что после достижения заданной предельной температуры изделие выдерживают при этой температуре до достижения теплового равновесия в течение времени, установленного в НТД, но не менее 30 мин.

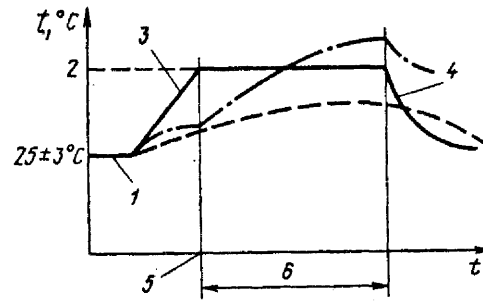


Рис. 2.5.5. График изменения температуры во времени: *1* - начальная температура; *2* - температура испытания; *3* - скорость изменения температуры 0,7 ... 1 °С /мин; *4* - скорость изменения температуры 0,5 °С /мин; *5* - момент включения изделия; *6* - длительность выдержки; температура: - - - - нетепловыделяющего изделия; — · — тепловыделяющего изделия; ——— в камере

При испытании нетепловыделяющих изделий рекомендуется задавать высокую скорость воздуха в испытательной камере (не менее 2 $м \cdot с^{-1}$), что вызывает повышение (понижение) температуры изделия.

При испытании тепловыделяющих изделий рекомендуется снижать скорость воздуха или, если это возможно, осуществлять испытания в условиях свободного обмена воздуха, что приведет к повышению температуры самых горячих точек испытуемого изделия.

Для достижения воспроизводимости результатов испытаний рекомендуется пользоваться определенным графиком изменения температуры во времени (рис. 2.5.5). Данный график отличается от рассмотренных выше более узким диапазоном начальной температуры (25 ± 3 °С), определенной скоростью изменения температуры воздуха в камере в период установления температуры испытания, длительностью выдержки, отсчитываемой с момента достижения в камере заданного значения температуры воздуха.

2.5.3. ИСПЫТАНИЯ НА ВОЗДЕЙСТВИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ

2.5.3.1. УСЛОВИЯ ИСПЫТАНИЙ И ПРИМЕНЯЕМОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

Результаты испытаний различных изделий на изменение температуры существенно зависят от таких свойств изделий, как теплоемкость, теплопроводность и тепловое расширение; от применяемых в их конструкциях материалов; от системы охлаждения, опреде-

ляющей распределение температуры внутри изделия и ряда других факторов.

Основными параметрами, характеризующими процесс испытаний на изменение температуры, являются: исходная (нормальная) температура, повышенная и пониженная температура, скорость изменения температуры, длительность выдержки при различных температурах, интервал между выдержками при двух крайних температурах, число циклов. Под *циклом испытания* понимают выдержку от исходной температуры до первой испытательной температуры, затем до второй испытательной температуры и снова до исходной температуры.

Одним из важных параметров является *длительность выдержки*, которую следует связывать с температурой постоянной времени изделия или входящих в него элементов (деталей).

Температурная постоянная времени изделия зависит от свойств и подвижности окружающей среды. При этом для некоторых конструкций изделий температурные постоянные времени наружных и внутренних деталей будут различными. В связи с этим следует определять температурную постоянную времени деталей, расположенных на большом расстоянии от поверхности изделия, на нагрев которых требуется затрачивать больше времени, а также деталей, наиболее критичных к изменению температуры.

Для определения температурной постоянной времени необходимо снять зависимость изменения температуры изделия от изменения температуры окружающей среды во времени. Критерием прекращения снятия указанной характеристики является достижение стационарной температуры изделием.

Значение температурной постоянной времени τ определяется точкой пересечений касательной к экспериментально определенной характеристике, проведенной из точки начального значения температуры $t_{н0}$, с линиями, ограничивающими диапазон температур испытания $t_в$ и $t_н$. При этом будут получены два значения постоянной времени τ_1 и τ_2 соответственно для повышенной и пониженной температур (рис. 2.5.6).

Таким образом, при выборе длительности выдержки t_1 и t_2 соответственно $t_в$ и $t_н$ исходят из следующих условий: если d - разность между температурами испытательной среды и изделием меньше $0{,}01D$ - разности между повышенной ($t_в$) и пониженной ($t_н$) температурами испытаний, то длительность выдержки $t \geq 5\tau$, а если $d < 0{,}1D$, то $t \geq 2{,}5\tau$.

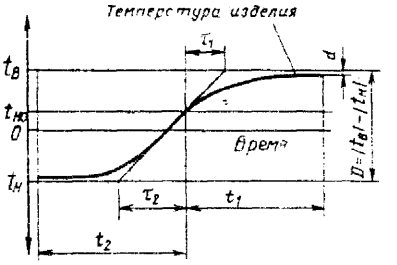


Рис. 2.5.6. Зависимость изменения температуры изделия от времени

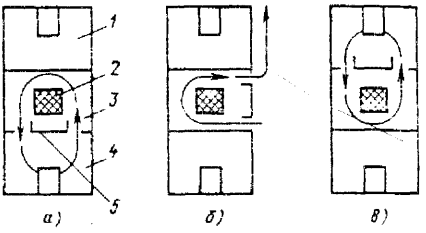


Рис. 2.5.7. Схема работы однокамерной установки с заслонкой:
1 - камера тепла; *2* - корзина для изделий; *3* - зона испытаний; *4* - камера холода; *5* - заслонка

Воспроизведение условий испытаний на воздействие изменения температуры осуществляют с помощью различных испытательный установок.

Для испытания изделий на постепенное изменение температуры находят применение комбинированные термокамеры (тепла и холода) с прямым (непосредственным) и с косвенным термостатированием. Лучшие результаты дает применение камер с косвенным термостатированием, оснащенных аналоговыми или цифровыми средствами автоматического регулирования температуры.

Для испытаний изделий на тепловой удар находят применение однокамерные и двухкамерные установки. Однокамерные установки обеспечивают поочередную подачу в зону испытаний камеры нагретого или охлажденного воздуха с помощью специальной заслонки или цилиндрической вращающейся камеры. О д н о к а м е р н а я у с т а н о в к а с з а с л о н к о й (рис. 2.5.7) может работать в двух- и в трехзонном режимах.

В о д н о к а м е р н о й у с т а н о в к е с в р а щ а ю щ е й с я ц и л и н д р и ч е с к о й к а м е р о й в зависимости от ее угла поворота зона испытаний соединяется с источниками нагретого или охлажденного воздуха (рис. 2.5.8). При этом также возможно осуществление двух- или трехзонного режима работы.

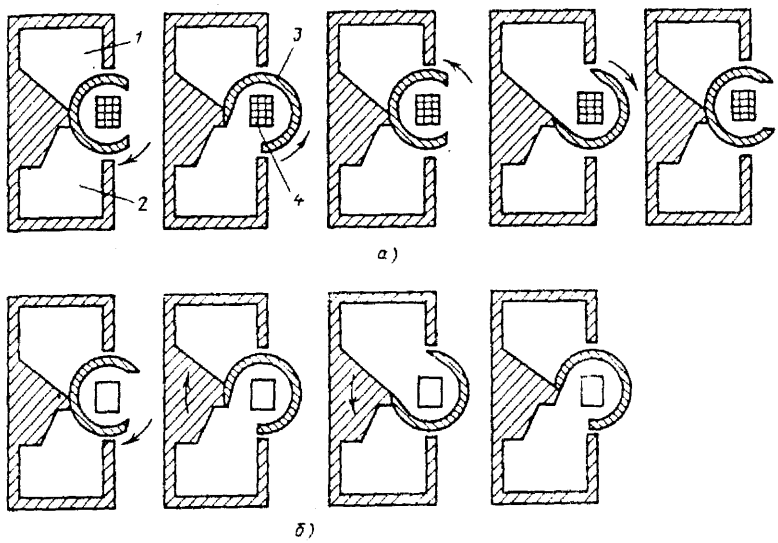


Рис. 2.5.8. Схема работы однокамерной установки с вращающейся цилиндрической камерой:
а - трехзонный режим; *б* - двухзонный режим;
1 - камера тепла; *2* - камера холода; *3* - цилиндрическая камера; *4* - корзина для изделий

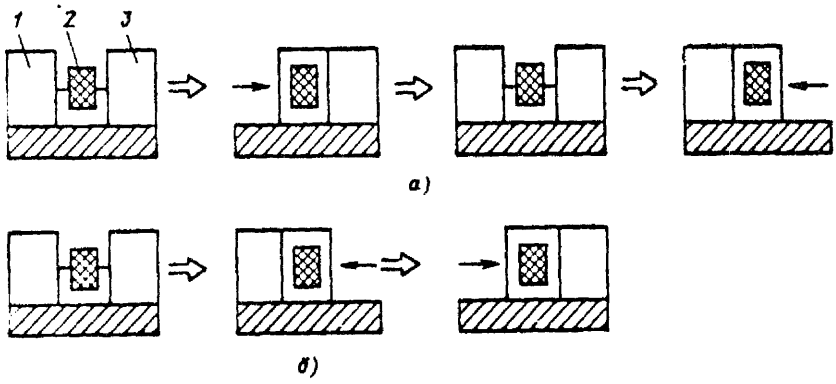


Рис. 2.5.9. Схема работы двухкамерной установки с горизонтальным перемещением камер:
а - трехзонный режим; *б* - двухзонный режим;
1 - камера холода; *2* - полки с корзинами для изделий; *3* - камера тепла

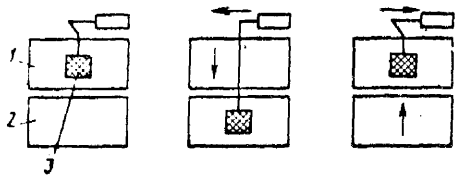


Рис. 2.5.10. Двухкамерная установка с вертикальным перемещением испытуемого изделия:
1 - камера тепла; *2* - камера холода;
3 - корзина для испытуемых изделий

Двухкамерные установки для испытаний на тепловой удар различаются в зависимости от направления перемещения камер на горизонтальные и вертикальные.

Двухкамерная установка с горизонтальным перемещением камер тепла и холода (рис. 2.5.9) отличается от рассмотренных тем, что камеры тепла и холода подводятся к стационарно расположенным в специальной корзине изделиям. Возможно осуществление двух- и трехзонного режимов испытаний.

Двухкамерная установка с вертикальным перемещением корзины с испытуемым изделием из камеры холода в камеру тепла обеспечивает возможность двухзонного режима испытаний (рис. 2.5.10).

Для компенсации повышения температуры в камере холода за счет накопления теплоты в изделиях, подвергавшихся в предыдущем цикле нагреву, осуществляют интенсификацию охлаждения. Резкое охлаждение может достигаться впрыскиванием с помощью инжекторов жидких хладагентов (азота или углекислоты); применением аккумулятора холода, накапливающего холод, вырабатываемый холодильной машиной. В момент перехода к циклу испытаний на воздействие пониженной температуры включаются синхронно аккумулятор холода и холодильная машина, которые охлаждают камеру за минимально короткое время.

Установка обеспечивает воспроизведение температур при нагреве в диапазоне +60 ... +200 °С и при охлаждении в диапазоне –10 ... – 65 °С. Время выхода на режим от комнатной температуры до +200 °С составляет 15 мин, а до –65 °С - 90 мин. Наличие в камерах вентиляторов обеспечивает принудительную циркуляцию воздуха. Нагрев камеры тепла осуществляется ленточными или проволочно-ленточными электронагревателями.

Охлаждение в камере холода достигается с помощью каскадной паровой холодильной машины. В камерах холода применяются испарители панельного типа, выполняющие функции внутренних стенок камеры. Имеющийся в установках вентилятор обеспечивает быстрое восстановление нормальных условий при воздействии нормальной температуры в трехзонном режиме. Предусмотрен автоматический удалитель инея.

При проведении испытаний в рассмотренных камерах испытуемое изделие помещается в специальную стальную корзину, которая остается неподвижной в процессе испытаний, что позволяет испытывать изделия под электрической нагрузкой. Для обеспечения поддержания заданного температурного режима с минимальными колебаниями температуры тормодатчик устанавливается непосредственно в зоне испытаний, что позволяет повысить качество контроля и слежения за температурой. Быстрое установление повышенной температуры в зоне испытаний достигается автоматическим дефростером, являющимся устройством, обеспечивающим дополнительный нагрев и циркуляцию воздуха.

Для испытания изделий на резкое изменение температур находит применение установка с двумя ваннами (рис. 2.5.11), заполненными жидким термоносителем (хлорированное или силиконовое масло). Использование жидкой термопередающей среды позволяет обеспечить более сильное температурное воздействие на испытуемое изделие.

Особенностью установки является наличие специального, регулируемого во времени механизма с поворотным устройством, обеспечивающим плавное перемещение двух корзин из коррозионно-стойкой стали с изделиями из одной ванны в другую. Обеспечение равномерности температуры в ваннах достигается перемешиванием жидкости пропеллерной мешалкой. Охлаждение от 0 до -60 °С осуществляется паровой холодильной машиной с змеевиковым испарителем, охватывающим ванну холода. В качестве термодатчика используется медно-константановая термопара. Нагрев от +50 до +200 °С осуществляется электронагревателем в специальной оболочке. Для измерения температуры используется хромель-алюмелевая термопара.

2.5.3.2. МЕТОДЫ ИСПЫТАНИЙ

Испытания на воздействие изменения температуры окружающей среды проводят для определения способности изделий сохранять свой внешний вид и значения параметров в пределах установленных норм после воздействия изменения температуры среды в пределах значений, установленных в НТД на изделие. Следует различать три разновидности данного вида испытаний: на постепенное изменение температуры или на циклическое изменение температуры, на быстрое изменение температуры или на тепловой удар и на резкое изменение температуры.

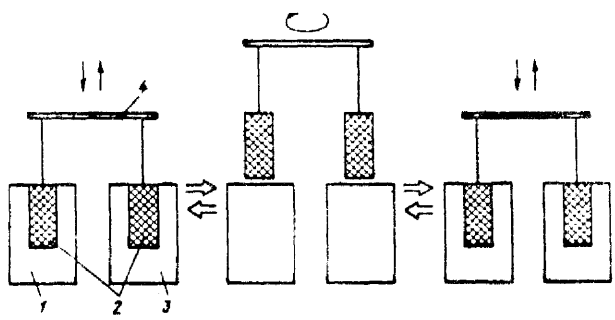


Рис. 2.5.11. Схема работы установки с двумя ваннами:
1 - ванна холода; *2* - корзина для изделий; *3* - ванна тепла; *4* - поворотное устройство

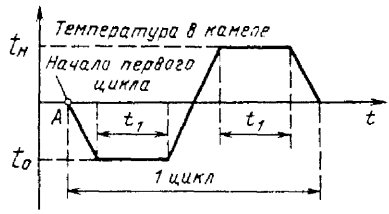


Рис. 2.5.12. График испытательного цикла постепенного изменения температуры в камере ($T_н$, $T_о$ - температуры нагрева и охлаждения; t_1 - время выдержки)

Испытание на постепенное изменение температуры проводят в термокамере (камера тепла и холода), обеспечивающей воспроизведение заданных режимов с отклонениями, не превышающими установленных значений. Испытания проводят без электрической нагрузки, если другое не предусмотрено НТД. При испытаниях тепловыделяющего изделия не под электрической нагрузкой в камере устанавливают положительную температуру, равную максимальной температуре контролируемого участка изделия.

Особенностью испытаний на постепенное изменение температуры является то, что изделия подвергают воздействию непрерывно следующих друг за другом циклов (рис. 2.5.12), различающихся тем, что скорость охлаждения или нагрева камер, усредненная за период не более 5 мин, выбирается из ряда $1 \pm 0{,}2$; $3 \pm 0{,}5$ или 5 ± 1 °С · мин$^{-1}$. Каждый цикл состоит из этапов, аналогичных рассмотренным выше. Длительность выдержки согласуется с длительностью суточного (24 ч) цикла при целом числе циклов с учетом восстановления и заключительных измерений.

Степень жесткости испытаний на изменение температуры выбирают в зависимости от свойств испытуемого изделия и возможного процесса их ухудшения. Она определяется разностью температур (их крайними значениями) и числом циклов.

Испытаниям на тепловой удар подвергают изделия, которые в условиях эксплуатации испытывают быстрые изменения температуры. Испытания на тепловой удар проводят для определения электрических характеристик изделий и их механической прочности при экстремальных температурных воздействиях. Испытания на тепловой удар могут осуществляться с применением двух раздельных камер тепла и холода, двухкамерных и однокамерных установок.

Испытания на тепловой удар характеризуются определенными параметрами, значения которых соответствуют установленным степеням жесткости. Важное значение имеет знание температурной постоянной времени τ, определяющей длительность выдержки при воздействии повышенной или пониженной температур. Физически длительность выдержки при каждой из двух температур зависит от теплоемкости испытуемых изделий (иногда ее рекомендуют брать равной 3 ч или 30 мин). Изделия подвергают воздействию 3 ... 5 циклов, если другое число не предусмотрено НТД.

Как правило, испытания проводят без электрической нагрузки. Однако при испытаниях в специализированных установках, допускающих подведение питающих напряжений, испытательных сигналов и их измерение, возможно испытание изделий в рабочем состоянии. После выдержки изделия в нормальных климатических условиях, осмотра и измерения значений параметров его подвергают воздействию установленного числа циклов изменения температуры.

При испытаниях изделий с применением двух раздельных камер тепла и холода в каждом цикле испытаний предусмотрены следующие этапы:

после установления в камере холода пониженной предельной или пониженной рабочей температуры (в зависимости от того, которая из них ниже) помещают в камеру изделие и выдерживают его до достижения теплового равновесия в течение времени, установленного НТД;

после выдержки в камере холода и установления в камере тепла повышенной предельной или рабочей температуры (в зависимости от того, какая из них выше) изделие переносят в камеру тепла и выдерживают до достижения теплового равновесия в течение времени, установленного в НТД.

Рекомендуется, чтобы время установления заданного температурного режима в камере после помещения в нее изделия не превышало 10 % времени выдержки или 5 мин (в зависимости от того, какое из этих значений меньше).

Время переноса изделия из камеры в камеру не должно превышать 3 мин.

Применение для испытаний двухкамерных и однокамерных установок позволяет сократить время установления заданного температурного режима и время переноса (перехода) изделия.

Испытания некоторых изделий на резкое изменение температур требует применения в качестве термоносителя жидкости, позволяющей оказать более сильное воздействие на изделие, чем при использовании воздуха для передачи температуры. При испытании используют две ванны с жидкостями, имеющими пониженную и повышенную температуры, соответствующие испытательным режимам. Этим методом наиболее целесообразно испы-

тывать герметичные изделия, имеющие стеклянно-металлические уплотнения.

Испытания могут проводиться в двух ваннах с водой, имеющих соответственно повышенную и пониженную температуру, или в специальных установках. Испытание осуществляют без подачи на изделие электрической нагрузки. При испытании изделий в двух ваннах с водой изделия подвергают воздействию 10 циклов, если иное число не указано в НТД. Каждый цикл состоит из следующих этапов:

- выдержка изделия в ванне с холодной водой со льдом при температуре 0 °С с превышением не более +2 °С ;

- перенос и выдержка в ванне с кипящей водой, причем температура не должна опускаться ниже 95 °С или более чем на 2 °С по отношению к значению, установленному в НТД (рис. 2.5.13).

Степени жесткости при данном виде испытаний определяются длительностью выдержки t_1 и продолжительностью t_2 переноса из одной ванны в другую, а также числом циклов.

Различают две степени жесткости:

- первая степень жесткости $t_1 \geq 5$ мин; $t_2 \leq 10$ с;

- вторая степень жесткости $t_1 \geq 15$ с; $t_2 \leq 3$ с.

После окончания последнего цикла изделие извлекают из ванны и, удалив с него капли влаги, проводят визуальный осмотр и измерение параметров.

Применение специальной установки для испытаний в жидкостных ваннах позволяет испытывать изделие при большем перепаде температур, поскольку низкотемпературная ванна обеспечивает понижение температуры до -65 ... 0 °С , а высокотемпературная ванна - повышение температуры до +50 ... +200 °С .

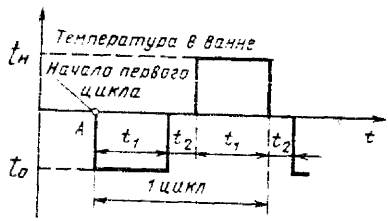


Рис. 2.5.13. График испытательного цикла быстрого изменения температуры в ванне:
A - начало цикла;
t_1 - время выдержки; t_2 - время переноса;
$T_н$, $T_о$ - температуры нагрева и охлаждения

Автоматическое перемещение изделий из одной ванны в другую за время 3 ... 8 с позволяет сократить общую продолжительность испытаний.

2.5.4. ИСПЫТАНИЕ НА ХОЛОДОУСТОЙЧИВОСТЬ

2.5.4.1. УСЛОВИЯ ИСПЫТАНИЙ И ПРИМЕНЯЕМОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

Для проведения испытаний на воздействие пониженной температуры применяют испытательные камеры холода (КХ) или комбинированные камеры:

тепла и холода (КТХ);

тепла, холода и пониженного атмосферного давления (КТХБ);

тепла, холода и влаги (КТХВ) и т.д.

Конструктивно *камеры холода* бывают двух видов: шкафные и сундучковые.

Особенностью *сундучковых камер* является расположение дверей в верхней части камеры (как бы в потолке), что облегчает ее загрузку изделиями больших габаритных размеров и масс.

Комбинированные камеры позволяют осуществлять испытания изделий на раздельное и одновременное воздействие ряда воспроизводимых факторов (холода и пониженного атмосферного давления), а также на воздействие постепенного изменения температуры (циклическое воздействие температур).

Требования к пределам воспроизводимых температур (диапазону изменения температур) в основном определяются стандартами на испытания различных изделий. Наиболее часто камеры холода характеризуются диапазоном температур +25 ... -65 °С .

Получение пониженной температуры в камере достигается искусственным охлаждением находящегося в ней воздуха с помощью двух способов: непосредственного и косвенного. Оба способа могут быть основаны на использовании одного из следующих физических процессов: испарения или кипения, плавления или таяния и сублимации. Все указанные процессы протекают с поглощением тепла из окружающей среды. Кроме того, искусственное охлаждение может быть основано на таких физических явлениях, как термоэлектрический эффект (эффект Пельтье) и на адиабатическом (без теплообмена с внешней средой) расширении газа.

По способу охлаждения различают камеры с непосредственным и косвенным охлаждением.

Непосредственное охлаждение может осуществляться путем введения твердого или жидкого хладагента в рабочий объем камеры. В качестве *твердого хладагента* применяют углекислоту, имеющую температуру (субли-

мации) точки замерзания -78,5 °С. Поглощая теплоту из окружающего пространства, твердая углекислота нагревается и превращается в безвредный, не вызывающий коррозии газ. Указанные способ охлаждения целесообразно применять при редких и кратковременных испытаниях.

Недостатками данного способа охлаждения являются: непостоянство температуры в камере вследствие плохой теплопередачи путем конвекции, а также зависимость температуры в камере от количества, габаритных размеров и масс загруженных в нее изделий. Установка в камеру вентилятора несколько уменьшает приведенные недостатки. Достоинствами данного способа охлаждения являются его простота, быстрая установка температуры, бесшумность и т.д.

Из *жидких хладагентов* наиболее широкое применение получил азот, который может вводиться в камеру вручную и автоматически. В камерах с автоматической регулировкой введения жидкого хладагента (азота) в рабочий объем (рис. 2.5.14) в зависимости от установленных на задающем устройстве значений пониженной температуры, а также температуры в камере вырабатывается сигнал, подводимый к пусковому устройству *9*. Сигнал с пускового устройства поступает на реле *8*, включающее нагреватель азотного испарителя *1* и открывающее соленоидный вентиль *5*. Жидкий азот проходит к воздухоохладителю *6*, расположенному в рабочем объеме камеры. Подача жидкого азота осуществляется за счет увеличения давления в сосуде Дьюара *2*, вызванного его нагревом. Давление в сосуде Дьюара контролируется манометром *4*. Для ручного дозирования расхода азота служит ручной вентиль *3*. Предохранительный клапан *7* предназначен для сброса давления из сосуда Дьюара при аварийном состоянии.

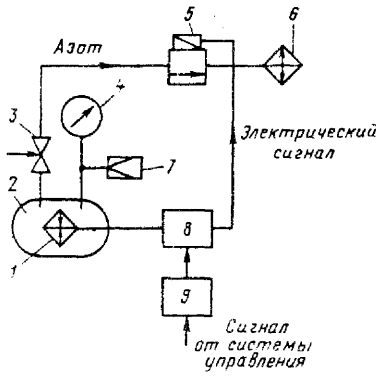


Рис. 2.5.14. Камера непосредственного охлаждения с автоматической регулировкой введения жидкого хладагента (азота)

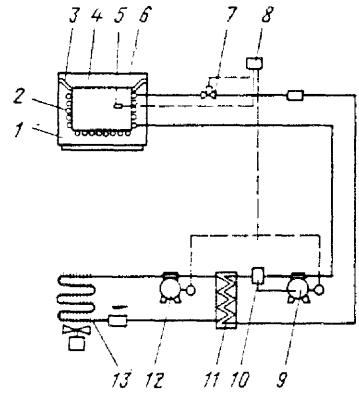


Рис. 2.5.15. Сундучковая камера с непосредственным охлаждением (испаритель расположен во внутренней металлической стенке, двухступенчатая холодильная машина):
1 - сундук с теплоизоляцией; *2* - испаритель; *3* - двойное уплотнение крышки; *4* - крышка; *5* - регулятор температуры; *6* - рабочий объем камеры; *7* - вентиль; *8* - маслосборник; *9* - холодильная установка 1-й ступени глубокого охлаждения; *10* - магнитный вентиль; *11* - промежуточный охладитель; *12* - холодильная установка 2-й ступени; *13* - конденсатор с воздушным охлаждением

К камерам с непосредственным охлаждением относятся и такие, в которых испарители располагаются во внутренних стенках (в рубашке), а также в рабочем объеме. Примером камеры с испарителем, расположенным во внутренней металлической стенке, может служить камера сундучкового типа (рис. 2.5.15), позволяющая получить максимальную минусовую температуру (до -85 °С) за относительно короткое время. Реализация указанных условий с помощью одноступенчатой холодильной машины оказывается нецелесообразной, так как она должна работать с большой разностью температур конденсации и кипения, а следовательно, с большим отношением давления конденсации P к давлению кипения P_0, что экономически невыгодно.

При большом отношении P / P_0 снижается холодопроизводительность машины и повышаются потребление энергии, температура хладагента и ухудшаются условия эксплуатации компрессора, поэтому когда $P / P_0 \geq 9$, целесообразно применять двух- или многоступенчатое сжатие хладагента. При двух- или многоступенчатом сжатии хладагент сжимается от давления кипения до давления конденсации последовательно по ступеням с промежуточным охлаждением частично сжатых паров. Отношение давления нагнетания к давлению всасывания хладагента в каждой ступени холо-

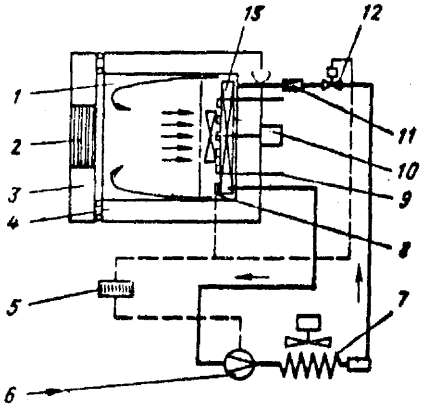


Рис. 2.5.16. Камера с непосредственным охлаждением или нагреванием за счет циркуляции холодного или нагретого воздуха:
1 - рабочий объем; *2* - окно; *3* - дверь; *4* - теплоизоляция; *5* - регулятор температуры; *6* - компрессор; *7* - конденсатор; *8* - термометр сопротивления; *9* - нагреватель; *10* - вентилятор; *11* - терморегулирующий вентиль; *12* - магнитный вентиль; *13* - испаритель

дильной машины меньше отношения P / P_0, между которыми осуществляется цикл двух- или многоступенчатой машины.

В камерах с непосредственным охлаждением или нагревом за счет циркуляции холодного или теплого воздуха (рис. 2.5.16) испаритель, нагреватель и вентилятор располагаются так, чтобы при принудительной циркуляции воздух проходил вдоль стен камеры, а затем попадал в пространство за специальной стенкой с отверстиями, где восстанавливал бы свои свойства.

В камерах с косвенным охлаждением испаритель помещают в специальный объем, который называют хладообменником. В нем осуществляется охлаждение промежуточной среды (в общем случае называемой термоносителем, а в частном случае хладоносителем), предназначенной для переноса теплоты от охлаждаемого тела к кипящему в испарителе хладагенту.

В качестве жидких термоносителей в камерах применяют вещества, удовлетворяющие требованиям, аналогичным тем, которые предъявляются к хладагентам: низкая температура замерзания $(t_з)$, малая вязкость, большая теплоемкость и теплопроводность, нетоксичность, взрывобезопасность, нейтральность к конструкционным материалам и т.д. В качестве термоносителей могут использоваться водные растворы солей (рассолы): хлорида натрия $(t_з < -15^\circ C)$, хлорида магния $(t_з < -27^\circ C)$, хлорида кальция $(t_з < -45^\circ C)$. В низкотемпературных камерах могут приниматься антифризы и фреоны, такие, как водные растворы пропиленгликоля $(t_з < -47^\circ C)$, этиленгликоля $(t_з < -60^\circ C)$, фреон-30 $(t_з < -90^\circ C)$ и фреон-11 $(t_з < -100^\circ C)$.

2.5.4.2. МЕТОДЫ ИСПЫТАНИЙ

Испытаниям на воздействие пониженной температуры подвергаются как тепловыделяющие, так и нетепловыделяющие изделия. Целью испытаний является определение пригодности изделий к эксплуатации, транспортированию или хранению при воздействии пониженной температуры. В условиях воздействия пониженной температуры, а также после пребывания в указанных условиях проводят проверку значений параметров и (или) внешнего вида изделий для установления их соответствия требованиям.

Если некоторые узлы имеют более высокую температуру, чем испытуемые изделия, то целесообразно проводить испытания на воздействие предельной пониженной температуры. При испытании тепловыделяющих изделий на воздействие пониженной температуры перенос теплоты происходит от изделия через монтажное приспособление к стенкам камеры. Наихудшим вариантом охлаждения тепловыделяющего изделия в камере является тот, при котором теплообмен монтажного приспособления со стенками камеры за счет высокой теплопроводности является наиболее интенсивным.

При выборе объема камеры и определения расположения изделий в ней необходимо учитывать, являются ли эти изделия тепловыделяющими или нет. Очевидно, что при испытании тепловыделяющих изделий их тепловое рассеяние будет влиять на процесс охлаждения. Испытания аппаратуры и средств измерений осуществляют без упаковки в готовом для эксплуатации состоянии.

Аппаратура, имеющая температуру окружающей среды, помещается в камеру с той же температурой. Затем в камере устанавливается температура, равная заданной. Скорость понижения температуры не должна превышать $1\,^\circ C \cdot мин^{-1}$, причем она определяется как среднее значение за период не более 5 мин. Рекомендуемая продолжительность испытаний аппаратуры на хранение 16 или 72 ч, если в НТД не оговаривается другой период времени.

При испытании аппаратуры для оценки ее работоспособности в процессе эксплуатации она подвергается воздействию пониженной температуры до наступления температурного равновесия, после чего аппаратуру включают и проверяют значения параметров, предусмот-

ренных НТД. Затем аппаратуру отключают и подвергают воздействию пониженной температуры в течение последующих 2 ч. По завершении указанной выдержки находящаяся в камере аппаратура включается вновь, и после достижения состояния установившегося режима проводятся измерения ее электрических параметров, проверка механических свойств и внешнего вида.

В заключение аппаратура включается и подвергается восстановлению. Температура постепенно повышается до значений, соответствующих нормальным атмосферным условиям. Аппаратура должна оставаться в камере до момента, пока температура в ней не превысит точки замерзания. Далее с аппаратуры любым способом (встряхиванием, обдуванием воздухом и т.д.) удаляются капли воды. После этого аппаратура находится в нормальных атмосферных условиях в течение времени, необходимого для достижения температурного равновесия.

Указанные испытания допускается совмещать с испытанием на воздействие изменения температуры среды.

Испытания на воздействие инея проводят в целях проверки способности изделий выдерживать приложение номинального электрического напряжения при конденсации на них инея. Испытания проводят в камере холода, обеспечивающей возможность установления температуры - $(20 \pm 5)\,^{\circ}C$. Продолжительность испытаний составляет 2 ч, если иное время не указано в НТД. После извлечения изделия из камеры его помещают в нормальные климатические условия, подают на него электрическое напряжение и выдерживают до полного оттаивания инея. Время выдержки, питающие напряжения, методы контроля и другие параметры предусматриваются НТД на соответствующие изделия. Если в процессе выдержки изделия под электрическим напряжением в нем не произошло пробоя или поверхностного перекрытия, а внешний вид соответствует требованиям, то его признают выдержавшим испытание.

2.5.5. ИСПЫТАНИЯ НА ВОЗДЕЙСТВИЕ ВЛАЖНОСТИ

2.5.5.1. УСЛОВИЯ ИСПЫТАНИЙ И ПРИМЕНЯЕМОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

Воздействие повышенной влажности воздуха на различные изделия следует рассматривать во взаимосвязи с основными внешними воздействующими факторами - температурой и атмосферным давлением, которые в существенной степени определяют состояние воды. Возможные формы взаимодействия воды с материалами различных изделий:

вода, проникая во все трещины, зазоры и капилляры или находясь на поверхности элементов конструкций изделий, удерживаясь на его мелкодисперсных частицах, взаимодействует с материалами указанных элементов и изменяет значения механических и электрических параметров, характеризующих испытуемое изделие;

вода оказывает химическое воздействие на материалы элементов и конструкций, которое также приводит к ухудшению значений электрических и механических параметров изделий.

Воздействия повышенной влажности на различные изделия могут быть *постоянными* и *циклическими* в соответствии с суточными колебаниями температуры и влаги. Примером постоянного воздействия повышенной влажности (98 ... 100 %) при температурах 30 ... 40 °С является их эксплуатация, хранение и транспортирование в странах с тропическим климатом.

При помещении относительно "сухого" изделия во влажный воздух наблюдается постепенное в течение времени поглощение им влаги из воздуха и, как следствие, его увлажнение. При этом влажность изделия асимптотически приближается к равновесному значению φ_p. Если же тепловыделяющее изделие после пребывания во влажном воздухе включается под электрическую нагрузку, то его влажность будет уменьшаться, асимптотически приближаясь к значению равновесной влажности φ_p, и в этом случае имеет место подсушка изделия.

Для испытаний на воздействие повышенной влажности необходимо применять камеры с одновременным воздействием повышенной температуры и влажности (термовлагокамеры), причем в этих камерах должны обеспечиваться воспроизведение постоянного и циклического режимов, а также соответствующая регулировка значений их основных параметров.

Температура и относительная влажность в полезном объеме камеры должна быть соответственно в диапазонах $(+25 \pm 3) \ldots (55 \pm 2)\,^{\circ}C$ и 80 ... 100 %. Поскольку большинство камер влажности являются комбинированными, обеспечивающими одновременный нагрев или охлаждение, то для исключения конденсации влаги на стенках и потолке камеры желательно, чтобы их температура была равна или на 1 ... 2 °С выше температуры воздуха в камере.

По способу получения влажного воздуха в испытательных камерах различают камеры двух типов: инжекционные и неинжекционные.

Инжекционными называют камеры, повышение влажности в которых создается путем введения (инжектирования) в их рабочий объем влажного воздуха. Реализуется закрытый способ увлажнения, основанный на циркуляции воздуха, прошедшего через увлажняющее устройство.

Неинжекционными называют камеры, повышение влажности в которых создается за счет испарения влаги с открытой поверхности. Реализуется открытый способ увлажнения, основанный на испарении влаги с свободной поверхности воды или насыщенных солевых растворов.

Наибольшее применение получили инжекционные камеры, в которых увлажнение воздуха происходит за счет его непрерывного прохождения через специальную ванну с водой и насыщения влагой (рис. 2.5.17).

При выходе из ванны воздух имеет 100 %-ную относительную влажность и температуру точки росы. Если необходимо обеспечить повышенную влажность в камере при температурах точки росы, близких или ниже $+2\,^{\circ}C$, то поток влажного воздуха пропускается через силикагелевый осушитель *5*, обеспечивающий его обезвоживание в соответствии с установленной температурой точки росы.

Иногда увлажнение и обезвоживание достигается путем пропускания воздушного потока через сыпучую массу керамических наполнителей, имеющую большую внутреннюю

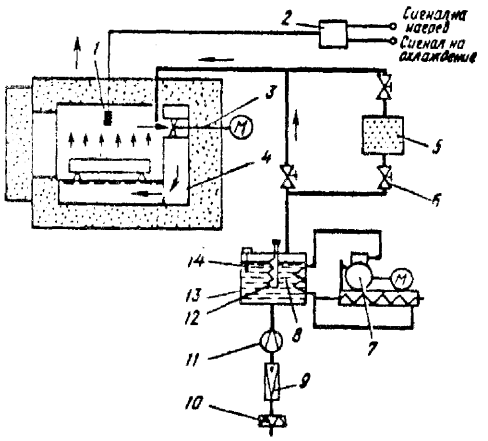


Рис. 2.5.17. Инжекционная камера влажности с увлажнением за счет барботирования:
1, 14 - термодатчики; *2* - регулятор температуры; *3* - вентилятор; *4* - канал циркуляции воздуха; *5* - силикагелевый осушитель; *6* - вентиль регулирующий; *7* - холодильная установка; *8* - испаритель холодильной установки; *9* - измеритель количества воздуха; *10* - воздушный фильтр; *11* - воздушный насос; *12* - нагреватель; *13* - ванна

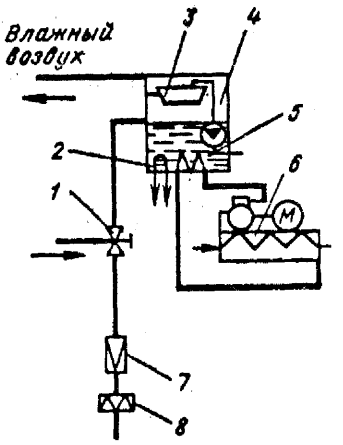


Рис. 5.2.18. Камера влажности с увлажнением за счет применения сыпучей массы керамических наполнителей:
1 - регулирующий вентиль; *2* - нагреватель; *3* - ванна с керамическими наполнителями; *4* - водяной насос; *5* - испаритель холодильной установки; *6* - холодильная установка; *7* - измеритель количества воздуха; *8* - воздушный фильтр

поверхность (рис. 2.5.18). Вода с определенной температурой под давлением, задаваемым насосом *4*, орошает сверху вниз керамическую массу, в то время как воздух проходит через нее в противоположном направлении (снизу вверх). Увлажненный или обезвоженный воздух вновь направляется в испытательную камеру. При таком устройстве увлажнения температура водяной ванны и температура точки росы влажного воздуха не столь тесно связаны, как в предыдущем случае, поэтому в данной системе регулировка влажности воздуха определяется его состоянием в испытательной камере.

Для получения более низких температур точки росы используется система, отличающаяся от рассмотренных тем, что водяная ванна только нагревается, а для обезвоживания влажного воздуха создается вспомогательный контур, в который включены два переключаемых испарителя *6* и *12* от одной холодильной установки *7* (рис. 2.5.19). В процессе работы используется только один испаритель, на котором излишняя влага либо конденсируется, либо вымораживается, а другой в это время оттаивает.

Возможны способы, обеспечивающие относительно быстрое изменение влажности в испытательной камере, в которой *увлажнение происходит за счет распыления нагретой воды* (рис. 2.5.20) или *за счет введения в камеру паровоздушной смеси*. Распыление воды может осуществляться с помощью специальных фор-

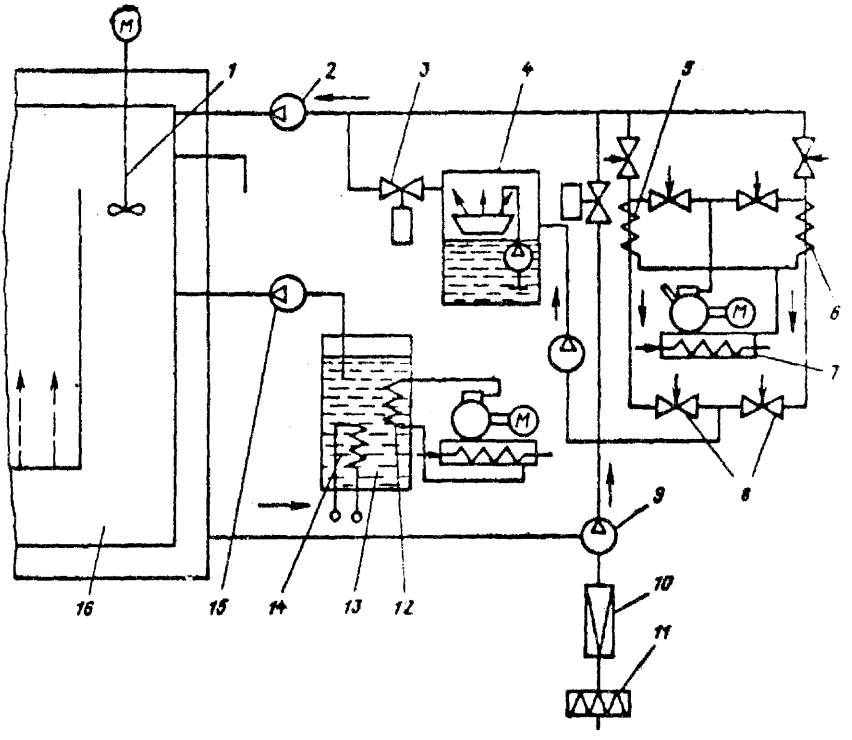


Рис. 5.2.19. Инжекционная камера с обезвоживанием за счет охлаждения (камера тепла, влаги, холода):
1 - вентилятор циркуляции воздуха в камере; *2* - вспомогательный насос увлажнителя; *3* - магнитный клапан; *4* - увлажнитель; *5, 6, 12* - испарители холодильной установки; *7* - холодильная установка; *8* - клапан; *9* - насос; *10* - измеритель количества воздуха; *11* - воздушный фильтр; *13* - термостат термоносителя; *14* - нагреватель; *15* - насос термоносителя; *16* - канал циркуляции увлажненного воздуха

сунок *6* или механическим путем (например, применением специальной центрифуги). Распыленная вода нагревается электронагревателем *7* и с помощью вентилятора *4* нагнетается в камеру. Образовавшаяся паровоздушная смесь, рециркулируя и обогащаясь влагой, обеспечивает заданный режим увлажнения. Использование явления рециркуляции позволяет отказаться от предварительного нагрева воздуха перед его увлажнением.

Недостатками способа распыления воды и введения в камеру паровоздушной смеси являются наличие водяных капель и неопределенное аэрозольное состояние.

Если в процессе испытаний на воздействие повышенной влажности ее значение должно оставаться постоянным, то целесообразно применение **неинжекционных камер**.

Для поддержания определенной относительной влажности необходимо обеспечить постоянство разности температур влажного воздуха и воды при неизменном давлении.

Недостатком данного способа получения повышенной влажности является необходимость поддержания с высокой точностью температуры, так как понижение температуры более чем на 0,5 °С при высокой относительной влажности может привести к выпадению росы.

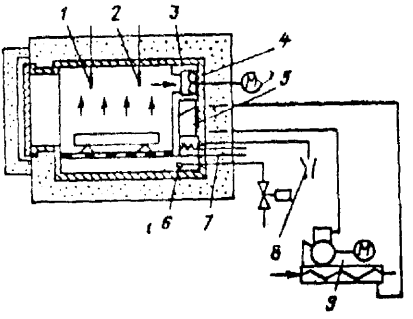


Рис. 2.5.20. Инжекционная камера влажности с увлажнением паром и прямым термостатированием:
1 - датчик влажности; *2* - термодатчик; *3* - канал циркуляции воздуха; *4* - вентилятор; *5* - испаритель системы охлаждения; *6* - форсунка увлажнения; *7* - нагреватель; *8* - сток конденсата; *9* - холодильная установка

Для получения требуемой постоянной влажности воздуха можно использовать *камеры с принудительной циркуляцией влажного воздуха*, принцип действия которых основан на закономерности равновесного состояния между насыщенным солевым раствором и окружающей атмосферой. Относительная влажность воздуха в камере регулируется с помощью насыщенных растворов солей, а также смесей глицерина с водой. Насыщенные соляные растворы обладают большой способностью поглощать или отдавать влагу, не оказывая влияния на относительную влажность воздуха.

Воздух над насыщенным соляным раствором при постоянной температуре сохраняет определенную относительную влажность, характерную для данного раствора соли и данной температуры, что позволяет не измерять относительную влажность во время испытаний. Насыщенный раствор должен иметь избыток соли, при котором он может отдавать и поглощать большое количество влаги, что не влияет на его способность регулировать относительную влажность воздуха. Соляной раствор можно использовать без замены в течение длительного времени.

Применяемые для испытаний насыщенные соляные растворы не должны создавать коррозионную атмосферу, опасную для испытуемых изделий. Следует избегать использования загрязненных растворов, а также выкристаллизования или выползания соли на стенки сосуда.

Для осуществления испытаний с применением насыщенных солевых растворов находит применение солевой гигростат.

При работе в климатической камере солевой гигростат обеспечивает колебание температуры во времени $\pm$ 0,02 °С, колебание температуры в данный момент времени +0,05 °С и колебание относительной влажности 0,2 %.

Гигростат не требует применения специальных средств измерений, так как относительная влажность определяется температурой в полезном объеме камеры и в кассете, а также родом солевого раствора. Солевой гигростат обеспечивает воспроизведение относительной влажности в полезном объеме камеры в диапазоне 12 ... 95 % (в зависимости от применяемой соли) при температуре 0 ... +50 °С. Погрешность устанавливаемой влажности при $\varphi < 50$ % составляет $\pm$ 0,4 %, при $\varphi > 50$ % - $\pm$ 0,7 %. Время установления устойчивого значения относительной влажности 20 ... 60 мин.

К достоинствам солевого гигростата относится обеспечение им высокого постоянства относительной влажности во времени и по объему.

В тех случаях, когда применение соляных растворов недопустимо, используют смесь глицерина с водой, от концентрации которой зависит относительная влажность. Смесь глицерина с водой может находиться, как и соляной раствор, в специальном резервуаре - кассете. Однако большая вязкость глицерина приводит к неравномерности концентрации раствора на поверхности и в толще смеси, поэтому рекомендуют обеспечивать циркуляцию с помощью насоса смеси по большей части стенок камеры. При этом смесь должна также покрывать пол камеры.

В связи с непостоянством концентрации раствора, обусловленным его быстрым старением, а также способностью некоторых изделий поглощать воду, необходимо систематически измерять и регулировать относительную влажность в камере и плотность смеси.

Таким образом, испытания с использованием смеси глицерина с водой требуют большого внимания к измерениям и процессу регулирования.

Увлажнение камер больших габаритных размеров (камер комнатного типа) может осуществляться открытым способом с применением подогрева воды электронагревателями или паром, а также закрытым способом путем непосредственного введения водяного пара в объем камеры.

Конструкция термовлагокамеры отличается от термокамеры введением в нее увлажнителя, устройства удаления конденсированной влаги, более сложных измерительных устройств и систем автоматического регулирования, обеспечивающих поддержание заданных температур и влажности.

Для **измерения влажности воздуха** применяют приборы, называемые *гигрометрами*. В климатических испытательных камерах для измерения и автоматического регулирования влажности воздуха находят наибольшее применение следующие методы: психрометрический, точки росы и сорбционный.

Психрометрический метод основан на определении разности температур, измеренных двумя термометрами: "сухим", измеряющим температуру воздуха ($t_с$), и "мокрым", измеряющим температуру тела, с поверхности которого происходит испарение воды ($t_м$), т.е. находящегося в термодинамическом равновесии с окружающей средой.

Пользуясь полуэмпирической психрометрической формулой, можно определить относительную влажность

$$\varphi = \frac{E_м}{E} - \frac{A p}{E}\left(t_с - t_м\right),$$

где $E_м$ - максимально возможная упругость водяного пара при температуре $t_м$; E - максимальная упругость водяного пара при температуре $t_с$; A - психрометрический коэффициент; p - атмосферное давление.

По показаниям сухого и мокрого термометров с помощью психрометрических таблиц или диаграмм, составленных для определенных конструкций психрометров, можно определить относительную влажность φ. Психрометрический коэффициент A зависит от размера и формы чувствительного элемента, вида и состояния смачиваемой поверхности тела, теплопроводности его защитной оболочки и ее защиты от радиации.

Существенное влияние на работу психрометра оказывает скорость циркуляции воздуха. При увеличении скорости воздушного потока усиливается испарение и уменьшается искажающее влияние теплового потока в тепловом балансе. В связи с этим в конструкции психрометра предусмотрена принудительная циркуляция воздуха. В *аспирационном психрометре* жидкостные термометры обдуваются с помощью аспиратора (вентилятора) потоком исследуемого воздуха с постоянной скоростью 2 м·с$^{-1}$. При этом они защищены от теплового воздействия прямых солнечных лучей. По данным Главной геофизической обсерватории, коэффициент $A = 79{,}47 \cdot 10^{-5}$ г·градус$^{-1}$ для скорости воздуха 2 ... 2,5 м·с$^{-1}$. С уменьшением скорости коэффициент A несколько увеличивается и может быть принят равным 10^{-3} г·град$^{-1}$.

Суммарная статическая погрешность измерения φ зависит от погрешностей измерения температур $t_с$, $t_м$, атмосферного давления p, а также от факторов, влияющих на значение коэффициента A. Погрешности, обусловленные скоростью воздушного потока, уменьшаются при использовании вместо жидкостных (ртутно-стеклянных) термометров миниатюрных термодатчиков терморезисторов, так как скорость циркуляции при этом понижается.

К достоинствам психрометрического метода можно отнести достаточно высокую точность измерений, относительно небольшую инерционность (постоянная времени электронного психрометра с терморезисторами 1 ... 3 мин).

Недостатками метода являются:

возможность измерений в ограниченном температурном диапазоне, особенно в области значений, близких к 0 °С;

зависимость результатов измерений от скорости циркуляции воздуха и атмосферного давления.

Для измерений при отрицательных температурах смачивание мокрого термометра рекомендуется производить 3 %-ным водным раствором формальдегида. В области повышенных температур психрометрический метод ограничен +100 °С.

Метод точки росы основан на определении температуры, до которой необходимо охладить ненасыщенный водяной пар для доведения его до состояния насыщения, характеризуемого точкой росы. Температура точки росы определяется по началу конденсации водяного пара на плоской поверхности твердого тела (металлического зеркальца), охлаждаемой в атмосфере влажного воздуха.

Сложность конструкции гигрометров точки росы, связанная с необходимостью применения охлаждающего устройства, практически исключает его использование в камерах влажности.

Сорбционные методы, получившие практическое применение, основаны на применении гигроскопических тел, изменяющих свои свойства в функции количества поглощенной влаги. В зависимости от материала, использованного для построения влагочувствительного элемента и соответственно параметра, изменяющегося под действием влаги, различают *деформационные, электрические, массовые, цветовые* и другие сорбционные гигрометры.

В деформационных гигрометрах используются свойства некоторых гигроскопических материалов изменять свои линейные размеры в функции влажности воздуха.

Наиболее широко применение в камерах влажности получили электрические гигрометры и, в частности, *электролитические подогревные гигрометры*. Электролитический подогревной датчик (рис. 2.5.21) представляет собой металлическую гильзу *1* (каркас), покрытую изоляционным материалом, на которую надет чулочек *2* из стекловолокна, пропитанный водным раствором соли хлористого лития. Поверх чулочка находятся проволочные электроды *3*, представляющие собой биффилярную обмотку, закороченную на конце. По обмотке проходит электрический ток, вызывающий ее нагрев. Так как солевой раствор хлористого лития проводит электрический ток, то проволочные электроды замыкаются раствором соли

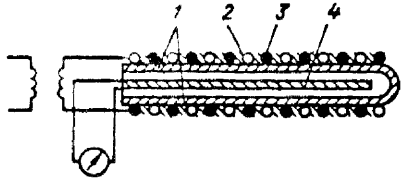


Рис. 2.5.21. Электролитический хлористолитиевый подогревной датчик

хлористого лития, в результате их активное сопротивление уменьшается, а нагрев током увеличивается. При этом вода, содержащаяся в растворе соли, испаряется, сопротивление раствора увеличивается и нагрев уменьшается. Испарение способствует охлаждению элемента и вследствие гигроскопичности соли хлористого лития увеличению поглощения влаги из окружающей среды. Равновесное состояние наступает при температуре точки росы, измеряемой малоинерционным терморезистором *4*, находящимся в гильзе.

Электролитические подогревные гигрометры можно использовать для измерения относительной влажности в пределах 13 ... 100 % в интервале температур 15 ... 50 °С. При этом точность измерений составляет ± 2 % относительной влажности, а постоянная времени - 1,5 ... 3 мин.

2.5.5.2. МЕТОДЫ ИСПЫТАНИЙ

Испытания изделий на воздействие повышенной влажности проводят в целях определения их пригодности для эксплуатации и хранения, проявляющейся в сохранении внешнего вида и значений параметров в пределах установленных в НТД норм после указанных воздействий.

По характеру воздействия различают постоянный и циклический режимы испытаний. При *постоянном режиме* испытуемые изделия подвергаются постоянному действию температуры и относительной влажности или парциальному давлению водяных паров. При *циклическом режиме* испытаний имитируется суточное изменение влажности и температуры, сопровождающееся конденсацией влаги и выпадением росы. По длительности воздействия различают *длительные, кратковременные* и *ускоренные* испытания. Длительные испытания проводят для проверки качества влагозащиты и коррозионной защиты.

Ускорение процесса испытаний достигается за счет повышения температуры, которое приводит к насыщению влажного воздуха, его конденсации и выпадению росы. При этом увеличивается абсолютная влажность воздуха и растет парциальное давление водяных паров, что способствует их проникновению во все трещины и капилляры изделия.

На основании изложенных соображений предусмотрено осуществление следующих методов испытаний:

при длительных воздействиях - циклические режимы (16+8 ч) и (12+12 ч), а также постоянный режим без конденсации влаги;

при кратковременных воздействиях - циклический режим и постоянный режим без конденсации влаги.

Воспроизводимость указанных методов испытаний существенно зависит от постоянства значений параметров испытательных режимов во времени.

Анализ показывает, что для достижения хорошей воспроизводимости испытаний необходимо обеспечивать по возможности более резкое снижение температуры с верхнего предельного значения до нижнего. Однако при этом не должно быть резкого снижения относительной влажности, поскольку в таком случае это может привести к подсушиванию испытуемого изделия. Одновременно необходимо в зависимости от предельных значений температуры поддерживать определенные значения парциальных давлений водяного пара, соответствующие поглощению влаги изделием.

Воспроизводимость испытаний зависит также от метода проведения испытаний. С учетом установленных допусков на парциальное давление водяного пара можно определить предельные значения температуры и относительной влажности, которые будут служить мерой воспроизводимости испытаний.

При разработке программы испытаний на воздействие повышенной влажности одним из главных вопросов является *выбор степени жесткости*, которая зависит от условий эксплуатации и исполнения изделия.

При *испытаниях в циклическом режиме* в зависимости от вида изделия и цели испытаний оно может находиться под электрической нагрузкой или без нее. Если целью испытаний является определение разрушающего действия электролиза или электрохимической коррозии, то изделие должно находиться под электрической нагрузкой. При испытаниях тепловыделяющих изделий, вызывающих недопустимую подсушку, препятствующую их увлажнению, целесообразно выборку изделий разделить на две группы и испытывать одну группу под напряжением, а другую без подачи напряжения.

Прежде чем приступить к непосредственному воздействию повышенной влажности на изделие, его выдерживают в нормальных климатических условиях для осуществления температурной стабилизации (рис. 2.5.22). Температура изделия должна быть стабилизирована при 25 ± 3 °С путем его выдержки в специальной камере (комнате) с нормальными климатическими условиями или в испытательной камере с указанной температурой. Продолжительность периода стабилизации указывается в НТД, но она должна быть не менее 1 ч. Рекомендуется, чтобы в течение последнего часа относительная влажность была повышена на 95 %.

В процессе циклических испытаний (цикл 16+8 ч) изделия подвергают воздействию непрерывно следующих друг за другом циклов, состоящих из двух частей:

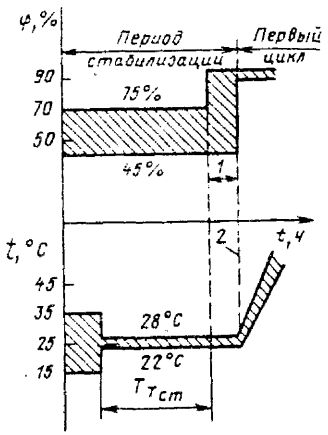


Рис. 2.5.22. Период стабилизации $t_{T_{ст}}$:

1 - время, требуемое для достижения φ = 95+ 100 % (не более); *2* - начало первого цикла

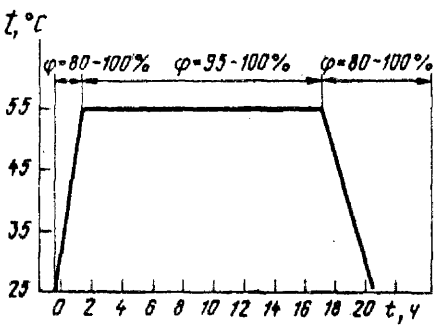


Рис. 2.5.23. Испытания изделий с циклом 16 + 8 ч

1) в I части цикла (рис. 2.5.23) температура в камере повышается в течение 1,5 ... 2,5 ч от уровня температуры лаборатории (25 ± 10 °С) до установленного значения, указанного в табл. 2.5.2. При этом относительная влажность должна составлять 80 ... 100 %. В течение этого периода на изделиях должна конденсироваться влага. Затем в любой точке полезного объема камеры должна поддерживаться заданная температура в течение 16 ч, но не менее 4 раз в 1 ч должны иметь место периодические колебания температуры в 2 ... 3 °С при условии, что температура остается в диапазоне 53 ... 57 °С. В течение этого периода относительная влажность должна составлять 95 ... 100 % и на изделиях появится влага;

2) во II части цикла изделие в камере охлаждается до уровня температуры лаборатории, но не менее чем на 5 °С ниже указанной в табл. 2.5.2. Относительная влажность при этом должна быть 80 ... 100 % вплоть до окончания цикла длительностью 24 ч. В течение этого периода времени на изделиях не должно появляться капель воды.

Время выдержки отсчитывается с момента включения камеры. Скорость повышения температуры и влажности при проведении каждого цикла должна обеспечивать конденсацию влаги на изделиях.

Особенностью *испытаний в циклическом режиме (цикл 12+12 ч)* является некоторое отличие временных изменений значений параметров, характеризующих процесс испытаний.

Период стабилизации заканчивается выдержкой изделия в испытательной камере в течение последнего часа при температуре окружающей среды 25 ± 3 °С и относительной влажности не менее 95 %. Значения параметров испытательных режимов выбирают из табл. 2.5.3 в зависимости от степени жесткости испытаний, установленной для изделия.

24-часовой цикл испытаний начинается с постепенного повышения температуры в течение 3 ч ± 30 мин до значения, указанного в табл. 2.5.3. Скорость повышения температуры может быть определена по заштрихованным участкам графиков, приведенных на рис. 2.5.24. Относительная влажность в этот период времени должна быть не менее 95 %, за исключением последних 15 мин, когда она должна быть не менее 90 %. Во время повышения температуры на изделиях должна конденсироваться влага. Условием выпадения росы является то, что температура поверхности изделий должна быть ниже точки росы воздуха в камере. Далее температура в камере поддерживается в пределах заданного значения (± 2 °С) до истечения 12 ч ± 30 мин с начала цикла. При этом относительная влажность должна быть равна 93 ± 3 %, за исключением первых и последних 15 мин, когда она должна находиться между 90 % и 100 %. В течение последних 15 мин на изделиях не должна конденсироваться влага. Затем температура в камере понижается в соответствии с одним из двух вариантов (рис. 2.5.24).

2.5.2. Параметры длительных и ускоренных испытаний с циклом 16+8 ч для различных степеней жесткости

Параметры испытаний	Длительное испытание			Ускоренное испытание	
Степень жесткости	III, IV, VII, XII, XIII	V, VI, VIII, XI	IX, X	V, VI, VIII, XI	IX, X
Продолжительность выдержки (число циклов)	4	9	21	4	9
Температура в первой части цикла, °С	40 ± 2	40 ± 2	40 ± 2	55 ± 2	55 ± 2

2.5.3. Параметры длительных и ускоренных испытаний с циклом 12+12 ч для различных степеней жесткости

Параметры испытаний	Длительное испытание			Ускоренное испытание	
Степень жесткости	IV, XII	V	IX	V	IX
Общая продолжительность выдержки (число циклов)	6	12	21	4	9
Верхняя температура, °С	40 ± 2	40 ± 2	40 ± 2	55 ± 2	55 ± 2

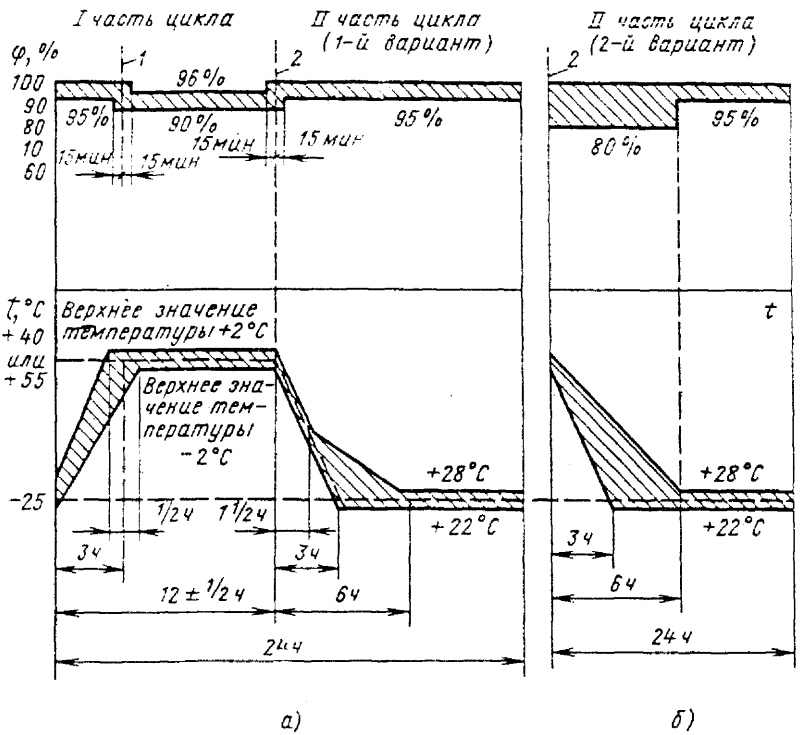


Рис. 2.5.24. Испытания изделий с циклом 12 + 12 ч. Варианты понижения температуры в камере: *а* - первый, при длительных испытаниях; *б* - второй, при кратковременных испытаниях

Вариант 1. Температура понижается до 25 ± 3 °С за время от 3 до 6 ч. Понижение температуры должно производиться со скоростью, определяемой графиком (рис. 2.5.24, *а*). При этом относительная влажность должна быть не менее 95 %, исключая первые 15 мин, когда она должна быть не менее 90 %.

Вариант 2. Отличается от варианта 1 тем, что в нем не предусмотрены дополнительные требования понижения температуры в течение первых полутора часов, а также тем, что относительная влажность должна быть не ниже 80 % (рис. 2.5.24, *б*). Затем температура поддерживается равной 25 ± 3 °С при относительной влажности не ниже 95 % до завершения 24-часового цикла.

В соответствии с НТД во время выдержки могут проводиться измерения значений электрических и (или) механических параметров изделий. Однако выполнять измерения при наличии на изделиях конденсированной влаги не рекомендуется.

По аналогичной методике осуществляют *кратковременные испытания в циклическом режиме*, целью которых является выявление технологических дефектов, а также дефектов, возникающих при проведении других испытаний. Испытания проводят при повышенной температуре 55 ± 2 °С, а также при числе циклов, равном 1, 2, 6. Далее осуществляют восстановление изделия в нормальных климатических условиях или в регулируемых условиях. При восстановлении в регулируемых условиях (рис. 2.5.25) изделия могут быть перенесены в другую камеру на время восстановления или могут оставаться в испытательной камере. Время переноса изделия в другую камеру не должно превышать 5 мин.

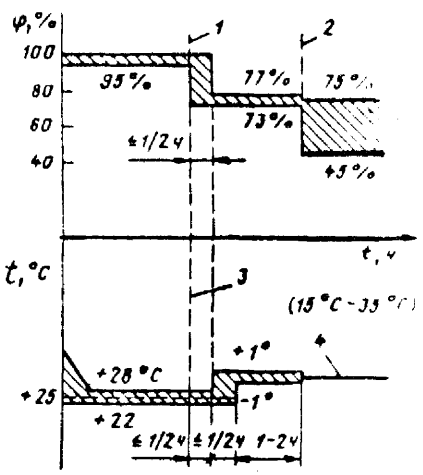


Рис. 2.5.25. Период восстановления в регулируемых условиях

При восстановлении в испытательной камере относительная влажность снижается до 75 ± 2 % за время не более 30 мин, после чего в течение времени не более 30 мин температуру в камере доводят до уровня температуры лаборатории с точностью ± 1 °С. Временные интервалы восстановления определяются габаритными размерами и свойствами изделий.

Испытания изделий на воздействие повышенной влажности воздуха в постоянном режиме (без конденсации влаги) характеризуются тем, что изделия находятся в камере влажности при относительной влажности воздуха 93 ± 3 % при повышенной температуре в течение общей продолжительности выдержки. Допускается предварительно нагревать изделия до температуры, превышающей испытательную на 2 ... 3 °С, и вносить их в камеру с заранее установленным испытательным режимом. При кратковременных испытаниях продолжительность составляет 2, 4, 6 и 10 суток. По окончании испытаний, проводимых по любому из рассмотренных методов, проводят оценку коррозионных разрушений изделий в соответствии с установленными требованиями.

2.5.6. ИСПЫТАНИЯ НА ВОЗДЕЙСТВИЕ ПЫЛИ

2.5.6.1. УСЛОВИЯ ИСПЫТАНИЙ И ПРИМЕНЯЕМОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

Изделия должны быть работоспособными и сохранять свои характеристики при воздействии пылевой смеси с частицами размером не более 200 мкм, движущимися со скоростью 5 м/с.

Абразивное воздействие пыли проявляется в основном в оптических и трущихся конструктивных элементах. Возникновение электрических зарядов у различных комбинаций пылевой смеси приводит к притяжению пыли к неподвижным поверхностям. Наличие пыли влияет на электрическую плотность изделий.

Воздействие пыли связано с действием ветра, который активизирует ее проникающее и разрушающее действие. Таким образом, требования к стойкости изделий на воздействие пыли для разных условий эксплуатации оказываются различными, что приводит к двум видам испытаний - на статическое и динамическое воздействие пыли. Для воспроизведения воздействия пыли с определенными скоростями циркуляции воздуха используются специальные камеры.

Основными параметрами, характеризующими камеры пыли, являются *скорость циркуляции воздуха в камере, температура воздуха, относительная влажность, временной режим.*

Кроме того, вид и режим испытаний зависят от параметров пылевой смеси состава

пылевой смеси, размера частиц, концентрации пыли в воздухе, плотности пыли.

В основном находят применение две конструкции камер: для испытаний на статическое и динамическое воздействие пыли.

В *камере для испытаний на статическое воздействие пыли* (рис. 2.5.26) пыль завихряется и с помощью постоянной циркуляции воздуха удерживается во взвешенном состоянии. Поскольку длительность падения частиц пыли различных размеров различна, необходимо, чтобы ее состав поддерживался постоянным.

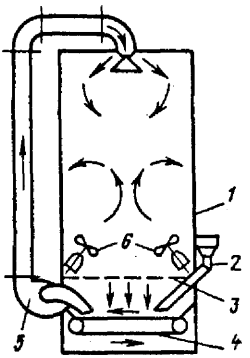


Рис. 2.5.26. Камера для испытаний на статическое воздействие пыли:
1 - испытательная камера; *2* - подача пыли; *3* - сетка для установки изделий; *4* - лента конвейера; *5* - вентилятор для отсоса пыли; *6* - вентилятор для завихрения пыли

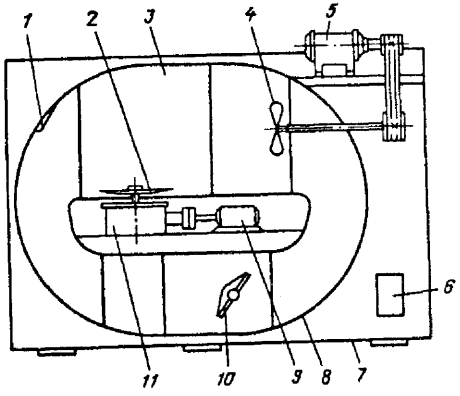


Рис. 2.5.27. Камера для испытаний на динамическое воздействие пыли:
1 - щит для частичного изменения направления потока воздуха; *2* - стол для установки изделия; *3* - испытательная камера; *4* - вентилятор; *5, 9* - электродвигатели; *6* - магнитные пускатели; *7* - каркас установки; *8* - воздухопровод; *10* - шибер (заслонка) для изменения скорости воздушного потока; *11* - редуктор

Камера для испытаний на динамическое воздействие пыли (рис. 2.5.27), представляет собой ветровой канал с замкнутой воздушной циркуляцией. Собственно испытательной камерой является средняя верхняя секция трубопровода.

Заданная концентрация пыли в камере достигается вводом в нее определенного количества пылевой смеси и циркуляцией воздуха. Для этого в камере имеется специальный дозатор, обеспечивающий введение пылевой смеси. Постоянство концентрации пыли контролируется измерителем концентрации через заданные интервалы времени. Заданный температурный режим достигается с помощью электронагревателя. Постоянство температурного режима может поддерживаться ручным и автоматическим регулированием.

В современных пылевых испытательных камерах осуществляется полная автоматизация поддержания заданных значений: временных параметров режимов, концентрации или плотности пылевой смеси, а также температуры.

Средства измерений значений параметров пыли. Воспроизводимость испытаний зависит от точности соблюдения условий испытаний, поэтому желательно проводить непрерывное измерение концентрации пыли в заданном диапазоне значений.

Методы исследования аэрозолей (пыли) разделяют на две большие группы: с выделением дисперсной фазы аэрозоля из дисперсной среды и без выделения.

Методы с выделением дисперсной фазы аэрозоля предусматривают две операции: предварительное выделение из воздуха частиц аэрозоля и последующее исследование.

В зависимости от физических принципов, применяемых для определения концентрации пылевых частиц, методы измерения делятся на массовые, оптические и фотоэлектрические; электрофизические, связанные с определением зарядов аэрозольных частиц, и т.д.

Примером *массового метода* является прибор (рис. 2.5.28), представляющий собой полный параллелепипед, устанавливаемый в любом участке камеры. Пыль попадает внутрь прибора через пять круглых отверстий и собирается на съемном дне. Воздух циркулирует в камере в течение 5 мин, а после прекращения циркуляции пыль оседает в течение 2 ч. Количество пыли, собранной в приборе за этот период, взвешивают. По НТД масса пыли должна составлять 25 ± 2 г. Прибор изготовляют из листов органического стекла толщиной 2 ... 4 мм.

Метод без выделения дисперсной фазы аэрозоля позволяет непрерывно проводить измерения и регистрацию концентрации пыли. Прибор основан на фотооптическом принципе (рис. 2.5.29), позволяющем оценить светопроницаемость смеси пыль - воздух. Свет элек-

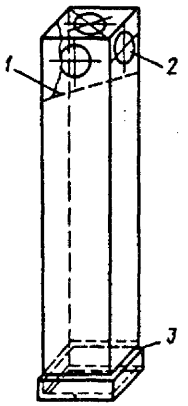


Рис. 2.5.28. Прибор для определения концентрации пыли массовым методом:
1 - направляющие перегородки;
2 - входные отверстия; *3* - съемное дно

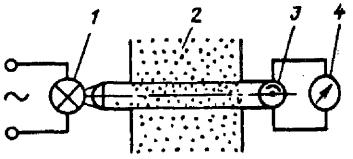


Рис. 2.5.29. Прибор для определения концентрации пыли фотооптическим методом:
1 - электрическая лампа; *2* - смесь пыли и газа;
3 - фотоэлемент; *4* - гальванометр

трической лампы накаливания проходит через испытательную камеру со смесью пыль - воздух и попадает на фотоэлемент, подключенный к гальванометру или к измерительной схеме.

Концентрация пыли определяется уравнением

$$c = -\frac{\rho}{a\chi} \ln \frac{I}{I_0},$$

где ρ - плотность пыли; a - показатель поглощения света пылью; χ - путь света в испытательной камере; I - сила тока фотоэлемента при чистом воздухе; I_0 - сила тока фотоэлемента при запыленном воздухе.

Указанный метод имеет рад недостатков, связанных с особенностями оптических свойств аэрозолей. Интенсивность рассеяния света аэрозолями зависит от вида пыли, дисперсного состава, формы и поверхностных свойств частиц, длины световых волн и т.д.

В настоящее время появились приборы, основанные на принципах голографии с использованием лазерной техники.

2.5.6.2. МЕТОДЫ ИСПЫТАНИЙ

Для проведения испытаний на воздействие пыли изделия помещают в камеру и располагают так, чтобы воздействие пыли максимально соответствовало эксплуатационным условиям. В частном случае способ установки определенного изделия указывается в НТД. Минимальное расстояние от изделий до стенок камеры и между изделиями должно быть не менее 10 см.

Выбор состава пылевой смеси, размеров ее частиц и концентрации зависит от цели испытаний, определяемой местом и продолжительностью эксплуатации изделия. Повышение концентрации позволяет сократить продолжительность испытаний. В любом случае для исключения образования комков пыли и нежелательного ее прилипания необходимо, чтобы относительная влажность воздуха в камере не превышала 30 ... 50 % (в зависимости от состава пылевой смеси), что достигается повышением температуры до +55 °С.

Для определения размеров частиц пыли ее просеивают через специальные сита; при этом остаток на сите не должен превышать 3 %.

Испытания изделий на динамическое воздействие пыли (песка) проводят для оценки их устойчивости к разрушающему (абразивному) воздействию пыли, а также для проверки их пыленепроницаемости и работоспособности в среде с повышенной концентрацией пыли. Особенностью испытаний на динамическое воздействие пыли (песка) является обязательная циркуляция воздуха с повышенной скоростью (табл. 2.5.4).

При проверке изделия на *устойчивость к абразивному действию пыли* изделия считают выдержавшими испытания, если их внешний вид удовлетворяет требованиям НТД. При испытании изделий на работоспособность они должны находиться в камере в рабочем состоянии. Необходимость проверки значений параметров изделий устанавливается в НТД.

Основной целью *испытаний на пыленепроницаемость* является выявление способности конструкции изделия препятствовать проникновению пыли внутрь его оболочки (кожуха). Чем меньшие отверстия в оболочке необходимо выявить, тем меньше должны быть размеры частиц пыли. Для распознавания проникновения пыли желательно применение флуоресцирующего порошка в количестве 10 % общего объема смеси. Размер частиц порошка должен быть порядка 50 мкм, что определяется с помощью специальных сит. При выборе флуоресцирующего порошка необходимо учитывать, что некоторые материалы (пластмассы, пропиточные средства и т.д.) могут также обладать люминесцентными свойствами, что может затруднять расшифровку результатов испытаний.

2.5.4. Параметры видов испытаний на воздействие пыли

Вид воздействия	Состав пылевой смеси, %	Размер частиц пыли, мкм	Продолжительность обдува, ч	Скорость циркуляции воздуха, $м \cdot с^{-1}$	Концентрация, $г \cdot м^{-3}$, или количество пылевой смеси в воздухе
Динамическое	Кварцевый песок 70; мел 15; каолин 15	≤ 200	2	10 ... 15	2 ± 1 или 0,1 % полезного объема камеры
Статическое	Кварцевый песок 60; мел 20; каолин 20	≤ 50	2 (оседание пыли 2 ч)	0,5 ... 1	То же

Для выявления проникновения пыли внутрь изделий можно использовать ультрафиолетовое облучение вскрытых изделий в затемненном помещении. Известно, что различные материалы, облучаемые ультрафиолетовым светом, обладают характерными оттенками свечения: мел химический - светло-синий; мел молотый - светло-коричневый; окись цинка - желто-зеленый; бумага из чистой целлюлозы - светло-желтый; хлопчатобумажное волокно не светится и т.д.

Для эффективного проникновения пыли через отверстия внутрь испытуемого изделия необходима разность давлений воздуха между испытательной камерой и внутренней полостью изделия. Очевидно, что предварительный нагрев испытуемого изделия приведет к созданию внутри изделия избыточного давления, способствующего выходу воздуха из него наружу. При помещении изделия в камеру с более низкой температурой в нем создается разрежение, которое будет способствовать проникновению пыли внутрь изделия.

В случае испытаний тепловыделяющего изделия эффект засасывания пыли можно осуществить периодическим включением и выключением изделия в процессе испытаний. Однако для осуществления процесса засасывания пыли желательно понизить температуру в камере до +35 °С. Важную роль при этом играет соотношение продолжительности циркуляции воздуха с пылевой смесью и ее осаждением.

Испытания на статическое воздействие пыли (песка) проводят в соответствии с режимом, представленным в табл. 2.5.4, для проверки способности изделий работать в среде с повышенной концентрацией пыли.

Перед размещением изделия в камере должна быть установлена температура (55 ± 3) °С и относительная влажность не более 50 %. Испытания на статическое воздействие пыли в ряде случаев имитируют эксплуатацию изделий в помещении, поэтому целесообразно, чтобы в состав пылевой смеси, кроме неорганической части, которая составляет до 70 % (по массе), входила бы еще и органическая часть, в качестве которой могут использоваться волокна целлюлозацетатного шелка (хлопья диаметром 20 ... 60 мкм и длиной 0,1 ... 0,5 мм).

После проведения испытаний обоих видов изделия извлекают из камеры, удаляют пыль с наружных поверхностей кисточками или лоскутами мягкой материи, если НТД не предусмотрены другие методы (обдув или всасывание пыли могут исказить результаты испытаний). Затем осуществляют визуальный осмотр. При испытании изделий в рабочем состоянии НТД может предусматривать измерения значений электрических параметров.

2.5.7. ИСПЫТАНИЯ НА ВОЗДЕЙСТВИЕ СОЛНЕЧНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ, АТМОСФЕРНОГО ДАВЛЕНИЯ, ПЛЕСНЕВЫХ ГРИБОВ

2.5.7.1. ИСПЫТАНИЕ НА ВОЗДЕЙСТВИЕ СОЛНЕЧНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Испытания проводят для проверки устойчивости изделий или их отдельных деталей и узлов к воздействию солнечного излучения. Облучение изделий, их узлов и деталей (кожухов, крышек, ручек, шкал и т.п.) осуществляется в камере СО-1 (0,5) солнечной радиации источниками инфракрасного и ультрафиолетового излучения.

В зависимости от назначения и условий эксплуатации изделия оно может подвергаться воздействию солнечной радиации в сухом и жарком или во влажном и теплом климате. Кроме того, необходимо учитывать циклический характер воздействия солнечной радиации (с соблюдением суточного цикла).

Основными параметрами, характеризующими воздействие солнечной радиации, явля-

2.5.5. Спектральное распределение энергии излучения

Параметр излучения	Интервал спектра					
	ультрафиолетовый		видимый			инфракрасный
Длина волны, мкм	0,28...0,32	0,32...0,40	0,40...0,52	0,52...0,64	0,64...0,78	0,78...3,00
Поверхностная плотность потока излучения, $Вт \cdot м^{-2}$	5	63	200	186	174	492
Допустимое отклонение, %	± 35	± 25	± 10	± 10	± 10	± 20

ются: *спектральное распределение энергии излучения* (табл. 2.5.5), а также *интенсивность излучения*, или *поверхностная плотность потока энергии излучения*. Интенсивность солнечного излучения, характеризуемая солнечной энергией, приходящейся на единицу поверхности, перпендикулярной солнечным лучам на среднем расстоянии от Солнца вне земной атмосферы, называют солнечной постоянной E_0.

Для проведения испытаний на воздействие солнечной радиации необходимо в заданной плоскости измерения обеспечить излучение, воспринимаемое испытуемым изделием, с интенсивностью 1,120 $кВт \cdot м^{-2}$ и определенным спектральным распределением энергии. В указанное значение интенсивности должны также входить излучения, полученные за счет отражения от стенок камеры, однако не должны входить инфракрасные излучения от нагреваемых стенок камер.

Наряду с рассмотренными к параметрам камер солнечной радиации относятся: *температура, скорость циркуляции воздуха и его относительная влажность*. Температура воздуха в камере при облучении во время темной фазы должна достигать +40 или 55 °С в зависимости от метода испытаний, воспроизводящего предполагаемые условия эксплуатации. Поскольку для испытаний применяются камеры с принудительной циркуляцией воздуха, необходимо учитывать возможность охлаждения изделий и термодатчиков под действием воздушного потока. Даже столь малая скорость циркуляции воздуха, как, например, 1 $м \cdot с^{-1}$, может вызвать уменьшение температуры перегрева более чем на 20 %. Вследствие этого при осуществлении нагрева (охлаждения) термоэлементами, расположенными в стенках камер, должно обеспечиваться более равномерное распределение температуры в камере при относительно небольшой скорости воздушного потока.

В качестве *искусственных источников солнечного излучения* используются одна или несколько специальных ламп, а также ряд оптических элементов (рефлекторов, светофильтров и т.д.), обеспечивающих получение требуемого спектра и заданной интенсивности излучения.

Источники излучения различаются по физической природе излучения. Они могут быть основаны на нагревании, принципе электролюминесценции, одновременном использовании нагрева и электролюминесценции.

К источникам излучения, основанным на нагревании, относятся *вольфрамовые лампы*. Вакуумные или газонаполненные вольфрамовые лампы большую часть своей энергии излучают в области коротковолновых инфракрасных лучей и почти не излучают ультрафиолетовых лучей, что ограничивает их применение. Так, например, вакуумная лампа при температуре *вольфрамовой нити* $T = 2\ 500$ К имеет максимум излучения в области $\lambda = 1,15$ мкм, а газонаполненная лампа при температуре нити $T = 3\ 000$ К - в области $\lambda = 0,96$ мкм. Если принять всю энергию, излучаемую вакуумной лампой, за 100 %, то только 7 ... 12 % приходится на видимую часть спектра, а остальная часть, за исключением небольших потерь, излучается в виде инфракрасных лучей.

Лампы с вольфрамовой нитью в колбе из кварцевого стекла с галогенным наполнителем обладают лучшей стабильностью рабочих характеристик на протяжении всего срока службы. Поскольку в солнечном спектре приблизительно 50 % энергии приходится на видимую и ультрафиолетовую части спектра, что соответствует длинам волн короче 0,7 мкм, применение вольфрамовых ламп целесообразно только в случаях, когда необходимо воспроизведение инфракрасного и теплового воздействия (рис. 2.5.30).

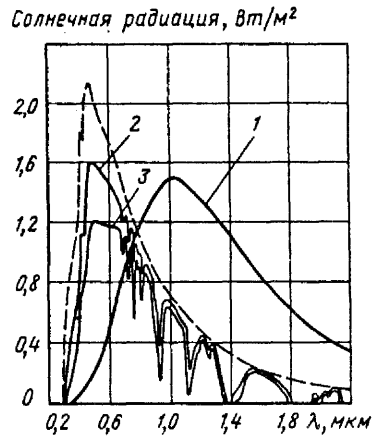


Рис. 2.5.30. Спектральное распределение излучения: *1* - вольфрамовой лампы накаливания; *2* - солнечной радиации, когда Солнце находится в зените; *3* - солнечной радиации при слабой облачности

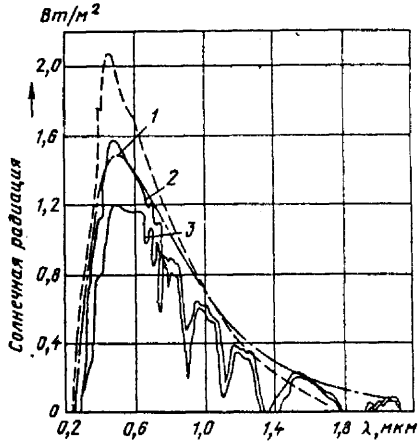


Рис. 2.5.31. Спектральное распределение излучения: *1* - ксеноновой газоразрядной лампы высокого давления; *2* - солнечной радиации, когда Солнце находится в зените; *3* - солнечной радиации при слабой облачности

В отличие от источников излучения, основанных на нагревании, которые дают сплошной спектр, *электролюминесцентные излучатели* имеют прерывистый спектр. Они характеризуются высокоинтенсивным селективным излучением в очень узкой области спектра, зависящей от газового заполнения.

К люминесцентным относятся также и *ксеноновые излучатели*, обеспечивающие получение спектра, наиболее приближающегося к солнечному (рис. 2.5.31). Спектр излучения зависит от длины разрядных промежутков, от мощности ламп, от их геометрической формы и размеров. Так, при коротких разрядных промежутках относительная энергия излучения больше, чем при длинных, и она в большей степени сосредоточена в ИК части спектра. Потребляемая мощность ксеноновых излучателей и эксплуатационные расходы весьма значительны. Теоретический срок службы порядка 5 000 ч.

Дуговые лампы основаны на использовании дугового разряда, образующегося между двумя угольными или графитовыми электродами. Они позволяют получить спектр излучения, имеющий максимум в области коротковолновой части инфракрасного излучения (0,7 ... 0,8 мкм) и пик в начале ультрафиолетовой части спектра. Недостатками дуговых ламп являются: постепенное затухание вольтовой дуги, приводящее к ограниченному времени непрерывной работы, а также недостаточная локализация и фиксация источника излучения.

Сравнение спектра солнечного излучения со спектрами ламп, применяемых для его имитации, показывает их недостаточное совпадение. В то время как солнечный свет дает приблизительно непрерывный (сплошной) спектр, все искусственные источники имеют определенные спектральные линии. В связи с этим для получения необходимого спектра излучения применяют *светофильтры*, которые могут быть стеклянными и жидкостными, абсорбционными и интерференционными. Выбор светофильтров зависит от источника излучения и его использования. Предпочтение отдается стеклянным фильтрам. К недостаткам стеклянных фильтров можно отнести неодинаковую оптическую плотность стекол, тенденцию к изменению спектральных характеристик под воздействием излучения.

В ряде случаев находят применение *многослойные стеклянные интерференционные светофильтры*, действие которых основано на интерференции лучей, многократно отражающихся и проходящих через тонкие слои прозрачных материалов. Подбирая показатели преломления, толщины и число этих слоев, можно получать различные светофильтры с почти произвольными спектральными свойствами. Интерференционные фильтры меньше нагреваются и обычно более стабильны, чем абсорбционные.

Хорошие результаты дает *комбинация интерференционных и абсорбционных светофильтров*. Таким образом, спектр излучения ксеноновой лампы может быть откорректирован с помощью комбинации абсорбционных светофильтров для инфракрасной и ультрафиолетовой областей.

Большая удаленность Солнца от Земли приводит к тому, что солнечные лучи падают на земную поверхность параллельно, в то время как искусственные источники излучения

находятся на сравнительно близком расстоянии от поверхности испытуемого изделия и не обеспечивают аналогичного направления лучей. Вследствие этого для обеспечения равномерного распределения интенсивности излучения в плоскости измерения необходимо применение *рефлектора* в виде параболического вогнутого зеркала. При этом важное значение имеет конструкция используемой лампы. Так, например, при применение и ксеноновой лампы возможно образование теней от ее электродов и опор. Иногда для обеспечения равномерности облучения используют ксеноновую лампу с длинным разрядным промежутком, укрепленную в желобообразном параболическом рефлекторе (рис. 2.5.32).

Источники излучения в камерах солнечной радиации рекомендуется размещать вне их рабочего объема, за специальным остеклением, исключающим, с одной стороны, воздействие на изделие большого количества теплоты, выделяемой лампами, и загрязнение испытуемых изделий озоном, образующимся в результате ультрафиолетового излучения ксеноновых, дуговых и других ламп, а с другой стороны, уменьшающим воздействие повышенной влажности в испытательной камере на оптические элементы. Попадание озона и других газов в рабочий объем камеры может оказывать значительное влияние на процессы деградации некоторых материалов.

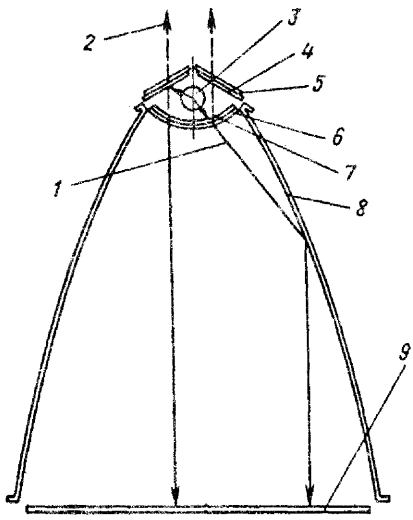


Рис. 2.5.32. Излучатель, имитирующий солнечное излучение:
1 - излучения ультрафиолетового и видимого спектра; *2* - ИК-излучения; *3* - ксеноновая лампа; *4* - зеркало УФ-излучения; *5* - зеркало излучения видимого спектра; *6* - оболочка из кварцевого стекла с избирательно отражающим слоем ИК-излучения; *7* - дополнительный фильтр УФ-излучения; *8* - параболический рефлектор; *9* - образующая поверхность

Средства измерений воздействия солнечного излучения. Постепенное изменение интенсивности излучения и спектрального распределения энергии излучения по сравнению с первоначальным, возникающее в процессе эксплуатации камер, требует регулярного контроля значений параметров воспроизводимых в камере испытательных режимов. С течением времени могут изменяться спектральные характеристики рефлекторов, светофильтров и ламп вследствие постепенного испарения материала электродов, который осаждается тонким слоем на их баллоне. К неприемлемым изменениям значений параметров излучения может приводить замена ламп.

Для оценки солнечной радиации находят применение ряд приборов.

Пиргелиометр - прибор для измерения прямого солнечного излучения, падающего на поверхность, перпендикулярную солнечным лучам. Он является эталонным прибором и применяется для поверки актинометров.

Пиранометр - прибор для измерения суммарного рассеянного солнечного излучения, поступающего на горизонтальную поверхность; применяется в сочетании с избирательными фильтрами.

Актинометр - прибор для измерения интенсивности прямого солнечного излучения; он измеряет относительные значения в отличие от пиргелиометра, измеряющего абсолютные значения. Определение интенсивности ультрафиолетового излучения осуществляется фотохимическим способом, основанным на вычислении изменения интенсивности ультрафиолетового излучения по результатам изменения оптической плотности светочувствительного раствора под действием излучения.

Наряду с определением суммарной интенсивности излучения представляет интерес исследование спектральных характеристик, осуществляемое сложными *спектрорадиометрическими приборами*.

В связи с высоким уровнем интенсивности излучения для измерения температуры в камере могут применяться термопреобразователи только определенного принципа действия. Рекомендуется использование термопар, устанавливаемых внутри радиационных экранов, изготовляемых из мельхиора.

При необходимости измерения температуры испытуемых изделий термопреобразователи следует устанавливать на внутренней поверхности (кожухов).

Испытания на воздействие солнечного излучения проводят для определения его влияния на тепловые, механические, химические, электрохимические и другие явления, происходящие в испытуемых изделиях.

В НТД на изделие необходимо указывать способы установки его в камеру (на опорных стойках либо на основании, обладающем определенной теплопроводностью), обеспечивающие необходимое положение относительно направления излучения. Хорошие результаты дает использование в качестве материала для основания бетона заданной толщины или слоя песка.

Действие солнечного облучения на испытуемое изделие существенно зависит от состояния его поверхности, определяющего характер поглощения, поэтому необходимо, чтобы оно отвечало требованиям испытаний, например отсутствие загрязнений поверхности (масляных пленок, пыли и т.д.).

После стабилизации изделия в нормальных климатических условиях в течение заданного времени его тщательно осматривают и измеряют значения определенных параметров, стабильность которых зависит от воздействия солнечной радиации.

Изделие устанавливают в камеру в положение, при котором наиболее уязвимые элементы его конструкции будут обращены к источникам излучения. При этом должна исключаться возможность экранирования излучения источника или отраженного излучения.

В зависимости от цели испытаний находят применение три метода их проведения: *А*, *В*, *С*.

Метод А применяется, когда основной интерес представляют результаты теплового воздействия. Метод *А* характеризуется 24-часовым циклом, состоящим из 8-часовой фазы облучения и 16-часовой темновой фазы. За указанный период времени обеспечивается получение изделием фазы облучения 8,96 кВт·м$^{-2}$, что приближается к наиболее жестким естественным условиям.

Температура воздуха в камере должна повышаться за 2 ч до начала фазы облучения. Увеличение фазы облучения свыше 8 ч ускоряет воздействие радиации по сравнению с естественными условиями.

Продолжительность испытаний (число циклов) зависит от габаритных размеров и массы испытуемых изделий.

В общем случае рекомендуются три цикла испытаний, однако в случаях испытаний крупногабаритных изделий требуется увеличить число циклов для достижения максимальной внутренней температуры и выявления процессов деградации.

Метод В применяется, когда основной интерес представляют процессы деградации. Метод *В* характеризуется 24-часовым циклом, состоящим из 20-часовой фазы облучения и 4-часовой темновой фазы. При этом доза облучения составляет 22,4 кВт·м$^{-2}$ за цикл. Известно, что фотохимические процессы деградации материалов, красок, пластмасс зависят также от влажности окружающей среды, поэтому иногда в начале 20-часовой фазы облучения возможно одновременное воздействие влажного тепла (относительная влажность 93+3 % при $t = 40 \pm 2$ °С).

Метод С применяется, когда необходимо оценить только фотохимический эффект, а циклические тепловые нагрузки не имеют значения. Метод *С* характеризуется непрерывным 24-часовым облучением. Данный метод считается упрощенным, и при его применении могут быть не выявлены явления деградации, обусловленные циклическими тепловыми нагрузками.

При реализации всех трех методов интегральная поверхностная плотность потока излучения должна быть равна 1,120 кВт·м$^{-2}$ + + 10 % (в том числе поверхностная плотность потока ультрафиолетовой части спектра 68 Вт·м$^{-2}$). Спектральное распределение должно соответствовать данным, указанным в табл. 2.5.5.

Во время фазы облучения температура воздуха в камере должна повышаться с приблизительно постоянной скоростью и поддерживаться на уровне 40 или 55 °С с точностью ± 2 °С. При проведении испытаний с одновременным воздействием влажности необходимо указывать период, в течение которого она должна поддерживаться:

а) во время фаз облучения;

б) во время темновых фаз;

в) в течение всей продолжительности испытаний.

Продолжительность испытаний (число циклов) зависит от цели испытаний, и ее рекомендуют выбирать из следующего ряда: 3, 5, 10, 56 циклов. Сокращение продолжительности испытаний за счет увеличения поверхностной плотности потока (интенсивности) излучения не рекомендуется.

В НТД на изделие следует указывать, должно ли оно функционировать в процессе испытаний и значения каких параметров необходимо измерять.

В случаях, когда требуется проводить испытания солнечных батарей, систем слежения за Солнцем и других изделий, предназначенных для космических исследований, необхо-

димо обеспечение точной коллимации лучей от излучателя (т.е. оптическая ось рефлектора должна составлять прямой угол с поверхностью изделия).

2.5.7.2. ИСПЫТАНИЯ НА ВОЗДЕЙСТВИЕ ПОНИЖЕННОГО АТМОСФЕРНОГО ДАВЛЕНИЯ

Под действием пониженного атмосферного давления возникают:

тепловые повреждения, вызванные ухудшением условий охлаждения;

электрические повреждения, такие, как снижение электрической прочности воздуха, приводящей к опасности возникновения дугового и поверхностного коронного разрядов с образованием озона;

механические повреждения вследствие образования перепадов давления между воздухом внутри и снаружи изделия, нарушения герметичности, появления течи и т.д.

Таким образом, изменяются характеристики, влияющие на безопасность изделий, вызванные изменениями диэлектрических свойств воздуха (плотность воздуха и подвижность ионов).

Для испытаний на воздействие пониженного атмосферного давления и температуры используют *термобарокамеры*, воспроизводящие пониженное атмосферное давление при нормальной, повышенной или пониженной температурах.

Основными параметрами, характеризующими термобарокамеры, являются:

диапазон значений атмосферного давления;

точность поддержания давления;

скорость откачки газа из рабочего объема камеры, время выхода на режим, состав остаточных газов, а также температурные режимы.

Для создания пониженного атмосферного давления в термобарокамере используют вакуумные насосы различных типов.

Возможны два принципа построения термобарокамер: с расположением теплоизоляции снаружи или внутри стенок камеры (рис. 2.5.33).

При *наружном расположении теплоизоляции* вне вакуумированной части уменьшаются требования к производительности систем нагрева и охлаждения, поскольку уменьшаются потери теплоты на нагрев теплоизоляции, обладающей большой массой и хорошей теплоемкостью.

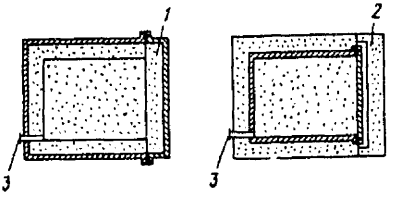


Рис. 2.5.33. Схема термобарокамер:
1 - теплоизоляция внутри; *2* - теплоизоляция снаружи стенок камеры; *3* - герметичный ввод (соединитель)

При *внутреннем расположении теплоизоляции* возможны такие отрицательные явления, как загрязнение воздуха в камере испарениями, выделяемыми теплоизоляцией, ее увлажнение и ряд других. Вследствие этого первая конструкция является предпочтительной.

Важным является выбор толщины стенок вакуумированной части, которая при разрежении, соответствующем 133 Па, должна выдерживать воздействие внешнего атмосферного давления не менее 101 кПа. Необходимость в минимальной толщине стенок объясняется тем, что нагрев (охлаждение) осуществляется с помощью терморубашки, так как термовоздействие на испытательное пространство при вакууме в камере практически невозможно. Диапазон температур, воспроизводимых в термобарокамерах, составляет -40 ... 95 °С либо -80 ... +95 °С.

Принудительная циркуляция воздуха в термобарокамерах затруднена, поэтому используются мощные аксиальные вентиляторы. Время снижения давления на 99,6 кПа составляет около 20 мин. Современные термобарокамеры имеют задающие устройства, обеспечивающие воспроизведение определенного закона изменения давления и температуры.

Для испытания изделий под электрической нагрузкой в стенке камеры смонтированы герметичные вводы (соединители), расстояние между которыми выбирают из условия, исключающего возникновение ионизационных процессов при пониженном давлении и заданных напряжениях, подаваемых на изделия.

Средства измерений атмосферного давления. Для измерения давления в термобарокамерах применяют *манометры*, которые классифицируются по ряду признаков:

по виду измеряемого давления;

по принципу действия;

по классу точности.

По виду измеряемого давления манометры делятся на две группы, различающиеся началом отсчета. В первую группу входят манометры избыточного давления, равного разности между барометрическим давлением и давлени-

ем разреженного газа (вакуумметрическим давлением). Приборы, предназначенные для измерений вакуумметрических давлений, называются *вакуумметрами*, а иногда *мановакуумметрами*.

Во вторую группу входят манометры, измеряющие абсолютное давление (например, давление атмосферы), - *барометры*.

По принципу действия различают четыре основные группы манометров: жидкостные, деформационные, грузопоршневые и электрические.

По классам точности манометры различают в зависимости от предельного значения допустимых основных и дополнительных погрешностей, выраженных в процентах диапазона измерений прибора.

При измерении разрежения в термобарокамерах наиболее широкое применение получили деформационные механические мановакуумметры, основанные на использовании упругих чувствительных элементов, представляющих собой мембрану, коробку или трубку, способную упруго деформироваться под воздействием разности между внутренним и внешним давлениями. Эта деформация служит мерой разности указанных выше давлений. Поскольку деформация упругого элемента весьма незначительна, в конструкцию манометров входят передаточные механизмы, служащие для передачи деформации упругого элемента, увеличенной в необходимое число раз, к движущемуся по шкале указателю. Деформационные манометры обеспечивают измерения давлений в широком диапазоне: 100 ... 10^9 Па (0,75 ... $75 \cdot 10^7$ мм рт. ст.) при 0 °С.

Погрешности деформационных манометров составляют ± 0,16 ... ± 4 % верхнего предела измерений.

Наибольшее распространение получили *деформационные манометры с упругим элементом* типа трубчатых пружин и передаточным механизмом секторного или рычажного типа. Образцовые манометры снабжаются механизмом установки нулевого положения стрелки (корректором нуля), что позволяет увеличить продолжительность межповерочного периода. Коррекция достигается принудительным возвращением свободного конца трубчатой пружины в нулевое исходное положение под действием приложенной к нему силы.

Для регистрации максимального измеряемого давления находят применение манометры с контрольной стрелкой, позволяющей определить и зафиксировать максимально достигнутое давление.

Для задания определенного значения разрежения используют контактный (сигнальный) манометр, у которого стрелка предварительно устанавливается в сигнальное положение. При достижении заданного значения давления контакт на стрелке замыкается. Для измерения давления внутри камеры манометр соединяется с рабочим объемом камеры манометрическими трубками (трубопроводами). В случае, когда температура манометра отличается от температуры заборной трубки, находящейся в камере, возникает погрешность измерений. При этом применение коротких трубопроводов большого диаметра приводит к увеличению погрешности, а применение длинных трубопроводов малого диаметра вызывает задержку во времени показаний манометра по отношению к изменению давления.

Погрешности при измерении давления возникают также за счет изменения температуры одного из участков равновесной вакуумной системы (камера - трубопровод - насос, а также манометр - камера).

Методы испытаний. Целью испытаний изделий на воздействие пониженного атмосферного давления является определение их пригодности для эксплуатации в наземных или авиационных условиях на больших высотах при атмосферных давлениях не ниже 1,33 кПа. Испытания на воздействие пониженного атмосферного давления, действующего в пределах стратосферы, осуществляются одним из методов, определяемых температурой окружающей среды. Различают испытания при нормальной, повышенной или пониженной рабочих температурах.

Испытаниям на воздействие *пониженного атмосферного давления* при нормальной температуре подвергают тепловыделяющие и нетепловыделяющие изделия, находящиеся в рабочем состоянии, для которых температурные воздействия не являются критичными, так как не влияют на их тепловой режим.

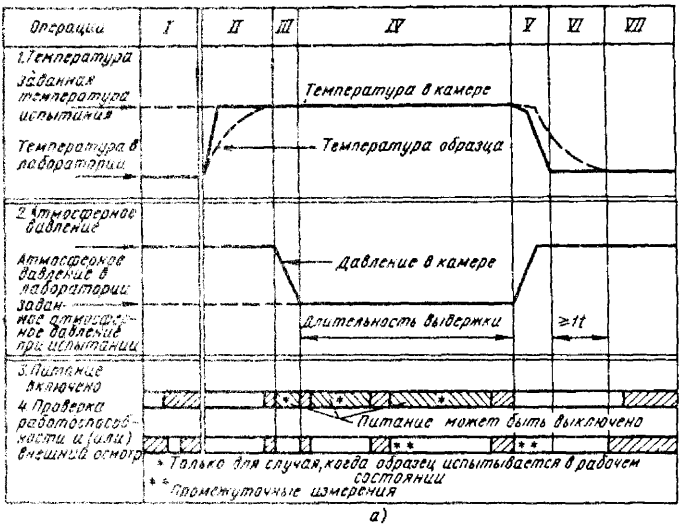
Испытаниям на *воздействие пониженного атмосферного давления при повышенной (пониженной) температуре* подвергают тепловыделяющие изделия, для которых температурное воздействие при электрической нагрузке является критичным. Одним из важных условий является правильный выбор соотношения площади поверхности, окружающей изделия, и общей площади поверхности изделия.

Испытания на воздействие пониженного атмосферного давления проводятся с соблюдением приводимых ниже методик, различных для тепловыделяющих и нетепловыделяющих изделий. Разница заключается в том, что тепловыделяющие изделия предпочтительно испытывать в камере без принудительной циркуляции воздуха, а нетепловыделяющие изделия - в камере с принудительной циркуляцией воздуха. Испытания следует проводить при комбинациях воздействий атмосферного давления, температуры и длительности.

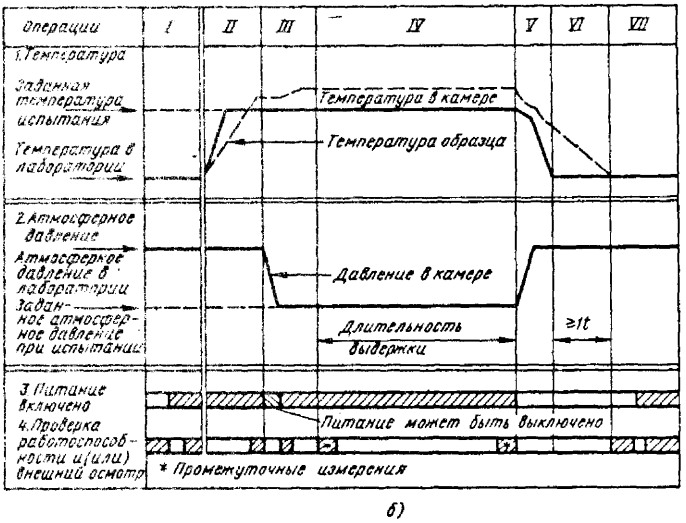
Метод испытаний на воздействие пониженного атмосферного давления при нормальной температуре. Для реализации метода используют барокамеры и термобарокамеры. Процесс испытаний складывается из приведенных ниже операций:

I. Процесс испытаний начинается с предварительной выдержки в нормальных атмосферных условиях, завершающейся первоначальными измерениями, предусматривающими внешний осмотр, измерение значений электрических параметров и проверку механических характеристик.

II. Изделие в готовом для эксплуатации состоянии помещают в камеру и устанавливают в рабочем положении. Если предусмотрено одновременное испытание группы тепловыделяющих изделий, то для их установки определяют минимально достижимые расстояния между ними. Включают питание тепловыделяющего и нетепловыделяющего изделия. По достижении теплового равновесия проводят контроль работоспособности, после чего нетепловыделяющие изделия могут быть выключены.



а)



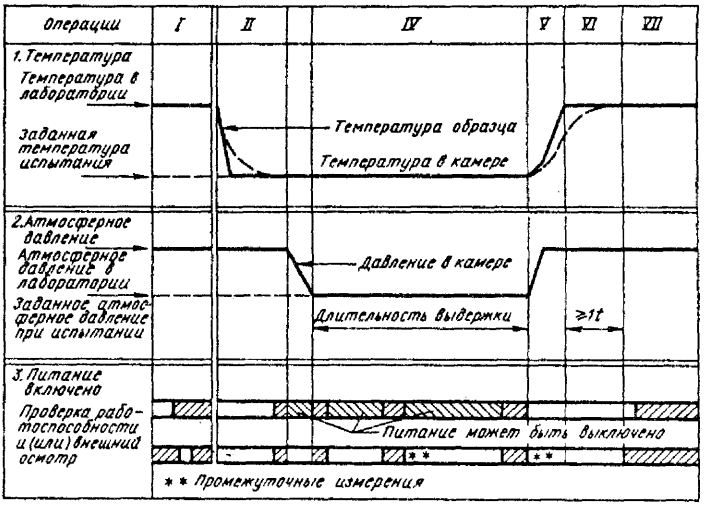
б)

Рис. 2.5.34. Режим испытаний на воздействие повышенной температуры и пониженного атмосферного давления: *а* - нетепловыделяющих изделий; *б* - тепловыделяющих изделий; *t* - время, в течение которого температура в камере достигнет значения, лежащего в пределах, установленных для нормальных атмосферных условий

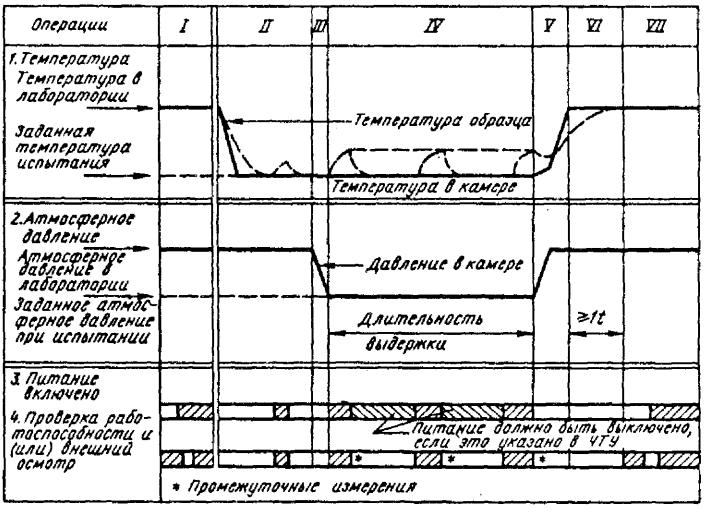
III. Устанавливают в камере пониженное атмосферное давление, предусмотренное НТД. Давление в камере снижают до определенного значения со скоростью, не превышающей 10 кПа·мин$^{-1}$. В процессе понижения давления проверяют параметры изделий, зависящие от электрической прочности.

IV. Проводится выдержка, в течение которой давление поддерживается неизменным. Во время выдержки нетепловыделяющие изделия могут оставаться в рабочем состоянии или быть выключены в соответствии с требованиями НТД. Тепловыделяющие изделия могут оставаться во включенном состоянии или включаться в соответствующее время перед измерениями. Оценка их работоспособности или промежуточные измерения проводятся только после достижения изделием теплового равновесия. Последние промежуточные измерения должны выполняться в течение последнего часа выдержки.

V. Давление в камере восстанавливается до значения, соответствующего нормальным атмосферным условиям. Давление повышается



а)



б)

Рис. 2.5.35. Режим испытаний на воздействие пониженной температуры и пониженного атмосферного давления: *а* - нетепловыделяющих изделий; *б* - тепловыделяющих изделий

со скоростью, не превышающей 10 кПа·мин$^{-1}$.

VI. Восстановление.

VII. Заключительные измерения.

При испытаниях на одновременное воздействие пониженного атмосферного давления и температуры (повышенной или пониженной) следует внести в операции I, IV и V ряд изменений (рис. 2.5.34 и рис. 2.5.35). В операцию II необходимо добавить включение системы нагрева (охлаждения) камеры для установления в ней температуры, соответствующей заданной в НТД степени жесткости. Скорость изменения температуры в камере не должна превышать 1 °С · мин$^{-1}$. При выполнении данной операции изделие выдерживают при заданной температуре до установления теплового равновесия, после чего оно включается и проверяется его работоспособность. Во время операции III в камере снижается давление со скоростью, не превышающей 10кПа · мин$^{-1}$, до значения, соответствующего заданной степени жесткости. При этом изделие должно быть включено и находиться в рабочем состоянии. Во время выполнения операции IV следует поддерживать одновременно с давлением и заданное значение температуры. Рекомендуемые длительности выдержки 5 мин, 30 мин, 2 ч, 4 ч и 16 ч. В процессе восстановления нормальных атмосферных условий (операция V) следует одновременно с повышением давления изменять температуру до нормальной со скоростью, не превышающей 1 °С · мин$^{-1}$.

При проведении рассмотренных испытаний состав атмосферы в испытательной камере не соответствует естественным условиям. Он в значительной степени определяется типом насосов, применяемых для понижения атмосферного давления, содержанием водяных паров, приводящих к конденсации влаги, что недопустимо. При необходимости влажность может быть измерена прибором, определяющим температуру точки росы. Таким образом, различие в составе естественной и искусственной атмосферы может приводить к погрешности коэффициента конвекции $\alpha_к$, которая не должна превышать 10 %. Необходимо учитывать, что к отрицательным побочным воздействиям на испытуемые изделия могут также приводить следующие факторы:

загрязнение воздуха в камере испарениями рабочей жидкости насоса и испарениями, выделяемыми вспомогательными частями камеры (вентилями, теплоизоляционными материалами и т.д.);

загрязнение пылью или водой, содержащейся в нагнетаемом воздухе при восстановлении давления до нормального.

Особое внимание следует обратить на измерения температуры в термобарокамере. Наличие пониженного атмосферного давления снижает эффективность теплообмена между испытательной средой и чувствительным элементом термометра за счет уменьшения коэффициента теплоотдачи (конвекции), что приводит к увеличению времени реакции термометра на изменение температуры. Кроме того, при испытании тепловыделяющих изделий появляется или увеличивается погрешность измерения, вызванная уменьшением коэффициента теплоотдачи воздушной среды в камере. При пониженном давлении термометр будет в меньшей мере подвержен воздействию тепловой энергии, что приведет к росту погрешности измерений. Применение экранов, защищающих термометр от излучения, может уменьшить данную погрешность.

2.5.7.3. ИСПЫТАНИЯ НА ВОЗДЕЙСТВИЕ ПЛЕСНЕВЫХ ГРИБОВ

Испытания проводят для определения способности изделий или их отдельных узлов и сборочных единиц противостоять развитию грибковой плесени.

Сущность метода испытаний на устойчивость к воздействию плесневых грибов заключается в выдерживании изделий, зараженных спорами плесневых грибов, в условиях, оптимальных для их развития с последующей оценкой грибоустойчивости.

Образцами для испытаний являются изделия или детали. Допускается испытывать:

1) отдельные узлы крупногабаритных и дорогостоящих изделий;

2) макеты при условии соблюдения конструктивно-технологического подобия их изделиям;

3) изделия, забракованные по электрическим параметрам, если они не имеют нарушений внешнего вида.

Испытания проводят на образцах, не подвергающихся климатическим и механическим видам испытаний.

Количество испытуемых образцов устанавливают в соответствии с НТД на изделие. Если количество образцов в НТД не указано, испытывают не менее трех образцов.

Виды грибов

Для испытания изделий, кроме оптических деталей, применяют следующие виды грибов:

Aspergillus niger van Tieghem.

Aspergillus terreus Thom.

Aureobasidium pullulans (de Bary) Arnaud.

Paecilomyces variotii Bainier.

Penicillium funiculosum Thom.

Penicillium ochro-chloron Biourge.

Spopulariopsis brevicaulis Bainier.

Trichoderma viride Pers. ex S. F. Gray.

Для испытаний оптических деталей вне сборки используют следующие виды грибов:

Aspergillus penicilloides Speg.
Aspergillus terreus Thom.
Paecilomyces variotii Bainier.
Penicillium chrysogenum Thom.
Scopulariopsis brevicaulis Bainier.

Испытание на стойкость к воздействию плесневых грибов проводят четырьмя методами:

1-й. Сущность метода заключается в том, что образцы, очищенные от внешних загрязнений, заражают водной суспензией спор грибов и выдерживают в условиях, оптимальных для их развития, в течение 28 сут.

Оптические детали испытываются только этим методом.

2-й. Сущность метода заключается в том, что изделие без очистки от внешних загрязнений заражают водной суспензией спор грибов и выдерживают в условиях, оптимальных для их развития, в течение 28 сут.

3-й. Сущность метода заключается в том, что изделие без очистки от внешних загрязнений заражают суспензией спор грибов и выдерживают в условиях, оптимальных для их развития, в течение 84 сут.

4-й. Сущность метода заключается в том, что изделия заражают суспензией грибов в питательной среде и выдерживают в условиях, оптимальных для их развития, в течение 28 сут.

Для испытаний используют специальные испытательные камеры или оборудование общего применения.

Специальные испытательные камеры должны обеспечивать получение повышенной температуры и влажности среды, ее незначительную подвижность и затемненность, а также автоматическое поддержание заданного режима испытаний.

Камера КВТ/Г-1М характеризуется следующими техническими данными:

температура 25 ± 10 ... 60 ± 2 °С;
относительная влажность 65±15 ... 98±2 % при температуре до +35 ± 2 °С;
скорость повышения температуры 0,1 ... 0,5 °С · мин$^{-1}$;
скорость увеличения относительной влажности 0,2 % в минуту;
неравномерность распределения температуры в камере ± 2 °С, относительной влажности +2 ... -3 %.

К оборудованию общего применения могут быть отнесены эксикаторы и термостаты с сосудами с водой для поддержания внутри них относительной влажности свыше 90 %. Термостаты, используемые для испытаний, должны сохранять температуру во всем рабочем объеме в пределах +(28 ... 30) °С. При этом изменение температуры не должно превышать 1 °С в один час.

Состав споровой суспензии зависит от материалов испытуемых изделий.

Суспензию приготовляют в дистиллированной воде, к которой добавляют 0,005 % нефунгицидного смачивающего агента (N метил таурид или диоктил содиум сульфосуцинат). Все культуры перемешивают во избежание образования комочков спор. Суспензия должна использоваться в день своего приготовления, и ее не следует хранить для дальнейшего использования.

Проведение испытаний начинают с проверки внешнего вида изделий (образцов) и, если это предусмотрено, измерения значений электрических параметров, проверки их механических свойств на соответствие требованиям НТД. Иногда для внешнего осмотра могут применяться оптические приборы с 50-кратным увеличением. В случаях, когда это оговорено в НТД, этим операциям должны предшествовать удаление средств консервации и очистка от внешних загрязнений. Способ и материал для очистки (этиловый спирт, вода и т.д.) зависят от материалов изделия. Бывает полезным очищать от загрязнений половину изделий (образцов), чтобы путем сравнения роста грибов можно было оценить грибоустойчивость изделий. Однако главное требование - проведение испытаний изделий (образцов) в тех условиях, в которых они должны использоваться.

Осуществление испытаний зависит от выбранного метода их проведения и от применяемого оборудования. В случае, когда *геометрические размеры изделий малы и испытания проводятся по первому методу*, может использоваться эксикатор или термостат. Однако изделия до момента их размещения необходимо заразить спорами грибов, что осуществляется в специальных боксах. С этой целью изделия совместно с контрольными чашками Петри помещают в бокс, где с помощью пульверизатора равномерно наносят на доступные поверхности изделия водный раствор споровой суспензии, не допуская при этом слияния капель.

Зараженные спорами грибов изделия и чашки Петри с питательной средой помещают в эксикатор или термостат не позднее чем через 15 мин после опрыскивания. При размещении изделий необходимо, чтобы расстояния между ними были не менее 20 мм, а расстояние от стенок не менее 50 мм. Эксикатор (термокамеру) закрывают и в течение пяти суток поддерживают температуру 29 ± 2 °С и относительную влажность воздуха более 90 %. При этом не допускаются конденсация влаги,

принудительная вентиляция и воздействие света.

По истечении пяти суток осмотром чашек Петри оценивается жизнеспособность спор. Если на питательной среде не наблюдается роста грибов, что свидетельствует о нежизнеспособности спор грибов, испытания повторяют на новых изделиях с вновь приготовленной суспензией. Если же имеет место нормальный рост грибов, то испытания продолжают в течение времени, предусмотренного выбранным методом. При испытании в эксикаторе для обеспечения притока свежего воздуха через каждые семь суток приоткрывают его крышку на 3 мин.

При испытаниях изделий в специальных камерах выполняют аналогичные подготовительные операции, но заражение изделий (т.е. опрыскивание споровой суспензией) осуществляется непосредственно в камере. После подтверждения жизнеспособности спор контролируется режим камеры ($t = 29 \pm 2\,^{\circ}C$, относительная влажность воздуха более 90 %), и в ней создается затемнение, исключающее проникновение естественного и искусственного света, а также обеспечивается неподвижность воздуха.

После испытаний образцы извлекают из камеры или эксикатора и тотчас осматривают при освещенности 200-300 лк невооруженным глазом, затем под микроскопом при увеличении 56-60^{x} и оценивают грибоустойчивость каждой детали изделия по интенсивности развития грибов (табл. 2.5.6).

По результатам внешнего осмотра делают заключение о грибостойкости изделия в целом по детали с максимальным баллом.

2.5.6. Оценка грибостойкости изделия

Балл	Характеристика балла
0	Под микроскопом прорастания спор и конидий не обнаружено
1	Под микроскопом видны проросшие споры и незначительно развитый мицелий
2	Под микроскопом виден развитый мицелий, возможно спороношение
3	Невооруженным глазом мицелий и (или) спороношение едва видны, но отчетливо видны под микроскопом
4	Невооруженным глазом отчетливо видно развитие грибов, покрывающих менее 25 % испытуемой поверхности
5	Невооруженным глазом отчетливо видно развитие грибов, покрывающих более 25 % испытуемой поверхности

Изделие считают грибостойким, если развитие грибов на нем не превышает балл, установленный в НТД.

Допустимые показатели роста грибов на испытуемом изделии в баллах устанавливаются НТД в зависимости от назначения, условий эксплуатации и хранения изделий.

Изделия электронной техники и электротехнические считаются выдержавшими испытания, если рост грибов не превышает 2 баллов.

Для выявления причин поражения изделий грибами можно несколько усложнить первый метод за счет того, что вся выборка изделий (четное количество) делится на две группы. Одну группу подвергают предварительной очистке от внешних загрязнений, а другую нет. Оценка результата испытаний проводится по обеим группам. Положительным результатом испытаний первой группы является рост грибов не выше 1 балла, а второй группы - не выше 2 балла. В этом случае считают, что изделие выдержало испытания.

По окончании испытаний изделие необходимо продезинфицировать. Для этой цели его можно выдержать в автоклаве при давлении 10 кПа и температуре 121 °С в течение 20 мин с последующим уничтожением или промыть (протереть) 5 %-ным раствором фенола (формальдегида) или 10 %-ным раствором перекиси водорода. Изделия, не представляющие материальной ценности, после дезинфекции подлежат уничтожению. Оптические детали протирают спиртом.

До испытаний и после них бокс и все приборы, допускающие облучение, подвергают воздействию ультрафиолетовых лучей в течение 20 мин. Микроскоп и различный мелкий инструмент протирают спиртом.

2.5.8. ИСПЫТАНИЯ НА ВОЗДЕЙСТВИЕ СПЕЦИАЛЬНЫХ СРЕД

Специальные среды - это среды (неорганические и органические соединения, масла, смазки, растворители, топлива, рабочие растворы, рабочие тела), внешние по отношению к изделию, которые вызывают или могут вызвать ограничение или потерю работоспособности изделия в процессе эксплуатации или хранения.

К специальным средам относят пары химических веществ, химические растворы (дезинфицирующие, дезактивирующие, дегазирующие), кислоты, газы и другие вещества, в присутствии которых могут работать изделия. Изделия, предназначенные для работы в специальных средах, должны обладать повышенной стойкостью к воздействию этих сред и для проверки ее проводятся соответствующие испытания. Виды специальных сред приведены в табл. 2.5.7.

2.5.7. Виды специальных сред

Вид специальной среды	Буквенное обозначение или формула	Агрегатное состояние	Номинальное верхнее значение концентрации специальной среды при длительном воздействии
1	2	3	4
Специальные среды групп 1, 2, 3			
Все виды	-	Газообразное, парообразное	ПДК р.з.
Специальные среды группы 4			
Аргон	Ar	Газообразное	90 %
Аргон + азот	Ar + N_2	То же	90 % Ar
Гелий	He	- " -	90 %
Азот	N_2	- " -	90 %
Специальные среды группы 5			
Окислы азота в пересчете на NO_2	NO_2	Газообразное	5 мг/м^3
Аммиак	NH_3	То же	20 мг/м^3
Амил	-	- " -	ПДК р.з.
Гептил	-	- " -	10 ПДК р.з.
Сероводород	H_2S	- " -	10 мг/м^3
Серы двуокись	SO_2	- " -	10 мг/м^3
Серы трехокись и серная кислота	SO_3 и H_2SO_4	- " -	1 мг/м^3
		Зола	1 мг/м^3
Хлор	Cl_2	Газообразное	1 мг/м^3
Хлористый водород	HCl	То же	5 мг/м^3
Озон	O_3	- " -	0,1 мг/м^3
Углекислый газ	CO_2	- " -	30 000 мг/м^3
Другие виды, помимо указанных выше	-	Газо- или парообразные	ПДК р.з.
Смеси			
Аммиак+сероводород	$NH_3 + H_2S$	- " -	(20 + 10) мг/м^3
Двуокись серы + хлористый водород	$SO_2 + HCl$	- " -	(10 + 5) мг/м^3
Трехокись серы + окислы азота в пересчете на N_2O_5	$SO_3 + N_2O_5$	- " -	(1 + 5) мг/м^3
Трехокись серы + водород хлористый	$SO_3 + HCl$	- " -	(1 + 5) мг/м^3
Трехокись серы + двуокись серы	$SO_3 + SO_2$	- " -	(1 + 10) мг/м^3
Хлористый водород + аммиак	$HCl + NH_3$	- " -	(5 + 20) мг/м^3

Продолжение табл. 2.5.7

1	2	3	4
Специальные среды группы 6			
Гидроокись натрия	$NaOH$	Жидкое	10 %-ный раствор
Свежегашеная известь	$Ca(OH)_2$	То же	20 %-ная взвесь
Хлористая известь (осветленный раствор)	$Ca(ClO)Cl$	- " -	5 %-ный раствор
Раствор № 1-4	-	Жидкое	По стандартам и техническим условиям на изделия конкретных серий и типов
Рецептура РД	-	То же	То же
Формалин	-	- " -	40 %-ный раствор
Формалин-креолиновая смесь	-	- " -	В соотношении 3:1
Хлороформ	$CHCl_3$	- " -	0,06 л/м^2 поверхности орошения
Кальцинированная сода	$NaCO_3$	- " -	10 %-ный раствор
Натрий хлористый	$NaCl$	- " -	Насыщенный раствор
Борная кислота + тиосульфат натрия	$H_3BO_3 + Na_2SO_3$	- " -	16 г/кг раствора
Специальные среды группы 7			
Все виды		Жидкое	По стандартам и техническим условиям на изделия конкретных серий и типов

Примечания:

1. Приведенные номинальные значения концентрации агрессивных сред, кроме гептила, соответствуют ПДК р.з.

2. Частота и метод обработки изделий специальными средами группы 6 - в соответствии со стандартами и техническими условиями на изделия конкретных серий и типов.

3. Для сред группы 4 минимальная продолжительность воздействия при использовании в качестве контрольных: 300 ч для аргона и аргона+азота, 24 ч для гелия; остаточная концентрация аргона с средах заполнения 1,5 %.

4. Виды и значения концентрации специальных сред групп 1 - 3, 5 в жидком состоянии устанавливают при необходимости в технических заданиях и (или) в стандартах и технических условиях на изделия конкретных серий или типов.

5. Предельно допустимая концентрация (ПДК) - это предельно допустимая концентрация химического соединения, утвержденная в установленном порядке, значение которой при длительном воздействии не вызывает в организме человека патологических изменений, мг/м^3.

ПДК р.з. - это ПДК в рабочих зонах.

Рабочая зона - это пространство высотой до 2 м над уровнем пола или площадки, на которых находятся места пребывания работающих.

Изделия должны быть стойкими к воздействию специальных сред, классификационные группы которых приведены ниже:

1 - масла, смазки на основе нефтепродуктов и синтетические;

2 - топлива на основе нефтепродуктов;

3 - органические растворители;

4 - среды заполнения и контрольные среды:

а) среды заполнения А и контрольные среды;

б) среды заполнения В;

5 - агрессивные среды;

6 - рабочие растворы;

7 - специальные охлаждающие жидкости.

Здесь среды заполнения - это среды (кроме воздуха), используемые для заполнения объемов, в которых эксплуатируется изделие.

Среды заполнения А - азот, аргон или их смеси с воздухом.

Среды заполнения В - среды заполнения, за исключением сред заполнения А.

Для сокращения времени испытаний увеличивают концентрацию химически активных компонентов среды воздействия, повышают температуру и относительную влажность. Испытательное оборудование должно обеспечивать заданные значения концентрации, температуры, давления и относительной влажности специальной среды. Длительность испытаний должна соответствовать длительности воздействия на аппаратуру специальных сред, а параметры испытательного режима - количественным и качественным характеристикам этих сред в условиях эксплуатации.

Для борьбы с воздействием специальных сред предусматривают специальные конструктивные исполнения изделий, применяют кислостойкие и другие специализированные покрытия, создают такие условия эксплуатации, при которых воздействие этих сред становится наименее заметным.

2.5.9. ИСПЫТАНИЯ НА ВОЗДЕЙСТВИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ И ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПОЛЯ

Для испытания на воздействие магнитного поля после начальных проверок характеристик изделие помещают в центре катушки, создающей равномерное магнитное поле. Для этой цели применяют катушку, состоящую из двух параллельных коаксиальных плоских колец и имеющую возможность поворота вокруг горизонтальной оси. Расстояние между средними плоскостями колец должно равняться половине среднего диаметра обмотки колец. Средний диаметр кольца должен быть не менее чем в 2,5 раза больше габаритных размеров испытуемого изделия.

Обмотки колец включают последовательно. Каркас и крепление катушки должны быть из немагнитных материалов.

Изделие подвергают воздействию постоянного и (или) переменного магнитного поля в зависимости от указаний в стандартах и (или) технических условиях на изделия конкретных видов (групп).

Силу тока катушки выбирают с таким расчетом, чтобы получить в центре катушки магнитное поле напряженности, при котором изделие должно эксплуатироваться.

Напряженность магнитного поля (в А/м) вычисляют по формуле

$$H = \frac{1{,}44\, I\, w}{D},$$

где I - сила тока, протекающего через обмотку, А; w - число витков обмотки каждого из колец; D - средний диаметр кольца, м.

Изделие испытывают во включенном состоянии. Изделие и катушку, создающую магнитное поле, поворачивают относительно друг друга до положения, при котором наблюдается максимальное влияние поля на изделие.

Средства измерений, используемые в процессе испытаний, должны быть удалены от магнитной катушки на расстояние, обеспечивающее независимость их показаний от магнитного поля, создаваемого катушкой.

После выключения катушки при необходимости проводят заключительные проверки характеристик.

Изделие считают выдержавшим испытание, если во время (и после испытаний) его характеристики соответствуют требованиям, установленным в стандартах или технических условиях на изделие конкретных групп.

Необходимость проверки наличия на поверхности изделий **зарядов электростатического поля** вызвана массовым использованием в конструкциях изделий и продукции пластических материалов, на поверхностях которых возникают заряды статического электричества порядка десятков и тысяч вольт, отрицательно влияющих на качество продукции и безопасность обслуживающего персонала. Поверхностные заряды статического электричества появляются как на гладких поверхностях, например полиэтиленовых пленках, так и ворсистых - различные виды текстиля.

Испытания электрической прочности и сопротивления изоляции изделий.

Испытания следует проводить:

между гальванически не связанными цепями изделия (цепями питания, измерения, контроля, управления, сигнализации и т.д.);

между каждой из указанных цепей и доступными для касания металлическими неток оведущими частями (корпусом, защитным экраном).

Испытания изоляции следует проводить в такой последовательности:

испытания электрической прочности;

измерение электрического сопротивления.

Изоляция электрических цепей изделий относительно корпуса и между собой в зависимости от номинального напряжения цепи и условий испытаний должна выдерживать в течение 1 мин действие испытательного напряжения практически синусоидальной формы частотой от 45 до 65 Гц.

Цепи изделий, испытательное напряжение которых превышает 2 кВ, подвергают испытаниям электрической прочности полным напряжением не более двух раз. Последующие испытания проводят напряжением, составляющим 80 % полного испытательного напряжения.

Изоляция цепей с различными номинальными напряжениями должна выдерживать приложенное между ними испытательное напряжение, соответствующее наибольшему номинальному напряжению испытуемых цепей.

Испытания изоляции в условиях, отличающихся от нормальных, проводят в конце соответствующих климатических испытаний без извлечения изделия из камеры. Если это невозможно, то допускается проводить испытания изоляции не позднее чем через 3 мин после извлечения изделий из камеры.

Мощность установок для испытаний электрической прочности изоляции должна быть не менее значений, указанных в табл. 2.5.8.

Относительная погрешность измерения испытательного напряжения не должна превышать ± 5 %.

Сопротивление изоляции следует измерять омметром или автоматическими средствами измерения сопротивления изоляции с погрешностью, не превышающей ± 20 %.

Изделия с корпусом из изоляционного материала перед испытаниями изоляции покрывают сплошной, плотно прилегающей к поверхности металлической фольгой таким образом, чтобы расстояние ее от зажимов испытуемой цепи было не менее 20 мм.

Испытательное напряжение повышают плавно, начиная с нуля или значения, не превышающего номинальное напряжение цепи, до испытательного в течение времени, установленного в стандартах и (или) технических условиях на изделия конкретных групп (видов), но не более 30 с.

Испытание напряжением постоянного тока следует проводить при положительной или отрицательной полярности в зависимости от установленного в стандартах и (или) технических условиях на изделия конкретных групп (видов).

2.5.8. Мощность испытательных установок

Верхний предел испытательного напряжения, кВ	Мощность, кВ · А
До 1,5	0,1
Св. 1,5 до 3,0	0,25
» 3,0 » 10,0	0,50
» 10,0 » 60,0	2,50

2.5.9. Минимально допускаемое электрическое сопротивление изоляции

Условия испытаний	R, МОм
Нормальные	20; 40; 100; 500; 1 000
При верхнем значении температуры рабочих условий	5; 10; 20; 50; 200
При верхнем значении относительной влажности рабочих условий	1; 2; 5; 7; 50

Примечания:

1. Для электрических цепей до 100 В допускается снижать значение минимально допускаемого сопротивления, но не ниже 1 МОм.

2. Требования к сопротивлению изоляции распространяются на изделия, для которых верхнее значение относительной влажности более 80 %.

Изоляцию выдерживают под испытательным напряжением в течение 1 мин. Затем напряжение снижают до нуля или значения, не превышающего номинальное, после чего установку отключают.

Изделие считают выдержавшим испытание электрической прочности изоляции, если не произошло пробоя или перекрытия изоляции. Появление коронного разряда или шума при испытании не является признаком неудовлетворительных результатов испытаний.

Минимально допускаемое электрическое сопротивление изоляции цепей номинальным напряжением до 500 В устанавливают в стандартах и (или) технических условиях на изделия конкретных групп (видов), исходя из рядов по табл. 2.5.9, в зависимости от условий испытаний.

Минимально допускаемое сопротивление изоляции цепей номинальным напряжением выше 500 В определяют умножением значений, указанных в табл. 2.5.9, на коэффициент, равный отношению номинального напряжения цепи к 500 В.

Электрическое сопротивление изоляции измеряют постоянным напряжением, значение которого выбирают в зависимости от номинального напряжения цепи $U_{ном}$ по табл. 2.5.10. Напряжение постоянного тока U при измерении не должно превышать испытательное напряжение при испытании электрической прочности изоляции.

2.5.10. Напряжение постоянного тока при измерении U

$U_{ном}$, В	U, В
До 100	От 100 до 250
Св. 100 до 250	Св. 250 » 500
» 250 » 660	» 500 » 1 000
» 660 » 2 000	» 1 000 » 2 500
» 2 000	» 2 500

Показания, определяющие электрическое сопротивление изоляции, следует отсчитывать по истечении 1 мин после приложения напряжения или меньшего времени, за которое показания средства измерения практически установятся.

Изделия считают выдержавшими испытания, если измеренные значения сопротивления изоляции равны или превышают значения, установленные в стандартах и (или) технических условиях на изделия конкретных групп (видов).

2.5.10. ИСПЫТАНИЯ НА ВОЗДЕЙСТВИЕ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ

2.5.10.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Источниками радиации являются излучения, образуемые потоками заряженных (электронов, позитронов, протонов, ионов) и (или) нейтральных (нейтронов) частиц, а также рентгеновских или гамма-квантов. Совокупность перечисленных потоков образует радиационное поле.

Чтобы правильно определить виды и характеристики испытательных воздействий, необходимо знать параметры тех радиационных полей, которые воздействуют на данную аппаратуру. Излучения, входящие в состав этих полей, в соответствии с источниками излучения принято разделять на излучения естественного и искусственного происхождения.

Естественные источники связаны с космическим излучением (космические лучи, излучение Солнца, радиационные пояса), *искусственные* образуются в результате работы ядерных установок, изотопных технологических устройств и т.д.

Величины, характеризующие поля ионизирующих излучений и их воздействии на материалы. Этими величинами определяются свойства источников излучений, характеризуются радиационные поля и эффекты, создаваемые воздействием излучений (табл. 2.5.11).

Главными характеристиками радиационных полей являются энергия E и плотность потока частиц (квантов). В качестве единицы измерения *энергии* принят джоуль, однако на практике для характеристики энергии ионизирующих излучений используется единица электрон-вольт (эВ), равная $1{,}602 \cdot 10^{-19}$ Дж.

Плотность потоков частиц или квантов φ - это число частиц или квантов, проникающих в объем элементарной сферы в единицу времени, отнесенное к площади поперечного сечения сферы.

Интегральный поток Φ частиц или квантов характеризует воздействие излучения за определенный период времени (за час, сутки, год). Численно он равен интегралу

$$\Phi = \int_t \varphi(t)\, dt .$$

Реакция изделия на воздействие радиационного поля определяется поглощенной энергией излучения, которая выражается через поглощенную дозу излучения или мощность поглощенной дозы.

Поглощенная доза излучения (*доза излучения*) - это поглощенная энергия любого ионизирующего излучения, отнесенная к единице массы облучаемой среды. Единица измерения поглощенной дозы излучения - Дж · кг$^{-1}$.

Как следует из определения понятия поглощенной дозы излучения, оно применимо к любому виду ионизирующего излучения и к любому веществу. Однако для характеристики рентгеновского и γ-излучений используется дополнительное понятие - экспозиционная доза.

Экспозиционная доза выражает энергию квантового излучения, преобразованную в кинетическую энергию заряженных частиц в единице массы атмосферного воздуха.

В качестве стандартного вещества для определения экспозиционной дозы протонов и электронов выбран кристалл иодистого натрия, активированный таллием (NaI, Tl). В процессе воздействия протонов и электронов в кристалле NaI диаметром 20 мм и высотой 20 мм, расположенном за защитным экраном эквивалентной толщиной 1 г · см$^{-2}$ алюминия, измеряется выход люминесценции.

Особенность измерения характеристик радиационных полей. Приборы, измеряющие дозу и мощность дозы излучения, называются *дозиметрами*. Идеальный дозиметр должен так измерять дозу (мощность дозы) излучения, чтобы измеренная величина была однозначно связана с контролируемыми параметрами объекта. Для этого необходим дозиметр, измеряющий дозы только той части излучения, которая ответственна за изменение контролируемого параметра изделия. В связи с этим приходится строить как бы эквивалент изделия

2.5.11. Величины и единицы измерения ионизирующих излучений

Объект определения	Измеряемые величины	Единицы измерения
Изотопный источник излучения	Активность изотопов в источнике	1 Бк = 1 распад в секунду
Радиационное поле	Поток радиоактивных частиц или квантов $\Phi = n / t$, где n - число частиц (квантов); t - время, с	$с^{-1}$
	Плотность потока частиц или квантов $\varphi = \Phi / S$, S - площадь, $м^2$	$м^{-2} \cdot с^{-1}$
	Кинетическая энергия излучения E	Дж
Процесс (эффект), создаваемый воздействием излучения	Поглощенная доза излучения $D = E / m$, где m - масса облучаемого вещества, кг	Гр
	Мощность поглощенной дозы излучения $P = \Delta D / \Delta t$, где ΔD - изменение поглощенной дозы излучения за время Δt, с	$Гр \cdot с^{-1}$
	Экспозиционная доза рентгеновского и гамма-излучений $D_э = Q / m$, где Q - сумма электрических зарядов ионов, имеющих одинаковый знак и возникающих в воздухе, когда все электроны, освобожденные с помощью квантов рентгеновского и (или) γ -излучений, полностью тормозятся, Кл	$Кл \cdot кг^{-1}$
	Мощность экспозиционной дозы рентгеновского и γ -излучений $P_э = \Delta D_э / \Delta t$, где $\Delta D_э$ - изменение экспозиционной дозы за время Δt, с	$Гр \cdot с^{-1}$

Примечание. Грей равен поглощенной дозе излучения, при которой облученному веществу массой 1 кг передается энергия излучения 1 Дж: 1 Гр = 1 Дж / 1 кг.

в виде соответствующего дозиметра. Поскольку поглощенная доза в изделии не равна дозе, определяемой дозиметром, необходимо проводить соответствующий пересчет показаний дозиметра.

Принцип действия и область применения основных групп приборов для измерения характеристик радиационных полей.

1. *Приборы, принцип действия которых основан на измерении электрического заряда.* Цилиндр Фарадея в простейшей форме состоит из заземленной сетки и собирающей пластины (коллектора), которая имеет достаточно высокий потенциал относительно сетки для отклонения частиц одного знака. Измерение силы тока коллектора, создаваемого частица-

ми, дает возможность непосредственно определить полный поток частиц одного знака.

Цилиндр Фарадея успешно используется для измерения характеристик потока частиц от ускорителей в лабораториях. Воздействующий поток Φ заряженных частиц можно преобразовать в поглощенную дозу излучения, усредненную по объему аппаратуры, по формуле

$$D = 1{,}6 \cdot 10^{-8} \Phi E / R,$$

где Φ - поток частиц; E - энергия частиц; R - пробег частиц.

2. *Ионизационные детекторы.* К их числу относятся ионизационные камеры, газоразрядные счетчики, полупроводниковые детекторы.

В ионизационных камерах под действием ионизирующих излучений нейтральные молекулы газа расщепляются на положительный и отрицательный ионы. В инертных газах и азоте отрицательным ионом является электрон. Под действием приложенной к электронам камеры разности потенциалов ионы направляются к электродам. Измеряется сила тока насыщения I, который связан с поглощением в газе за 1 с энергией излучения E соотношением

$$\varepsilon I = E,$$

где ε - средняя работа, затрачиваемая на образование в газе пары ионов (величина, характерная для данного газа). Величина ε мало зависит от рода излучения и от энергии квантов или частиц. Для воздуха $\varepsilon = 34$ эВ.

В газоразрядном счетчике между электродами прикладывается более высокое электрическое поле, чем в ионизационной камере. Напряженность этого поля выбирается достаточной для возбуждения ударной ионизации в газе, в результате чего в счетчике создается газовое усиление. Коэффициент газового усиления (равный отношению амплитуды импульса тока, созданного на электродах при ударной ионизации, к току при начальной ионизации) может достигать значения 10^4. Поэтому газоразрядные счетчики обладают очень высокой чувствительностью и регистрируют практически каждую заряженную частицу, попавшую в чувствительный объем счетчика.

Наибольшее распространение получил счетчик Гейгера - Мюллера, конструктивно аналогичный ионизационной камере, но имеющий настолько высокий потенциал (1 000 ... 2 000 В) между стенками, что каждый акт ионизации приводит к лавинному разряду. В связи с этим счетчик Гейгера не может различать частицы по виду и энергии.

Полупроводниковые детекторы можно разделить на два класса регистраторы отдельный событий (счетчики) и измерители среднего уровня радиации.

Полупроводниковый детектор представляет собой кристалл с двумя электродами, к которым подведено рабочее напряжение, создающее в кристалле электрическое поле. Ионизирующее излучение образует на своем пути в кристалле электрическое поле. Ионизирующее излучение образует на своем пути в кристалле свободные электроны (дырки) аналогично тому, как это происходит при ионизации газов. Под действием ускоряющего поля электроны движутся через кристалл, пока не достигнут положительного электрода. Между электродами течет ток, образующий импульс напряжения.

3. *Сцинтилляционные приборы измерения ионизирующих излучений.* Принцип их действия основан на том, что возвращение атомов и молекул вещества из возбужденного состояния в основное сопровождается световой вспышкой, которая может быть зарегистрирована чувствительным фотоэлектронным умножителем.

Для регистрации протонов и α-частиц более всего подходят сцинтилляционные счетчики с кристаллами ZnS(Ag). Их применяют либо в виде тонких кристаллов, либо в виде твердого раствора в пластмассе.

Для регистрации быстрых нейтронов применяют органические водородсодержащие кристаллы (антрацен, стильбен) и жидкие сцинтилляторы, а также смеси или твердые растворы ZnS(Ag) в органических наполнителях.

Сцинтилляционные детекторы могут также применяться для счета числа γ-квантов и измерений дозы γ-излучения.

По сравнению со счетными трубками сцинтилляционные счетчики имеют значительные преимущества: более высокую эффективность регистрации, достигающую нескольких десятков процентов, возможность работы при скорости счета, на несколько порядков более высокой.

4. *Приборы, основанные на химических методах дозиметрии.* Принцип их действия заключается в измерении количества вновь образовавшегося вещества (называемого "выходом" реакции) при химических реакциях, происходящих в веществе под действием ионизирующих излучений.

Наиболее характерными особенностями химических методов измерения ионизирующих излучений являются возможность измерений очень высоких доз и при очень высоких мощностях дозы, пригодность для измерений в смешанных полях излучения.

5. *Приборы, основанные на фотографических методах регистрации ионизирующих излучений.* Измеряются почернения облученных, проявленных и отфиксированных фотопленок или подсчитывается число зерен или треков в фотоэмульсии и изучается их распределение. Эти приборы используются для индивидуального контроля дозы рентгеновского, γ -, β - и нейтронного излучений, а также для оценки пространственного распределения экспозиционной дозы.

В практике измерений ионизирующих излучений применяют односторонние и двусторонние фотопленки и фотопластинки, с одной стороны покрытые эмульсией.

2.5.10.2. МЕТОДЫ ИСПЫТАНИЙ

Методы испытаний могут быть разделены на группы по следующим квалификационным признакам:

а) характеру процесса взаимодействия излучения с веществом:

испытания на радиационную стойкость, при которых проверяется работоспособность аппарата относительно происходящих в ней дозных эффектах;

испытания на радиационную устойчивость, при которых проверяется работоспособность аппаратуры относительно происходящих в ней мощностных эффектов;

б) по условиям проведения испытаний:

натурные испытания, которые проводятся при эксплуатационных воздействиях;

лабораторные испытания, которые проводятся на установках, где моделируются эксплуатационные условия (например, на ускорителях, изотропных источниках и т.п.);

в) по виду воздействия:

испытания на воздействие электромагнитных излучений (рентгеновских и γ -квантов);

испытания на воздействие потоков нейтронов;

испытания на воздействие потоков ионов и протонов.

При проведении радиационных испытаний решаются следующие основные задачи:

определяется вероятность безотказной работы (для непрерывного воздействия) и интенсивность отказов (при воздействии одиночных ионов) в реальных условиях эксплуатации;

оценивается уровень стойкости (прочности) и (или) устойчивости к воздействию излучений во время и после воздействия;

проверяется эффективность работоспособных методов повышения стойкости и устойчивости изделия;

собирается информация для реализации расчетных моделей и методов прогнозирования стойкости и устойчивости изделия к воздействию излучений.

При проведении испытаний, кроме перечисленных выше задач, обычно решаются следующие методические вопросы:

определение требований к изделиям с учетом вида излучения, режима испытаний, необходимости защиты и т.п.;

организация дозиметрического контроля;

выбор методов обработки результатов лабораторных испытаний и приближения их к реальным эксплуатационным условиям.

Испытания на воздействие рентгеновского и γ -излучений. Изделия, подвергаемые в эксплуатационных условиях воздействию непрерывного излучения ядерных реакторов, изотопных источников и вторичного излучения от попадания на корпус высокоэнергетического космического ионизирующего излучения, испытываются на стойкость с использованием статического γ -излучения. При этом проверяется сохранение работоспособности в условиях как необратимых, так и обратимых изменений во время воздействия.

Изделия, подвергаемые в эксплуатационных условиях воздействию импульсного излучения ядерных реакторов и при ядерном взрыве и вторичного излучения от попадания импульсных потоков протонов и электронов соответствующих ускорителей, испытываются на стойкость с использованием генераторов импульсного излучения.

Испытания на импульсное воздействие рентгеновского и γ -излучений осуществляется с помощью генераторов импульсов этих излучений, построенных по единой схеме. Коаксиальная накопительная линия, заполненная жидким диэлектриком (чаще всего трансформаторным маслом), заряжается от источника высокого напряжения (например, генератора Аркадьева-Маркса, трансформатора Тесла, резонансного трансформатора и др.). При срабатывании коммутатора линия разряжается на ускорительную трубку. Основными элементами ускорительной трубки являются диод и изолятор. Благодаря взрывной эмиссии в диоде создается мощный поток электронов, который с катода направляется на мишень, в результате чего возникает мощная вспышка рентгеновского излучения. Диапазон энергий фотонов, генерируемых такими установками, составляет от 300 кэВ до 10 МэВ.

Для получения импульсного тока амплитудой в сотни и тысячи ампер при энергии электронов в несколько мегаэлектрон-вольт используются линейные ускорители.

При этих испытаниях используются следующие средства измерений:

средства измерения значений параметров (характеристик), по показаниям которых судят о сохранении его работоспособности;

средства измерения режимов работы установок, позволяющие контролировать значения параметров (например, напряжение на аноде ускорителя и его силу тока);

дозиметры для определения дозы и мощности дозы излучения, воздействующего на изделие.

Основными задачами испытаний на установках тормозного излучения являются:

определение максимальной мощности экспозиционной дозы излучения, при которой еще не происходит сбоев в работе изделия (уровень работы без сбоев);

выявление наличия и вида обратимых и необратимых отказов в работе изделия при требуемых уровнях мощности дозы;

оценка степени восстанавливаемости работоспособности изделия и способности решать возложенные на него целевые задачи после воздействия ионизирующего излучения с требуемой мощностью дозы, а также возможного времени потери работоспособности изделия.

При определении уровня работы без сбоев испытуемые образцы изделия многократно нагружаются импульсным тормозным излучением. При этом осуществляется направленный поиск диапазона мощности доз, при верхней границе которой сбой в работе изделия происходит, а при нижней - нет.

При решении задач определения видов сбоев и времени потери работоспособности изделий нагружение проводится, как правило, импульсом тормозного излучения с требуемой мощностью дозы. Учитывая, что переходные процессы в изделиях зависят от формы и длительности импульса излучения, уровень нагружения определяют с учетом различий параметров импульсов при испытаниях и в условиях эксплуатации аппаратуры.

В силу ограничений, связанных с площадью выходного окна ускорительной трубки и мощностью установки, в ряде случаев не представляется возможным осуществлять нагружение с требуемыми мощностью и равномерностью облучения всей аппаратуры в целом. В этих случаях облучение площади испытуемого образца изделия проводится по частям поочередно с двух противоположных сторон. Изделия целесообразно испытывать в режиме функционирования, наиболее тяжелом с точки зрения последствий воздействия рассматриваемых излучений.

Изделие соединяется с контрольно-измерительной и регистрирующей аппаратурой, задающей режим работы, соединительными линиями длиной 5 ... 20 м. Для снижения уровня электромагнитных наводок и помех соединительные линии прокладываются в стальных трубах. Перед испытаниями без подачи электрического питания на изделия регистрируется уровень электрических наводок на соединительных линиях в момент возникновения импульса рентгеновского (γ-) излучения. Если уровень электромагнитных наводок и помех оказывается выше допустимого, принимаются дополнительные меры защиты.

Особого внимания требует согласование волновых сопротивлений соединительных линий с входными импедансами контрольно-измерительной и регистрирующей аппаратуры, а также учет затуханий и искажений формы импульсных сигналов, передаваемых по этим линиям. При длине соединительных линий 5 ... 10 м эти искажения могут быть учтены при оценке погрешности измерения параметров изделий. При большей длине соединительных линий измеряемые сигналы от изделия к измерительной аппаратуре и управляющие сигналы к изделиям от операторов передаются через специальные выносные блоки, устанавливаемые на расстоянии 1 ... 2 м от изделий вне действия прямого пучка излучения и с дополнительной экранной защитой от попадания рассеянного излучения.

Испытания на воздействие статического (непрерывного) γ-излучения, выявляющие необратимые изменения параметров, реализуются с помощью кобальтовых установок, в которых в качестве излучателя применяются радиоактивные изотопы ^{60}Co. Энергия γ-излучения ^{60}Co составляет примерно 1,25 МэВ.

Кобальтовые установки имеют много различных модификаций (конструкций). Особенностью установок, используемых для испытаний аппаратуры и средств измерений соединительных линий, является достаточно высокая мощность дозы γ-излучения источника ^{60}Co - не менее 500 $Р \cdot с^{-1}$. Эти источники хранятся в бетонном хранилище, из которого в камеру для облучения подаются автоматически по специальным каналам. Управление работой установки осуществляется оператором дистанционно. Набор необходимой дозы γ-излучения регистрируется расстоянием до облучателя и временем облучения.

При проведении рассматриваемых испытаний используются средства измерений двух видов:

средства измерений значений параметров (характеристик) изделия и дополнительные средства измерений температуры наиболее термочувствительных узлов (элементов) изделия;

средства измерения амплитудно-временных характеристик, энергетического спектра, дозы.

Амплитудно-временные характеристики измеряются с использованием сцинтилляционных детекторов, PIN-диодов или полупроводниковых детекторов. Энергетический спектр измеряется методом анализа функции

ослабления γ-излучения, т.е. расчетным методом на основе анализа формы импульсов тока и напряжения.

Испытания на воздействие потока нейтронов проводятся для определения обратимых и необратимых изменений параметров изделий, которые могут возникнуть при воздействии нейтронов ядерных энергетических установок, ядерного взрыва или вторичного нейтронного излучения.

Поскольку имеются существенные различия во влиянии на работоспособность непрерывных и импульсных излучений, то в зависимости от того, каким видам воздействия они подвергаются в эксплуатации, используются испытания на исследовательских импульсных или статических ядерных реакторах.

Испытания на воздействие импульсных потоков нейтронов проводятся на импульсных ядерных реакторах. Спектр нейтронов импульсных ядерных реакторов близок к спектру деления ядер U^{235} (табл. 2.5.12).

2.5.12. Предельные значения параметров импульсных исследовательских ядерных реакторов

Параметр	Единица измерения	Значения
Мощность реактора	МВт	$(1 \dots 2)10^{-3}$
Плотность потока нейтронов с энергией E>0,1 МэВ	$см^{-2}\cdot с^{-1}$	$2\cdot10^{16}...5\cdot10^{18}$
Мощность дозы γ-излучения	$А\cdot кг^{-1}$	$3\cdot10^{3}...3\cdot10^{5}$
Длительность импульса нейтронов, измеренная по точкам, соответствующим половине амплитуды импульса	с	$5\cdot10^{-5}...2\cdot10^{-3}$

Особенности размещения изделий обусловливаются двумя обстоятельствами.

Во-первых, изделия располагаются вблизи активной зоны; поток нейтронов изменяется обратно пропорционально квадрату расстояния от центра активной зоны, поэтому воздействующий поток нейтронов регулируется путем выбора соответствующего расстояния от центра активной зоны до испытуемого изделия.

Во-вторых, с помощью охлаждаемых экранов стремятся предотвратить попадание на изделия сильных потоков теплового и γ-излучения.

Длина соединительных линий между изделиями и контрольно-измерительной аппаратурой может достигать 40 м. Регистрация значений параметров при испытании аппаратуры выполняется аналогично регистрации при испытаниях на установках импульсного рентгеновского излучения.

Следует отметить, что изделия после испытаний становятся радиоактивными, поэтому они, как правило, подлежат уничтожению.

При оценке результатов испытаний необходимо учитывать следующее:

спектрально-энергетические характеристики нейтронов исследовательских ядерных реакторов и в условиях эксплуатации могут существенно различаться. Это различие учитывается коэффициентами относительной эффективности действия нейтронов с различными энергетическими спектрами;

показания дозиметров могут содержать погрешность вследствие воздействия γ-излучения, которое вносит также дополнительные изменения в параметры изделия, что необходимо учитывать введением соответствующих поправок.

Испытания на воздействие непрерывных потоков нейтронов проводятся с помощью водоводяных реакторов бассейного типа на тепловых нейтронах (табл. 2.5.13).

При рассматриваемых испытаниях используют те же средства измерения, правила размещения изделий, соединительных линий и оценки результатов, что и при испытаниях на импульсных ядерных реакторах.

2.5.13. Предельные значения параметров статических исследовательских реакторов

Параметр	Единица измерения	Значения
Мощность реактора	МВт	0,2 ... 50
Плотность потока нейтронов с энергией E>0,1 МэВ	$см^{-2}\cdot с^{-1}$	$10^{11}...2\cdot10^{14}$
Мощность дозы γ-излучения	$А\cdot кг^{-1}$	1 ... 80

Испытаниям на воздействие ионизирующих излучений подвергаются изделия, используемые для работы в космосе, или средства измерений, устанавливаемые в зоне действия ускорительной техники для радиационной технологии. Эти испытания подразделяются на натурные (испытания с комбинированным воздействием различных видов излучений) и лабораторные (испытания на раздельное воздействие каждого вида излучений).

Натурные испытания на воздействие потоков космических электронов, протонов и

ионов проводят на космических объектах или с помощью исследовательских ракет.

Лабораторные испытания на раздельное воздействие космических ионизирующих излучений проводят с помощью специальных источников заряженных частиц. Они, как правило, могут давать только моноэнергетические потоки, поэтому в ряде случаев необходимо обеспечить эквивалентность лабораторных и натурных испытаний.

В большинстве случаев такую эквивалентность определяют по "энергетическим эквивалентам", приравнивая между собой эквивалентные дозы излучений при натурных и лабораторных испытаниях.

Эквивалентная доза

$$D_{экв} = D\, k_к\, k_р\, k_и,$$

где D - поглощенная доза, $k_к$ - коэффициент качества излучения, учитывающий линейное преобразование энергии; $k_р$ - коэффициент распределения, определяемый степенью неравномерности поглощения энергии веществом; $k_и$ - коэффициент интенсивности излучения, зависящий от плотности энергии излучения.

Для применения приведенной формулы необходимо выразить значения эквивалентной и поглощенной доз в соответствующих единицах. Для измерения поглощенной дозы излучения используется единица грей (Гр), определение которой приведено в примечании к табл. 2.5.11, а также внесистемная единица рад, 1 рад = 10^{-2} Гр. Поглощенная доза зависит от природы материала, конструктивных особенностей и режимов работы изделия. В связи с этим для конкретизации меры количества радиоактивного излучения приняты единицы энергии, поглощенной специально выбранными стандартными или образцовыми веществами. Эти единицы называются *экспозиционными дозами*. Стандартным веществом для рентгеновского и γ-излучения в России выбран сухой воздух при нормальных условиях (в США - углерод); для определения экспозиционной дозы протонов и электронов - кристалл иодистого натрия (NaI), активированный таллием (Tl); для нейтронов - тканеэквивалентный газ, т.е. такая смесь газов, в которой концентрации водорода и азота равны их концентрации в мягких тканях человека.

Экспозиционная доза рентгеновского и γ-излучения измеряется в Кл·кг$^{-1}$, а также для ее измерения может использоваться внесистемная единица - рентген (Р); 1Р = = 2,57976·10^{-4} Кл·кг$^{-1}$.

Для определения поглощенной дозы D натурного облучения находят сумму поглощенных доз всех компонентов натурного спектра.

В качестве *источников заряженных частиц* могут использоваться две группы установок:

источники со статическим пучком, у которых пучок заряженных частиц не меняет своей интенсивности, формы и пространственного расположения в течение всего времени облучения;

источники с управляемым пучком, у которых в процессе облучения пучок может перемещаться по поверхности изделия (сканировать), изменять свою форму.

По форме траектории заряженных частиц ускорители делятся на линейные и циклические. В линейных ускорителях траектории заряженных частиц близки к прямой линии, а в циклических частицы под действием ведущего магнитного поля (постоянного или изменяющегося во времени) движутся по орбитам, близким к круговым.

Имеется большое разнообразие линейных ускорителей с энергиями электронов от 1 до 200 и более МэВ.

Энергия, полученная частицей к концу цикла ускорения, слагается из очень большого числа малых порций энергий. Этот способ ускорения частиц называется *резонансным*.

В современных циклических ускорителях используют постоянные и переменные магнитные поля. К циклическим ускорителям с постоянным магнитным полем относятся циклотроны и фазотроны.

Циклотрон предназначен для циклического ускорения протонов и ионов. С помощью циклотрона протонам можно сообщать энергию до 25 МэВ.

Фазотрон (*синхроциклотрон*) - циклический резонансный ускоритель тяжелых частиц.

К циклическим ускорителям с изменяющимся во времени магнитным полем относятся синхротрон и синхрофазотрон.

Основными ионными источниками являются:

1. Высокочастотные источники, в которых применяются ионные пушки и высокочастотное вытягивающее поле.

2. Ионный источник Пеннинга, который обычно использует впуск газа (кислорода, гелия, азота) с последующим ускорением (с помощью анода) и бомбардировкой первичными ионами антикатода (мишени).

3. Жидкометаллический ионный источник.

Методика испытаний включает:

1. Монтаж изделий имеет следующие особенности:

изделия укрепляются на основании, обеспечивающем отвод избыточной теплоты (вследствие радиационного разогрева) и статического электричества. С этой целью могут использоваться массивные медные теплоотводы, одновременно являющиеся заземляющим контуром;

изделия размещаются в специальных камерах, обеспечивающих требуемую радиационную защиту. В этих камерах предусматривается также наличие устройств, позволяющих перегружать облученное изделие для транспортировки или выдержки в камере;

подача питающих и сигнальных напряжений осуществляется по возможности наиболее короткими проводами, имеющими заземленное экранирование;

непосредственно на панелях, где укрепляются изделия, монтируются датчики измерения температуры и воздействующего излучения. В тех случаях, когда это необходимо по условиям измерения, вместе с датчиками монтируются предварительные усилители.

2. Контроль радиации изделий на радиационное воздействие. Реакция изделий оценивается путем измерения значений соответствующих параметров.

Выбранные параметры измеряются до и после испытаний, а также во время воздействия одновременно с измерением параметров испытательных воздействий.

3. Измерение параметров испытательных воздействий. Основными параметрами являются температуры окружающей среды и изделий, а также значения параметров потоков частиц.

При регистрации потоков заряженных частиц необходимо иметь возможность оценить временное и энергетическое распределение частиц различных сортов. Для распределения частиц по сортам используется масс-спектрометрический метод.

Энергетическое распределение частиц фиксируется тремя различными способами.

Первый способ состоит в установке определенного набора фильтров (поглотителей), за которыми фиксируются интенсивности потоков с энергией E_i, большей той энергии E_{R_i}, которая соответствует пробегу R_i равному толщине фильтра.

Таким образом, получается ряд значений интенсивности

$$I_i\left(E_i > E_{R_i}\right),$$

где R_i - толщина фильтра.

По этим данным восстанавливается весь спектр $I(E)$.

Второй способ состоит в помещении в поток частиц специальных регистраторов. В этих регистраторах частицы создают радиационные дефекты, вид и местоположение которых зависит от энергии падающей частицы. Распределение радиационных дефектов анализируется различными методами (послойным стравливанием, электронной просвечивающей микроскопией, рентгеновским микрозондовым анализом и т.п.).

Третий способ состоит в снятии энергетических спектров с использованием соответствующих ионизационных (трековых) камер.

Необходимо обеспечение соблюдения следующих требований к пучкам заряженных частиц:

1. Пучок должен быть выведен из камеры в атмосферу (за исключением пучка протонов с энергией ниже 30 МэВ, который выводится в вакуумную камеру с вакуумным шлюзом и со съемным фланцем, обеспечивающим возможность облучения изделий и измерение их параметров при облучении без нарушения вакуума в ускорительной камере).

2. Пучок должен иметь достаточно большие размеры (не менее 5 см по диаметру) и хорошую равномерность по сечению, что при необходимости может достигаться сканированием пучка по площади аппаратуры. При этом плотности потоков в пучке не должны превышать $5 \cdot 10^{11}$ см$^{-2}$·с$^{-1}$ - для электронов и $5 \cdot 10^{10}$ см$^{-2}$·с$^{-1}$ - для протонов (в целях ограничения радиационного нагрева изделия).

3. Пучок должен равномерно облучать весь объем изделия.

4. Плотность потока и время воздействия пучка на изделие должны быть такими, чтобы достигался интегральный поток, после воздействия которого можно было бы сделать вывод о возможности функционирования изделия в заданных радиационных условиях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Бегларян В. Х.** Климатические испытания аппаратуры и средств измерений, М.: Машиностроение, 1983. 150 с.

2. **Вибрация** в технике: Справочник /. Под ред. В. Н. Челомея в 6 т. М.: Машиностроение, 1978 - 1981.

3. **Гусенков А. П., Нахапетян Е. Г.** Методы и средства обеспечения надежности машин. М.: Наука, 1993. 238 с.

4. **Дроздов Ю. Н., Павлов В. Г., Пучков В. Н.** Трение и износ в экстремальных условиях. Справочник. М.: Машиностроение, 1986. 223 с.

5. **Испытательная** техника: Справочник в 2 кн. / Под ред. В. В. Клюева, М.: Машиностроение, 1982, 528 с. (кн. 1); 559 с. (кн. 2).

6. **Испытание** материалов. / Под ред. Х. Блюменауэра. М.: Металлургия, 1979, 446 с.

7. **Крагельский И. В., Добычин М. Н., Комбалов В. С.** Основы расчетов на трение и износ. М.: Машиностроение, 1977. 526 с.

8. **Малинский В. Д., Бегларян В. Х., Дубицкий Л. Г.** Испытания аппаратуры и средств измерений на воздействие внешних факторов:

Справочник. М.: Машиностроение, 1993. 576 с.

9. **Острейковский В. А.** Многофакторные испытания на надежность. М.: Энергия, 1978. 152 с.

10. **Приборы** и системы для измерения вибрации, шума и удара: Справочник в 2 кн. Кн. 1 / Под ред. В. В. Клюева. М.: Машиностроение, 1978. 448 с.

11. **Приборы** и системы для измерения вибрации, шума и удара: Справочник в 2 кн. Кн. 2 / Под ред. В. В. Клюева, М.: Машиностроение, 1979. 439 с.

12. **Проников А. С.** Надежность машин. М.: Машиностроение, 1978. 590 с.

13. **Проблемы** надежности и ресурс в машиностроении. М.: Наука, 1986. 245 с.

14. **Работнов Ю. Н.** Механика деформируемого твердого тела. М.: Наука, 1979. 744 с.

15. **Справочник** по контролю промышленных шумов / Пер. с англ. под ред. Клюева В. В.. М.: Машиностроение, 1979. 447 с.

16. **Свириденко, Мышкин Н. К., Калмыков Т. Ф., Холодилов О. В.** Акустические и электрические методы в триботехнике. Минск Наука и техника, 1987. 280 с.

17. **Теоретические** и прикладные задачи трения, износа и смазки / Под ред. К. В. Фролова, С. В. Пинегина, А. В. Чичинадзе. М Наука, 1982. 293 с.

18. **Трение,** изнашивание и смазка: Справочник в 2 т. / Под ред. И. В. Крагельского, В. В. Алисина. М.: Машиностроение, 1978 Т. 1, 399 с. Т. 2, 358 с.

19. **Тимощук Л. Т.** Механические испытания металлов. М.: Металлургия, 1971. 224 с.

20. **Фридман Я. Б.** Механические свойства металлов. Ч. 1, Дефектоскопия и разрушение. М.: Машиностроение, 1974. 472 с.

21. **Фридман Я. Б.** Механические свойства металлов. Ч. 2. Механические испытания конструкционная прочность. М.: Машиностроение, 1974. 368 с.

22. **Хрущев М. М., Бабичев М. А.** Абразивное изнашивание. М.: Наука, 1970. 252 с.

23. **Школьник Л. М.** Методика усталостных испытаний. М.: Металлургия, 1978. 302 с.

Раздел 3

КОНТРОЛЬ

Глава 3.1

ОСНОВНЫЕ ТЕРМИНЫ

Контроль (технический контроль) - проверка соответствия объекта установленным техническим требованиям.

Вид контроля - классификационная группировка контроля по определенному признаку.

Метод контроля - правила применения определенных принципов и средств контроля.

Метод неразрушающего контроля - метод контроля, при котором не должна быть нарушена пригодность объекта к применению.

Система контроля - совокупность средств контроля, исполнителей и определенных объектов контроля, взаимодействующих по правилам, установленным соответствующей нормативной документацией.

Средство контроля - техническое устройство, вещество и (или) материал для проведения контроля.

Исполнители - специалисты службы контроля или изготовители продукции, обладающие правом самооценки (имеющие личное клеймо).

Объект технического контроля - подвергаемая контролю продукция, процессы ее создания, применения, хранения, технического обслуживания и ремонта, а также соответствующая техническая документация.

Дефект - каждое отдельное несоответствие продукции установленным требованиям.

Контролепригодность - свойство изделия, обеспечивающее возможность, удобство и надежность его контроля при изготовлении, испытаниях, техническом обслуживании и ремонте.

Испытание - техническая операция, заключающаяся в установлении одной или нескольких характеристик данной продукции, процесса или услуги в соответствии с установленной процедурой.

Входной контроль - контроль продукции поставщика, поступившей к потребителю или заказчику, и предназначаемый для использования при изготовлении, ремонте или эксплуатации продукции.

Операционный контроль - контроль продукции или процесса во время выполнения или после завершения технологической операции.

Приемочный контроль - контроль продукции, по результатам которого принимается решение о ее пригодности к поставкам и (или) использованию.

Эксплуатационный контроль - контроль, осуществляемый на стадии эксплуатации. В эксплуатационном различают *входной*, *профилактический* (необязательный) и *текущий* (обязательный) виды контроля.

По характеру воздействия на технологический процесс различают *пассивный* и *активный* контроль. В последнем случае предусматривают использование результатов контроля для корректировки изготовления продукции.

Полнота охвата контролем продукции уменьшается по мере возрастания иерархии контролируемой инстанции. Отдел или лаборатория проводят *сплошной* контроль (контроль каждой единицы продукции) только для продукции ответственного назначения, в остальных случаях они проводят *выборочный* контроль. Более высокие контролирующие инстанции осуществляют *инспекционный* контроль (проверка эффективности ранее выполненного контроля), который обычно является выборочным. Доля выборочно контролируемых изделий (*объем выборки*) тем меньше, чем выше контролирующая инстанция. Инспекционный контроль, проводимый в случайное время, называют *летучим*. Он позволяет более эффективно проверять работу службы контроля, чем периодический.

При выборочном контроле могут применять разрушающие методы, нарушающие пригодность продукции к применению. В некоторых случаях после такого контроля продукция может оказаться пригодной к использованию, однако контроль этого не гарантирует. Как правило, неразрушающими методами контролируют всю продукцию, что повышает ее эксплуатационную надежность.

Глава 3.2

ДЕФЕКТЫ МЕТАЛЛОИЗДЕЛИЙ

Кристаллическая структура. Большинство технических металлических материалов являются поликристаллическими, т.е. состоят из многих отдельных кристаллитов, примыкающих друг к другу без зазоров.

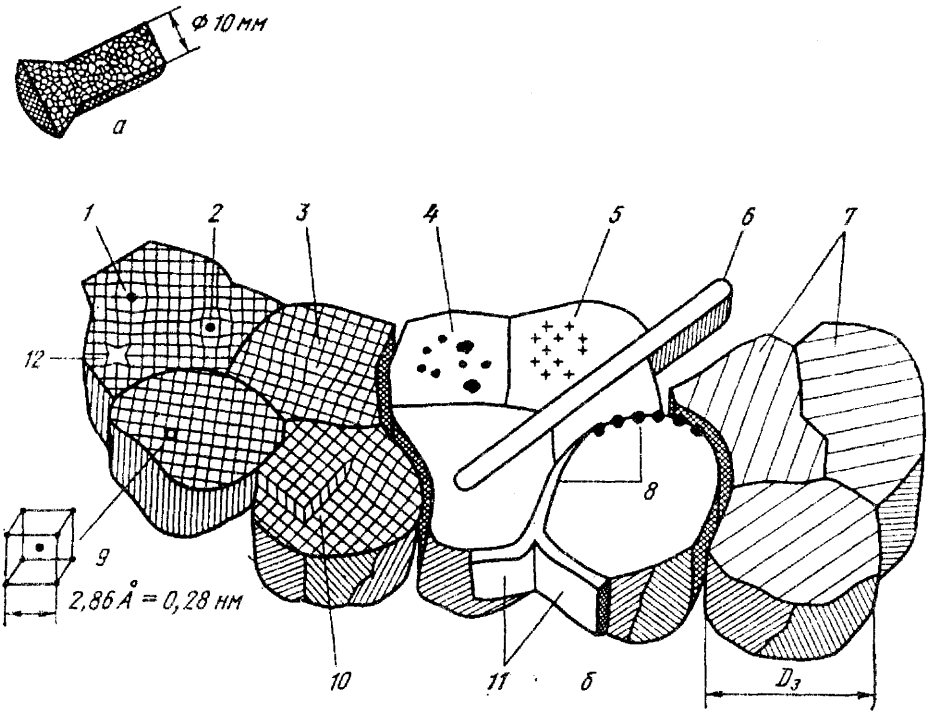


Рис. 3.2.1. Структура поликристаллического металлического сплава на примере стальной заклепки:
а - металлографический шлиф заклепки; *б* - структура металла: *1, 2* - примесные (чужеродные) атомы замещения и внедрения соответственно; *3* - краевая дислокация; *4* - некогерентные выделения; *5* - когерентные выделения; *6* - тугоплавкие примесные включения; *7* - линии скольжения; *8* - выделения по границам зерен; *9* - элементарная ячейка α- железа; *10* - винтовая дислокация; *11* - пленочные выделения по границам зерен; *12* - вакансия; $D_з$ - диаметр зерна

Кристаллы в поликристаллах, в отличие от свободно выращенных, не имеют правильной геометрической формы и называются кристаллитами, или зернами. Их наблюдают на специально приготовленных и протравленных шлифах с помощью оптического микроскопа. Диаметры зерен могут иметь размеры от нескольких микрометров до нескольких миллиметров; границы между ними называют границами зерен. Внутри каждого зерна атомы располагаются в правильном геометрическом порядке, который можно проиллюстрировать на моделях пространственных решеток (элементарных ячеек). На рис. 3.2.1 размеры решетки по сравнению с размерами зерна слишком велики; в действительности период решетки составляет около 0,00001 диаметра зерна.

В зернах всегда имеются дефекты кристаллического строения, основными из которых являются дислокации. Металлы могут растворять примесные (инородные) атомы, которые как бы встраиваются в решетку металла по типу замещения или внедрения. Незанятые места в кристаллической решетке (в ее узлах) носят название вакансий.

Кристаллиты с одинаковым химическим составом и кристаллической структурой представляют собой фазу. Чистые металлы всегда являются однофазными. В большинстве случаев сплавы состоят из нескольких фаз. Различные фазы образуются в процессе охлаждения из расплава или в результате последующей термической обработки вследствие изменения растворимости элементов с изменением температуры. Если решетка металла содержит больше примесных атомов, чем может раствориться при данной температуре, то из такого пересыщенного твердого раствора выделяются разной степени дисперсные частицы, называемые фазами выделений. Когерентные выделения характеризуются сопряжением их решетки с решеткой основного металла - матрицы. Некогерентные выделения образуют с матрицей межфазные границы.

Преимущественным местом образования фаз выделений являются границы зерен. Выделения по границам зерен могут либо образовывать сплошные оболочки вокруг зерен, либо

располагаться в этих местах прерывисто. Тугоплавкие фазы, которые в виде твердых частиц находятся в металлическом расплаве, в образующейся при затвердевании зернистой структуре распределены беспорядочно.

Дефекты в металлах. Многолетний опыт исследования отказов машин и механизмов свидетельствует о том, что основным видом разрушения деталей из различных металлических материалов является разрушение от усталости. Причины указанного вида разрушения весьма многообразны. К их числу относятся, например, низкое качество материала или изготовления деталей, недостаточная конструктивная прочность, нарушение требований по эксплуатации и т.д. Наиболее часто усталостные разрушения происходят из-за дефектов производственно-технологического происхождения, возникающих в деталях вследствие их некачественного изготовления, а также конструктивно-производственных дефектов.

Наряду с этим в эксплуатации происходят разрушения по механизму ползучести, от действия длительных статических сил, при одновременном действии нагрузок и агрессивной среды и т.п.

С точки зрения неразрушающего контроля деталей и изделий из металлических материалов все виды несовершенств в металлах вне зависимости от природы их образования (нарушения в металлургии, технологии, эксплуатации) целесообразно рассмотреть с позиции: дефект есть или дефект отсутствует. Вообще, *дефектом* называется каждое отдельное несоответствие продукции требованиям, установленным нормативной документацией.

3.2.1. МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЕ ДЕФЕКТЫ

Металлургические дефекты образуются при выплавке слитков и литье деталей.

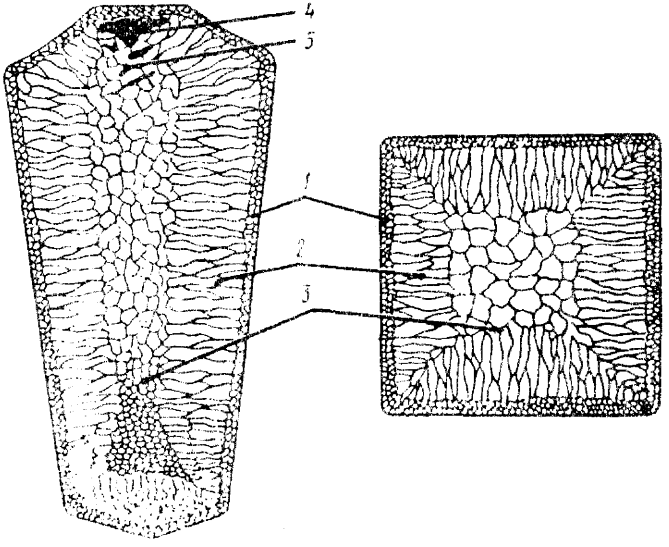


Рис. 3.2.2. Структура слитка:
1 - мелкозернистая корка; *2* - зона столбчатых кристаллитов; *3* - зона равноосных кристаллитов; *4* - усадочная раковина; *5* - рыхлоты ("хвост")

Усадочная раковина (рис. 3.2.2) - представляет собой полость, образовавшуюся вследствие уменьшения объема жидкого металла при его затвердевании. Внутренняя поверхность усадочной раковины неровная, с мелкими выступами и впадинами. В открытой раковине поверхность покрыта пленкой оксидов вследствие контакта металла с воздухом. В усадочной раковине скапливаются металлические включения, всплывающие из жидкого металла на его поверхность.

Причина образования усадочной раковины - уменьшение объема металла при затвердевании. При разливке стали в изложницы, расширяющиеся кверху, усадочная раковина образуется в центре верхней части слитка, а при разливке в изложницы, расширяющиеся книзу - в нижней части слитка.

При электрошлаковом, вакуумно-дуговом и электронно-лучевом переплавах усадочную раковину выводят в верхнюю часть слитка. Усадочная раковина при этих процессах менее развита, чем при разливке металла в изложницы.

Пузыри в литом металле представляют собой полости (округлые, овальные или про-

долговатые - в виде каналов), образовавшиеся в результате выделения газов при кристаллизации.

По расположению в слитках и литых слябах пузыри могут быть:

а) внутренние, расположенные произвольно;

б) подкорковые, расположенные у поверхности слитков и представляющие собой тонкие извилистые каналы (рис. 3.2.3);

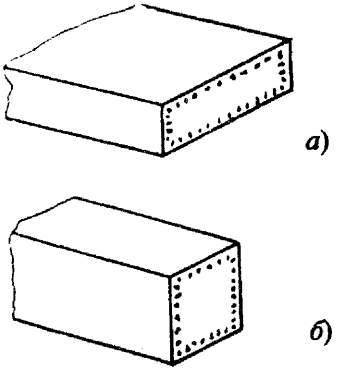


Рис. 3.2.3. Схема расположения подкорковых пузырей в непрерывном слитке:
а - листовой слиток; *б* - сортовой слиток

в) поверхностные.

Внутренние пузыри могут быть единичными, сдвоенными или строенными. Поверхность пузырей гладкая, блестящая. В пузырях встречаются неметаллические фазы; они заполняют определенные участки пузыря или отлагаются на его стенках.

Рис. 3.2.4. Незаварившийся при обработке давлением газовый пузырь

Горячая деформация приводит к завариванию пузырей в том случае, если стенки их не содержат стойких оксидов или силикатов. Если же в пузырях присутствуют силикатное стекло или другие стойкие оксиды, не растворяющиеся в металле при высокотемпературной деформации, то стенки пузыря сближаются и образуется прослойка оксидов. На поперечных шлифах незаварившиеся пузыри имеют вид полосок различной толщины (рис. 3.2.4). В микроструктуре в этом случае наблюдаются прослойки включений, соответствующие стенкам пузырей.

Газовые пузыри в литом металле образуются вследствие выделения газов (оксидов углерода, азота, водорода, монооксида кремния) в период кристаллизации, поскольку их растворимость в твердом металле значительно меньше, чем в жидком. Пузыри газа, возникающие в объеме металла, всплывают или частично фиксируются в затвердевающем металле.

Возникновение подкорковых пузырей связано чаще всего с недостаточным раскислением металла в процессе выплавки. К образованию подкорковых пузырей также может привести повышенное содержание влаги в защитной шлакообразующей смеси, завороты окисленной корки.

Выделение газов из жидкого металла с образованием поверхностных пузырей может происходить по двум причинам:

1) высокая концентрация растворенного в металле кислорода или азота;

2) поступление газов из внешних источников (выгорание смазки изложниц, неудовлетворительная очистка изложниц, использование влажных изложниц, завороты корки).

Корочки представляют собой участки металла, загрязненные неметаллическими включениями, располагаются в объеме слитков или у поверхности. Могут быть темными или светлыми.

Темная корочка - дефект макроструктуры, представляющий собой участки различной формы, характеризующиеся плохой полируемостью и повышенной травимостью из-за наличия неметаллических включений и повышенного содержания примесей (серы, фосфора). Темные корочки образуются следующим образом: корочки, опускаясь с поверхности жидкого металла, становятся "ловушками" для всплывающих включений. На нижней поверхности таких корок обнаруживается слой неметаллических включений. Если потонувшая корочка успевает расплавиться, в месте ее расположения обнаруживается зона скопления включений. Эффективный способ обнаружения корочек в заготовке - 100%-ный ультразвуковой контроль.

Светлая корочка - дефект макроструктуры нижней части слитка; имеет вид светлых полос, сопровождающихся неметаллическими включениями. Формирование светлых корочек связано с перерывами в разливке (металл успевает окислиться и загустеть, а следующие порции жидкого металла проталкивают его в тело слитка) и с медленной разливкой металла, имеющего низкую температуру.

Рис. 3.2.5. Микроструктура в зоне заворота корки. Сталь ШХ15 (× 100)

Завороты корки - дефект представляет собой завернувшиеся корки металла, окислившиеся заливины и брызги, расположенные у поверхности слитков. В деформированном металле дефект представляет собой разрывы или частичное отслоение, образовавшееся в результате раскатки завернувшихся корок или брызг. При горячей деформации дефекты вытягиваются вдоль ее направления. На поверхности прутков дефект может иметь вид языкообразного отслоения или разрыва, часто называемого *слиточной пленкой*.

Дефект выявляется при осмотре поверхности и может быть точно классифицирован на прутках по внешнему виду и путем микроанализа. Типичный вид раскатанной корки в микроструктуре приведен на рис. 3.2.5. На микрошлифе в зоне дефекта отсутствуют крупные скопления неметаллических включений. В некоторых участках зоны, прилегающей к дефекту, часто наблюдаются обезуглероживание и окалина.

Завороты корок могут встречаться в металле всех марок стали при любых способах разливки, кроме электрошлакового переплава. Дефект часто встречается при разливке холодного металла, при медленной разливке, а также при разливке металла с большой вязкостью.

Межкристаллитные трещины представляют собой тонкие нарушения сплошности, образующиеся по границам кристаллитов при низкой прочности этих границ. Пониженная прочность границ часто связана с присутствием на них прослоек неметаллической фазы и ликватов. Располагаются межкристаллитные трещины и прослойки преимущественно в осевой зоне слитков, а иногда и по всему сечению слитков. В результате деформации с большой степенью обжатия межкристаллитные трещины при небольшом их развитии могут частично завариваться (или полностью).

Причиной образования межкристаллитных трещин являются усадочные напряжения (термические и структурные) в участках металла, затвердевающего в последнюю очередь при малой прочности связи между кристаллитами, которая особенно резко проявляется в присутствии на их границах неметаллической фазы. Межкристаллитные трещины могут возникать при температуре конца затвердевания. При дальнейшем охлаждении усадочные напряжения, особенно структурные, могут приводить к развитию образовавшихся трещин или вызывать появление новых.

В жаропрочных сталях и сплавах трещины могут появляться в интервале температур дисперсионного твердения. В сталях мартенситного класса межкристаллитные трещины могут развиваться при температурах мартенситного превращения или при последующем хранении металла.

Трещины горячие (кристаллизационные) (рис. 3.2.6) - извилистые, окисленные разрывы металла, более широкие у поверхности и сужающиеся вглубь, образовавшиеся в период кристаллизации металла вследствие действия растягивающих напряжений, превышающих прочность наружных слоев слитка.

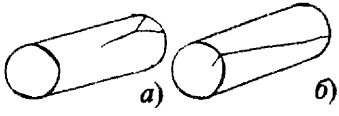


Рис. 3.2.6. Схема горячих раскатанных трещин на прутках:
а - продольная трещина; *б* - косая трещина

В поперечных макрошлифах трещины имеют извилистый, прерывистый ступенчатый характер и располагаются в междендритных промежутках - как бы состоят из нескольких разрывов, являющихся продолжением друг друга в глубину слитка и разделенных перемычками из металла.

Рис. 3.2.7. Внешний вид продольной раскатанной горячей трещины на блюме стали 20

Продольные раскатанные трещины - это продольные узкие разрывы металла с плотно сжатыми стенками и редкими ступеньками (рис. 3.2.7). Поперечные и наклонные раскатанные трещины представляют собой грубые разрывы поперечной ориентации, часто языкообразной формы, сопровождающиеся иногда пленами.

В поперечном сечении дефекты имеют характерную форму: широкие у поверхности, суживаются вглубь, стенки полостей извилистые. Концы полостей могут иметь несколько ответвлений, постепенно утоньчающихся.

В изделиях из ферритоперлитных, перлитных и мартенситных сталей вокруг дефектов наблюдается ярко выраженная структурная неоднородность, массивное обезуглероживание у поверхности с плавным переходом к нормальной структуре, ликвация легкоплавких компонентов на концах ферритных дорожек.

Образование трещин предопределяет многочисленные технологические факторы, одновременно вызывающие понижение механической прочности первичной корочки и увеличение разрывающих усилий в момент образования трещин:

перегрев жидкого металла;

повышенная скорость разливки металла;

повышенное содержание серы;

пониженная теплопроводность металла;

повышенная способность затвердевающего металла к линейной усадке.

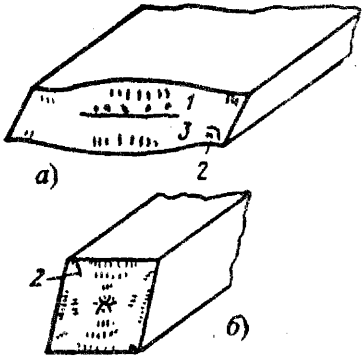


Рис. 3.2.8. Схемы расположения трещин в сечении:
а - листовой пруток; *б* - сортовой слиток;
1 - трещина, перпендикулярная граням;
2 - трещина напряжения; *3* - осевая трещина

Трещины (рис. 3.2.8) представляют собой нарушения сплошности в виде разрывов металла. Образование трещин в непрерывном слитке связано с напряжениями, возникающими в процессе его формирования, и обусловлено пониженной прочностью и пластичностью металла в различных температурных интервалах. При формировании непрерывного слитка могут возникать различного вида напряжения - термические, усадочные, адгезионные - как результат действия различных механических нагрузок, вызванных трением в кристаллизаторе, обжатием валков, разгибом слитков на радиальных установках, многократными фазовыми превращениями в определенных участках. На поперечных темплетах слитков трещины выявляются в виде отдельных широких скоплений.

В процессе прокатки непрерывно-литых заготовок с внутренними трещинами несплошности могут устраняться; химическая же неоднородность, сопровождающая трещины, проявляется в виде участков повышенной травимости. При прокатке образуются трещины искажения.

В материале деталей трещины, образующиеся при литье, могут распространяться по извилистой и ветвящейся траектории, на отдельных участках могут наблюдаться уширенные полости, заполненные продуктами окисления. Материал деталей по краям берегов литейных трещин обеднен легирующими элементами в результате высокотемпературного окисления, происходящего в процессе охлаждения металла и термической обработки.

Плены - пленки на поверхности или внутри отливки, состоящие из окислов, часто с включением формовочного материала. Плены в отливках возникают в результате того, что при заполнении формы составляющие расплава вступают в химическую реакцию с атмосферой и материалом формы, а из продуктов реакции на поверхности расплава образуется тугоплавкая и плотная пленка. При механическом разрушении этой пленки в процессе заливки отдельные куски ее оседают в различных местах формы.

Литейные подрезы - дефекты литья в виде углублений в местах конструктивных концентраторов напряжений. Образование литейных подрезов связано с недостаточной жидкотекучестью металла в процессе литья из-за понижения температуры.

В процессе литья слитков или деталей могут образовываться дефекты типа **рыхлоты** (скоплений усадочных пор), появляющиеся в результате уменьшения объема металла при затвердевании. Такие дефекты представляют собой несплошности материала неопределенных очертаний и имеют прерывистый или непрерывный характер.

К дефектам, образующимся при литье деталей, относятся **отклонения в их геометрии.**

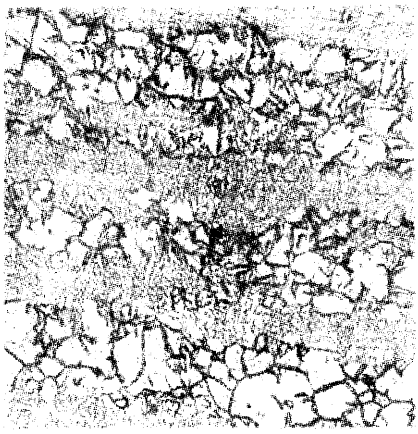


Рис. 3.2.9. Полосчатая микроструктура продольного микрошлифа образца из стали ЭП310ПИ (× 500)

Ликвация представляет собой неоднородность сплавов по составу, образующуюся при их затвердевании. Ликвацией называется также процесс создания такой неоднородности. Различают дендритную и зональную ликвации. *Дендритная ликвация* - неоднородность по составу осей и межосных участков в объеме дендрита. *Зональная ликвация* - неоднородность по составу различных зон слитков. Кристаллит литого металла неоднороден по составу и состоит из сростков дендритов. При деформации дендритное строение металла изменяется. Оси дендритов располагаются вдоль направления деформации и по мере увеличения степени обжатия, температуры и длительности нагрева уменьшается различие в составе осей и межосных участков. Однако полное выравнивание состава не достигается и в микроструктуре деформированного металла сохраняется структурная *полосчатость*. На продольном микрошлифе при этом наблюдается полосчатая структура, состоящая, например, для аустенитно-мартенситных сталей, из полос аустенита и мартенсита (рис. 3.2.9).

Причина дендритной ликвации - затвердевание сплавов в некотором интервале температур. В начале затвердевания образуются оси дендритов первого порядка, обогащенные компонентами, имеющими более высокую температуру затвердевания, затем (по мере понижения температуры и изменения состава расплава) перпендикулярно к первичным осям образуются оси второго порядка и далее ответвляются оси более высоких порядков. В период кристаллизации в участках, расположенных между осями дендритов, находится жидкость, обогащенная легкоплавкими примесями.

Формирование осей дендритов первого порядка при направленном теплоотводе приводит к обогащению расплава легкоплавкими примесями, вследствие чего в конце зоны столбчатых кристаллов, где развиты оси первого порядка, накапливаются примеси (сера, углерод, кислород, фосфор). Таким образом создается зональная ликвация.

Границы ликвационных зон при приложении внешних нагрузок могут явиться концентраторами напряжений, что обеспечивает зарождение и рост трещин.

Рис. 3.2.10. Оксисульфидные включения в виде тонких пленок в районе газовой ликвации. Сталь 10кп (× 200)

Газовая ликвация - характерный дефект слитка кипящей стали, представляющий собой участки структурной и химической неодно-

родности в виде стреловидной ликвации - каналов в зоне наружной корочки и сегрегационных пятен у внутренних концов сотовых пузырей.

Участки газовой ликвации в пузырях загрязнены неметаллическими включениями, главным образом сульфидами и оксисульфидами в виде отдельных групп и цепочек и тонких пленок, располагающихся по межосным участкам, обусловливая иногда границу ликвационного участка (рис. 3.2.10).

Точечно-пятнистая неоднородность типична для высоколегированных жаропрочных сталей и сплавов и представляет собой локальные участки, обогащенные ликвирующими примесями в виде избыточных фаз (рис 3.2.11).

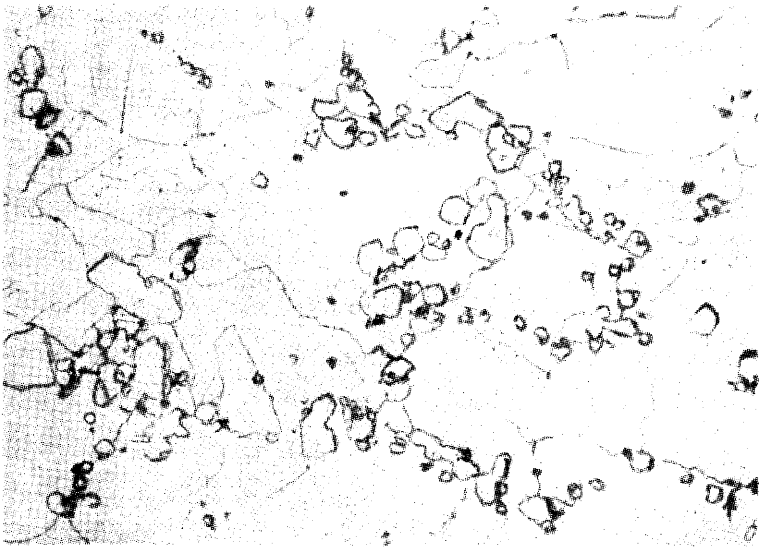


Рис. 3.2.11. Микроструктура продольного микрошлифа стали ЭИ868 с точечно-пятнистой неоднородностью. Видны строчки карбидов, интерметаллидов и нитридов (× 500)

Точечно-пятнистая неоднородность образуется вследствие дендритной ликвации сплавов в период их кристаллизации в области равноосных кристаллов, где ликвация имеет наибольшее развитие. Обусловлено это тем, что формирование межосных участков в рассматриваемой области происходит в условиях замедленного охлаждения с резко выраженной разделительной диффузией, приводящей к значительному обогащению межосных участков углеродом, азотом, кислородом, бором, серой и некоторыми легирующими элементами (W, Mo, Cr). В этих участках образуются избыточные фазы: карбиды, карбонитриды, бориды, сульфиды и т.п.

Ликвационный квадрат - дефект, выявляющийся в поперечных макрошлифах деформированного металла; представляет собой структурную неоднородность в виде различно травящихся зон, контуры которых повторяют форму слитка. Причина образования ликвационного квадрата - зональная ликвация в сочетании с дендритной. Примеси (фосфор, кислород, сера и др.) оттесняются к концу зоны столбчатых кристаллов, обогащая слой жидкого металла, расположенный за этой зоной.

Инородные металлические включения отличаются по составу и структуре от основного металла и попадают в него из внешних источников, которые могут быть весьма разнообразными: ферросплавы и лигатуры, затонувшие куски прутков или маркировочных дужек, куски электродов.

Маркировочные дужки попадают в слиток из прибыльной части; в случае раннего погружения дужки в металл, высокой температуры металла и шлака концы дужки подплавляются и погружаются в тело слитка, захватывая с собой и шлак (рис. 3.2.12).

Инородные металлические включения обнаруживаются при контроле микроструктуры или при ультразвуковом контроле.

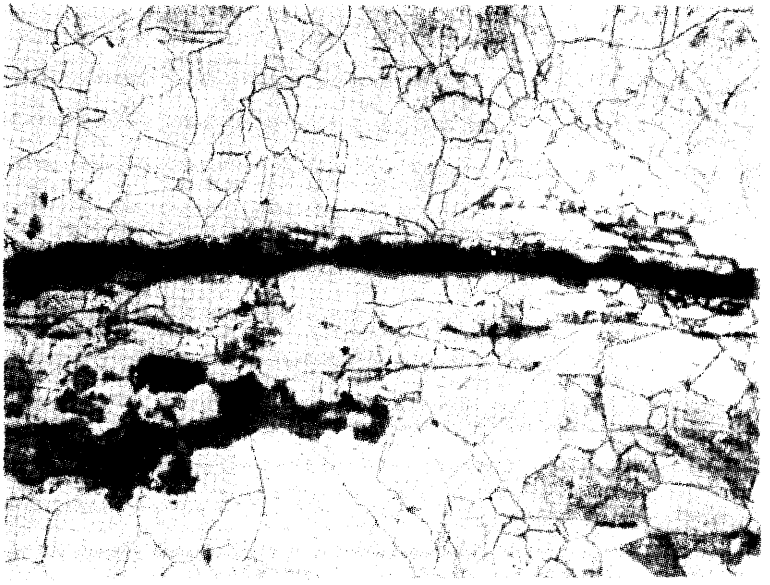


Рис. 3.2.12. Шлаковое включение в зоне дефекта от расплава дужки (× 100)

Неметаллические включения (загрязнения) (рис. 3.2.13) бывают двоякого рода и происхождения:

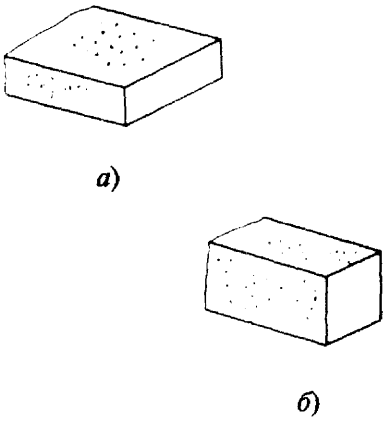


Рис. 3.2.13. Схема расположения крупных неметаллических включений на поверхности слитков: *а* - листовой слиток; *б* - сортовой слиток

включения неметаллических частиц, попавших в металл извне (шлак, огнеупор, графит, песок);

включения частиц окислов, сульфидов, силикатов, нитридов, образующихся внутри металла вследствие химического взаимодействия компонентов при расплавлении и заливке сплава.

Они располагаются в виде цепочек или сетки преимущественно по границам зерен; по форме бывают округлые и удлиненные; могут служить источниками зарождения трещин (рис. 3.2.14).

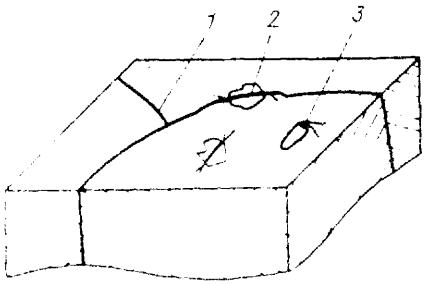


Рис. 3.2.14. Разрушение, инициируемое включениями (схема): *1* - граница зерна; *2* - микротрещина в хрупко разрушившемся включении; *3* - микротрещина на границе включение - матрица

При деформации в местах протяженных строчек включений образуются микротрещины, которые при слиянии формируют несплошность, а при выходе на поверхность - надрывы (рис. 3.2.15).

На рис. 3.2.16 приведен пример вытянутых вдоль направления прокатки строчечных включений сульфидов марганца и железа.

В деформированном металле загрязнения вытягиваются вдоль направления деформации и образуют нитевидные дефекты, называемые **волосовинами** (рис. 3.2.17). Волосовины могут быть в виде сплошных или прерывистых строчек, иметь различную длину (от 1 до 100 мм и более). Длина волосовин зависит от степени

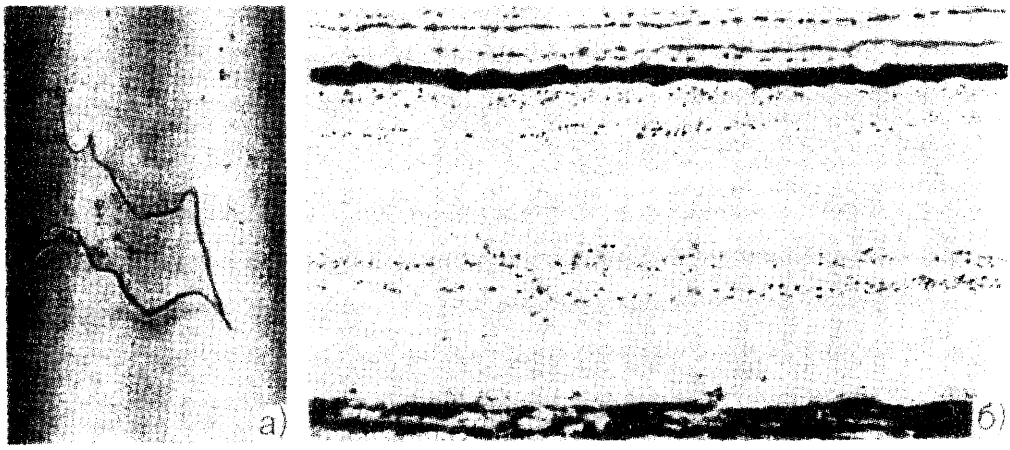


Рис. 3.2.15. Надрыв по неметаллическим включениям (грубым строчкам корунда α - Al_2O_3)

Рис. 3.2.16. Сульфиды FeS - MnS в металле с повышенным содержанием серы и фосфора (× 100)

Рис. 3.2.17. Волосовины на валу, выявленные магнитным методом

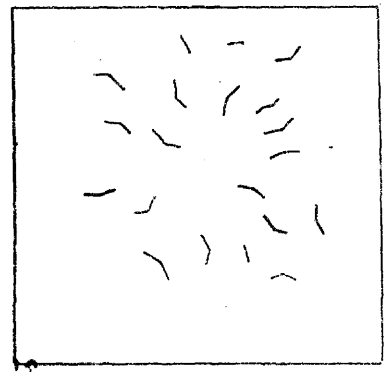


Рис. 3.2.18. Типичное расположение флокенов в макрошлифах сталей (схема)

деформации и размера загрязнения. В прутках стали волосовины наиболее часто встречаются в поверхностной зоне и в осевой зоне равноосных кристаллов.

Флокены представляют собой тонкие разрывы (рис. 3.2.18) металла округлой или овальной формы, образующиеся вследствие структурных напряжений в металле, насыщенном водородом; располагаются в средней зоне слитков, поковок или прутков. Обычно образуются в деформированном металле. В литом металле встречаются редко, преимущественно в конструкционных сталях с высоким содержанием легирующих элементов.

В деформированном металле флокены выявляются на макрошлифах, в изломах и при ультразвуковом контроле проката и поковок.

Флокены образуются преимущественно в процессе охлаждения стали горячей деформа-

ции, термической обработки, а также при последующем хранении металла. Причина образования флокенов - наличие в металле водорода и высоких напряжений в локальных участках при значительной хрупкости металла в этих участках. Водород, определяющий флокеночувствительность металла, попадает в него преимущественно в процессе выплавки. Растворимость водорода в жидком сплаве значительно выше, чем в твердом.

С повышением содержания легирующих элементов и углерода склонность к образованию флокенов увеличивается.

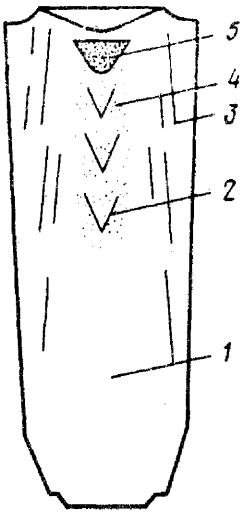


Рис. 3.2.19. Схема различных видов ликвации:
1 - отрицательная ликвация; *2* - прямая V-образная ликвация; *3* - обратная V-образная ликвация; *4* - положительная ликвация; 5 - усадочная полость

V-образная ликвация имеет вид темнотравящихся участков (полос), обогащенных серой, фосфором, углеродом и др. примесями. Может быть прямой или обратной. На рис. 3.2.19 схематически показаны прямая и обратная V-образная ликвация, а также зоны положительной и отрицательной ликваций.

Шлаковые включения - неметаллические оксидные включения округлой формы, расположенные в теле отливки или на ее поверхности. Обнаруживаются внешним осмотром и рентгенопросвечиванием.

Причины возникновения:

применение не очищенных от масла и коррозии шихтовых материалов;

недостаточное рафинирование расплава;

малое время выстаивания расплава после рафинирования;

плохая промывка и очистка разливочного ковша;

повышенная склонность расплава к окислению;

турбулентное (завихренное) поступление метала в форму и его вспенивание;

падение металла в форму;

прерывание струи металла при заливке.

Вскип, вскиповая раковина - оксидные складки или раковины, образовавшиеся при кипении сплава. Различают вскипы со стороны формы, стержня и от холодильника. Причина образования - большое давление газов и паров в форме вследствие:

высокой газотворной способности материала формы и стержней, низкой газопроницаемости формы;

повышенной влажности отдельных участков формы;

установки непросушенных стержней;

чрезмерного уплотнения отдельных участков формы;

отсутствия воздухоотводящих каналов (или залив их металлом) в форме и стержнях;

некачественной подготовки холодильников (плохо очищены от загрязнений, плохо просушены или не окрашены);

недостаточной просушки кокильной краски;

установки неподогретых металлических стержней и вставок в кокиль.

Поверхностное окисление (загар, горение) - встречается (у отливок из магниевых сплавов) в виде:

сплошной окисной плены черного или серого цвета;

отдельных или групповых раковин, заполненных порошком черного цвета или серого цвета;

наростов (грибков) черного цвета.

Причины возникновения:

недостаточное количество защитных присадок в формовочной смеси и стержнях;

повышенная влажность стержней;

перегрев каналов литниковой системы;

чрезмерно высокая температура заливки;

медленное остывание отливки в форме, способствующее выгоранию защитных присадок.

Оксидный спай - нарушение сплошности отливки в виде несливщихся потоков металла, разделенных пленкой. Наиболее часто проявляется в тонких сечениях отливки.

Причины возникновения:

малая скорость заполнения формы сплавом;

низкая температура заливки или недостаточный нагрев кокиля;

прерывание струи сплава;

неправильный подвод металла, при котором образуются глухие, плохо промываемые металлом полости, заполняемые несколькими потоками металла;

низкая газопроницаемость и плохая вентиляция формы.

Газовые раковины - полости округлой формы диаметром 1...3 мм и более с гладкой блестящей поверхностью. Располагаются в теле отливки отдельными включениями или гнездами. При литье магниевых сплавов наружные раковины имеют окисленную поверхность серого или черного цвета, при взаимодействии металла с серой раковины имеют желтую окраску. При литье тяжелых цветных металлов раковины часто располагаются под коркой металла (подкорковые раковины) и обнаруживаются при обработке резанием.

Причины возникновения:

низкая газопроницаемость формы и стержней;

повышенное содержание газотворных веществ или посторонних включений в формовочной и стержневой смесях и кокильной краске;

высокая влажность формы и стержней;

захват воздуха при заливке, большая скорость потока сплава в форме;

недостаточная вентиляция кокиля;

плохая обработка холодильников;

избыточность припыливания струи металла серой (при литье магниевых сплавов);

плохо раскисленный и насыщенный водородом и серой металл (при литье оловянных, высокосвинцовистых и других бронз и никелевых сплавов);

местное скопление защитных присадок в формовочных смесях.

Газоусадочная пористость - образуется по следующим причинам:

повышенная газонасыщенность сплава;

недостаточное питание отливки;

повышенная влажность формы;

недостаточная просушка стержней и кокильной краски;

завышенная температура заливаемого сплава.

Коробление - искажение геометрии и конфигурации отливки. Обнаруживается после остывания отливки в форме, выбивки и заварки.

Причины возникновения:

неравномерное охлаждение и усадка отдельных частей отливки, вызывающие появление внутренних напряжений, которые превосходят предел текучести металла;

малая жесткость конструкции отливки;

неправильная укладка деталей при термической обработке;

низкая температура охлаждающей среды;

неравномерный нагрев отливки при заварке дефектов.

Ужимины - длинные узкие вмятины в теле отливки, наслоения металла, отделенные прослойкой формовочной смеси (при литье в песчаные формы) или прослойкой краски (при литье в кокиль).

Причины возникновения:

нарушение технологии приготовления формовочной смеси;

неравномерное уплотнение формы, вызывающее неравномерное расширение слоев формы при заполнении ее металлом;

отслаивание и растрескивание слоя кокильной краски;

местный перегрев формы при заливке.

Пригар - неравномерные утолщения из формовочной или стержневой смеси, пропитанные металлом, располагающиеся в местах ее соприкосновения с наиболее горячими участками формы.

Причины возникновения:

крупнозернистый песок и слабое уплотнение формы;

низкая огнеупорность (для медных сплавов) формовочной и стержневой смесей;

повышенный напор сплава при заливке;

низкое качество противопригарной краски;

завышенная температура заливки.

Королек - металлическое включение того же состава, что и отливки. В большинстве случаев включение полностью окружено металлом.

Причины возникновения:

неправильный режим заливки отливок (перегрев струи, выбросы и разбрызгивание металла);

неудачная конструкция литниковой системы, приводящая к раздроблению струи металлического расплава.

Отклонение микроструктуры по виду, количеству и величине структурных составляющих от требований стандарта.

Причины возникновения:

нарушение технологии термической обработки вследствие заниженной температуры нагрева, приводящей к неполной закалке; завышенной температуры нагрева, приводящей

к пережогу (оплавлению) структуры; замедленного процесса закалки;

недостаточная выдержка отливок в печи;

неравномерный прогрев отливок, приводящий к неравномерной закалке;

неоптимальное содержание отдельных компонентов сплава.

Несоответствие герметичности отливки техническим требованиям чертежа. Отливки не выдерживают испытания на герметичность.

Причины возникновения:

повышенная пористость и усадочная рыхлота;

неправильно подобран состав сплава.

3.2.2. ДЕФЕКТЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ (ДЕФЕКТЫ ОБРАБОТКИ)

Рванины (рис. 3.2.20) представляют собой раскрытые разрывы, расположенные перпендикулярно или под углом к направлению наибольшей вытяжки металла; образуются при горячей деформации металла из-за пониженной пластичности. В момент образования рванины обычно тонкие, но последующая деформация приводит к их расширению.

Рис. 3.2.20. Рванины на поверхности стальной заготовки

В сталях и сплавах, содержащих титан, по рванинам могут располагаться окислы и нитриды титана, образовавшиеся в раскрытых разрывах при вторичном нагреве металла.

Вызывающая образование рванины пониженная пластичность металла при температурах горячей деформации может быть связана с технологией выплавки, при которой возникают легкоплавкие или стекловидные прослойки. Низкая пластичность может быть также связана с двухфазной структурой стали аустенитно-ферритного класса.

При удовлетворительном качестве металла рванины могут образовываться вследствие неблагоприятных условий нагрева (перегрев, пережог, недогрев) или деформации (большие степени обжатия, неоптимальная схема калибровки).

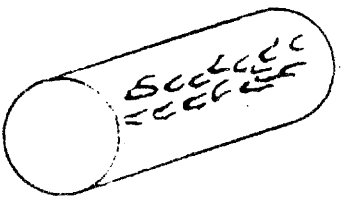


Рис. 3.2.21. Схема расположения прокатных плен на прутке

Деформация заготовок с рванинами приводит к образованию на поверхности групповых дефектов, называемых **прокатными пленами** (рис. 3.2.21). Они представляют собой отслоения металла языкообразной формы, соединенные с основным металлом, и образуются вследствие раскатки или расковки рванин.

Внутренние трещины и разрывы от деформации образуются при деформации вследствие высоких напряжений и малой пластичности металла. Располагаются преимущественно в центральной зоне прутков.

Внутренние разрывы от деформации могут различаться по внешнему виду в зависимости от условий деформации. Ковка прутков квадратного сечения из круглых слитков труднодеформируемых сплавов может приводить к образованию разрывов в виде ковочного креста или разветвленных разрывов, расходящихся от центра. Иногда образуются прямолинейные ступенчатые разрывы или округлые.

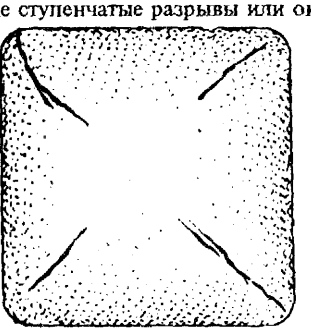


Рис. 3.2.22. Ковочные трещины в жаропрочной стали

Последующая деформация не устраняет грубых внутренних разрывов, если их поверхность контактировала во время нагрева с воздухом (рис. 3.2.22).

Возникновению дефектов способствует применение больших обжатий и отклонения от оптимальной температуры деформации. Образованию внутренних разрывов способствует низкая температура деформации.

Скворечник (рис. 3.2.23) представляет собой раскрывшуюся при деформации трещину в слитках или заготовках. Причина дефекта -

образование трещин при нагреве холодных слитков или заготовок; наружные слои металла нагреваются довольно быстро, а внутренние - медленно. Увеличение объема нагретых слоев создает растягивающие напряжения во внутренних холодных частях слитков. Под воздействием этих напряжений происходит разрыв металла. При деформации слитка трещины обычно раскрываются.

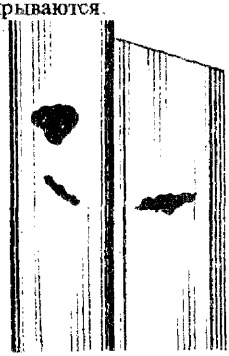


Рис. 3.2.23. Скворечники в катаных стальных заготовках

На макрошлифе наблюдается полость с разрывами, выходящими на поверхность. Для обнаружения скворечников, не выходящих на поверхность, применяют ультразвуковой контроль.

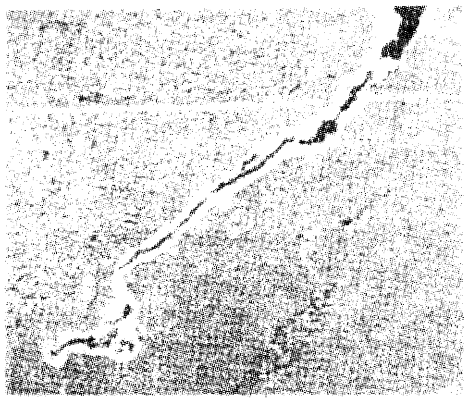


Рис. 3.2.24. Штамповочная трещина в материале лопатки из сплава ЖС6КП (× 400)

Штамповочные трещины (трещины горячего деформационного происхождения) связаны с пониженной пластичностью материала и имеют, как правило, извилистый характер (рис. 3.2.24).

Характерным структурным признаком, свидетельствующим об образовании трещины в процессе горячей деформационной обработки, является обеднение легирующими элементами материала детали в зоне ее полостей, которое на микрошлифах проявляется в виде наблюдаемых белых нетравящихся полос, окаймляющих поверхности трещины.

Этот признак технологического происхождения трещин является наиболее убедительным в тех случаях, когда он обнаруживается в зоне участков деталей, максимальная эксплуатационная температура которых заведомо ниже температуры начала происхождения окислительных процессов, сопровождающихся диффузионным перемещением легирующих элементов и кислорода.

Вообще, обеднение легирующими элементами материала деталей по краям поверхностей эксплуатационных трещин может являться диагностическим признаком невыявления их при проведении дефектоскопического контроля в ремонте (если наработка детали после ремонта недостаточна для высокотемпературного окисления даже при воздействии максимальных эксплуатационных температур).

Обеднение легирующими элементами материала детали в зонах полостей штамповочных трещин может и отсутствовать в тех случаях, когда штамповочная трещина образуется внутри металла и получает выход на поверхность детали после удаления припуска на механическую обработку.

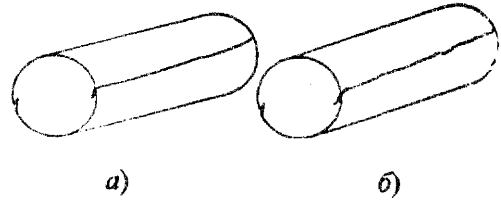


Рис. 3.2.25. Схема закатов на прутках:
а - прямолинейный дефект; *б* - дефект с зазубринами

Закат представляет собой прокатанный прямолинейный продольный выступ с одной стороны проката или с двух диаметрально противоположных сторон (рис. 3.2.25). Дефект, как правило, проходит по всей длине прутка.

Дефект образуется при прокатке заготовок или прутков с подрезами, усами, заусенцами и другими продольными выступами. Дефект может также получаться на конце раскатов из-за неправильной заделки в калибр.

На поперечных шлифах характерная особенность заката - расположение под острым углом к поверхности металла, конец дефекта не разветвлен и огибается волокном. При вдавливании грубого уса закат может располагаться под прямым углом к поверхности и иметь серповидный конец.

Закаты выявляются при внешнем осмотре проката или при осадке образцов в горячем или холодном состоянии. Под слоем прокатной окалины тонкие закаты трудно различи-

мы, поэтому для их лучшего обнаружения применяют абразивное светление прутков кольцами или змейкой с шагом 20...30 см. Особенность заката состоит в том, что в местах зачистки наблюдаются отклонения от прямой линии, связанные с распространением дефекта в глубь металла под острым углом. Иногда металл подвергают травлению, но этот способ нежелателен, так как может способствовать коррозии при последующем хранении.

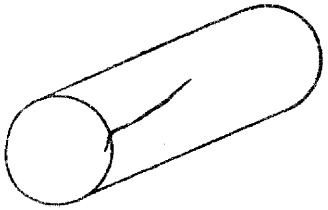


Рис. 3.2.26. Схема закова

Заков представляет собой продавленный выступ, образующийся при ковке из-за неравномерного обжатия (рис. 3.2.26). Заков на прутке имеет изогнутый волнистый вид и может распространяться на значительное расстояние вдоль прутка или быть коротким. Заков имеет тупой конец, заполненный окалиной. Конец закова может огибаться волокном.

Дефект особенно часто возникает при ковке низкоуглеродистых сталей с высоким содержанием хрома.

а) *б)*

Рис. 3.2.27. Схемы трещин напряжения на прутках:
а - единичная трещина;
б - прерывистая продольная трещина

Трещины напряжения. Дефект представляет собой направленную в глубь металла, часто под прямым углом к поверхности, трещину, образующуюся вследствие объемных изменений, связанных со структурными превращениями или с нагревом и охлаждением металла (рис. 3.2.27).

Трещины напряжения образуются в слитках и деформированном металле при его переделах и имеют ряд разновидностей:

трещины, образовавшиеся при охлаждении металла, в процессе которого произошли фазовые превращения (например, мартенситное превращение в стали);

трещины, образовавшиеся при вылеживании металла (например, стали с мартенситной структурой);

трещины, образовавшиеся при медленном нагреве наклепанных дисперсионно-твердеющих сплавов;

трещины, образовавшиеся при нагреве или охлаждении высокохромистых сталей ферритного класса, склонных к выделению σ-фазы;

трещины, образовавшиеся при быстром нагреве сплава с высокой твердостью и малой пластичностью.

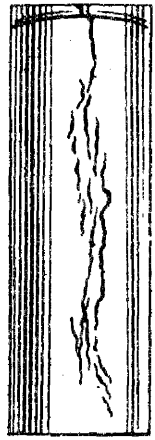


Рис. 3.2.28. Закалочные трещины, выявленные магнитным методом

В сталях наиболее распространены трещины, образующиеся при охлаждении от температур закалки с образованием мартенситной структуры (рис. 3.2.28).

Характерные признаки трещин напряжения на нетравленых шлифах:

расположение трещин под прямым углом к поверхности;

извилистый характер;

малая ширина;

наличие мелких ответвлений;

иногда раздвоенный конец.

На травленых шлифах трещины напряжения более широкие и часто распространяются по границам зерен.

Если трещины напряжения образуются на последней операции охлаждения или нагрева, то обезуглероживания, окисления по их границам не наблюдается. При дополнительном нагреве после образования трещин в их полостях, особенно в начале, могут наблюдаться окисление, обеднение легирующими элементами, обезуглероживание (в зависимости от температуры и времени нагрева).

Причина возникновения трещин при охлаждении стали с образованием мартенситной структуры - увеличение объема металла при превращении аустенита в мартенсит. Это превращение начинается с поверхности, а затем распространяется в глубь металла. Глубинные

участки металла, увеличиваясь в объеме, создают растягивающие напряжения в поверхностных слоях, имеющих мартенситную структуру, отличающуюся малой пластичностью и высокой твердостью. Возникающая на поверхности трещина может углубляться.

Образование трещин при вылеживании стали связано с тем, что после охлаждения в стали сохраняется некоторое количество непревращенного в мартенсит аустенита (до 10 %), который при вылеживании претерпевает распад, приводящий к образованию трещин, вследствие дополнительного изменения объема и понижения пластичности металла.

Иногда наблюдаются поверхностные неглубокие трещины, вызванные наличием обезуглероженного слоя на поверхности прутков стали, закалившейся на воздухе. Изменение состава наружных слоев по сравнению с внутренними приводит к тому, что при неодновременном структурном превращении возникают объемные напряжения, вызывающие образование поверхностных трещин.

Причиной образования трещин напряжения в дисперсионно-твердеющих сталях и сплавах также являются объемные напряжения и снижение пластичности в процессе распада твердого раствора. Трещины образуются при нагреве до 650...850^0 С вследствие интенсивного выделения упрочняющей фазы в предварительно наклепанном металле. При этих температурах еще не происходит полной рекристаллизации.

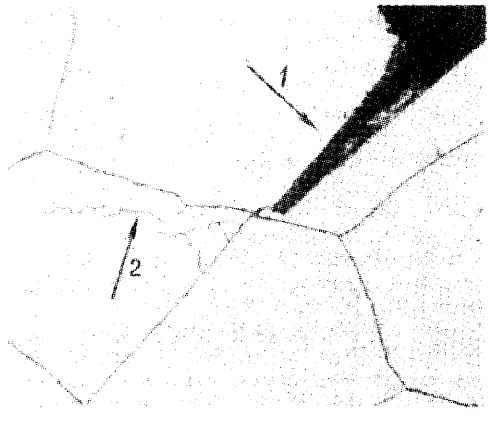


Рис. 3.2.29. Трещина скольного характера (стрелка *1*) в материале рабочей лопатки из сплава ЭИ617 (× 200). Стрелкой *2* указана усталостная трещина

Внутренние растягивающие напряжения часто являются причиной образования системы сколов по телу зерен, расположенных под поверхностью деталей (рис. 3.2.29). Указанные дефекты в эксплуатации могут развиваться по усталостному механизму.

В сталях ферритного и ферритно-мартенситного классов, главным образом высокохромистых, причиной возникновения трещин напряжения может быть выделение σ-фазы в интервале температур 750...850^0 С как при охлаждении, так и при нагреве. Наряду с изменениями объема в этом случае происходит охрупчивание материала.

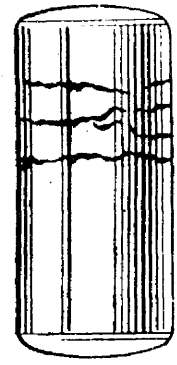


Рис. 3.2.30. Шлифовочные трещины в стальном ролике, выявленные магнитопорошковым методом

Шлифовочные трещины (рис. 3.2.30) представляют собой сетку паутинообразных или отдельных произвольно ориентированных поверхностных разрывов, образовавшихся при шлифовании металла, обладающего высокой твердостью, хрупкостью и малой теплопроводностью. Могут возникать при шлифовании слитков и деформированного металла. Имеют небольшую глубину (0,01...2 мм), но удалять их шлифованием обычно не удается, так как при шлифовании возникают новые трещины.

Причина возникновения шлифовочных трещин - местный разогрев металла, приводящий к локальному увеличению его объема. При последующем охлаждении объем локальных зон уменьшается и при температурах ниже 100^0 С, когда металл становится хрупким, происходит разрыв.

Металл в местах интенсивной шлифовки вследствие разогрева часто бывает покрыт пленкой оксидов, имеющих вид цветов побежалости.

Микроанализ показывает, что шлифовочные трещины очень тонкие, извилистые и распространяются в глубь металла зигзагами или ступеньками с ответвлениями (рис. 3.2.31).

Наибольшей склонностью к образованию шлифовочных трещин обладают стали мартенситного и ферритного (высокохромистые и хромоалюминиевые) классов, а также дисперсионно-твердеющие сплавы.

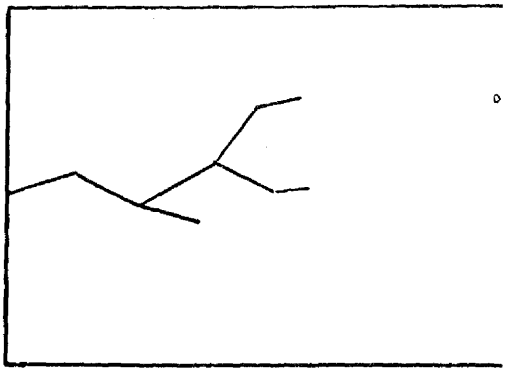


Рис. 3.2.31. Схема распространения шлифовочной трещины

Дефекты сварки - опасные дефекты технологического происхождения, резко снижающие характеристики сопротивления деталей знакопеременным нагрузкам.

Трещины в зоне сварного шва (рис. 3.2.32):

1) горячие трещины в переходной зоне от шва к основному металлу (рис. 3.2.33) - извилистые, в изломе имеют темный цвет, сильно окисленные, распространяются по границам зерен. Возникают при сварке деталей малой толщины (до 3 мм), склонных к образованию трещин при высоких температурах (выше 900^0 С в период кристаллизации наплавленного металла) вследствие неправильной технологии сварки, неудовлетворительной конструкции изделия или неправильного расположения швов;

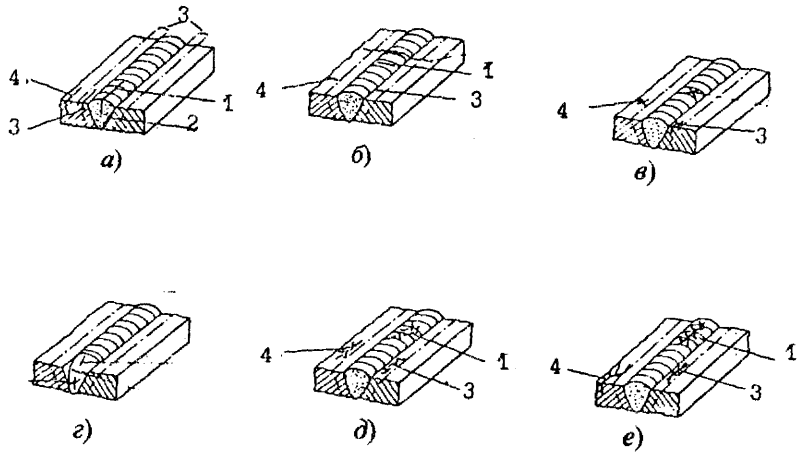


Рис. 3.2.32. Схемы трещин в сварных соединениях:
а - продольных; *б* - поперечных; *в* - радиальных; *г* - кратерных; *д* - скопление трещин; *е* - ветвящиеся; *1* - сварной шов; *2* - зона сплавления; *3* - зона термического влияния; *4* - основной металл;

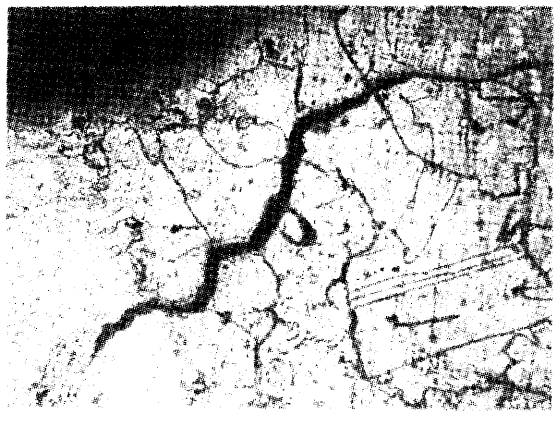


Рис. 3.2.33. Горячая сварочная трещина в материале патрубка. Сплав ВЖ98 (× 200)

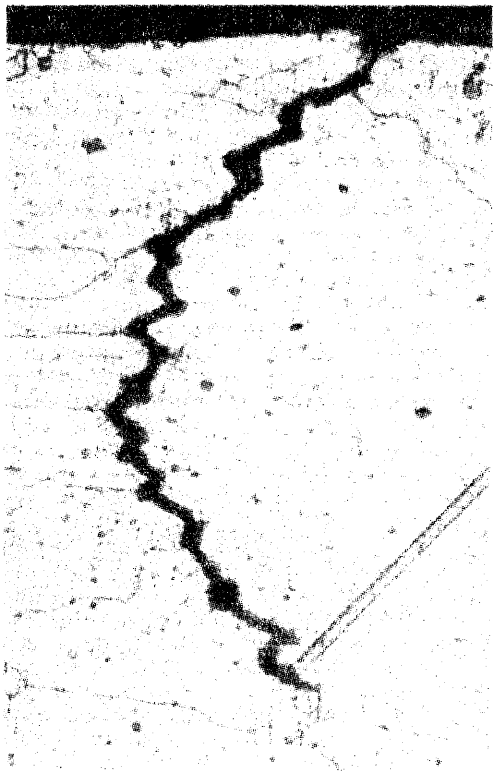


Рис. 3.2.34. Трещина в наплавленном металле сварного шва завихрителя патрубка. Сплав ВЖ98 (× 100)

2) трещины в наплавленном металле - продольные и поперечные, в изломе имеют темный цвет, сильно окисленные или светлые с цветами побежалости. Причины образования: неправильно выбранная марка присадочного материала; неудовлетворительное качество присадочной проволоки, обмазки или флюса; неправильные режимы и техника сварки; высокие внутренние напряжения в швах. Пример продольной трещины в наплавленном металле сварного шва приведен на рис. 3.2.34;

3) трещины в кратере возникают при сварке вследствие избытка серы в электродах (проволоке, обмазке) или в результате неправильного выполнения окончания шва;

4) холодные трещины в шве и переходной зоне, расположенные под любым углом ко шву, в изломе светлые или со слабыми цветами побежалости. Возникают при остывании детали в зоне пониженных температур, преимущественно при дуговой сварке низколегированной стали большой толщины. Чаще всего трещины возникают в переходной зоне вследствие неправильной техники сварки или неправильно выбранного присадочного материала;

5) мелкие трещины (микротрещины в шве или надрывы по переходной зоне) возникают вследствие неудовлетворительного качества присадочной проволоки, обмазки или флюса;

6) трещины, образующиеся в сварных соединениях при термообработке (закалке) узлов деталей; могут иметь произвольное направление. Возникают из-за несоблюдения режимов и условий термической обработки сварных узлов или вследствие неудовлетворительной (нетехнологичной) конструкции детали или узла;

7) трещины рихтовочные, могут иметь произвольное направление, в изломе светлые. Причина образования - неправильная технология правки изделий, получивших коробление.

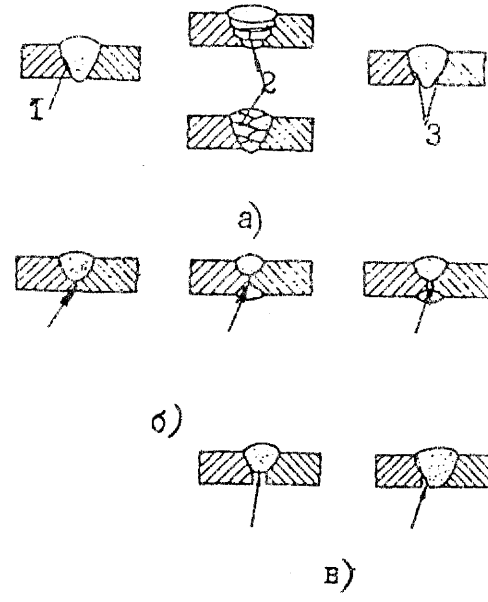


Рис. 3.2.35. Непровары и несплавления сварного шва:
а - непровары: *1* - в зоне сплавления; *2* - в сечении шва; *3* - в корне шва;
б - непроваренное поперечное сечение шва;
в - неполное заполнение корня сварного шва

Непровары (рис. 3.2.35) - отсутствие сплавления между основным и наплавленным металлом в корне или по кромке, а также между отдельными слоями - приходами при многослойной сварке.

Поры и раковины (рис. 3.2.36 и 3.2.37) в металле шва - пузыри (как правило, сферической формы) различной величины, заполненные газами (водород, окись углерода). Образуются из-за присутствия газов, поглощаемых жидким металлом сварочной ванны в процессе сварки.

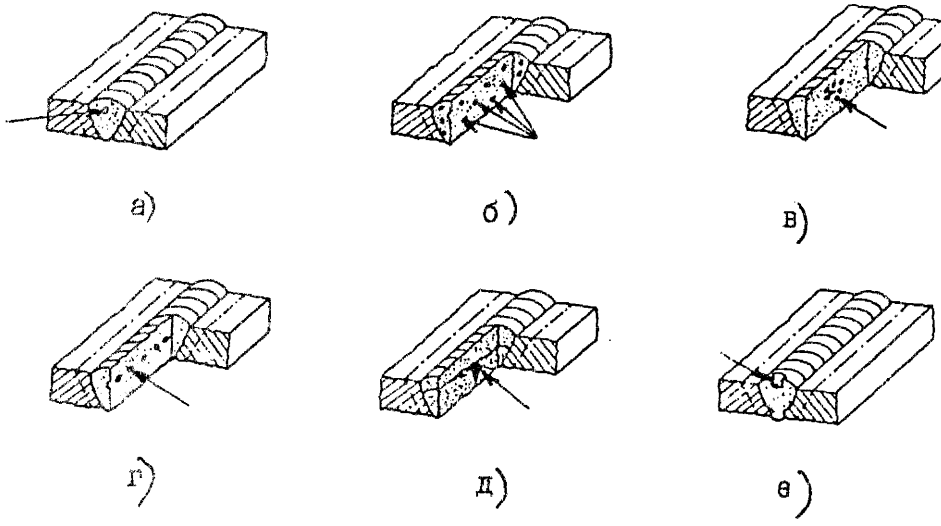


Рис. 3.2.36. Поры в литой зоне сварного шва:
а - газовая пора; *б* - распределенная пористость; *в* - скопление пор; *г* - цепочка пор; *д* - пора в сварном ядре; *е* - поверхностная пора

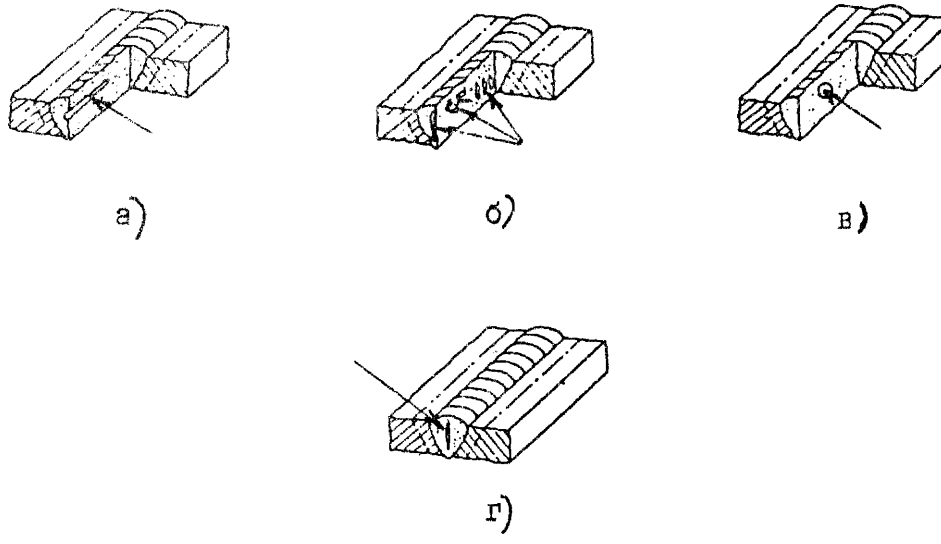


Рис. 3.2.37. Раковины в литой зоне сварного шва:
а - удлиненная раковина; *б* - скругленные полости; *в* - пузырь; *г* - усадочная раковина

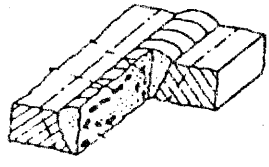


Рис. 3.2.38. Шлаковые включения в сварном шве

Отклонения в геометрии сварного шва и сварного соединения в виде подрезов, канавок, ряби, неполноты заполнения кратера, излишка металла, угловых и линейных смещений вызываются неправильной техникой сварки или нетехнологичной конструкцией узла.

Шлаковые включения в металле шва (рис. 3.2.38) - небольшие объемы, заполненные неметаллическими веществами (шлаками, окислами). Величина их колеблется от микроскопических размеров до нескольких миллиметров в поперечнике. Форма может быть

самой различной - от сферической до плоской, вытянутой в виде пленки, которая разделяет прилегающие объемы наплавленного металла.

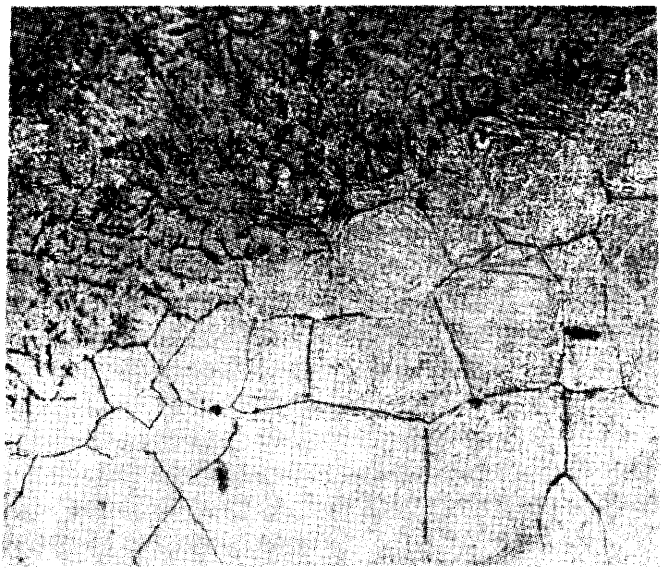


Рис. 3.2.39. Карбидная сетка по границам зерен основного материала (СН2) в околошовной зоне (× 200)

Карбидная сетка по границам зерен в околошовной зоне (рис. 3.2.39); возникает в основном материале (сталях типа ВНС-2, СН2) при нагреве до температур выше 750^0 С. Образуется при коагуляции карбидов и является охрупчивающим фактором, снижающим несущую способность при эксплуатационных нагрузках.

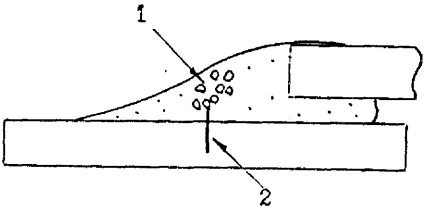


Рис. 3.2.40. Поры *1* в паяном шве, усталостная трещина *2*

Дефекты паяных соединений. Наиболее часто встречающимися дефектами, обнаруживаемыми при визуальном контроле, являются *поверхностные поры* и *рыхлоты* в виде *скоплений* и *цепочек* (рис. 3.2.40). В этом случае они служат концентраторами напряжений типа надреза и при наличии вибрационных напряжений способствуют усталостному разрушению деталей.

Другими, наиболее часто встречающимися дефектами паяных швов, являются *наплывы* (рис. 3.2.41) и *натеки* припоя, образующиеся вследствие неравномерного формирования

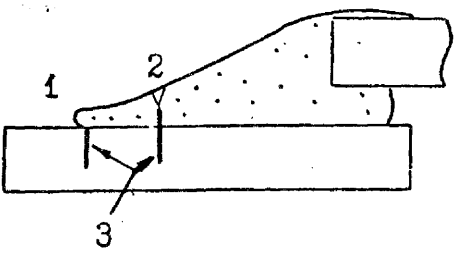


Рис. 3.2.41. Наплыв *1* и риска *2* на поверхности паяного шва, усталостные трещины *3*

галтели. Наплывы и натеки, являясь концентраторами напряжений, снижают усталостную прочность паяного соединения. Причиной разрушения деталей по паяным швам могут быть и глубокие риски, нанесенные при зачистке шва для устранения грубых переходов.

Еще одним дефектом паяных соединений является *проникновение припоя по границам зерен* основного материала (рис. 3.2.42), так как при этом может происходить ослабление его структуры вследствие возникновения расклинивающего эффекта и образования микротрещин в материале. Расклинивающий эффект связан с различной степенью термического расширения припоя, который содержит большое количество меди. Значительному проникновению припоя по границам зерен способствует перегрев основного материала в процессе пайки, приводящий к росту зерен на гра-

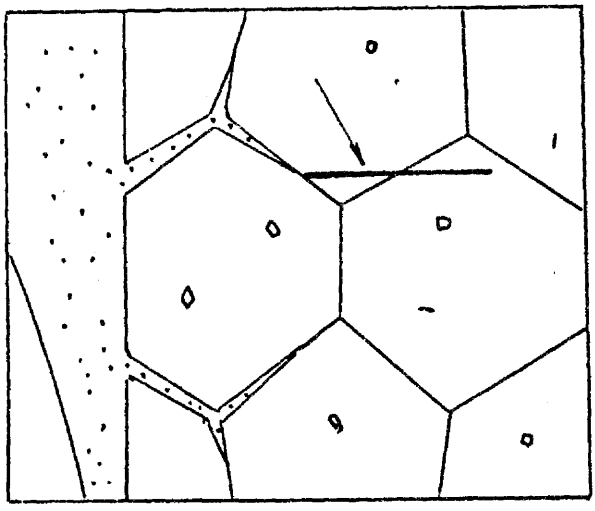


Рис. 3.2.42. Проникновение припоя по границам зерен основного материала. Стрелкой указана усталостная трещина

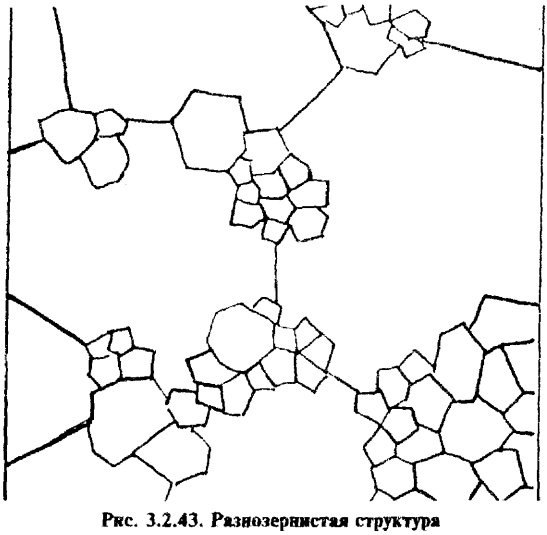


Рис. 3.2.43. Разнозернистая структура

нице припой - основной материал. Этот дефект представляет особую опасность, если он находится вблизи окончания галтели паяного шва, так как в данном случае значительно сказываются вибрационные напряжения, возникающие в процессе эксплуатации изделия.

Прижоги - дефекты, образующиеся при локальном перегреве материала, например, в процессе клеймения (маркировки) деталей электрографом. При клеймении существует возможность случайного касания электрографом поверхности детали в местах, повреждения на которых недопустимы, либо возникновение электрического разряда при касании детали с оправкой. Интенсивный местный разогрев поверхности детали в зоне прижога сопровождается образованием структурного концентратора напряжений, в зоне которого может возникнуть растрескивание.

При металлографическом анализе материала деталей наличие прижогов устанавливается по белым, нетравящимся участкам, видимым на поверхности травленого шлифа.

Разнозернистая структура. К числу дефектов горячей деформационной обработки сталей и сплавов относится разнозернистость структуры (рис. 3.2.43), возникающая, когда часть металла попадает в зону критических степеней деформации. Опасная роль разнозернистой структуры заключается в ее склонности

к растрескиванию по границам крупных зерен в различных условиях, например при механической обработке, при воздействии эксплуатационных напряжений и температур за счет различия в прочностных и пластических свойствах материала с мелко- и крупнозернистой структурой.

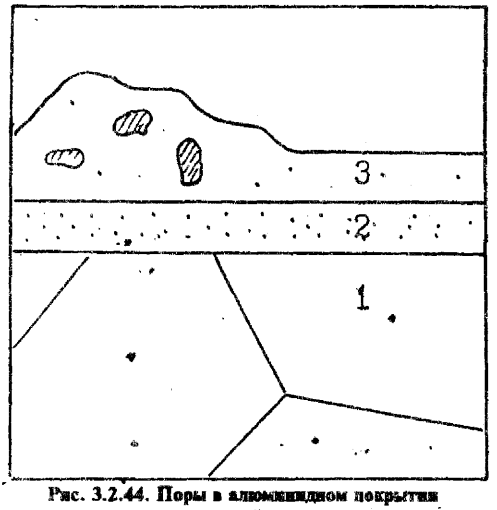


Рис. 3.2.44. Поры в алюминидном покрытии неравномерной толщины:
1 - основной материал; *2* - переходный слой; *3* - покрытие

Дефекты алюминидных покрытий на деталях из жаропрочных сплавов - дефекты алитированных слоев, к которым относятся:

поры (рис. 3.2.44);

неравномерная толщина покрытий;

несоответствие толщины покрытий заданной техническими условиями, в частности снижение толщины, иногда вплоть до полного его отсутствия;

растрескивание покрытия, его отслаивание, вспучивание.

Защитное покрытие лопаток, имеющее повышенную по отношению к ТУ толщину, склонно к растрескиванию в условиях эксплуатации. От дефектов в алюминидных покрытиях в процессе работы развиваются трещины в основном материале.

3.2.3. ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ДЕФЕКТЫ

Воздействие эксплуатационных нагрузок, окружающей среды (температура, влажность, пары кислот, щелочей, агрессивных компонентов топлива и т.п.), фазовые и структурные превращения, протекающие во времени в условиях воздействия эксплуатационных факторов при неблагоприятных сочетаниях могут вызвать зарождение и развитие эксплуатационных повреждений (коррозионные язвы, питтинги, фреттинг-коррозия, трещины).

Ниже приведено описание основных видов эксплуатационных повреждений деталей при воздействии статических и циклических нагрузок в нормальных условиях и при воздействии агрессивных сред.

3.2.3.1. ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ДЕФЕКТЫ В УСЛОВИЯХ ВОЗДЕЙСТВИЯ СТАТИЧЕСКИХ НАГРУЗОК

Трещины однократного нагружения образуются в материале деталей при воздействии на них нагрузок, превышающих прочность деталей.

Если предшествующая образованию трещины деформация происходила в объеме, соизмеримом с объемом детали, то трещину называют *трещиной вязкого разрушения*.

Если в зоне образования трещины отсутствуют видимые следы макропластической деформации, то трещину называют *хрупкой* (рис. 3.2.45).

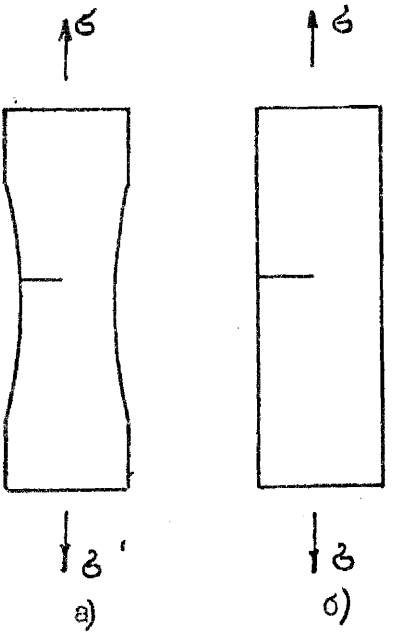


Рис. 3.2.45. Схема разрушения:
а - вязкого; *б* - хрупкого

Вязкие трещины имеют, как правило, внутризеренный характер распространения (рис. 3.2.46), ориентированы либо нормально к направлению действия растягивающих напряжений, либо совпадают с направлением действия касательных напряжений.

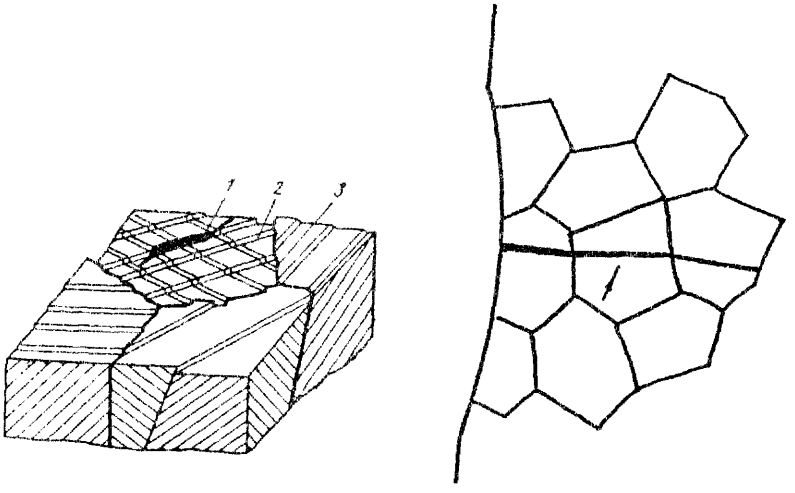


Рис. 3.2.46. Внутризеренное (вязкое) распространение трещин при однократном нагружении. Схемы микрорельефа (*а*) и микроструктуры (*б*):
1 - микротрещина; *2* - полосы скольжения; *3* - граница зерна

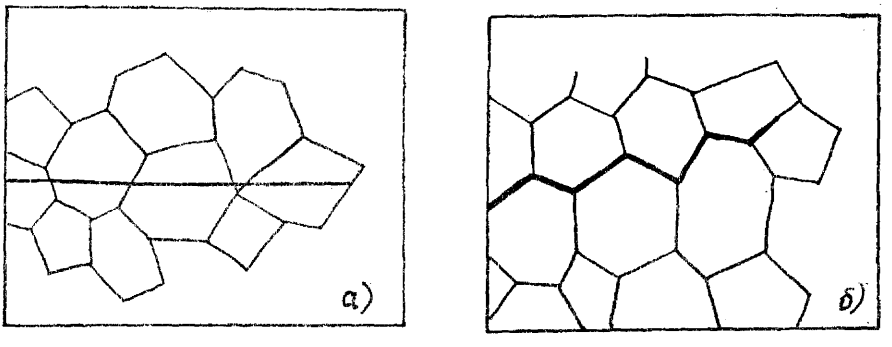


Рис. 3.2.47. Внутризеренное (*а*) и межзеренное (*б*) распространение хрупких трещин при однократном нагружении

Хрупкое разрушение может иметь как внутризеренный, так и межзеренный характер (рис. 3.2.47), приводя соответственно к образованию кристаллического или зернистого излома. Хрупкие трещины располагаются по поверхностям, перпендикулярным к направлению действия наибольших растягивающих напряжений.

Трещины замедленного разрушения. Замедленным (задержанным) разрушением принято называть хрупкое разрушение, наступающее с течением времени под воздействием статической нагрузки при напряжениях, меньших предела прочности (иногда ниже предела текучести) материала без влияния повышенной температуры и коррозионных активных сред.

К факторам, повышающим склонность материалов к замедленному разрушению, относят:

1) наличие в них водорода;

2) в закаленных сталях - закономерности мартенситного превращения, приводящего к возникновению в структуре стали остаточных микронапряжений;

3) постепенное накопление дефектов структуры при вязком течении по границам зерен.

Возникновению трещин замедленного разрушения способствуют наличие на поверхности детали хрупкого слоя, монтажные перекосы. Часто решающим фактором является действие внутренних растягивающих напряжений, возникающих при сварке, закалке, механической обработке и т.д.

При замедленном разрушении могут наблюдаться как множественные, так и единичные трещины. Характер трещин в существенной степени определяется классом и структурой материала. Так, алюминиевые сплавы замедленно разрушаются обычно по границам зерен; стали - часто по телу зерен или границам субзерен.

Примеры межзеренного и внутризеренного распространения трещин замедленного разрушения приведены на рис. 3.2.48.

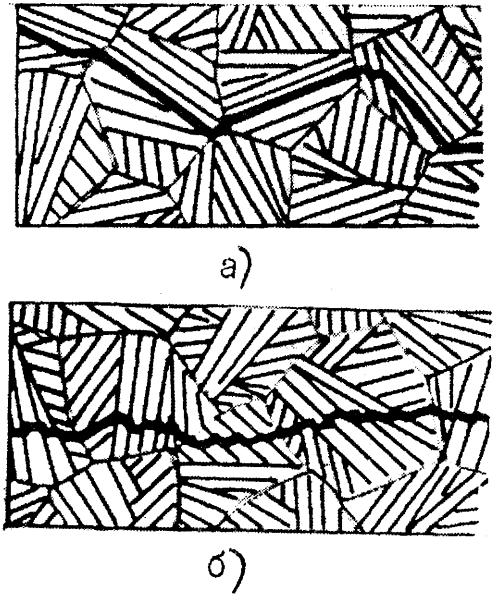


Рис. 3.2.48. Схема распространения трещин замедленного разрушения по границам (*а*) и телу (*б*) зерен

Характер разрушения в значительной степени определяется и уровнем действующих напряжений. Так, в алюминиевых сплавах при относительно низком уровне напряжений излом в зоне замедленного разрушения практически полностью межзеренный, при повышенных напряжениях - смешанный.

Разрушение под влиянием водорода (водородная хрупкость). Под влиянием растворенного водорода металлы могут настолько охрупчиваться, что уже при приложении малого растягивающего напряжения образуются трещины. Источниками поступления водорода могут явиться термическая диссоциация воды при металлургических процессах (литье, сварка), диссоциация газов, коррозия, гальванические процессы и т.п.

При диффузии водорода извне границы зерен оказываются наиболее благоприятными путями диффузии; они тем самым вносят преимущественный вклад в охрупчивание. Другими благоприятными путями проникновения водорода являются также поры и неметаллические включения (рис. 3.2.49).

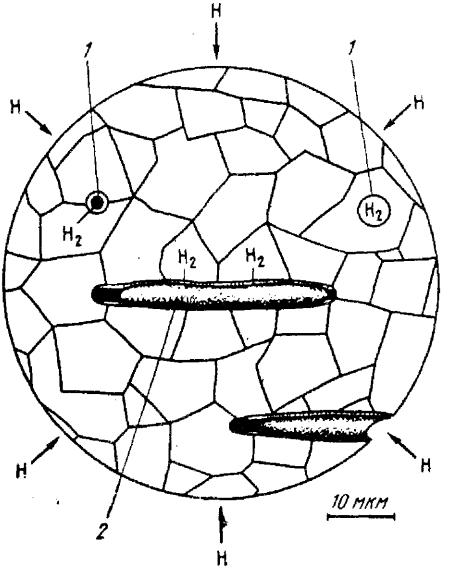


Рис. 3.2.49. Проникновение водорода в сталь при наличии пор и включений:
1 - поры; *2* - включения

Вызванное воздействием водорода разрушение происходит интенсивнее при действии внешней медленно возрастающей или постоянной статической нагрузки (замедленное разрушение); наличии остаточных напряжений (усадочные напряжения и напряжения, связанные с превращениями); холодной деформации; увеличении прочности в результате закалки; при низких температурах (но выше -70^0 С).

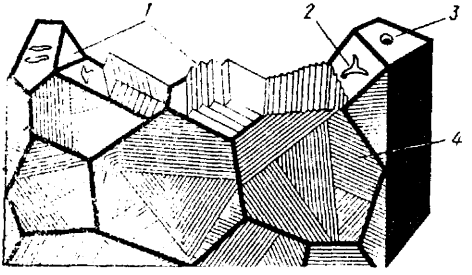


Рис. 3.2.50. Схема образования излома, обусловленного водородным охрупчиванием:
1 - поверхность излома; *2* - пластически деформированные волосовины; *3* - микропоры; *4* - поверхность шлифа

По отношению к исходному аустенитному зерну вызванное воздействием водорода разрушение стали может быть как межзеренным, так и внутризеренным (рис. 3.2.50).

Трещины ползучести. Разрушение деталей после пластического течения их материала под воздействием постоянного напряжения при относительно высоких температурах называется разрушением от ползучести. Для ползучести характерно множественное трещинообразование.

Для длительного высокотемпературного нагружения типично межзеренное разрушение, однако не исключено и внутризеренное разрушение, возможность которого определяется скоростью деформирования и температурой. С повышением температуры переход от внутризеренного к межзеренному разрушению смещается в область более высоких скоростей деформирования.

Большое влияние на характер разрушения оказывает размер зерен и их разнозернистость. Для материала с разнородным зерном характерно межзеренное разрушение в области малых зерен и внутризеренное - более крупных.

Коррозионное поражение металлов. Повреждения металлов под влиянием химического воздействия называют коррозией. Коррозионные явления представляют собой такие реакции, в которых принимают парное и множественное участие различные фазовые составляющие, например твердая фаза с твердой фазой; твердая фаза с газообразной и т.п.

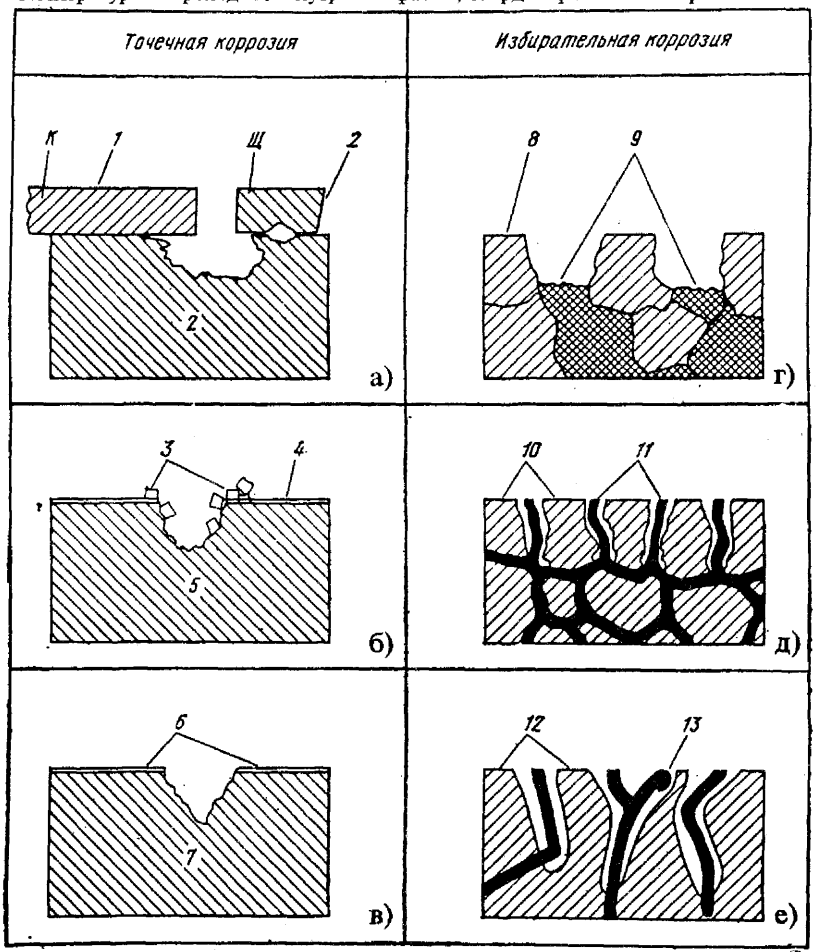


Рис. 3.2.51. Виды локального коррозионного воздействия вследствие образования микрогальваноэлементов:
а - контактная (*К*) и щелевая (*Щ*) коррозия; *б* - "обесцинкование", "обезникелевание", "обезалюминиевание"; *в* - точечная коррозия; *г* - избирательная коррозия; *д* - распад по границам зерен; *е* - "губчатая" коррозия в чугуне: *1* - участок благородного металла; *2* - участок неблагородного металла; *3* - кристаллы чистой меди; *4* - покровный слой; *5* - медный сплав; *6* - покровный слой; *7* - металл; *8* - благородная фаза; *9* - неблагородная фаза; *10* - основной металл; *11* - выделения по границам зерен, например карбидов; *12* - перлит, феррит; *13* - графит

Локальное химическое воздействие на поверхность металла обусловлено образованием вызывающего коррозию локализованного гальванического элемента. Происходит обмен зарядами, причем корродирующий металл является анодом. В зависимости от расположения катодов различают *точечную коррозию* и *избирательную коррозию* (рис. 3.2.51). При точечной коррозии вся структура металла подвержена коррозии, а при избирательной - только определенная структурная составляющая.

В качестве причин, вызывающих локальную коррозию, могут быть пористость, направленные остаточные напряжения, неравномерное распределение температур, неблагоприятная текстура.

Коррозионное растрескивание. Особенно опасный вид коррозионного разрушения - коррозионное растрескивание, происходящее при одновременном воздействии статических растягивающих напряжений (внешних и внутренних) и коррозионной среды. При этом наблюдается хрупкое разрушение и оно направлено перпендикулярно действию растягивающих напряжений.

Каверны, язвы и другие коррозионные повреждения, являясь концентраторами напряжений, часто служат очагами коррозионного растрескивания. Если материал склонен к общей коррозии и к коррозионному растрескиванию, трудно разделить эти два процесса как в начальной стадии, так и при развитии разрушения. Обычно процесс развития коррозионного разрушения состоит из трех стадий:

I - медленное развитие трещин, когда процесс в основном определяется коррозионным фактором;

II - скачкообразное, относительно быстрое развитие трещин при увеличивающемся влиянии механического фактора;

III - лавинообразное разрушение (долом).

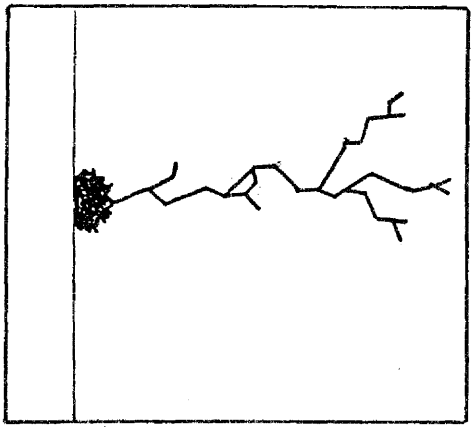


Рис. 3.2.52. Коррозионное растрескивание

Особенностью трещин при коррозионном растрескивании является их сильная разветвленность (рис. 3.2.52). Для коррозионного растрескивания наиболее характерно развитие разрушения по границам зерен.

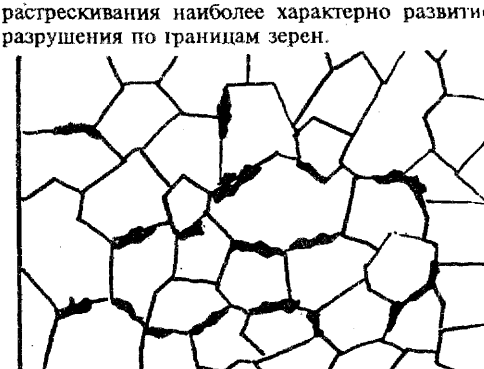


Рис. 3.2.53. Межкристаллитная коррозия

При межзеренном разрушении трещины коррозионного растрескивания трудно отличить от трещин межкристаллитной коррозии. Однако в последнем случае трещины, как правило, имеют вид паучков и гораздо менее ориентированы, чем при коррозионном растрескивании (рис. 3.2.53).

3.2.3.2. ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ДЕФЕКТЫ В УСЛОВИЯХ ВОЗДЕЙСТВИЯ ПЕРЕМЕННЫХ НАГРУЗОК

Детали машин в эксплуатации подвергаются воздействию вибрационных или переменных нагрузок; в наиболее критическом режиме детали начинают работать при совпадении частот собственных колебаний с частотой возбуждающей силы. Процесс постепенного накопления повреждений материала под действием переменных напряжений, приводящий к изменению свойств, образованию трещин, их развитию и разрушению называется **усталостью**.

При *многоцикловрй (классической) усталости* усталостные повреждения происходят в основном при упругом деформировании. В случае упругопластического деформирования при циклическом нагружении принято говорить о *малоцикловой усталости*. Частным случаем усталостного разрушения является *разрушение* от действия *повторно-статических нагрузок*, при котором деформирование происходит в пластической области.

Усталостные трещины (рис. 3.2.54) начинаются, как правило, вблизи поверхности. Зародышевые трещины обычно располагаются под углом ~45^0 к направлению растягивающего напряжения (I стадия). В высокопрочных никелевых и кобальтовых сплавах по *45-градусному типу* образуются сравнительно протяженные области усталостных разрушений.

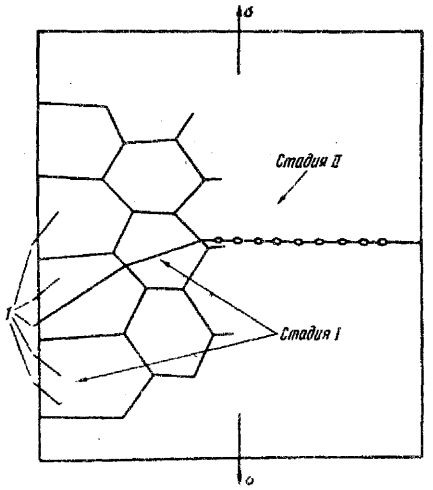


Рис. 3.2.54. Схема распространения усталостной трещины:
1 - экструзии, интрузии, полосы скольжения

Хотя усталостные трещины могут начинаться и на совершенно гладких полированных поверхностях, их возникновение в сильной степени облегчается при наличии концентраторов напряжений на поверхностях. Часто исходные точки образования начальных усталостных трещин являются местами стесненной пластической деформации в зоне концентрации напряжений (включения, неровности от механической обработки, надрывы, закаты, точечная коррозия, язвины, поры, задиры и др.). Кроме того, следует обращать внимание на наличие участков структуры с малой усталостной прочностью (обезуглероженные слои, δ-феррит в хромистых сталях).

После образования трещины и ее начального распространения под углом ~45^0 чаще всего в области одного или двух зерен, за стадией *I* следует стадия *II*, отвечающая распространению трещины перпендикулярно к направлению действия максимальных растягивающих напряжений. Трещины усталости распространяются, как правило, по телу зерен (транскристаллитное разрушение). Следов макропластической деформации в зоне усталостного разрушения не наблюдается.

Усталость при высоких температурах представляет собой сложный процесс, в котором определенную роль играют явления ползучести и повреждения, характерные для длительного статического высокотемпературного нагружения.

Эксплуатационные усталостные разрушения деталей при высоких температурах начинаются или непосредственно у поверхности или на малых расстояниях от поверхности деталей. Трещины имеют преимущественно прямолинейный характер и распространяются по телу зерен или смешанным образом (по телу и границам зерен). Основная поверхность излома располагается нормально по отношению к действующим растягивающим напряжениям.

Трещины термической усталости. Разрушение деталей после многократного воздействия периодически изменяющегося во времени уровня термических напряжений представляет собой явление термической усталости. Разрушение наступает при значительных знакопеременных пластических деформациях при общем числе теплосмен (циклов), характерном для повторно-статических нагружений. Наблюдается тенденция к возникновению трещин термоусталости в местах с наиболее окисленными поверхностными слоями.

На термоусталость деталей влияют конструктивные и технологические факторы: образование трещин бывает связано с наличием конструктивных концентраторов напряжений - в местах изменения сечений, у отверстий, в галтелях, в зонах сварных швов.

Внутренние металлургические дефекты могут не оказать существенного влияния на термоусталость, если место их расположения не совпадает с местами наибольших температурных перепадов и концентрации деформаций.

Для разрушения при термической усталости характерно множественное возникновение трещин, что объясняется локальностью действия термических напряжений и относительно быстрой их релаксацией.

Для термоусталости характерны трещины с широкими полостями и тупыми окончаниями - *трещины "разгара"*. Стенки большинства трещин интенсивно окислены. Степень окисления даже соседних трещин может быть различной, что свидетельствует о неодновременном возникновении трещин и относительно медленном их развитии.

Трещины термоусталости могут иметь местные уширения, когда они пересекают границы зерен, неблагоприятно ориентированные для развития по ним трещин. Указанное явление объясняется более интенсивным окислением границ зерен в связи с большей концентрацией в них легкоокисляющихся элементов (Mo, W), которые входят в состав карбидов, располагающихся обычно по границам зерен, а также более свободным доступом кислорода по границам зерен.

При наличии на пути трещины границы зерен, ориентированной под острым углом к их траектории, трещины могут ветвиться. Такие трещины называются *"паукообразными"*.

Несмотря на сходство явлений термической и механической усталости, необходимо учитывать, что действие повторных нагревов сопровождается сложным комплексом явле-

ний, проходящих в материалах при высоких температурах: окислением, старением, рекристаллизацией, ползучестью.

Трещины коррозионной усталости. Разрушение материалов в результате действия повторно приложенных нагрузок и коррозионной среды называют коррозионно-усталостным разрушением. С увеличением напряжения увеличивается роль механического фактора, с уменьшением напряжения и увеличением агрессивности среды - коррозионного.

Одновременное действие коррозионной среды и переменного напряжения оказывают более сильное влияние, чем их суммарное, но раздельное действие. Разрушение при коррозионной усталости может начаться при напряжениях значительно ниже предела выносливости.

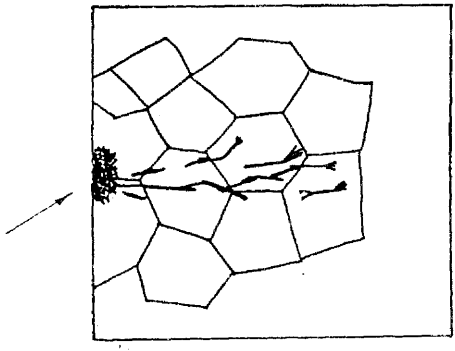


Рис. 3.2.55. Трещина коррозионной усталости. (Стрелкой указан очаг разрушения)

Коррозионно-усталостное разрушение начинается, как правило, после существенного повреждения поверхности, образования на ней язв, каверн и межкристаллитной коррозии (рис. 3.2.55). От этих очагов может практически одновременно начаться развитие многих трещин. Коррозионно-усталостные трещины - это в большинстве случаев многочисленные трещины, разветвляющиеся по мере роста и заканчивающиеся пучками, напоминающими корневую систему растений. Они менее ориентированы, чем при усталостном разрушении без коррозионного влияния среды. При коррозионно-усталостном нагружении разрушение может проходить как по границам, так и по телу зерен.

Трещины контактной усталости представляют собой контактные усталостные выкрашивания, образующиеся на поверхности металлических деталей при многократном приложении контактных нагрузок и относительном возвратно-поступательном движении.

Поверхностные контактные разрушения - фреттинг-коррозия или контактная усталость являются не полными разрушениями деталей, а сочетаниями многочисленных, часто очень мелких сколов.

Контактное усталостное выкрашивание (образование питтингов) с последующим развитием усталостного разрушения по сечению деталей наблюдается в таких деталях, как подшипники качения и скольжения, на зубьях шестерен, замковых соединениях и пр.

В условиях переменного контакта на поверхностях деталей образуются развальцованные языки, более твердые по сравнению с основным материалом из-за деформационного упрочнения. Сильная развальцовка языков может привести к образованию следов сдвига, которые могут быть местами зарождения усталостных трещин. Увеличенные за счет деформации при развитии усталости языки (или чешуйки) могут быть вырваны в результате действия тангенциальных растягивающих сил (рис. 3.2.56).

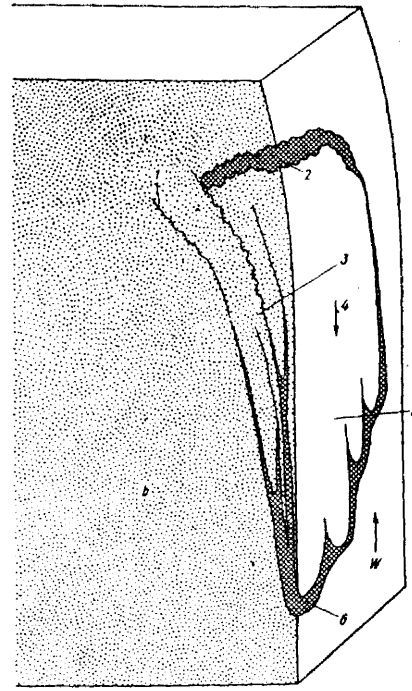


Рис. 3.2.56. Схема образования питтингов на ножке зуба ведущего зубчатого колеса. С-образный след усталостного излома на поверхности:
1 - усталостное разрушение; *2* - излом под действием статической нагрузки; *3* - пакеты скольжения, разрушенные сдвигом, шиферная структура; *4* - тангенциальная сила трения, отрицательное проскальзывание; *5* - масло; *6* - деформационные языки на боковой стороне зуба; *W* - направление (вдоль боковой стенки зуба) перемещения нагруженной точки соприкосновения

Причиной образования питтинга служат местные перегрузки или недостаточная смазка.

Только большие силы трения могут привести к образованию длинных деформационных языков, которые вызывают питтинговое разрушение боковых сторон зубьев шестерен.

Питтинги могут быть обнаружены при приработке боковых поверхностей зубьев еще до эксплуатации. Они связаны с наличием локальных выступов на поверхности, которые развальцовываются до небольших языков, отрываются без образования усталостных трещин и оставляют на боковой стороне зуба плоский отпечаток с гладкой поверхностью.

Кавитационное растрескивание. Кавитация означает образование на поверхности твердого тела при разрушении газообразных пузырьков. Лопающиеся пузырьки производят разрушения в слое металла на границе с жидкостью. Усталостная кавитация наблюдается, когда колеблющаяся стенка граничит с жидкостью (например, в циклически нагружаемых подшипниках скольжения).

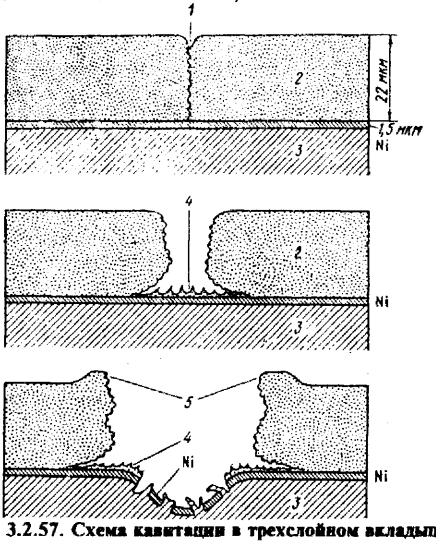


Рис. 3.2.57. Схема кавитации в трехслойном вкладыше подшипника:
1 - усталостная трещина; *2* - AlSn20-сплав; вкладыш подшипника; *3* - свинцовистая бронза; *4* - микрократер; *5* - края с большими наплывами (утолщениями)

Разрушение подшипника из трехслойного материала в результате усталостной кавитации показано на рис. 3.2.57. Повреждение начинается с образования усталостной трещины во вкладыше *2*. В никелевом слое гальванического покрытия усталостное разрушение разветвляется и далее распространяется с образованием почти круглых канавок. В основании канавок материал заливки вкладыша спрессовывается с никелевым сплавом и образует кратеры. В донной части образуется центральный кратер, где никелевый слой прорывается и разрушение переходит на свинцовистую бронзу.

3.2.3.3. РАСТРЕСКИВАНИЕ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ТЕРМИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ

Разрушения под действием термических напряжений происходят только вследствие теплового градиента без приложения внешней механической нагрузки. Причиной возникновения трещин является образование локальных полей напряжений.

Каждое изменение температуры из-за перепада температур по сечению изделий вызывает даже в не имеющих превращений металлах и сплавах существенные тепловые напряжения. Если к тому же температура превышает температуру превращения, то образуются новые фазы и модификации, имеющие различные удельные объемы. Это сопровождается возникновением дополнительных структурных напряжений, связанных с превращениями. Резкие одноразовые изменения температуры приводят к возникновению так называемых *термоударных трещин*. Предпосылкой для образования термоударных трещин является возникновение таких суммарных тепловых и структурных напряжений, которые приводят к появлению термических напряжений, превышающих временное сопротивление.

В участках изделия, примыкающих к поверхности, при охлаждении возникают растягивающие напряжения, в глубине изделия - сжимающие. В начальной стадии напряжение в резко охлажденном тонком внешнем слое очень велико, поскольку зоны материала, расположенные в глубине, допускают деформацию только в ограниченной степени.

Общий уровень остаточных термических напряжений зависит от предела текучести материала, его модуля упругости E, коэффициента теплопроводности, формы изделия, температурного градиента и продолжительности (резкости) охлаждения.

3.2.3.4. РАДИАЦИОННЫЕ ПОВРЕЖДЕНИЯ

При воздействии ионизирующих излучений (рентгеновское, α, β, γ, протонное, нейтронное) на конструкционные материалы последние получают соответствующие повреждения, определяемые количеством энергии, поглощенной материалом.

К числу таких радиационных повреждений относятся: вакансии, внедренные атомы, примесные атомы, термические пики, ионизационные эффекты.

Вакансия представляет собой узел решетки, в котором в результате взаимодействия с излучением отсутствует атом, образуется в твердых телах при столкновениях быстрых нейтронов, осколков деления ядер и других быстрых частиц с атомами решетки.

Внедрившиеся в междоузлия атомы - атомы, сместившиеся из своих устойчивых положений в решетке.

Примесные атомы образуются в результате ядерных реакций, протекающих при захвате нейтронов ядром атома (*радиационное легирование*). Внедряясь в решетку облучаемого вещества, они могут значительно изменять его свойства.

Термические пики обусловлены колебаниями узлов решетки вдоль пути движения быстрых частиц либо заряженных, выбитых со своего места атомов решетки. В локальных объемах ($\sim 10^{-17}$ см^3) возникают большие перегревы (до 10^3 К).

Ионизационные эффекты наблюдаются, когда ионизирующие излучения, проходя через вещество, вызывают в нем ионизацию, следствием чего является разрыв химических связей, образование радикалов и т.д.

Облучение металлов увеличивает подвижность атомов и ускоряет фазовые и структурные превращения.

Посредством трансмутационной реакции $n \rightarrow \alpha$ происходит образование гелия (плохо растворяющегося в твердом состоянии в металлах), что может привести к появлению пузырей на границах зерен. Образующийся при облучении водород способствует охрупчиванию металлов.

Слияние вакансий способствует формированию пустот (*радиационная пористость*) и вызывает заметное разбухание и коробление металла.

Физические и химические неоднородности (различного типа дефекты, примесные атомы), возникающие при облучении металлов, существенным образом изменяют их свойства (возрастает удельное электросопротивление; повышается склонность к коррозионному растрескиванию; металлы охрупчиваются: предел текучести, предел прочности, твердость возрастают, пластичность снижается; падает значение длительной прочности).

Для исследования металлов, поврежденных наличием радиационных дефектов, наиболее чувствительным является метод измерения электросопротивления.

Глава 3.3

КЛАССИФИКАЦИЯ МЕТОДОВ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ

В основу классификации методов неразрушающего контроля положены физические процессы взаимодействия физического поля или вещества с объектом контроля. С точки зрения физических явлений, на которых они основаны, выделяют девять видов неразрушающего контроля: магнитный, электрический, вихретоковый, радиоволновый, тепловой, оптический, радиационный, акустический и проникающими веществами. Каждый из видов контроля подразделяют на методы по рассматриваемым признакам.

Характер взаимодействия поля или вещества с объектом. Взаимодействие должно быть таким, чтобы контролируемый признак объекта вызывал определенные изменения поля или состояние вещества. Например, наличие несплошности вызывало изменение прошедшего через нее излучения или проникновение в нее пробного вещества. В некоторых случаях используемое для контроля физическое поле возникает под действием других физических эффектов, связанных с контролируемым признаком. Например, электродвижущая сила, возникающая при нагреве разнородных материалов, позволяет контролировать химический состав материалов (термоэлектрический эффект).

Первичный информативный параметр - конкретный параметр поля или вещества (амплитуда поля, время его распространения, количество вещества и т.д.), изменение которого используют для характеристики контролируемого объекта. Например, наличие несплошности увеличивает или уменьшает амплитуду прошедшего через нее излучения.

Способ получения первичной информации - конкретный тип датчика или вещества, которые используют для измерения и фиксации упомянутого информационного параметра.

Классификация методов НК дана в табл. 3.3.1.

Магнитный неразрушающий контроль основан на анализе взаимодействия магнитного поля с ОК. Как правило, его применяют для контроля объектов из ферромагнитных материалов. Свойства, которые требуется контролировать (химический состав, структура, наличие несплошностей и др.), обычно связаны с параметрами процесса намагничивания и петлей гистерезиса.

Электрический неразрушающий контроль основан на регистрации параметров электрического поля, взаимодействующего с контролируемым объектом (собственно *электрический метод*), или поля, возникающего в ОК в результате внешнего воздействия (*термоэлектрический* и *трибоэлектрический методы*). Первичными информационными параметрами являются электрическая емкость или потенциал.

Вихретоковый неразрушающий контроль основан на анализе взаимодействия электромагнитного поля вихретокового преобразователя с электромагнитным полем вихревых токов, наводимых в ОК. Его применяют только для контроля объектов из электропроводящих материалов. Вихревые токи возбуждаются в объекте преобразователем в виде индуктивной катушки, питаемой переменным или импульсным током. Приемным преобразователем (измерителем) служит та же или другая катушка. Возбуждающую и приемную катушки располагают либо с одной стороны, либо по разные стороны от ОК.

3.3.1. Классификация методов неразрушающего контроля

Вид контроля	Методы контроля		
	по характеру взаимодействия физических полей или проникающих веществ с ОК	по первичному информативному параметру	по способу получения первичной информации
1	2	3	4
Магнитный	Магнитный	Коэрцитивной силы Намагниченности Остаточной индукции Магнитной проницаемости Эффекта Баркгаузена	Магнитопорошковый Индукционный Феррозондовый Эффект Холла Магнитографический Пондеромоторный
Электрический	Электрический Трибоэлектрический Термоэлектрический	Электропотенциальный Электроемкостный	Электростатический порошковый Электропараметрический Электроискровой Экзоэлектронной эмиссии Шумовой Контакт разности потенциалов
Вихретоковый	Прошедшего поля Отраженного поля	Амплитудный Фазовый Частотный Спектральный Многочастотный	Трансформаторный Параметрический
Радиоволновый	Прошедшего излучения Отраженного излучения Рассеянного излучения Резонансный	Амплитудный Фазовый Частотный Временной Поляризационный Геометрический	Детекторный (диодный) Болометрический Термисторный Интерференционный Голографический Жидких кристаллов Термобумаг Термолюминофоров Фотоуправляемых полупроводниковых пластин Калориметрический
Тепловой	Тепловой контактный Конвективный Собственного излучения	Термометрический Теплометрический	Пирометрический Жидких кристаллов Термокрасок Термобумаг Термолюминофоров Термозависимых параметров Оптический интерференционный Калориметрический

Продолжение табл. 3.3.1

1	2	3	4
Оптический	Прошедшего излучения Отраженного излучения Рассеянного излучения Индуцированного излучения	Амплитудный Фазовый Временной Частотный Поляризационный Геометрический Спектральный	Интерференционный Голографический Рефрактометрический Визуально-оптический
Радиационный	Прошедшего излучения Рассеянного излучения Активационного анализа Характеристического излучения Автоэмиссионный	Плотности потока энергии Спектральный	Сцинтиляционный Ионизационный Вторичных электронов Радиографический Радиоскопический
Акустический	Прошедшего излучения Отраженного излучения Резонансный Импедансный Собственных колебаний Акустико-эмиссионный	 Амплитудный Фазовый Временной Частотный Спектральный	Пьезоэлектрический Электромагнитно-акустический Микрофонный Порошковый
Проникающими веществами	Молекулярный Капиллярный Молекулярный Течеискания	Жидкостный Газовый	Яркостный (ахроматический) Цветной (хроматический) Люминесцентный Люминисцентно-цветной Фильтрующихся частиц Масс-спектрометрический Пузырьковый Манометрический Галогенный Радиоактивный Катарометрический Высокочастотного разряда Химический Остаточных устойчивых деформаций Акустический

Интенсивность и распределение вихревых токов в объекте зависят от его размеров, электрических и магнитных свойств материала, от наличия в материале нарушений сплошности, взаимного расположения преобразователя и ОК, т.е. от многих параметров.

Радиоволновой неразрушающий контроль основан на регистрации изменений параметров электромагнитных волн радиодиапазона, взаимодействующих с ОК. Обычно применяют волны сверхвысокочастотного (СВЧ) диапазона длиной 1...100 мм и контролируют изделия из материалов, где радиоволны не очень сильно затухают: диэлектрики (пластмассы, керамика, стекловолокно), магнитодиэлектрики (ферриты), полупроводники, тонкостенные металлические объекты. По характеру взаимодействия с объектом контроля различают ме-

тоды *прошедшего, отраженного, рассеянного излучения* и *резонансный*.

Тепловой неразрушающий контроль основан на регистрации изменений тепловых или температурных полей ОК. Он применим к объектам из любых материалов. По характеру взаимодействия поля с ОК различают методы: *пассивный* или *собственного* излучения (на объект не воздействуют внешним источником энергии) и *активный* (объект нагревают или охлаждают от внешнего источника). Измеряемым информационным параметром служит температура или тепловой поток.

Оптический неразрушающий контроль основан на наблюдении или регистрации параметров оптического излучения, взаимодействующего с ОК. По характеру взаимодействия различают методы *прошедшего, отраженного, рассеянного* и *индуцированного излучения*.

Оптические методы имеют очень широкое применение благодаря большому разнообразию способов получения первичной информации. Возможность их применения для наружного контроля не зависит от материала объекта. Самым простым методом является органолептический визуальный контроль, с помощью которого находят видимые дефекты, отклонения от заданных формы, цвета и т.д.

Радиационный неразрушающий контроль основан на регистрации и анализе проникающего ионизирующего излучения после взаимодействия его с ОК. Наиболее широко используют для контроля рентгеновское и гамма-излучения.

Акустический неразрушающий контроль основан на регистрации параметров упругих волн, возникающих или возбуждаемых в объекте. Чаще всего используют упругие волны ультразвукового диапазона (с частотой колебаний выше 20 кГц), этот метод называют *ультразвуковым*. В отличие от всех ранее рассмотренных методов здесь применяют и регистрируют не электромагнитные, а упругие волны, параметры которых тесно связаны с такими свойствами материалов, как упругость, плотность, анизотропия (неравномерность свойств по различным направлениям) и др.

Контроль проникающими веществами основан на проникновении пробных веществ в полость дефектов ОК. Его делят на методы *капиллярные* и *течеискания*.

Капиллярные методы основаны на капиллярном проникновении в полость дефекта индикаторной жидкости (керосина, скипидара), хорошо смачивающей материал объекта. Их применяют для обнаружения слабо видимых невооруженным глазом поверхностных дефектов.

Методы течеискания используют для выявления только сквозных дефектов.

Цель неразрушающих испытаний не сводится только к обнаружению дефектов. Конечно, отыскание дефектов входит в задачу испытания. Однако сфера применения этих методов гораздо шире задачи отыскания крупных дефектов, поскольку неразрушающие испытания используют для контроля свойств и оценки надежности материала. Неразрушающие испытания могут играть важную роль в ряде различных областей:

1) при выявлении дефектов;

2) для улучшения, усовершенствования и контроля процесса, а также управления им;

3) для определения физических, химических, металлургических или механических свойств материала, а также изменения этих свойств;

4) для измерения размеров;

5) при эксплуатационных (динамических) испытаниях.

Кроме крупных (макро-) дефектов, таких, как включения, пустоты и трещины, в материале имеется много местных неоднородностей (микродефектов). К таким неоднородностям можно отнести размер зерен и их ориентацию, наклеп, градиенты в химическом составе, внутренние напряжения, неравномерные термообработку, упрочнение и старение.

Микродефекты, вызванные изменением свойств материала, гораздо труднее выявлять и интерпретировать, чем макродефекты; для этого необходима более тонкая методика измерений. Однако во время выполнения элементом конструкции заданных функций такие местные микронеоднородности могут играть более важную роль, чем крупные дефекты.

Например, для достижения требуемых механических свойств часто прибегают к термической обработке. Если при этом не будет получен определенный размер зерна, то даже удовлетворительно сконструированный элемент конструкции может оказаться неспособным выполнять свое назначение. Другим важным фактором, который может снизить надежность конструкции, являются остаточные напряжения.

В процессе развития техники бездефектность материала всегда была важнейшим фактором. Даже при использовании наилучших материалов, наиболее совершенных конструкций и технологических процессов в получаемых изделиях могут существовать дефекты. Таким образом, методы неразрушающих испытаний служат инструментом для улучшения и контроля методов конструирования и технологических процессов. С помощью таких методов можно определить, где и каким образом возникают дефекты, чтобы затем устранить причину их возникновения. Неразрушающие испытания можно использовать также для

того, чтобы проконтролировать технологический процесс, с тем чтобы обеспечить изготовление надежных изделий.

Одна из трудностей неразрушающих испытаний состоит в том, что почти вся информация получается косвенным путем. Поэтому, чтобы сделать по полученной информации правильные выводы, нужны определенные опыт и тренировка. Хотя в принципе эти методы и приемы просты, при их использовании, и особенно при обработке и анализе результатов, необходимы некоторые навыки.

В результате проведения неразрушающих испытаний зачастую желательно не только выявить наличие дефектов в материале, но также определить их тип, размеры и расположение. Здесь несомненные преимущества дают автоматизация и механизация процесса измерений. При этом, например, исключаются из полученной информации субъективные ошибки оператора и осуществляется быстрая обратная связь. Новые достижения в области регистрации данных, создания электронного оборудования и преобразователей механических величин в электрические позволяют еще более усовершенствовать автоматизацию и механизацию неразрушающих испытаний.

Глава 3.4

РАДИОГРАФИЯ

3.4.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

При радиационном контроле используют, как минимум, три основных элемента (рис. 3.4.1):

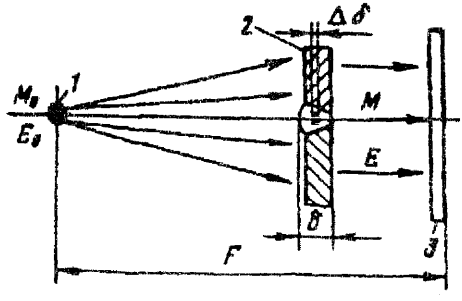


Рис. 3.4.1. Схема просвечивания:
1 - источник; *2* - объект контроля (ОК); *3* - детектор

источник ионизирующего излучения;

контролируемый объект;

детектор, регистрирующий дефектоскопическую информацию.

При прохождении через изделие ионизирующее излучение ослабляется - поглощается и рассеивается. Степень ослабления зависит от толщины δ, плотности ρ и атомного номера z материала контролируемого объекта, а также от интенсивности M и энергии E излучения. При наличии в веществе внутренних дефектов размером $\Delta\delta$ изменяются интенсивность и энергия пучка излучения.

Методы радиационного контроля различаются способами детектирования дефектоскопической информации и соответственно делятся на радиографические, радиоскопические и радиометрические.

Изделия просвечиваются с использованием различных видов ионизирующих излучений.

Радиографические методы радиационного неразрушающего контроля основаны на преобразовании радиационного изображения контролируемого объекта в радиографический снимок или запись этого изображения на запоминающем устройстве с последующим преобразованием в световое изображение. На практике этот метод наиболее широко распространен в связи с его простотой и документальным подтверждением получаемых результатов. В зависимости от используемых детекторов различают *пленочную радиографию* и *ксерорадиографию* (*электрорадиографию*). В первом случае детектором скрытого изображения и регистратором статического видимого изображения служит фоточувствительная пленка, во втором - полупроводниковая пластина, а в качестве регистратора используют обычную бумагу.

В зависимости от используемого излучения различают несколько разновидностей промышленной радиографии: рентгенографию, гаммаграфию, ускорительную и нейтронную радиографию. Каждый из перечисленных методов имеет свою сферу использования. Этими методами можно просвечивать стальные изделия толщиной от 1 до 700 мм.

Радиационная интроскопия - метод радиационного неразрушающего контроля, основанный на преобразовании радиационного изображения контролируемого объекта в световое изображение на выходном экране радиационно-оптического преобразователя, причем анализ полученного изображения проводится в процессе контроля.

Чувствительность этого метода несколько меньше, чем радиографии, но его преимуществами являются повышенная достоверность получаемых результатов благодаря возможности стереоскопического видения дефектов и рассмотрения изделий под разными углами, "экспрессность" и непрерывность контроля.

Радиометрическая дефектоскопия - метод получения информации о внутреннем состоянии контролируемого изделия, просвечиваемого ионизирующим излучением, в виде электрических сигналов (различной величины длительности или количества).

Этот метод обеспечивает наибольшие возможности автоматизации процесса контроля и осуществления автоматической обратной связи контроля и технологического процесса изготовления изделия. Преимуществом метода является возможность проведения непрерывного высокопроизводительного контроля качества изделия, обусловленная высоким быстродействием применения аппаратуры. По чувствительности этот метод не уступает радиографии.

Методика и техника контроля. Детали, узлы, изделия поступают на просвечивание после визуального контроля очищенными от масла, грязи, шлака и т.п. На контролируемые узлы изделий разрабатываются технологические карты контроля, которые определяют порядок и технику контроля с использованием ионизирующих излучений.

Перед просвечиванием новых объектов выполняются следующие операции:

анализируется конструкция и определяются участки и схемы просвечивания;

выбираются источники излучения, тип рентгенографической пленки, усиливающие экраны;

определяются режимы просвечивания (напряжение на рентгеновской трубке и сила тока, тип радиоактивного источника, тип ускорителя и энергия излучения, фокусное расстояние, время просвечивания);

проводятся мероприятия по защите людей от воздействия ионизирующего излучения, по обеспечению электро- и пожаробезопасности;

заряжаются кассеты;

устанавливаются с помощью средств механизации и автоматизации в положение просвечивания источники излучения и контролируемые объекты, а также кассеты, маркировочные знаки, эталоны чувствительности, компенсаторы;

защищается кассета от действия рассеянного излучения;

подготавливаются к включению рентгеновские аппараты, бетатроны, гамма-дефектоскопы.

Места на деталях и узлах изделий, подлежащие контролю просвечиванием, размечают цветным карандашом или мелком на отдельные участки, соответствующие размеру снимка, и маркируют условными обозначениями. Маркировочные знаки (цифры, буквы, стрелки) изготавливают в соответствии с ГОСТ 15843-70. При повторном контроле на данном участке к маркировке снимка добавляют букву "П".

При проведении просвечивания кассету с пленкой необходимо защитить от постороннего рассеянного и вторичного излучения с задней стороны листовым свинцом толщиной 1-3 мм или другими эквивалентными материалами соответствующей толщины. Заряженные кассеты вместе со свинцовым листом закрепляют на контролируемом объекте с помощью приспособлений, обеспечивающих плотное прилегание кассет к просвечиваемому участку. При просвечивании плоских деталей в стационарных условиях кассету укладывают на специальный стол, покрытый листовым окрашенным свинцом, либо на свинцовый лист размерами не менее поля облучения. При просвечивании вне такого стола кассеты вместе со свинцовыми листами плотно прижимают к контролируемым участкам. Источник излучения и контролируемый объект с прижатой к нему кассетой во время просвечивания должны находиться в условиях, исключающих их сотрясение и вибрации.

Радиографический контроль необходимо проводить с оптимальным применением средств механизации и автоматизации основных и подготовительных операций, фотообработки рентгеновской пленки, а также с использованием оснастки и приспособлений, повышающих эксплуатационные характеристики основного оборудования.

Выбор или создание устройств, механизирующих и автоматизирующих операции радиографического контроля, следует проводить с учетом конкретных условий, конструкции контролируемых объектов, технико-экономической эффективности от внедрения этих устройств, включающей в себя снижение трудоемкости выполнения контрольных операций, улучшение культуры и условий труда, рациональное использование производственных площадей.

В практической деятельности радиографы постоянно сталкиваются с необходимостью решения новых задач по контролю конкретных изделий, когда применение просвечивания в обычной форме их не решает. Приведем несколько таких примеров. Полностью пропаянное соединение иногда трудно отличить по радиографическому снимку от полностью непропаянного. В этом случае необходимо обратить внимание на то, как на снимке выглядят галтели. Наличие их изображения на снимке может служить признаком пропаянного соединения.

При радиографическом контроле качества сварных швов алюминиевых сплавов на снимках иногда наблюдаются полосы вдоль сварного соединения, это так называемые ложные дефекты. Основная причина их появления - дифракция рентгеновского излучения на зернистой структуре в металле шва.

Известно, что дефекты, имеющие плоскостной характер, плохо выявляются при просвечивании в направлении, перпендикулярном плоскости раскрытия. Это относится к непроварам точечной сварки, отсутствию клея в клеевых, клеесварных и клеемеханических соединениях. В этом случае иногда между

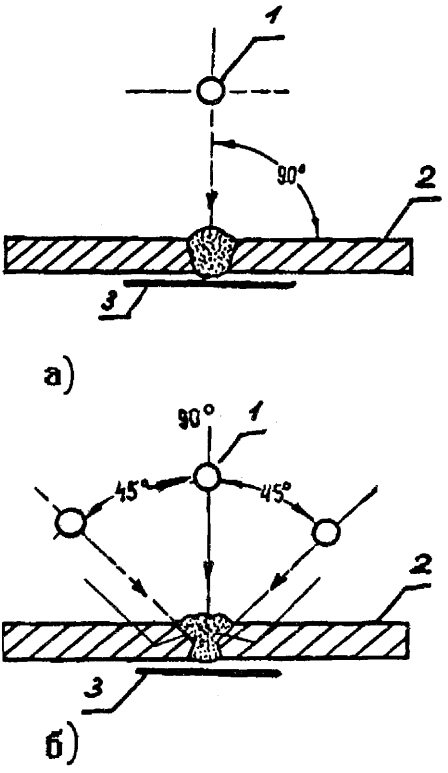


Рис. 3.4.2. Схемы просвечивания ОК со сварным швом:
а - без скоса кромок, *б* - с кромками Х-образной разделки; *1* - источник излучения; *2* - ОК; *3* - пленка

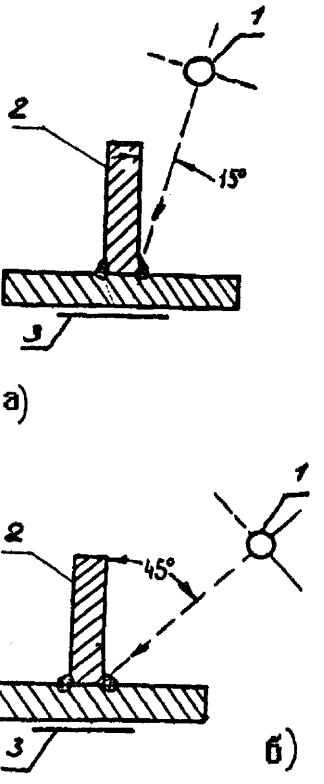


Рис. 3.4.3. Схемы просвечивания тавровых ОК с неполным проплавлением угла между его стенками:
а - правильная; *б* - неправильная;
1 - источник излучения; *2* - ОК; *3* - пленка

соединяемыми поверхностями (или в клей) вводят контрастирующие материалы (например, металлическую пудру), хорошо поглощающие излучение, распределение которых отчетливо выявляется по радиографическим снимкам.

Глубину залегания дефектов можно определить, используя принципы стереоскопии. Для этого делают два снимка при смещенных относительно друг друга положениях источника излучения или один снимок, производя просвечивание на одну пленку два раза из тех же разных положений. На поверхностях изделия располагают свинцовые метки. Глубину залегания дефекта определяют расчетным путем или рассматривая стереоскопическую пару снимков через специальную линзовую стереоскопическую систему.

Специалисты по неразрушающему контролю должны работать в контакте с конструкторами изделий, материаловедами и технологами. Обязательными являются проверка надежности применяемых приемов по результатам металлографического анализа, оценка влияния вносимых изменений в технологию изготовления (например, введение в соединение контрастирующих материалов) на прочностные свойства изделий. Надежность радиографического контроля повышается при привлечении специалистов по неразрушающему контролю к анализу дефектоскопической технологичности вновь создаваемых конструкций на ранних стадиях проектирования.

3.4.2. СХЕМЫ ПРОСВЕЧИВАНИЯ

Некоторые сварные конструкции и схемы их просвечивания приведены на рис 3.4.2 - 3.4.7.

При контроле ОК со сварным швом без скоса кромок ось рабочего пучка излучения направлена перпендикулярно стыкуемым плоскостям (рис. 3.4.2, *а*).

Для обеспечения качественной сварки в ОК с толщиной стенок более 4 мм предусмат

ривается подготовка кромок под сварку с их скосом под углом 45^0 и менее. Сварочные дефекты в этом случае с большой вероятностью будут появляться в местах сплавления основного и наплавленного металла. В этом случае при контроле ответственных ОК ось пучка излучения нужно центрировать параллельно плоскостям сплавления и под углом 90^0 к горизонтальной плоскости (см. рис. 3.4.2, *б*).

На рис. 3.4.3 приведены схемы просвечивания с оптимальным (рис. 3.4.3, *а*) и неоптимальным (рис. 3.4.3, *б*) центрированием оси рабочего пучка излучения при просвечивании тавровых соединений. Просвечивание по схеме рис. 3.4.3, *б* таврового соединения с небольшим проплавлением угла может привести к выводу о неполном проплавлении угла из-за возможного зазора между вертикальной и горизонтальной стенками сварного соединения. Рис. 3.4.4 иллюстрирует правильное центрирование оси рабочего пучка излучения, поскольку требуется убедиться в полном проплавлении элементов соединения.

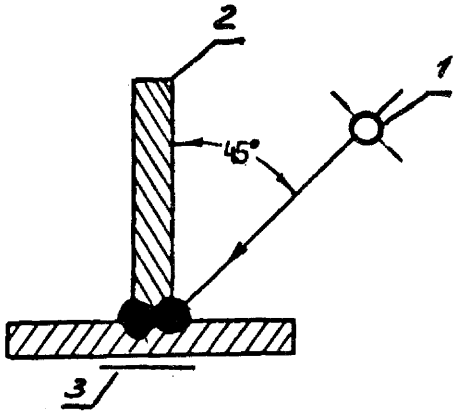


Рис. 3.4.4. Схема просвечивания таврового ОК с полным проплавлением элементов соединения:
1 - источник излучения; *2* - ОК; *3* - пленка

Схему просвечивания на рис. 3.4.5 таврового соединения с использованием нескольких пленок можно использовать, когда соединение имеет несколько угловых швов с разной степенью проплавления.

При контроле кольцевых сварных соединений цилиндрических изделий следует, как правило, использовать схемы просвечивания через одну стенку ОК (см. рис. 3.4.6).

При просвечивании сварных соединений по схемам рис. 3.4.7 обычно направление излучения выбирают таким, чтобы изображения противолежащих участков сварного шва на снимке не накладывались друг на друга.

Национальные и международные стандарты при помощи номограмм или алгебраи-

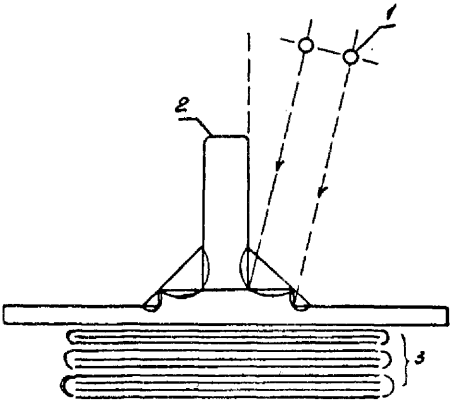


Рис. 3.4.5. Схема просвечивания таврового соединения с использованием нескольких пленок:
1 - источник излучения; *2* - ОК;
3 - кассета с пленками

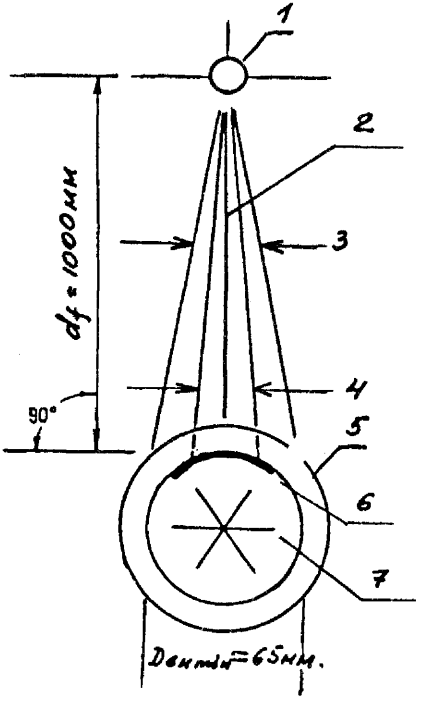


Рис. 3.4.6. Схема просвечивания кольцевого стыкового сварного соединения через одну стенку:
1 - источник излучения; *2* - ось рабочего пучка излучения; *3* - апертура пучка, вызывающего большую дисторсию радиационного изображения ОК; *4* - апертура рабочего пучка излучения; *5* - ОК; *6* - пленка со свинцовым экраном от воздействия обратно-рассеянного излучения; *7* - участки (экспозиции) при контроле (не менее 6)

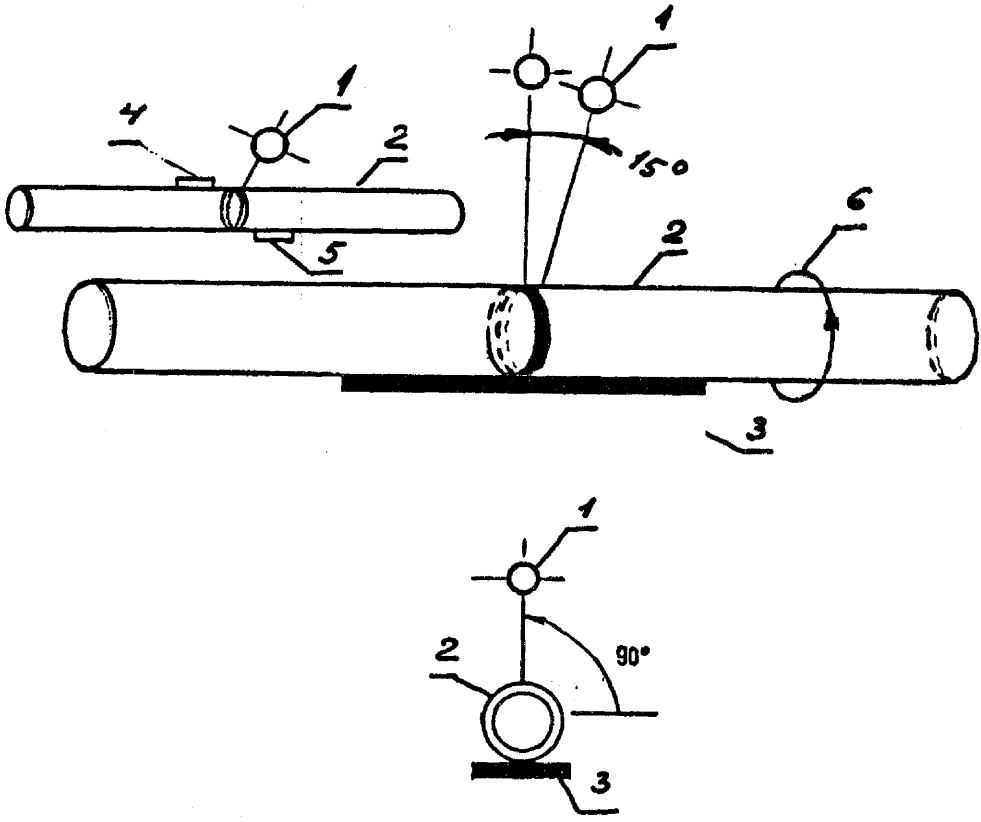


Рис. 3.4.7. Схема просвечивания кольцевого стыкового сварного соединения с внутренним диаметром 32 ... 64 мм через две стенки:

1 - источник излучения; *2* - ОК; *3* - пленка; *4* - пластинчатый эталон чувствительности с толщиной 2 % от удвоенной толщины стенки; *5* - пластинчатый эталон чувствительности с толщиной 2 % от толщины одной стенки; *6* - участки (экспозиции) при контроле (не менее 6)

ческих зависимостей с учетом геометрических характеристик ОК устанавливают ограничения на значения некоторых параметров радиографирования при контроле по схемам рис. 3.4.6 и 3.4.7.

Все цилиндрические ОК следует нумеровать по часовой стрелке лицевой стороной к рабочему пучку излучения. Свинцовые маркировочные знаки должны размещаться на стороне ОК, противоположной сварному шву, около которого находится пленка, и на расстоянии не менее 4 мм от зоны термического влияния.

При просвечивании ОК с внутренними диаметрами менее 65 мм через две стенки целесообразно один эталон чувствительности, например пластинчатый толщиной 2 % от удвоенной толщины стенки ОК, размещать на стороне, обращенной к источнику излучения, а другой - толщиной 2 % от толщины стенки ОК - на противоположной стороне. Хотя стандарты не требуют дополнительного размещения второго эталона, его изображение даст дефектоскописту дополнительную информацию при расшифровке снимка.

Схема просвечивания при радиографировании сварной закрытой сферы показана на рис. 3.4.8. Принцип радиографирования аналогичен контролю сварных труб через две стенки, при этом равноотстоящие маркировочные знаки должны размещаться таким образом, чтобы их изображения фиксировались на снимке.

Схемы контроля закрытого резервуара приведены на рис. 3.4.9. Размещение источника излучения около одного конца резервуара показывает, что такая схема позволяет просветить сварной шов другого конца за одну экспозицию.

Все сварные швы на полусфере можно просветить за одну экспозицию с использованием радионуклидного источника излучения (рис. 3.4.10). Источник размещают в геометрическом центре полусферы, а пленки - над всеми швами.

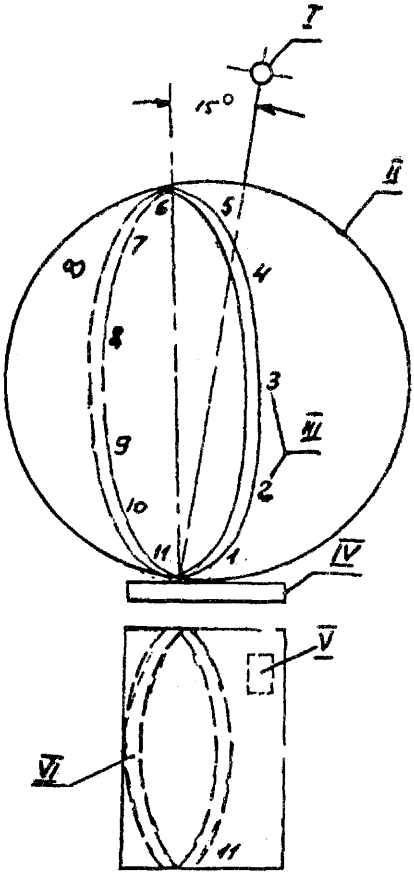


Рис. 3.4.8. Схема просвечивания сварной закрытой сферы:
I - источник излучения; *II* - ОК; *III* - маркировочные цифры; *IV* - кассета с пленкой; *V* - *VI* - соответственно изображения маркировочной платы и сварного шва

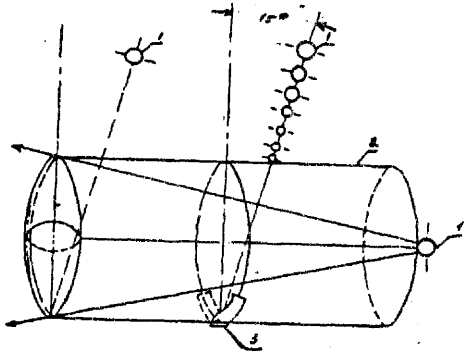


Рис. 3.4.9. Схема просвечивания сварного закрытого резервуара:
1 - источник излучения; *2* - ОК; *3* - пленка

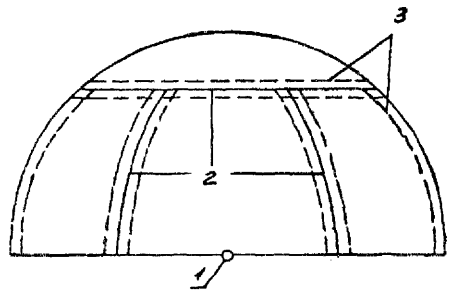


Рис. 3.4.10. Схема просвечивания сварных швов на полусфере:
1 - источник излучения; *2* - сварные швы; *3* - пленки

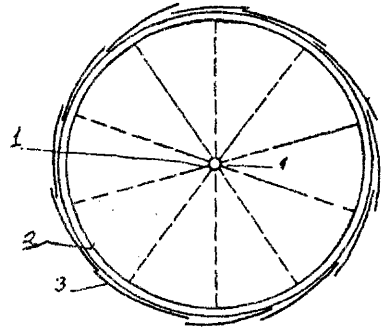


Рис. 3.4.11. Схема просвечивания труб большого диаметра:
1 - источник излучения, *2* - ОК; *3* - пленки

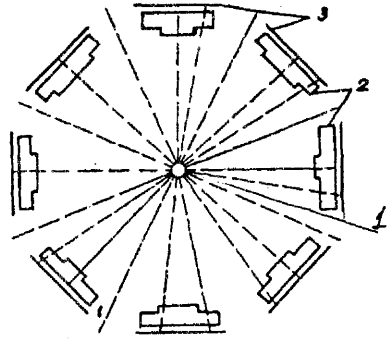


Рис. 3.4.12. Схема просвечивания одинаковых мелких ОК:
1 - источник излучения, *2* - ОК; *3* - пленки

Рис. 3.4.11 и 3.4.12 иллюстрируют два примера панорамного просвечивания. На рис. 3.4.11 показана схема просвечивания труб достаточно большого диаметра, такого, чтобы в нее можно было ввести рентгеновский аппарат с панорамным выходом излучения или радионуклидный источник. Диаметры современных кроулеров - автоматически передвигающихся в трубах устройств с источниками излучения - имеют размеры около 120 мм, так что с их

помощью можно панорамно просвечивать трубы с внутренним диаметром 130 мм и более. Схема просвечивания на рис. 3.4.12 применяется в тех случаях, когда нужно просветить достаточно большое число одинаковых мелких ОК.

3.4.3. ВЫБОР ЭНЕРГИИ ИСТОЧНИКОВ ФОТОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Атомный номер и плотность материала ОК оказывают наибольшее влияние на прохождение через него фотонного излучения.

Плотности металлов от лития до осмия находятся в пределах 0,53...22,57 г/см^3. Плотность сварных ОК из металлов от магния до ниобия лежит в диапазоне 1,76...8,57 г/см^3. Толщина ОК влияет на прохождение через него фотонного излучения примерно так же как и плотность его материала.

При выборе энергии фотонов с учетом атомного номера, плотности материала и толщины ОК исходят из некоторого компромисса между чувствительностью радиационного контроля и длительностью экспозиции. С одной стороны для повышения чувствительности контроля стремятся уменьшить энергию фотонов. Однако очень низкие энергии фотонов приводят к чрезвычайно длительным экспозициям. При повышении энергии фотонов снижается чувствительность контроля и поэтому во многих стандартах при помощи таблиц или графиков устанавливается максимально допустимая энергия фотонов (анодное напряжение на рентгеновской трубке) как функция толщины ОК с учетом материала, из которого он выполнен (рис. 3.4.13 и табл. 3.4.1).

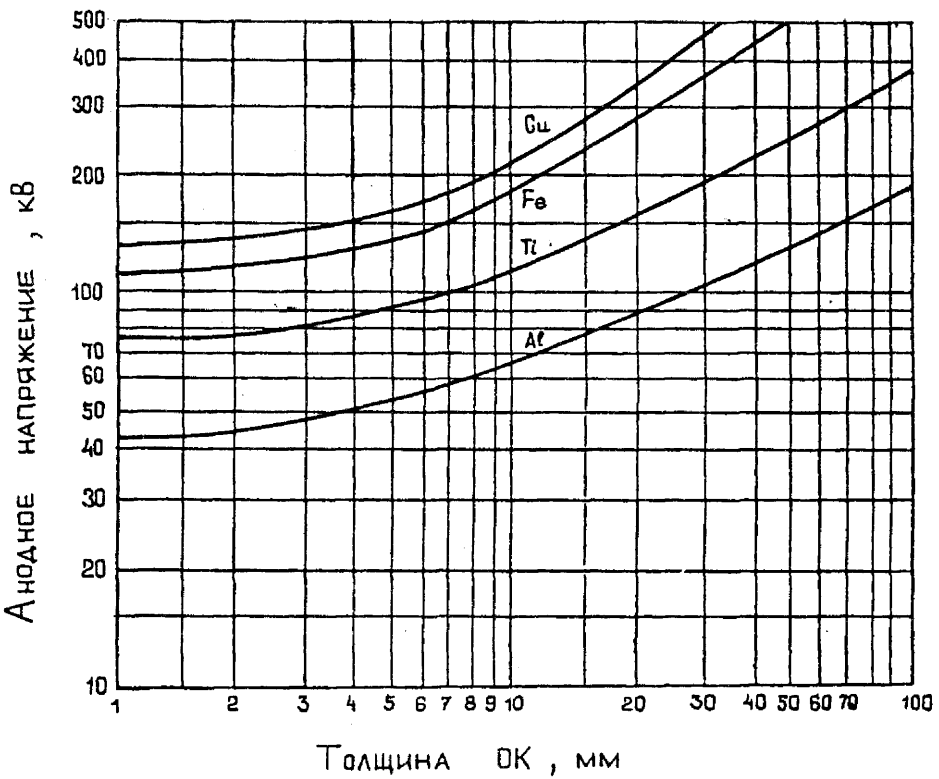


Рис. 3.4.13. Графики зависимостей максимального анодного напряжения на рентгеновской трубке от толщины ОК, выполненных из сплавов на основе меди, железа, титана и алюминия

Вариация анодного напряжения на рентгеновской трубке при разности потенциалов на ее электродах выше 150 кВ приводит к значительным изменениям чувствительности контроля. Ориентировочно можно считать, что повышение анодного напряжения с 200 кВ до 225 кВ и с 400 кВ до 450 кВ приводит к уменьшению вдвое времени эксплуатации и к снижению на 25 % чувствительности радиационного контроля ОК соответствующих толщин. На рис. 3.4.13 приведен график зависимости анодного напряжения на рентгеновской трубке при применении радиографического метода контроля от толщины ОК из сплавов

на основе железа, меди, алюминия и титана при чувствительности радиационного контроля около 2 %, а на рис. 3.4.14 графически области применения радиографии для ОК из сплавов на основе железа при использовании гамма-дефектоскопов при чувствительности контроля около 2 %. Различные формы графиков на этих рисунках обусловлены тем, что у гамма-дефектоскопов нельзя регулировать энергию фотонов. Верхний предел по толщине ОК (см. табл. 3.4.1 и рис. 3.4.14) определяется плотностью потока энергии фотонов в рабочем пучке излучения, испускаемого радионуклидным источником, а нижний - уменьшением чувствительности радиационного контроля.

3.4.1. Область применения радиографического метода при контроле ОК из сплавов на основе железа, меди и никеля при использовании гамма-дефектоскопов и ускорителей электронов

Источник излучения	Толщина ОК, мм	
	Общий контроль	Контроль с повышенной чувствительностью
^{60}Yb	$1 \le x \le 20$	$5 \le x \le 15$
^{192}Ir	$20 \le x \le 100$	$40 \le x \le 90$
^{60}Co	$40 \le x \le 200$	$60 \le x \le 150$
Ускорители на энергию: 1...4 МэВ	$30 \le x \le 200$	$50 \le x \le 180$
4...12 МэВ	$x \ge 50$	$x \ge 80$
выше 12 МэВ	$x \ge 80$	$x \ge 100$

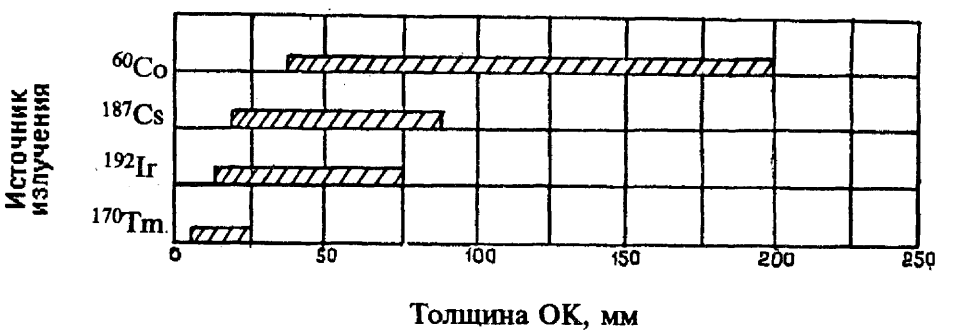


Рис. 3.4.14. Области применения радиографии для ОК из сплавов на основе железа при использовании гамма-дефектоскопов при чувствительности контроля около 2 %

Большинство табличного и графического материала, используемого при подготовке технологических документов для проведения эффективного радиографического контроля, дается для ОК, выполненных из сплавов на основе алюминия или железа. Коэффициенты радиографической эквивалентности для ОК из других широко используемых материалов приведены в табл. 3.4.2.

В этой таблице при напряжениях на рентгеновских трубках 100 кВ и ниже за стандартный материал принимается алюминий, а при более высоких напряжениях и при использовании гамма-излучения - сталь. Значение эквивалентной толщины оценивают произведением радиационной толщины ОК на указанный в табл. 3.4.2 коэффициент.

3.4.2. Коэффициенты радиографической эквивалентности

Материал	Рентгеновское излучение, кВ								Гамма-излучение		
	50	100	150	220	400	1000	2000	4–25 МэВ	^{192}Ir	^{137}Cs	^{60}Co
Магний	0,6	0,6	0,5	0,08	–	–	–	–	–	–	–
Алюминий	1,0	1,0	0,12	0,18	–	–	–	–	0,35	0,35	0,35
Титан	–	8,0	0,45	0,35	–	–	–	–	–	–	–
Сталь	–	12,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
Медь	–	18,0	1,6	1,4	1,4	–	–	1,3	1,1	1,1	1,0
Цинк	–	–	1,4	1,3	1,3	–	–	1,2	1,1	1,0	1,0
Латунь	–	–	1,4	1,3	1,3	1,2	1,2	1,1	1,1	1,1	1,1
Цирконий	–	–	2,3	2,0	–	1,0	–	–	–	–	–
Свинец	–	–	14,0	12,0	–	5,0	2,5	3,0	4,0	3,2	2,3
Уран	–	–	–	25,0	–	–	–	3,9	12,6	5,6	3,4

3.4.4. РЕНТГЕНОГРАФИЧЕСКИЕ ПЛЕНКИ И ХИМИКО-ФОТОГРАФИЧЕСКАЯ ИХ ОБРАБОТКА

Некоторые национальные и международные стандарты классифицируют ОК и рентгеновскую технику, с помощью которой их контролируют, на два класса:

А – ОК и техника неответственного назначения;

В – ОК и техника ответственного назначения.

Отнесение ОК к тому или иному классу определяется контрактами на его поставку.

Выбор той или иной пленки определяется необходимостью получения рентгеновского снимка с определенной контрастностью и четкостью изображения. Контрастность пленки, ее чувствительность и гранулярность взаимосвязаны между собой, и высокочувствительные пленки имеют крупные зерна и низкий предел разрешения, а низкочувствительные – мелкие зерна и высокий предел разрешения. Поэтому, хотя с экономической точки зрения желательно, чтобы время экспонирования пленки было как можно короче, использование высокочувствительной пленки ограничивается ее зернистостью, которая в значительной мере определяет качество изображения мелких дефектов. Заводы-изготовители пленок выпускают их с достаточно широким диапазоном по чувствительности, контрастности и гранулярности.

В зависимости от зернистости, контрастности и чувствительности к излучению в отечественной литературе по рентгенотехнике рентгенографические пленки подразделяют на четыре класса.

Класс I. Особо мелкозернистые, высококонтрастные безэкранные пленки (типа РТ-5). Они могут использоваться с металлическими усиливающими экранами или без них.

Класс II. Мелкозернистые высококонтрастные безэкранные пленки (типа РТ-4М, РТ-СШ, РНТМ-1). Эти пленки в 2 – 4 раза более чувствительны к излучению по сравнению с пленками I-го класса.

Класс III. Высокочувствительная к излучению безэкранная пленка (типа РТ-1), ее чувствительность в 5 – 10 раз выше, чем пленки I-го класса.

Класс IV. Высокочувствительная к излучению экранная пленка (типа РТ-2). При использовании с люминесцентными экранами эта пленка сокращает время просвечивания ОК в 10 – 100 раз по сравнению с применением пленок I-го класса.

Стандарты международных организаций (Международный институт сварки, Европейский комитет по стандартизации) для классификации рентгенографических пленок используют следующие сенситометрические и структурометрические параметры:

Чувствительность S – величина, обратная значению дозы K_s в грэях ($S = 1/K_s$), необходимой для достижения заданного значения оптической плотности D обработанной пленки. Например, $D = 2$ без учета составляющей плотности D_0.

Градиент G – локальная крутизна характеристической кривой $D = f(\lg K)$ – является мерой достижимого значения контраста. Определяется как производная оптической плотности по логарифму экспозиции: $G = dD/d(\lg K) = (K/\lg e)\,(dD/dK)$ при заданном значении оптической плотности ($D - D_0$), где K, Гр – доза для получения плотности $D - D_0$ и D_0 – оптическая плотность неэкспонированной обработанной пленки, включая подложку (оптическая плотность вуали и подложки). Градиент G должен измеряться с погрешностью не более 5 % при доверительной вероятности 0,95.

Гранулярность σ_D – это флуктуации оптической плотности равномерно экспонированного и

проявленного фотоматериала, оцениваемые инструментальными методами, например, с помощью микроденситометра.

Оптическая плотность пленки при оценке ее структурометрических характеристик должна составлять $D = (2{,}00 \pm 0{,}05) + D_0$, диапазон сканирования – не менее 100 мм при диаметре диафрагмы микроденситометра (100±5) мкм.

Для отсечки низкочастотных шумов данные, поступающие с микроденситометра, должны фильтроваться фильтрами нижних частот с граничной пространственной частотой 0,1 пар линий/мм. Погрешность измерения σ_D допускается не более 10 % при доверительной вероятности 0,95. Необходимо осуществить минимум 6 измерений на разных пленках.

С увеличением размеров зерен фотоэмульсии, энергии ионизирующего излучения и времени проявления гранулярность возрастает.

Отношение градиент/шум – это частное от деления градиента G на σ_D. Достаточно низкое значение этого отношения для промышленных пленок является необходимым следствием требования низкой плотности вуали при длительном хранении пленок.

Класс пленок по EN 584-1 зависит от граничных значений градиента G, гранулярности σ_D и отношения G/σ_D (табл. 3.4.3).

На основании табл. 3.4.3 можно составить качественную классификационную таблицу (табл. 3.4.4) с учетом того, что чувствительность пленок хотя и не является классификационным параметром, но непосредственно зависит от значений G, σ_D, G/σ_D.

Выбор пленок и металлических экранов для просвечивания сварных швов объектов контроля из сплавов на основе железа, меди и никеля Европейский комитет по стандартизации (EN 444) рекомендует делать в соответствии с табл. 3.4.5, из сплавов на основе алюминия и титана использовать пленки соответственно класса С3.

3.4.3. Классы пленок EN 584-1

Класс пленки	G_{min}		$(G/\sigma_D)_{min}$ при	$(\sigma_D)_{max}$ при
	$D = 2$	$D = 4$	$D = 2$	$D = 2$
C1	4,5	7,5	300	0,018
C2	4,3	7,4	270	0,018
C3	4,1	6,8	180	0,023
C4	4,1	6,8	150	0,028
C5	3,8	6,4	120	0,032
C6	3,5	5,0	100	0,039

Примечание: значения оптической плотности D указаны без учета составляющей D_0.

3.4.4. Качественная классификационная таблица пленок

Класс пленки	Тип зернистости	Качество снимка	Чувствительность
C1; C2	Очень мелкодисперсная	Очень высокое	Очень низкая
C3; C4	Мелкозернистая	Высокое	Низкая
C5	Средняя	Среднее	Средняя
C6	Крупнозернистая	Низкое	Высокая

Можно использовать также пленки, дающие лучшее качество снимков, чем пленки, указанные в таблицах. Пленкам классов С3, С4, С5 и С6 можно поставить в соответствие пленки классов *I, II, III, IV* отечественной классификации.

После экспонирования радиографическую пленку необходимо подвергнуть химической обработке. Все процедуры, выполняемые при получении снимка, имеют важное значение, так как ошибки, допускаемые при обработке, могут сделать непригодной хорошо проэкспонированную пленку. На рис. 3.4.15 представлены стадии химико-фотографической обработки пленки. Каждая стадия обработки пленки зависит от предшествующей стадии, а она в свою очередь влияет на последующие стадии.

Для получения хороших результатов при обработке радиографической пленки необходимо соблюдать следующие общие правила:

а) выдержать концентрацию химических реактивов, температуры растворов и время обработки в необходимых пределах;

б) использовать оборудование, баки, кюветы, держатели и т.п., выдерживающие химическое воздействие растворов, применяемых при обработке пленки, не загрязняя эти растворы;

в) оборудовать темную комнату соответствующими фотолабораторными фонарями и приспособлениями для регулирования освещения так, чтобы избежать вуалирования пленки;

г) поддерживать стерильную чистоту в фотолаборатории.

Растворы для обработки пленки и промывочная вода находятся в баках, достаточно глубоких для того, чтобы пленку можно было подвесить в вертикальном положении. До начала обработки пленку извлекают из кассеты. Эту операцию выполняют в темной комнате для того, чтобы избежать вуалирования пленки. Пленку держат за края или углы, не перегибая ее. Эту операцию проводят достаточно медленно и осторожно, чтобы не вызвать электрических разрядов у поверхности пленки. Необходимость осторожного обращения обусловлена

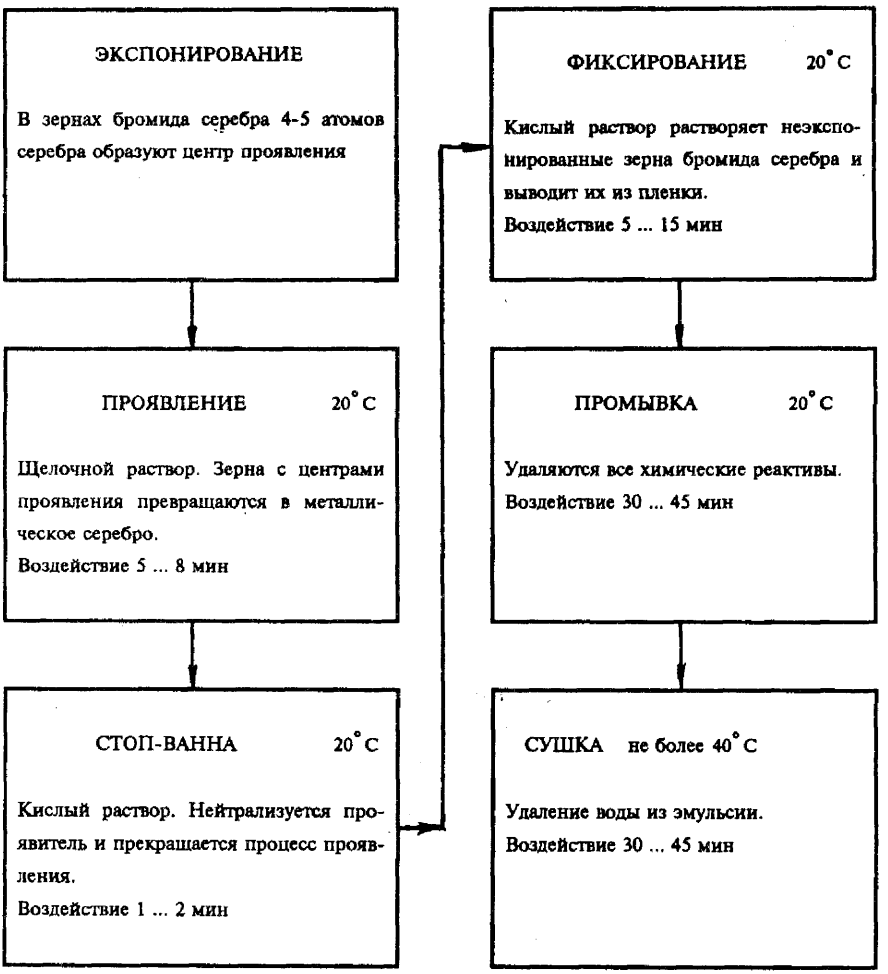


Рис. 3.4.15. Стадии химико-фотографической обработки пленки

тем, что после экспонирования пленка становится более чем в два раза чувствительнее к энергетическому воздействию, и, следовательно, после экспонирования пленка будет реагировать на гораздо меньшие электрические разряды, чем до экспонирования. После извлечения из кассеты пленку размещают в держателе для обработки, который прочно удерживает ее за четыре угла. Обработка в баках имеет следующие преимущества по сравнению с обработкой в кюветах:

а) растворы легко достигают любого участка с обеих сторон пленки.

б) регулирование температуры воды, в которую погружены баки для обработки пленки, позволяет контролировать температуру растворов.

в) можно легко манипулировать пленками в баках.

г) экономия времени и лабораторных помещений.

Полная обработка пленки в баках может включать пять отдельных стадий: проявление, стоп-ванна, фиксация, промывка и сушка. Эта обработка имеет достаточно жесткий температурно-временной режим. Этот температурно-временной принцип основан на регулируемом уровне химической активности растворов, который обычно контролируется.

Техника безопасности. Щелочной проявитель, содержащий гидрохинон, является достаточно опасным раствором. Необходима хорошая вентиляция помещения при смешивании химикатов и использовать фильтры или респираторы и защитные очки. Необходимо оборудовать место для промывки глаз. При попадании проявителя в глаза сотруднику он должен начать их промывку не позднее чем через 15 с и продолжать промывать минимум 15 мин.

3.4.5. Классы пленок и типы металлических усиливающих экранов для радиографии стали и сплавов на основе меди и никеля

Источник излучения	Просвечиваемая толщина	Класс пленок	Тип и толщина (T) металлических экранов
Рентгеновское:			
< 100 кВ		С3	Без экранов или между Pb-экранами, $T < 0{,}03$ мм
100...150 Кв		С3	Между Pb-экранами, $T < 0{,}15$ мм
150...250 кВ		С4	То же
^{69}Yb	< 5 мм	С3	Без экранов или между Pb-экранами, $T < 0{,}03$ мм
^{1170}Tm	≥ 5 мм	С4	Между Pb-экранами, $0{,}02 < T < 0{,}15$ мм
Рентгеновская трубка при напряжении 250...500 кВ	≤ 50 мм	С4	Между Pb-экранами, $0{,}02 < T < 0{,}2$ мм
	> 50 мм	С4	Передний экран из Pb, $0{,}1 < T < 0{,}2$ мм[1)]
^{75}Se		С4	Передний экран из Pb, $0{,}1 < T < 0{,}2$ мм[2)]
^{192}Ir		С4	То же. Задний экран из Pb, $0{,}02 < T < 0{,}2$ мм
^{60}Co	≤ 100 мм > 100 мм	С4 С5	Между экранами из стали или меди, $0{,}25 < T < 0{,}7$ мм[3)]
Ускоритель электронов:			
1...4 МэВ	≤ 100 мм > 100 мм	С3 С5	То же
4...12 МэВ	≤ 300 мм > 300 мм	С4 С5	Передний экран из меди, стали или тантала, $T < 1$ мм Задний экран из меди или стали, $T < 0{,}5$ мм[4)]
> 12 МэВ	≤ 300 мм > 300 мм	С4 С5	Между экранами из тантала, $T < 1$ мм (передний)[5)], $T < 0{,}5$ мм (задний)

Могут быть также использованы:

[1)] Лучшие классы пленок.

[2)] Готовые упаковки пленок с передним экраном с $T < 0{,}03$ мм, если между объектом контроля и пленкой размещен дополнительный Pb-экран толщиной около 1 мм.

[3)] Свинцовые экраны толщиной от 0,1 до 0,5 мм.

[4)] Свинцовые экраны толщиной от 0,5 до 1 мм.

[6)] Экраны из вольфрама.

При работе с фиксажем также должна соблюдаться необходимая осторожность. Резиновые перчатки достаточно хорошо защищают кожу, а водонепроницаемые фартуки - одежду.

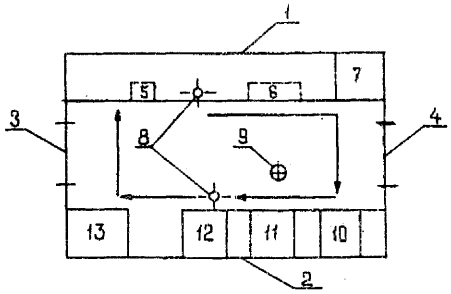


Рис. 3.4.16. Типичная схема размещения оборудования в фотолаборатории (темная комната):
1 - сухая сторона; *2* - мокрая сторона; *3* - вход/выход; *4* - запасной выход; *5* - бункер с пленками; *6* - хранилище рамок для проявления пленок; *7* - хранилище пленок; *8* - фотолабораторные фонари; *9* - сток в полу

Фотолаборатория. Типичная схема размещения оборудования фотолаборатории (темной комнаты) представлена на рис. 3.4.16. В темной комнате выполняются все этапы обработки пленки, или состоять из нескольких комнат, каждая из которых предназначена для выполнения определенных операций. Расположение, размер и конструкция лабораторного оборудования зависит от объема и содержания выполняемых работ. Оборудование в темной комнате должно быть размещено так, чтобы повысить эффективность прохождения пленкой всех этапов ее обработки. Темная комната должна освещаться фотолабораторными фонарями, мощность которых должна быть достаточной для выполнения всех операций ее обработки без нанесения ей вреда. Кроме того, эта комната должна быть защищена от подсветки со стороны посторонних источников света. Действие фотолабораторных фонарей на пленку следует тщательно достаточно часто проверять во избежание появления вуали от засветки.

Защита темной комнаты от проникновения наружного света через входы может обеспечиваться при помощи двери, запираемой изнутри, а также создания двойных или вращающихся дверей или лабиринтного входа. Стены на тех участках, куда могут попадать брызги химических реактивов, защищаются керамической плиткой или стеклом. Полы комнаты обычно покрывают химически стойким, водонепроницаемым и нескользким материалом, но избегают покрытия полов непроводящим покрытием (резиновая плитка, твердые парафины на бетоне и т.п.).

Загрузочный стол, шкафы для хранения пленки, баки для ее обработки и сушилки - это стандартное оборудование темной комнаты. Металлические части загрузочного стола, шкафов и другого оборудования обычно заземляют.

Работа с необработанной пленкой, загрузка и выгрузка пленок из кассеты и рамки для проявления - все эти операции выполняются на загрузочном столе. В непосредственной близи загрузочного стола размещаются приспособления для хранения кассет и рамок для проявления пленок, а также светонепроницаемые бункеры для хранения пленок.

Баки для обработки пленки располагаются на "мокром" участке темной комнаты в один ряд в соответствии с порядком обработки пленки. Размеры баков должны соответствовать объему выполняемой работы.

Важно, чтобы фотолаборатория хорошо вентилировалась. Чистота имеет важное значение для процесса обработки пленки. Необходимо использовать белые перчатки во время загрузки и выгрузки пленок из кассеты, а также размещения пленок в рамках для проявления. На участке обработки пленки должна поддерживаться безупречная чистота и доступ к нему должен быть ограничен, за исключением работающих на этом участке. Относительная влажность в фотолаборатории должна составлять от 40 до 60 % и контролироваться психрометрами.

Рентгеновскую пленку хранят при температуре 18 - 24^0 С и относительной влажности 40 - 60 %.

Для хранения рентгеновской пленки выделяют две зоны: одну - для длительного хранения и другую - в фотолаборатории для кратковременного хранения. Коробки с пленками должны храниться на ребре.

Кассеты для зарядки пленок и маркировочные знаки. Кассеты предназначены для защиты пленки от света и от повреждений и должны обеспечивать плотный прижим усиливающих экранов к пленке и легкую зарядку пленок в темноте. Гибкие кассеты могут изготавливаться из резины или пластика. Гибкость этих кассет позволяет придавать пленке форму, соответствующую контурам ОК, и добиваться минимального расстояния между ОК и пленкой. Жесткие кассеты обычно содержат два шарнирно соединенных элемента, которые можно фиксировать прижимными зажимами. Элементы могут иметь плоские или искривленные формы.

Для правильной расшифровки готового радиографического снимка используются маркировочные знаки (буквенные и цифровые), изготовленные из материалов, обеспечивающих получение на снимках их четкого изображения. Эти знаки устанавливаются на контролируемом участке ОК или непосредственно на

кассете с пленкой и по возможности не должны сниматься до полного анализа рентгенограммы. Часто для их закрепления используют пластилин, клей или клейкую ленту. Знаки должны устанавливаться так, чтобы не экранировать важные детали изображения ОК. Знаки используют также для указания мест наложения пленок друг на друга и фиксирования ориентации цилиндрических ОК при просвечивании. Некоторые знаки (например А, О, Н, П, М и т.п.) симметричны и могут вызывать путаницу при определении ориентации снимка. Толщина свинцовых знаков может составлять 1 ... 5 мм, а шрифтовых линий, образующих знак - 0,6 ... 0,8 его толщины. Адекватные маркировочные знаки (тире, стрелки, буквы и т.п.) могут быть изготовлены из обрезков свинцовой проволоки.

3.4.5. ВЫБОР ФОКУСНОГО РАССТОЯНИЯ

Один из способов выбора фокусного расстояния (расстояние излучатель-преобразователь), позволяющего получать высокую чувствительность выявления дефектов, заключается в том, что после ориентировочной оценки энергии фотонов рабочего пучка излучения и выбора источника излучения и типа пленки оценивают значение нерезкости преобразования радиационного изображения (нерезкость преобразования U_f). Эта нерезкость возникает при преобразовании исходного радиационного изображения двух смежных полей со скачкообразным изменением физического параметра изображения на границе раздела этих полей (рис. 3.4.17). Она определяется микроструктурой пленки (экрана) и физикой взаимодействия фотонов первичного излучения с веществом пленки (экрана). На нерезкость преобразования влияет не только средний размер зерна пленки, но и энергия фотонов, поскольку она определяет длину пробега электронов в эмульсии. Усредненные по экспериментальным данным нерезкости преобразования U_f для различных пленок и энергий фотонов приведены в табл. 3.4.6.

3.4.6.Зависимость нерезкости преобразования от энергии фотонного излучения

Энергия излучения, кэВ, или тип источника	Нерезкость U_f, мм, для пленок	
	мелкозернистых	крупнозернистых
50	0,03	0,05
100	0,05	0,10
200	0,09	0,12
300	0,12	0,15
400	0,15	0,20
1000	0,24	0,30
2000	0,32	0,45
8000	0,60	0,70
31000	1,00	1,20
^{192}Ir	0,13	0,20
^{137}Cs	0,28	0,30
^{60}Co	0,35	0,50

Продолжение табл 3.4.6

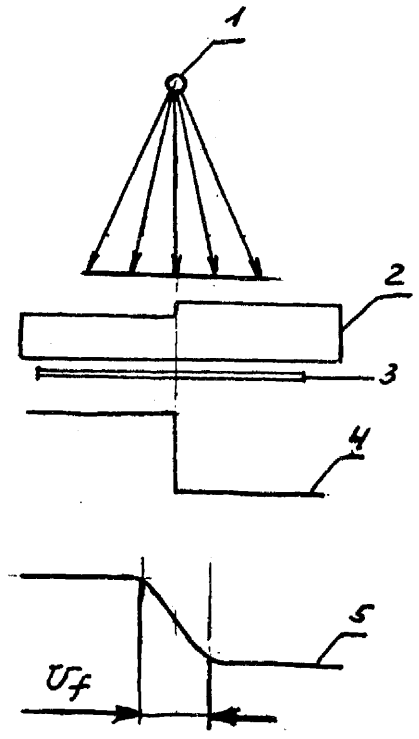


Рис. 3.4.17. Схема формирования нерезкости преобразования:
1 - источник излучения; *2* - ОК с резким изменением толщины; *3* - рентгеновская пленка; *4* - профиль радиационного изображения; *5* - сглаженный профиль оптической плотности снимка ОК

Фокусное расстояние d_f выбирают таким образом, чтобы геометрическая нерезкость U_g была соизмерима со значением U_f.

В стандартных международных организациях (Международный институт сварки, Европейский комитет по стандартизации) и ряде стран для выбора фокусных расстояний используются номограммы (рис. 3.4.18), построенные на основе зависимостей:

$$d_f / f = 15 b^{2/3}$$

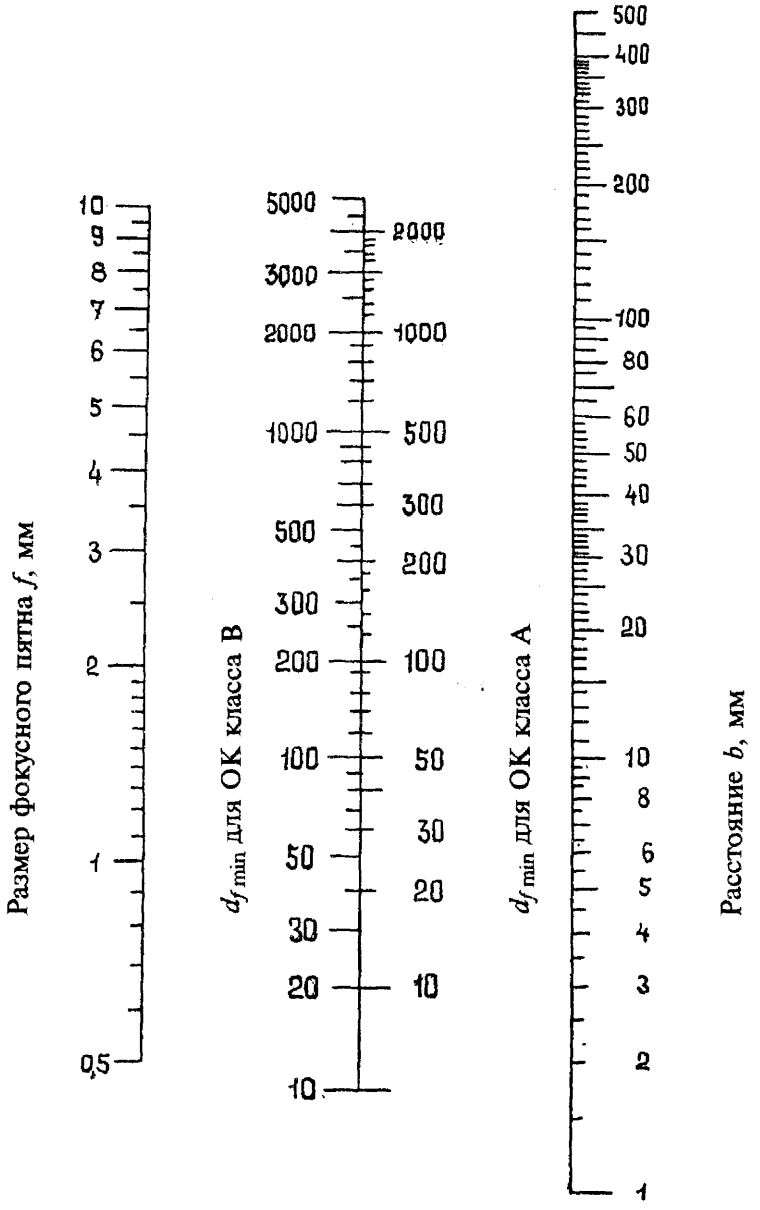


Рис. 3.4.18. Номограмма для оценки минимального фокусного расстояния $d_{f_{\min}}$ по заданному размеру f фокусного пятна излучателя и расстоянию b от ОК рентгеновской пленки

для ОК и техники ответственного назначения класса *B*;

$$d_f / f = 7{,}5 b^{2/3}$$

для ОК и техники неответственного назначения класса А;

где f - размеры фокусного пятна источника; b - расстояние между поверхностью ОК, обращенной к источнику излучения, и пленкой вдоль оси рабочего пучка излучения.

Первая из приведенных зависимостей основана на предположении, что $U_g = 2U_f$, а U_f выбирают по табл. 3.4.6.

На качество радиографического снимка влияют и другие виды нерезкости. Нерезкость рассеяния радиационного изображения (нерезкость рассеяния U_s) возникает в материале ОК и (или) материале детектора радиационного излучения.

Динамическая нерезкость радиационного изображения (динамическая нерезкость U_α) возникает при относительном перемещении (в процессе преобразования изображения) источника излучения, просвечиваемого ОК и преобразователя изображения.

Общая нерезкость U_T определяется совместным действием всех видов нерезкостей и формой неоднородности (дефекта) а ОК. Аналитически ее часто записывают в виде эмпирического равенства

$$U_T = \sqrt[3]{U_g^3 + U_f^3 + U_s^3 + U_\alpha^3}$$

или

$$U_T = \sqrt{U_g^2 + U_f^2 + U_s^2 + U_\alpha^2}.$$

Для того, чтобы получить снимок хорошего качества, полная нерезкость должна быть уменьшена до минимума. Кроме ограничений на значение общей нерезкости при контроле учитывают и ограничения на другие параметры. Так, нормативные документы требуют, чтобы относительное увеличение размеров изображений дефектов, расположенных со стороны источника излучения (по отношению к дефектам, расположенным со стороны пленки) не должно превышать 1,25. Часто для расчета значений фокусного расстояния используют соотношение.

$$d_f = b\left(f / U_f + 1\right).$$

3.4.6. ДИАФРАГМЫ, КОЛЛИМАТОРЫ, ФИЛЬТРЫ И КОМПЕНСАТОРЫ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Диафрагмой ионизирующего излучения (рис. 3.4.19) называют устройство, предназначенное для ограничения размеров поперечного сечения рабочего пучка ионизирующего излучения.

Коллиматор (рис. 3.4.20) - это устройство, осуществляющее формирование пучка направленного ионизирующего излучения.

Диафрагмы и коллиматоры, как правило, изготавливают из свинца или его сплавов. Некоторые рентгеновские излучатели имеют встроенные регулируемые диафрагмы, сконструированные таким образом, чтобы рабочий пучок излучения на некотором фиксированном расстоянии охватывал площадь пленки стандартного размера.

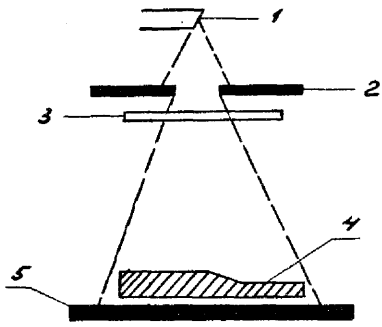


Рис. 3.4.19. Схема формирования ограниченного по размерам поперечного сечения рабочего пучка излучения с его фильтрацией:
1 - фокусное пятно излучателя; *2* - диафрагма; *3* - фильтр; *4* - ОК; *5* - радиационный преобразователь

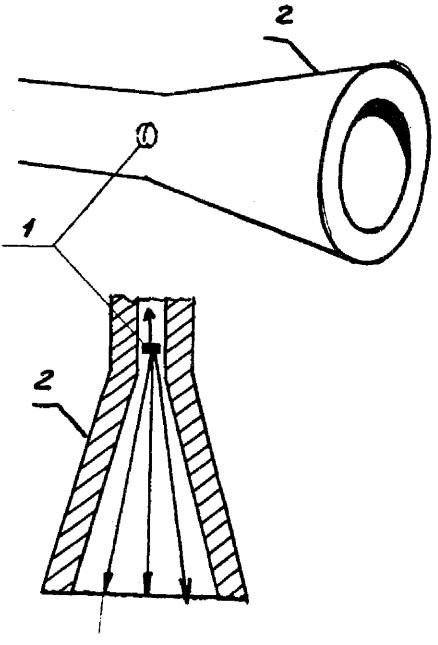


Рис. 3.4.20. Схема формирования пучка направленного ионизирующего излучения:
1 - источник излучения; *2* - коллиматор

Фильтром ионизирующего излучения называют совокупность поглощающих сред, предназначенных для изменения энергетического спектра ионизирующего излучения. Радиографические фильтры обычно изготавливают из листов металла с большим атомным номером (свинец, медь, латунь, железо) и размещают в непосредственной близости от источника излучения.

Размещение фильтра у источника излучения позволяет за счет поглощения "мягкой" компоненты излучения пучка сформировать

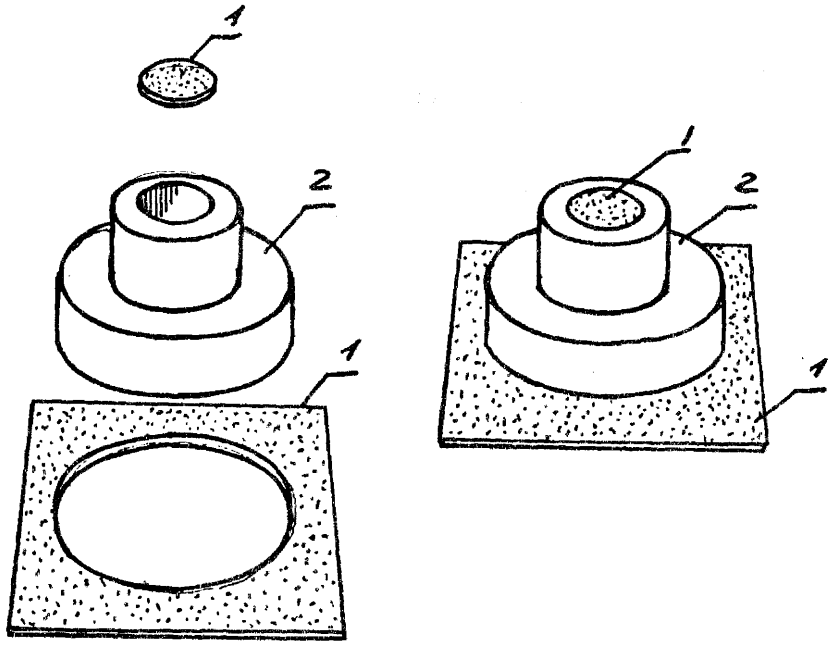


Рис. 3.4.21. Типовая схема использования твердотельного компенсатора:
1 - элемент компенсатора; *2* - ОК

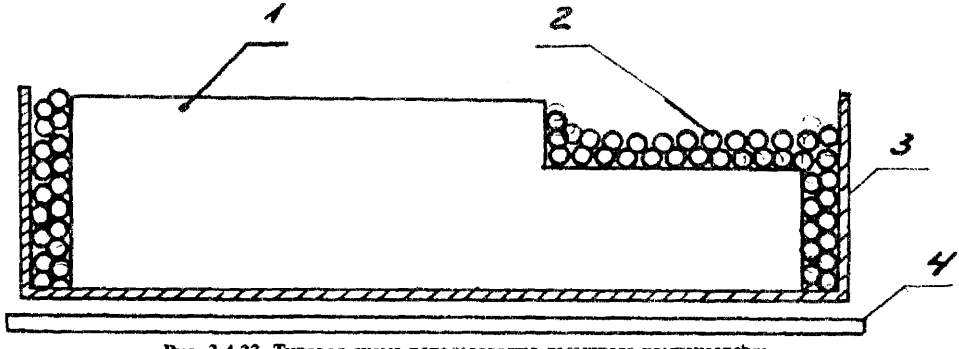


Рис. 3.4.22. Типовая схема использования насыпного компенсатора:
1 - ОК; *2* - металлическая дробь; *3* - контейнер; *4* - радиационный преобразователь

более "жесткий" рабочий пучок излучения, при помощи которого можно получить за одну экспозицию удовлетворительный снимок ОК с достаточно большой вариацией радиационной толщины. Требуемое воздействие фильтра на пучок излучения определяется материалом ОК, его толщиной и вариацией последней.

При радиографировании стальных ОК удовлетворительные результаты можно получить, используя свинцовые фильтры толщиной 3 % или медные фильтры толщиной 20 % от максимальной толщины ОК. Часто используют свинцовые фильтры толщиной: 0,25; 0,5; 0,6 ... 1,0; 1,0 ... 1,5 мм соответственно при анодных напряжениях 150; 200 ... 250; 400 и 1000 кВ.

При больших вариациях радиационной толщины ОК фильтрация излучения не позволяет за одну экспозицию получить снимок необходимого качества всего ОК и в этом случае используют такой прием, как маскирование при помощи компенсаторов. *Компенсатором* ионизирующего излучения называют дополнительное к ОК поглощающее тело (вещество), вводимое в зону рабочего пучка излучения с целью улучшения условия регистрации радиационного изображения и анализа выходного изображения ОК. В практике радиационного контроля используют твердые, на-

сыпные, жидкостные компенсаторы, а также компенсаторы в виде пасты.

В качестве твердого маскировочного материала широко используют свинец (рис. 3.4.21). Для стальных ОК толщиной 25 и 50 мм требуется слой свинца соответственно толщиной 3 и 8 мм, при этом свинец должен примыкать к ОК, не оставляя никаких зазоров. Такой способ маскирования обычно используют при просвечивании ОК с краями простого профиля.

При работе с насыпными компенсаторами (порошок, дробь и т.п.) (рис. 3.4.22) ОК размещают в контейнеры и засыпают им пространство между стенками контейнера и ОК.

Для ОК сложной конфигурации применяют компенсаторы на основе растворов (смесей) различных веществ, химически нейтральных ОК. Такой раствор может быть приготовлен растворением 500 г ацетата свинца в 1 л горячей воды с добавлением 400 г нитрата свинца и использован при просвечивании стальных ОК при анодных напряжениях на рентгеновской трубке не более 200 кВ.

Для ОК из легких сплавов может быть использован четыреххлористый углерод. В качестве дополнительного поглощающего материала широко используют бариевую пасту, а также пасты на основе солей свинца и жира, пластилина и свинцового порошка и т.п.

Когда требуется просветить большое число ОК одинаковой формы, используют специальные компенсаторы, конфигурация которых позволяет выровнять эквивалентную радиационную толщину по всей площади ОК.

3.4.7. РЕЖИМЫ ПРОСВЕЧИВАНИЯ ОК РЕНТГЕНОВСКИМ ИЗЛУЧЕНИЕМ

Номограммы рентгеновских экспозиций. Номограммы рентгеновских экспозиций представляют собой графические зависимости между толщиной материала, анодным напряжением на рентгеновской трубке и экспозицией (рис. 3.4.23). При планировании режимов просвечивания каждую конкретную номограмму можно использовать только при определенной совокупности условий, включающих тип рентгеновского аппарата, конкретное фокусное расстояние, тип пленки и экранов, условия обработки пленки с указанием оптической плотности снимка. Номограммы дают достаточно точную информацию для оценки режимов просвечивания ОК в виде пластины, но при просвечивании ОК, толщина которого изменяется в широких пределах, их можно использовать только в качестве первого приближения.

Для того, чтобы составить номограмму экспозиций, получают серию радиографических снимков ступенчатого клина, изготовленного из конкретного материла. При этом для ряда анодных напряжений на рентгеновской трубке (через 10 ... 30 кВ) клин последовательно радиографируют при различных экспозициях (мА-мин, мА-с). Полученные пленки обрабатывают в соответствии со стандартной методикой.

На каждом радиографическом снимке получается изображение клина в виде серии элементов с различной оптической плотностью. Выбрав определенную оптическую плотность, например s=2, с помощью денситометра определяют местонахождение изображения элементов с этой плотностью на каждой радиограмме. Для каждого такого элемента имеется информация о толщине клина, анодном напряжении и экспозиции.

При отсутствии на рентгенограмме заданной плотности почернения соответствующую толщину материла оценивают путем интерполяции. Затем значения толщины материала, напряжения и экспозиции для каждого элемента с заданной оптической плотностью наносят на график в полулогарифмическом масштабе. Экспозицию (мА-мин) откладывают по логарифмической шкале, а толщину материала по линейной шкале.

Второй способ составления номограммы экспозиций требует больших вычислений, но меньше снимков. При каждом выбранном напряжении выполняют однократное экспонирование ступенчатого клина. На каждой рентгенограмме измеряют оптические плотности для каждого элемента клина. Затем по характеристической кривой пленки оценивают экспозицию, которая дала бы заданную оптическую плотность для каждого элемента клина. Полученные значения экспозиции, толщины и напряжения наносят на графики, как и при выполнении первого способа.

Можно также составить номограммы, определяющие полезный интервал экспозиций и соответствующий ему полезный интервал плотностей, которые задаются толщинами ОК, допускающими радиографирование за одну экспозицию. Эти толщины определяются самой низкой и самой высокой плотностями почернения, допускаемыми на готовом радиографическом снимке. Для составления этих номограмм пользуются описанными выше способами с тем исключением, что на графике наносят как нижнее, так и верхнее допустимое значение плотности почернения. В результате для каждого анодного напряжения получаются две кривые - одна для нижней, а другая - для верхней допустимой плотности почернения.

Значение экспозиции можно непосредственно считывать с номограммы только в том случае, если условия радиографического процесса во всех деталях согласуются с условиями, применявшимися при составлении номограммы экспозиций. Любое изменение требует введения поправочного коэффициента.

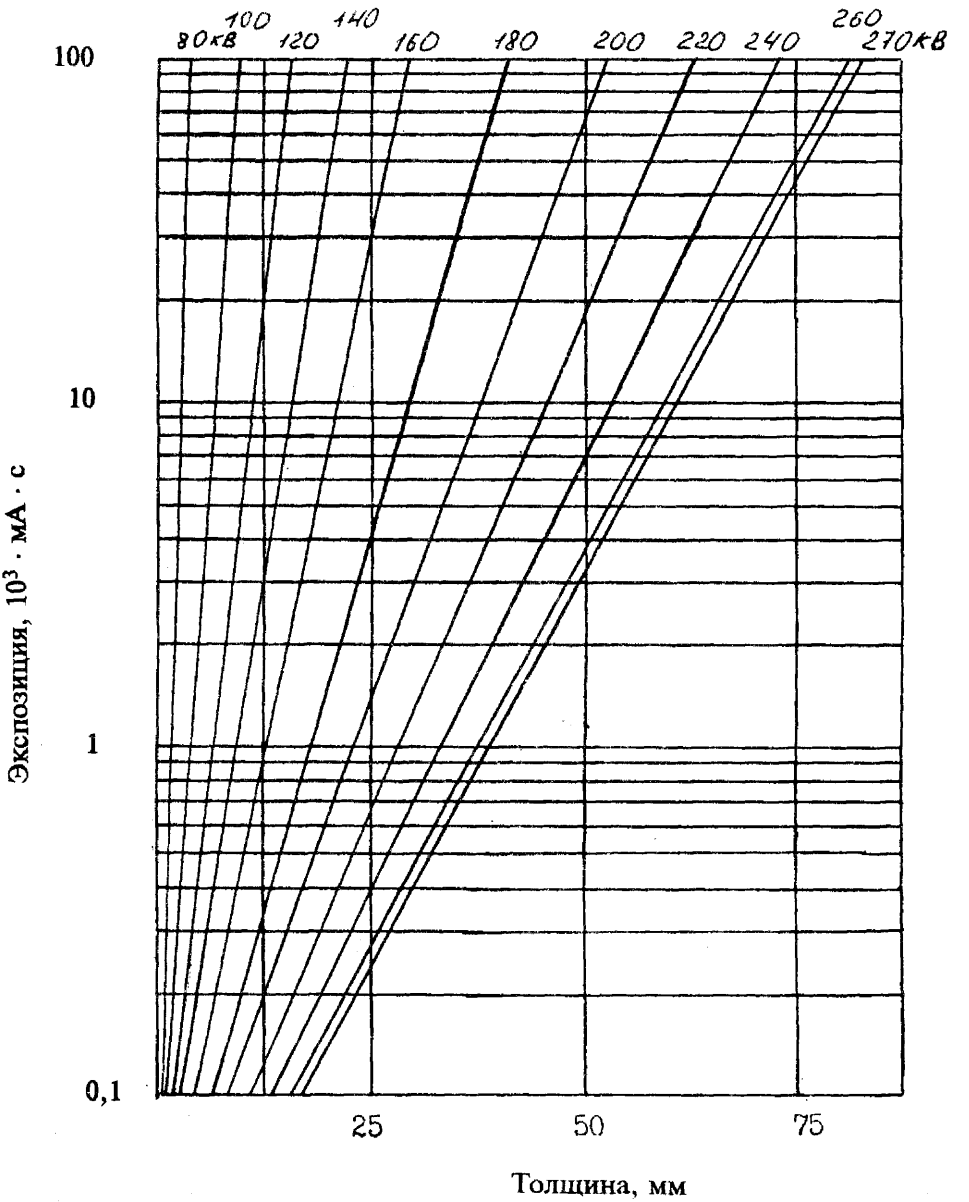


Рис. 3.4.23. Номограмма для определения экспозиций просвечивания сплавов на основе железа стационарным рентгеновским аппаратом на пленку со свинцовой фольгой при фокусном расстоянии d_f = 1000 мм и оптической плотности почернения снимков s = 2

Иногда трудно найти поправочный коэффициент, позволяющий номограмму экспозиций, составленную при использовании одного рентгеновского аппарата, применять при оценке режимов просвечивания для другого аппарата. Разные рентгеновские аппараты, работающие в одинаковых режимах по анодному напряжению и току, могут генерировать пучки излучения с разными физическими характеристиками (интенсивность, энергетический спектр и т.п.).

Изменение фокусного расстояния можно скомпенсировать использованием закона обратных квадратов.

Поправку на использование другого типа пленки или для получения другой оптической плотности можно ввести, используя характеристические кривые пленок.

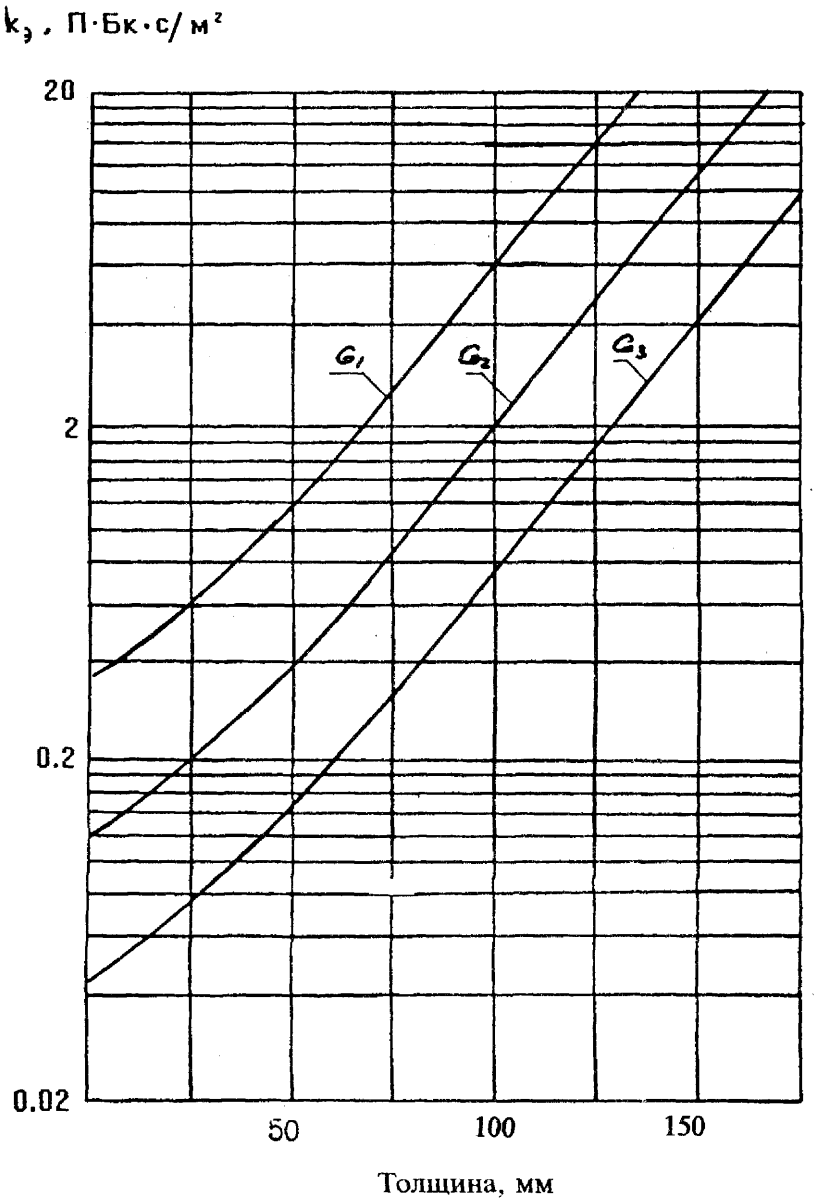


Рис. 3.4.24. Номограмма для определения экспозиций просвечивания Co60 сплавов на основе железа гамма-излучением на пленки типа *G* при плотности почернения снимков $s = 2$

При смене типов экранов, например при замене экрана из свинцовой фольги люминесцентным экраном, легче и вернее построить новую номограмму экспозиций.

Изменение условий обработки пленки вызывает изменение ее чувствительности и в этом случае поправочный коэффициент следует определять экспериментально.

При радиографировании ОК, материал которого отличается от материала ступенчатого клина, применяемого при составлении номограммы, для выбора режимов просвечивания используются коэффициенты радиографической эквивалентности.

Некоторые номограммы определяют экспозиции не в мА·с, а единицах "коэффициента экспозиции" (фактора экспозиции). Номограммы этого типа легко использовать для любого значения фокусного расстояния.

Коэффициент экспозиции $k_э$ - это параметр, объединяющий ток i_a рентгеновской трубки (для рентгеновского излучения) или активность A радионуклидного источника (для гамма-излучения) и фокусное расстояние d_f, при котором просвечивался ступенчатый клин для получения данных при построении номограммы. Коэффициент экспозиции

$$k_э = \frac{i_a t}{d_f^2}$$

или

$$k_э = \frac{A t}{d_f^2}.$$

Режим радиографирования задают указанием анодного напряжения и коэффициента экспозиции или указанием типа радионуклидного источника и коэффициента экспозиции. В этих случаях достаточно умножить коэффициент экспозиции на квадрат фокусного расстояния для того, чтобы найти, например, требуемую экспозицию в мА-мин или Кюри-ч.

Номограммы гамма-экспозиций. На номограммах (рис. 3.4.24) гамма-экспозиции отсутствует параметр, соответствующий анодному напряжению рентгеновской трубки, поэтому они содержат одну кривую или несколько кривых, каждая из которых соответствует определенному типу пленки, плотности почернения пленки или фокусному расстоянию.

Время просвечивания определяют по формуле

$$t = k_э d_f^2 / A,$$

где t - время при плотности почернения снимка $s = 2{,}0_f$ с; $k_э$ - коэффициент экспозиции; d_f - фокусное расстояние, м; A - активность источника, Бк (беккерелях).

Ниже даны поправочные коэффициенты на плотность почернения снимка.

Плотность	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
Поправочный коэффициент	0,43	0,7	1,0	1,3	1,6

Номограммы гамма-экспозиций легко модифицировать, чтобы они давали информацию о полезном интервале экспозиции.

Энергия фотонов гамма-излучения зависит от типа радионуклидного источника и остается постоянной при его эксплуатации. Активность источника и время его эксплуатации связаны обратной зависимостью, так что требуемая продолжительность времени экспозиции определяется активностью источника в момент экспонирования (рис. 3.4.25).

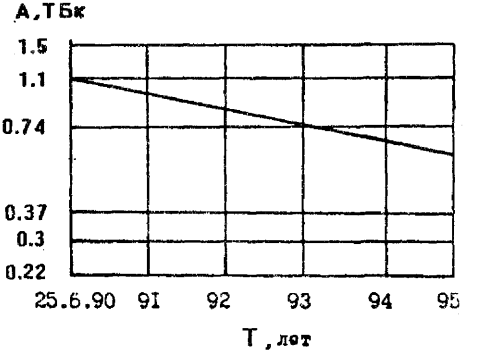


Рис. 3.4.25. Кривая распада радионуклидного источника на основе ^{60}Co

Информация, содержащаяся в номограмме гамма-экспозиции, в сочетании с таблицей коэффициентов радиографической эквивалентности позволяет определять нужные значения экспозиций для материала, не указанного в номограмме.

3.4.8. РАСШИФРОВКА РАДИОГРАФИЧЕСКИХ СНИМКОВ

Сложность процесса расшифровки можно оценить на основе не полного перечня факторов, влияющих на этот процесс, а именно характеристик:

ОК: форма, толщина, материал, ориентация, наиболее вероятные типы дефектов;

средств контроля: источника излучения, регистрирующих средств и методов их обработки;

картины: яркости фона, плотность помех и ложных сигналов;

оператора: острота зрения, тренированность, мотивировка действий, утомление, получение предварительного инструктажа, возраст, интеллект, индивидуальные особенности, рабочая нагрузка, метод поиска;

разнородных факторов: освещенность в помещении, шумы и вибрации во времени расшифровки.

Следует отметить, что оператор обнаруживает изображения дефектов вероятностным образом. Разброс у определенных опытных расшифровщиков радиографических снимков в способности извлекать информацию из снимков составляет около 30 %. Очевидно, что даже при самых лучших возможных условиях обучения и опыта квалифицированные расшифровщики изображений на пленках вряд ли достигнут согласия более чем в 90 - 95 % случаев. Поэтому во всех случаях, когда качество

готовой продукции является важным фактором безопасности, минимум два квалифицированных оператора должны оценивать качество ОК по снимкам и выносить заключение.

Контрольные радиографические снимки являются ценным пособием при обучении и расшифровке. Кроме этого, рекомендуется иметь собственную библиотеку радиографических снимков и соответствующих фотографий микрошлифов дефектных участков ОК.

Острота зрения является существенным параметром для первого этапа трехэтапного процесса расшифровки: обнаружение, опознавание, оценка. Острота зрения человека может меняться и действительно меняется изо дня в день в зависимости от физиологических факторов. Понимание этого стимулирует ежедневную проверку остроты зрения, например с помощью диапозитивов, на которых имеются изображения линейчатых дефектов с резкими и размытыми очертаниями.

Условия для просмотра снимков также имеют важное значение при расшифровке.

Негатоскопы с регулируемой яркостью и размерами освещенного поля обычно разделяют на четыре группы:

для локального просмотра снимка (диаметр освещенного поля 7 ... 10 см);

просмотра ленточной рентгеновской пленки;

просмотра больших площадей (35 × 45 см);

комбинированные (локальный просмотр больших площадей).

Изображения на рентгеновских пленках можно эффективно оценивать при помощи увеличительных устройств: лупы с ценой деления 0,1 мм и менее, увеличителя на штативе и т.п.

Первый этап просмотра пленки требует оценки качества радиографического изображения. Он включает определение следующих факторов:

содержит ли снимок пятна, полосы, загрязнения и повреждения эмульсионного слоя;

имеется ли на снимке изображение ограничительных меток, маркировочных знаков, эталона чувствительности;

в заданных ли пределах находится оптическая плотность почернения на снимке.

Чувствительность радиационного контроля. Для оценки качества снимков используют эталоны чувствительности. Это установленные нормативными документами по форме, составу и способу применения тест-образцы, размеры элементов которых заданы. По химсоставу и плотности материала эталоны должны быть идентичны материалу ОК. На рис. 3.4.26 изображены эталоны чувствительности.

Эталон чувствительности ступенчатого типа не имеет стандартной конструкции, однако типичной можно назвать такую, которая имеет пять ступеней квадратной формы размером, например, 10 мм каждая; толщина ступеней 0,25; 0,5; 1,0 и 1,25 мм.

Канавочный эталон чувствительности представляет собой пластину с канавками установленных форм и размеров.

Проволочный эталон - это набор прямых проволочек установленных длин и размеров. Проволочные эталоны стандартизованы ГОСТ-7512-82, в Великобритании BS3971.1980, Германии DIN 54109, в скандинавских странах UCO ISO/R-1027, 1969 и Международным институтом сварки - IIS/IIW - 62-60. Эталоны имеют незначительные изменения в конструкциях.

Ступенчато-дырочные эталоны содержат набор пластин, каждая из которых имеет по одному-два отверстия, просверленных насквозь под прямым углом к их поверхности. Диаметр отверстия равен толщине пластин.

Пластинчатый эталон чувствительности радиационного контроля представляет собой пластину с цилиндрическими отверстиями установленных форм и размеров. Эти эталоны стандартизованы ГОСТ 7512-82 и Американским обществом по испытанию материалов ASTM (стандарт Е 142).

Многие международные нормы и нормы США сформулированы таким образом, что толщина пластины T составляет 2 % от толщины ОК и требуется, чтобы на радиографическом снимке было видно отверстие, диаметр которого в два раза больше толщины пластины ($2T$). Эталон стандарта Е 142, кроме отверстия диаметром $2T$, имеет отверстия диаметром $1T$ и $4T$.

Абсолютная чувствительность радиационного контроля (наименьшая глубина выявляемой на снимке канавки канавочного эталона, наименьший диаметр выявляемой на снимке проволоки проволочного эталона, наименьшая толщина пластинчатого эталона, при которой на снимке выявляется отверстие диаметром, равным удвоенной толщине эталона) должна соответствовать требованиям технической документации на ОК.

Требованиями технической документации на ОК может задаваться также относительная чувствительность контроля K (в процентах)

$$K = 100\,\delta / x,$$

где δ - абсолютная чувствительность контроля; x - радиационная толщина ОК.

Уровни чувствительности и относительной чувствительности по нормам ASTM определяются не только толщиной пластинчатого эталона, но и диаметром выявляемого в нем отверстия (табл. 3.4.7).

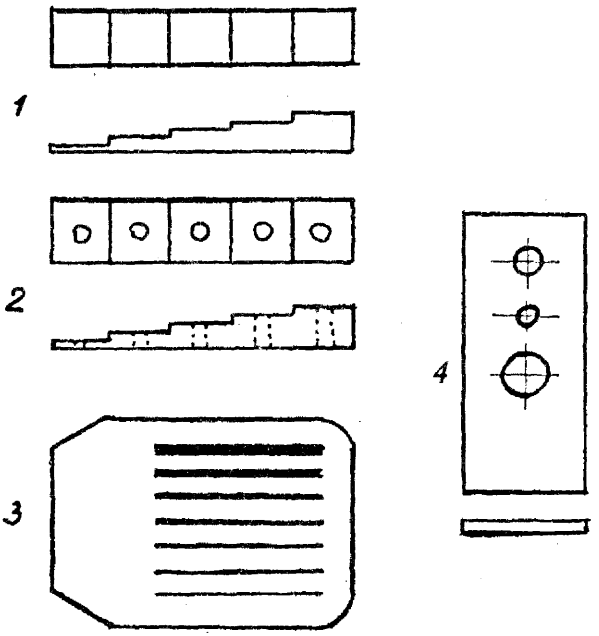


Рис. 3.4.26. Эталоны чувствительности радиационного контроля:
1 - ступенчатый; *2* - ступенчато-дырочный; *3* - проволочный; *4* - пластинчатый

3.4.7. Уровни чувствительности по нормам ASTM

Уровни чувствительности	Относительная чувствительность
1 - 1T*	0,7
1 - 2T	1,0
2 - 1T	1,4
2 - 2T	2,0
2 - 4T	2,8
4 - 2T	4,0

* Первая цифра означает толщину пластины в % толщины ОК; вторая - диаметр выявляемого отверстия в единицах толщины эталона.

Обычно эталоны чувствительности устанавливают на стороне ОК, обращенной к источнику излучения. Это требование основано на том, что при формировании изображения внутренних структур ОК наиболее сильно будут деградированы структуры, расположенные ближе к источнику излучения. Если ОК имеет неравномерную толщину, то эталоны устанавливают на более важную часть ОК или на ОК размещают несколько эталонов. На ОК, имеющих сварной шов с усилением, проволочные и пластинчатые эталоны можно размещать на дополнительных пластинах такой толщины, чтобы радиационная толщина усиления была равна эквивалентной радиационной толщине дополнительной пластины и ОК в месте размещения эталона.

Следует отметить, что между чувствительностью контроля по эталонам и чувствительностью к выявлению реальных дефектов не существует простой зависимости. Однако использование эталонов чувствительности позволяет сделать оценку чувствительности к выявлению дефектов некоторых типов. Так, пора, заполненная газом, с объемом, равным объему цилиндрического отверстия пластинчатого эталона диаметром 2T, имеет размер примерно в 1,8 раза больший, чем толщина эталона. Поэтому чувствительность 2 % по такому эталону соответствует чувствительности 3,6 % к пористости. Усадочные раковины в отливках представляют собой пустоты почти цилиндрического сечения. Следовательно, чувствительность по проволочным эталонам соответствует чувствительности к усадочным раковинам.

Оценка качества ОК по снимку. Именно на этом этапе индивидуальная острота зрения и опыт оператора, а также понимание им процесса получения снимка становятся доминирующими факторами.

Так как глаз более восприимчив к движущимся элементам изображения, небольшие движения снимка помогают обнаруживать мелкие детали изображения. Размещение пленки под углом или изменение угла зрения повышает контрастность мелкозернистых элементов изображения. Уменьшение углового размера освещенного поля и использование увеличительных приборов помогают объективности оценки качества ОК. С другой стороны, большие угловые размеры освещенного поля позволяют повысить точность диагностирования узлов и механизмов по снимкам.

Уровни оптической плотности почернения элементов изображения снимка существенно влияют на выполнение оценки качества ОК. Измерение плотности почернения проводят с помощью денситометров, позволяющих оценивать оптическую плотность изображений с размерами 1 ... 3 мм; микроденситометров и микрофотометров, дающих возможность измерять плотность на деталях снимков до 3 мкм.

Денситометр (измеритель оптической плотности) представляет собой прибор, цифровой блок которого информационно связан со светочувствительным датчиком.

При размещении рентгеновского снимка с достаточно большой плотностью почернения между источником света и светочувствительным датчиком на последний будет воздействовать после прохождения снимка небольшое количество света и на индикаторе цифрового блока будет высвечиваться высокое значение оптической плотности снимка. И наоборот, когда через участок пленки пройдет больше света, который воздействует на датчик, измеритель покажет более низкую плотность. При правильном использовании денситометра перед измерением плотностей почернения его прогревают в течение нескольких минут.

Калибровка прибора. Калибровка измерителей оптической плотности осуществляется с помощью полоски фотоматериала с набором эталонных значений оптических плотностей. При правильной эксплуатации денситометра можно осуществлять измерения с точностью ± 0,02.

Денситометры и наборы оптических плотностей подлежат проверке не реже одного раза в год.

При специализированных денситометрических исследованиях рентгеновских снимков (измерение нерезкости, размеров фокусных пятен излучателей и т.п.) используют сканирующие микроденситометры. Они могут автоматически сканировать заданный участок снимка и создавать графические изображения, соответствующие плотностям почернения, измеренным на траектории сканирования.

Артефакты (от лат. artefactum - искусственно сделанный) - это обнаруживаемые на радиографических снимках ложные информационно не связанные с ОК элементы изображения в виде полос, теней, линий и т.п., возникающие, например из-за неправильного изготовления, хранения, обращения и обработки регистрирующих средств: пленок, экранов. Артефакты многих типов можно спутать с изображениями реальных дефектов. Поэтому важно уметь идентифицировать эти ложные элементы изображения и отметить их наличие при документировании результатов контроля.

3.4.9. ДОКУМЕНТАЛЬНОЕ ОФОРМЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАДИОГРАФИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ

Наряду с данными о схеме и параметрах контроля, документальное оформление должно сопровождаться полной и точной информацией о качестве ОК, которую содержит снимок. Использование стандартной формы записи результатов контроля позволяет более эффективно использовать все необходимые данные.

Важным аспектом любого документального оформления результатов контроля является способ описания местоположения участков ОК, с которых были сделаны рентгеновские снимки. Большинство специалистов по радиографии пользуется своего рода "сокращенным кодом" из свинцовых маркировочных знаков, расположенных как на ОК, так и на кассете для идентификации направлений просвечивания и позиций, однако часто такой код не позволяет однозначно соотносить снимки с конкретными участками ОК.

Отсутствие пояснительной информации при последующих просмотрах рентгенограмм может приводить к дорогостоящим задержкам при решении вопросов о причинах аварийных ситуаций, проверке качества ОК заказчиком, органами надзора и т.п. Наконец, основной проблемой документального оформления результатов радиографического контроля является точное описание всех существенных дефектов, обнаруженных в ОК с учетом их характеристик, размеров, местоположения и, если тот, кто оформляет документы, обладает необходимой компетентностью, значимости таких дефектов.

В отдельных случаях могут оказаться необходимыми дубликаты или копии рентгеновских снимков. Если снимок имеет достаточно широкий диапазон плотностей почернения, необходимо сделать его дубликат. Копии могут быть сделаны различными способами в зависимости от оптической плотности снимка-оригинала:

1) изготовлением с оригинала позитива на фотографической бумаге;

2) получением отпечатка на бумаге с использованием промежуточного негатива. Промежуточный негатив изготовляют на фотопленке средней чувствительности;

3) получением снимков с использованием 35-миллиметровой или более узкой копировальной пленки. (такая пленка не позволяет передавать достаточно широкий диапазон плотностей оригинала);

4) путем рентгенографирования снимка-оригинала с использованием рентгеновского излучения очень низкой энергии (10...15 кэВ). Этот способ эффективен при плотности снимка-оригинала более 4;

5) с использованием цифровой телевизионной системы или линейной матрицы детекторов (могут быть оцифрованы пленки в диапазоне плотностей почернения 1 ... 4,8); цифровое изображение может обрабатываться и запоминаться; так, оптический диск с двумя гигабайтами данных может храниться без потерь информации в течение 30 лет.

Глава 3.5

АКУСТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ

3.5.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Акустическими методами называют методы, основанные на использовании упругих колебаний и волн любых частот. Методы, использующие частоты от 20 кГц до 100 Мгц, называют *ультразвуковыми*.

Упругая волна представляет собой процесс распространения возмущений в среде в результате действия механических сил, происходящий благодаря упругому взаимодействию частиц среды.

Отклонение частицы от положения равновесия называется *смещением* ξ, величина $v = d\xi/dt$ *- колебательной скоростью*. Колебания частиц обусловлены *звуковым давлением* p, представляющим собой разность между мгновенным p_a и статическим p_0 давлениями в данной точке среды:

$$p = p_a - p_0.$$

Важным параметром среды является ее *характеристический импеданс* или *удельное волновое сопротивление*. Он определяется как отношение комплексных амплитуд звукового давления $\dot{p}$ к колебательной скорости $\dot{v}$ в гармонической бегущей волне:

$$z = \dot{p} / \dot{v},$$

обычно выражается произведением плотности ρ среды на скорость распространения волны:

$$z = \rho c.$$

Для сред с небольшими потерями z можно считать действительной величиной.

Акустическим импедансом z_a называют отношение комплексных амплитуд $\dot{p}$ и $\dot{v}$ в любой гармонической волне:

$$z_a = \dot{p} / \dot{v}.$$

В общем случае z_a - комплексная величина.

В неразрушающем контроле встречается также понятие *механического импеданса*, под которым понимают отношение комплексных амплитуд гармонической возмущающей силы $\dot{F}$ и вызываемой ею колебательной скорости $\dot{v}$ в направлении силы:

$$Z = \dot{F} / \dot{v}.$$

В отличие от ρc, характеризующего среду, механический импеданс является параметром конструкции.

Энергетической характеристикой упругой волны служит *интенсивность*. Для бегущей гармонической волны интенсивность

$$j = \rho c v_m^2 / 2 = p_m^2 / 2\rho c,$$

где v_m и p_m - амплитуды колебательной скорости и звукового давления соответственно.

Единицы измерения рассмотренных величин в системе СИ: смещения - м, колебательной скорости - м/с, звукового давления - Па, интенсивности - Вт/м^2, характеристического и акустического импедансов - Па·с/м, механического импеданса - Н·с/м.

В жидкостях и газах распространяются лишь продольные волны. В безграничных твердых телах могут существовать только продольные и поперечные (сдвиговые) волны. В продольных волнах направление колебательного движения частиц среды совпадает (или противоположно) с направлением распространения волны, в поперечных - перпендикулярно этому направлению.

В ограниченных твердых телах могут распространяться также волны других типов. Из них основное значение имеют: поверхностные волны (волны Рэлея), нормальные волны в слоях (волны Лэмба), изгибные волны, нормальные стержневые волны (волны Похгаммера).

Поверхностные волны распространяются по свободным поверхностям твердых тел в слое толщиной порядка длины волны. Частицы среды движутся по эллиптическим траекториям.

Волны Лэмба возбуждаются в слоях - листах, стенках труб и т.п. - и имеют волноводный механизм распространения. Скорость распространения этих волн зависит от толщины слоя и частоты. Симметричные s и антисимметричные a моды волн отличаются симметричным и антисимметричным движениями относительно среднего сечения слоя (рис. 3.5.1). Различные моды волн распространяются с разными скоростями. Изгибные волны есть частный случай антисимметричных волн Лэмба нулевого порядка a_0, когда длина волны намного больше толщины слоя.

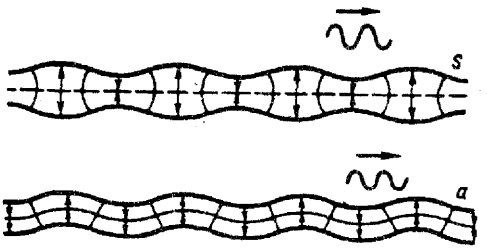


Рис. 3.5.1. Деформация пластины при распространении симметричных и антисимметричных волн

Стержневые волны во многом сходны с волнами Лэмба. Они также делятся на симметричные и антисимметричные и имеют множество мод.

Скорости продольных, поперечных и поверхностных волн в большинстве материалов не зависят от частоты. Скорости волн в пластинах и стержнях зависят от произведения толщины изделия на частоту. Это явление называют *дисперсией скорости.*

Скорости распространения волн всех типов определяются *плотностью* ρ *среды* и ее упругими составляющими. Формулы для скоростей распространения основных типов волн приведены в табл. 3.5.1, акустические свойства различных сред - в табл. 3.5.2.

При распространении в средах упругие волны ослабляются вследствие расхождения энергии в пространстве и затухания в среде. В ультразвуковой дефектоскопии применяют высокие частоты (f > 0,5 Мгц), когда отношение поперечного размера $2a$ преобразователя больше дины волны ($2a > \lambda$, где λ - длина волны).

В этом случае излучение характеризуется направленностью, т.е. основная энергия сосредоточена в пределах относительно узкого пучка. Акустическое поле излучателя обладает ближней и дальней зонами. Для круглого преобразователя радиусом a границей ближней зоны является расстояние $r_б = a^2 / \lambda$. В ближней зоне ($r < r_б$) звуковое давление меняется немонотонно, в дальней зоне - монотонно убывает. На расстояниях $r >> r_б$ зависимость звукового давления от угла θ с осью излучения представляется диаграммой направленности (рис. 3.5.2), имеющей основной и несколько боковых лепестков. Угол раскрытия основного лепестка этой диаграммы

$$\theta = \arcsin 0{,}6 \Big/ \frac{\lambda}{a}.$$

Направленность при приеме аналогична направленности при излучении.

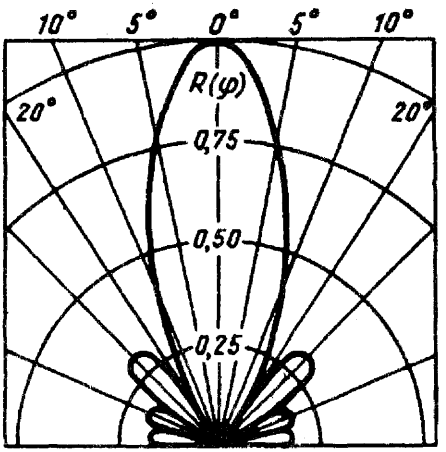


Рис. 3.5.2. Диаграмма направленности поля излучения дискообразного преобразователя с $2a/\lambda = 5$ в полярных координатах

При распространении сферической акустической волны в безграничной среде ослабление звукового давления происходит по закону

$$p = \frac{p_0}{r^2} e^{-\delta r}.$$

Здесь член $1/r^2$ характеризует ослабление вследствие расхождения, множитель $e^{-\delta r}$ - вследствие затухания.

Коэффициент затухания $\delta = \frac{1}{r} \ln\left(p / p_0\right)$ выражается в Неперах/м (Нп/м) и имеет размерность $м^{-1}$. Часто его представляют также в децибелах / м (дБ/м). При этом 1 Нп/м = = 8,686 дБ/м, 1 дБ/м=0,1151 Нп/м.

Коэффициент затухания складывается из коэффициентов поглощения и рассеяния:

$$\delta = \delta_п + \delta_р.$$

При поглощении звуковая энергия переходит в тепловую, а при рассеянии остается звуковой, но уходит из направленно распространяющейся волны в результате отражений от неоднородностей среды.

В газах и жидкостях, не засоренных взвешенными частицами, пузырьками воздуха (в жидкости), рассеяние отсутствует и затухание определяется только поглощением. Коэффициент поглощения пропорционален квадрату частоты.

Для твердых тел коэффициент поглощения чаще всего пропорционален частоте. Для стали $\frac{\delta_п}{f}$ =0,1 ÷ 1,5 Нп/МГц·м; для алюминия 0,05 ÷ 0,06; для магния 0,1. Поглощение опре-

3.5.1. Типы волн

Среда распространения	Тип (название) волны	Характеристика волны	Скорость распространения
Жидкость или газ	Продольные (растяжения-сжатия)	Периодические расширения и сжатия среды	$c = \sqrt{\frac{K}{p}}$
Безграничное твердое тело	Продольные (растяжения-сжатия, безвихревые)	Частицы колеблются в направлении распространения волны	$c_l = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}}$
	Поперечные (сдвига, эквиволюминальные)	Частицы колеблются в плоскости, перпендикулярной направлению распространения волны	$c_t = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)}} \approx 0{,}55c_l$
Поверхность полубезграничного тела	Поверхностные (Рэлея)	Волна распространяется по поверхности тела	$c_s = \frac{0{,}87+1{,}12\nu}{1+\nu}c_t \approx 0{,}93c_t$
Бесконечная пластина толщиной h	Изгибная	Изгиб пластины со сдвигом	$c_b = \sqrt{\omega h}\cdot\sqrt[4]{\frac{E}{12\rho(1-\nu)}}$ $(\lambda >> h)$
	Нормальная симметричная (мода s_0 волны Лэмба)	Продольные колебания с изменением поперечных размеров	$c_a \approx \sqrt{\frac{E}{\rho\left(1-\nu^2\right)}}$ $(\lambda >> h)$
Бесконечный стержень диаметром d	Продольные (растяжения-сжатия)	Продольные колебания с изменением поперечных размеров	$c_0 = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$ $(\lambda >> d)$

Примечание. Здесь K - модуль всестороннего сжатия; E - модуль упругости; ν - коэффициент Пуассона; ω - угловая частота; ρ - плотность; λ - длина волны.

3.5.2. Акустические свойства различных сред

Вещество	Плотность ρ, 10^3 кг/м^3	Скорость распространения волн c, 10^3 м/с			Характеристический импеданс для продольных волн, МПа·с/м
		продольных	поперечных	поверхностных	
Металлы и сплавы					
Алюминий	2,7	6,36	3,13	2,9	17,2
Бронза	8,5 - 8,9	3,5 - 3,8	2,3 - 2,5	2,1 - 2,3	30 - 34
Вольфрам	19,25	5,32	2,7	2,65	102,7
Дюралюминий	2,7 - 2,8	6,25-6,35	3,0 - 3,2	2,8 - 3,0	17,2-20,0
Железо	7,8	5,91	3,23	3,0	46,3
Латунь	8,5	4,43	2,12	1,95	37,7
Магний	1,74	5,77	3,05	2,875	10,1
Медь	8,9	4,72	2,44	2,26	42,0
Молибден	10,09	6,29	3,35	3,11	63,5
Никель	8,8	5,63	2,96	2,64	49,5
Олово	7,3	3,32	1,67	1,56	24,2
Ртуть	13,6	1,45	-	-	19,8
Свинец	11,4	2,16	0,85	0,79	24,6
Серебро	10,5	3,60	1,59	1,48	38,0
Сталь:					
коррозионностойкая	8,03	5,66-6,14	3,12-3,25	3,1	45,5-49,3
углеродистая	7,8	5,90-5,94	3,22-3,25	3,0	46,2- 46,4
Титан	4,5	6,10	3,13	2,91	27,5
Цинк	7,1	4,17	2,41	2,22	29,6
Чугун	7,2	3,5 - 5,6	2,2 - 3,2	-	25 - 40
Неметаллы					
Бетон	1,8 - 2,8	2,1 - 5,2	-	-	4 - 14,5
Капрон	1,1	2,64	-	-	2,9
Кварц плавленный	2,2	5,93	3,75	3,39	13,0
Нейлон, перлон	1,1 - 1,2	1,8 - 2,2	-	-	1,8 - 2,7
Стекло органическое	1,18	2,65-2,75	1,12-1,13	1,05	3,0 - 3,2
Окись алюминия (корунд)	3,7 - 3,9	10	-	-	37 - 39
Полистирол	1,1	2,37	1,12	1,04	3,0
Резина:					
сырая	1,3 - 2,1	1,48	-	-	1,9 - 3,1
вулканизированная	0,9 - 1,6	1,5 - 2,3	-	-	1,3 - 3,7
Смола акриловая	1,18	2,67	1,12	-	3,2
Стекло оконное	2,6	5,7	3,4	3,1	14,5
Текстолит	1,2 - 1,3	2,63	-	-	3,1 - 3,9
Фторопласт	2,2	1,35	-	-	3
Фарфор	2,4	5,3 - 5,35	3,5 - 3,7	-	1,3 - 1,4
Эбонит	1,2	2,4	-	-	2,9
Эпоксидная смола твердая	1,15 - 1,3	2,5 - 2,8	1,1	-	2,8 - 3,7
Жидкости (20^0 С)					
Вода	0,998	1,490	-	-	1,49
Глицерин	1,265	1,923	-	-	2,42
Керосин	0,825	1,295	-	-	1,45
Масло:					
машинное (автол)	0,89- 0,96	1,74	-	-	1,5 - 1,7
трансформаторное	0,9 - 0,92	1,38-1,40	-	-	1,25-1,27
Спирт этиловый	0,789	1,180	-	-	0,93
Газы (0^0 С)					
Водород	$0{,}9\cdot10^{-4}$	1,248	-	-	$1{,}1\cdot10^{-4}$
Воздух	$1{,}3\cdot10^{-3}$	0,331	-	-	$4{,}3\cdot10^{-4}$

деляет затухание акустических волн в аморфных твердых телах, а также в монокристаллах.

Большинство твердых тел состоит из большого числа зерен-кристаллитов, на границах которых происходит рассеяние ультразвуковых волн. Вследствие этого роль рассеяния оказывается значительной и часто превалирующей. Особенно велико рассеяние в материалах, состоящих из разнородных частиц (бетон, гранит, чугун), и в материалах с большой упругой анизотропией - разной скоростью упругих волн для разных направлений в кристалле (медь, аустенитная сталь).

Для металлов δ_p увеличивается с ростом упругой анизотропии, среднего размера кристаллитов $\overline{D}$ и частоты:

$$\delta_p \sim f^n \ (n = 2 \div 4).$$

В области

$$\lambda / \overline{D} = 4 + 10$$

$\delta_p \approx \overline{D} f^2$, а при $\lambda > 10\overline{D}$ $\delta_p \approx \overline{D}^3 f^4$.

К примеру, в малоуглеродистой стали для продольных и поперечных волн при $\lambda > 10\overline{D}$:

$$\delta_l \approx 0{,}12 f + 20\overline{D}^3 f^4,$$

$$\delta_t \approx 0{,}1 f + 105\overline{D}^3 f^4.$$

Здесь $\overline{D}$ - в мм, f - в МГц, δ - в Нп/м.

Значения коэффициентов затухания в зависимости от частоты для некоторых сталей приведены на рис. 3.5.3.

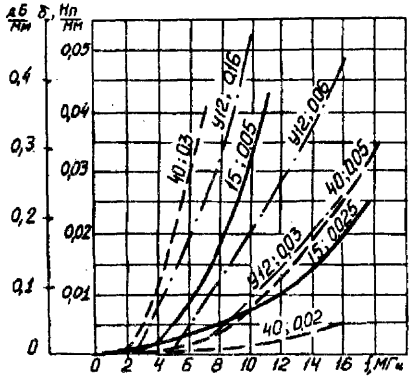


Рис. 3.5.3. Коэффициент затухания продольных волн в сталях
(даны марка стали и средний размер зерна в мм)

В пластиках значения коэффициентов затухания обычно больше, чем в металлах, и определяются они в основном поглощением (рис. 3.5.4). Минимальный размер дефекта, выявляемого методом отражения, ограничен дифракцией упругих волн.

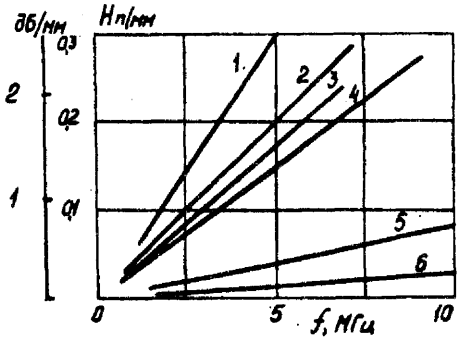


Рис. 3.5.4. Коэффициент затухания продольных волн в неметаллах:
1 - фторопласт; *2* - отвержденная эпоксидная смола ЭД-5; *3* - эбонит; *4* - компаунд К-153; *5* - органическое стекло; *6* - полистирол

При $d/\lambda < 0{,}5$ волна огибает дефект и отражение от него резко уменьшается. Поэтому с ростом частоты (уменьшением λ) чувствительность растет. Однако увеличению частоты препятствует рост поглощения и шумов, обусловленных рассеянием волн на неоднородностях структуры материала. В результате частоту прозвучивания выбирают путем компромисса с учетом структуры материала изделия.

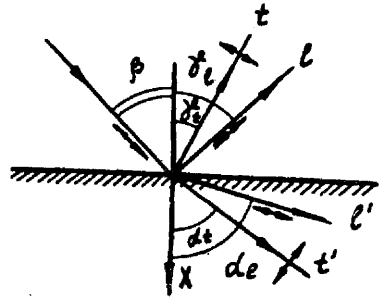


Рис. 3.5.5. Отражение, преломление и трансформация при падении продольной волны на границу раздела двух твердых сред

Граница двух протяженных сред. Падающая на границу двух протяженных сред плоская волна частично проходит, частично отражается и может трансформироваться. В твердых телах (рис. 3.5.5) возникают две (продольная и поперечная) отраженные и две преломленные волны с направлениями по закону синусов (закону Снеллиуса):

$$\frac{\sin\beta}{c} = \frac{\sin\gamma_l}{c_l} = \frac{\sin\gamma_t}{c_t} = \frac{\sin\alpha_l}{c_{l'}} = \frac{\sin\alpha_t}{c_{t'}},$$

где β, γ и α - углы падения, отражения и преломления; c - скорости волн; индексы l и t

обозначают продольные и поперечные волны, для нижней среды индексы имеют штрих ('), скорость падающей волны - без индекса. Если одна среда (или обе) жидкая или газообразная, то поперечные волны в ней не существуют и количество волн сокращается.

Амплитуды каждой отраженной или прошедшей волны определяются коэффициентами отражения или прозрачности R или D. Эти коэффициенты могут быть по амплитудам смещения, акустического давления или других переменных величин. Часто используют коэффициенты по потокам энергии, перпендикулярным границе раздела $\widetilde{R}$ и $\widetilde{D}$ (будем называть "по энергии"). Для этих коэффициентов справедливы общие закономерности:

1) Сумма всех коэффициентов отражения и прозрачности по энергии равна 1 (закон сохранения энергии):

$$\widetilde{R}_{ll} + \widetilde{R}_{lt} + \widetilde{D}_{ll'} + \widetilde{D}_{lt'} = 1.$$

2) Коэффициенты отражения по амплитуде однотипной волны с двух сторон от границы равны по модулю и обратны по знаку:

$$R_{ll} = -R_{l'l'}; \quad R_{tt} = -R_{t't'}.$$

3) Коэффициент прозрачности по энергии равен произведению коэффициентов по амплитуде в двух направлениях. Например:

$$\widetilde{D}_{lt'} = D_{lt'} D_{t'l} = \widetilde{D}_{t'l}.$$

То же относится к коэффициентам отражения разнотипных волн:

$$\widetilde{R}_{lt} = R_{lt} R_{tl} = \widetilde{R}_{tl}.$$

Эта закономерность (в части прохождения) важна для дефектоскопии, поскольку границу изделия волна проходит дважды.

На рис. 3.5.6, *в* и 3.5.7 показаны расчетные коэффициенты прозрачности по энергии для границ некоторых сред. Кроме того на рис. 3.5.6, *а*, *б* для границы оргстекло-сталь даны коэффициенты прозрачности по амплитуде смещения при падении продольной волны из оргстекла в сталь под углом β (*а*) и при падении продольной или поперечной волн из стали в оргстекло под углами α_l и α_t (*б*). На дополнительных шкалах - углы преломления. Штриховыми линиями на рис. 3.5.6, *в* показаны коэффициенты прозрачности по энергии при конечной толщине слоя масла δ (указано в долях длины волны в масле).

При первом и втором критических углах

$$\beta' = \arcsin\left(c_{l'}/c\right), \quad \beta'' = \arcsin\left(c_{t'}/c\right)$$

преломленные волны (продольная и поперечная соответственно) превращаются в неоднородные, т.е. соответствующая волна распространяется вдоль границы, фронт ее перпенди-

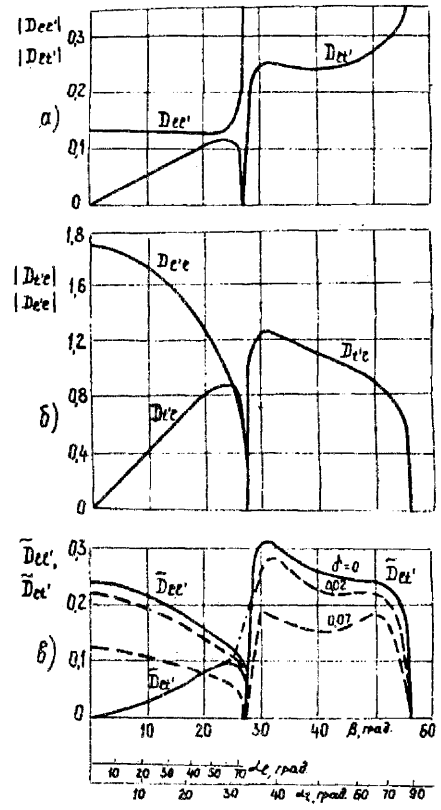


Рис. 3.5.6. Коэффициенты прозрачности для границы оргстекло - слой масла - сталь:
по амплитуде в прямом (*а*), обратном (*б*) направлениях и по энергии (*в*)
(штрихпунктирная линия - эксперимент)

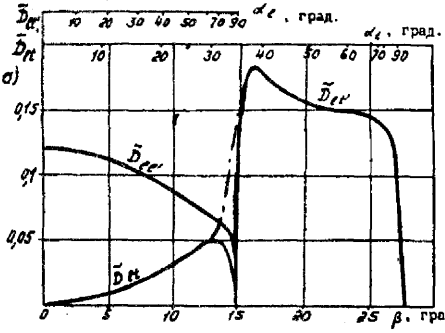


Рис. 3.5.7. Коэффициент прозрачности по энергии для границы вода - сталь
(штрихпунктирная линия - эксперимент)

кулярен границе, амплитуда уменьшается с глубиной.

При нормальном падении волны на границу трансформация отсутствует, и формулы для коэффициентов имеют вид:

$$R_{II} = \frac{z'-z}{z'+z};\ \tilde{R}_{II} = R_{II}^2;$$

$$D_{II'} = \frac{2z'}{z'+z};\ \tilde{D}_{II'} = \frac{4z'z}{(z'+z)^2},$$

где z и z' - характеристические сопротивления верхней и нижней сред для продольных волн.

Для **возбуждения и приема упругих колебаний** используют электроакустические преобразователи. Наиболее распространены пьезоэлектрические преобразователи. Они очень разнообразны и отличаются назначением, исполнением, рабочими частотами и другими параметрами.

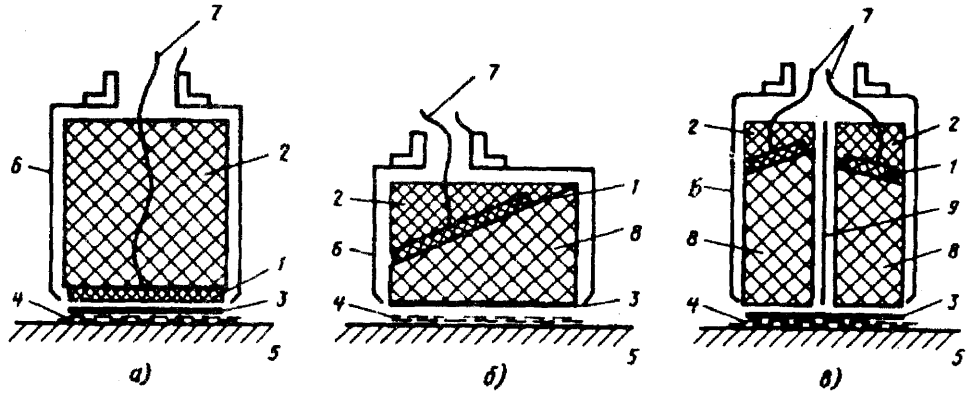


Рис. 3.5.8. Конструкция пьезопреобразователей:
а - прямого совмещенного; *б* - наклонного; *в* - раздельно-совмещенного;
1 - пьезоэлемент; *2* - демпфер; *3* - протектор; *4* - слой контактной жидкости; *5* - контролируемый объект;
6 - корпус; *7* - вывод; *8* - призма; *9* - акустический экран

Прямые совмещенные преобразователи (рис. 3.5.8, *а*) служат для излучения и приема продольных упругих волн. Обе эти функции выполняет один пьезоэлемент.

В раздельно-совмещенных преобразователях (рис. 3.5.8, *в*) для излучения и приема продольных волн используют разные пьезоэлементы, смонтированные в общем корпусе. Применяют также раздельные преобразователи, один из которых только излучает, другой только принимает упругие волны.

Для работы поперечными, поверхностными и волнами Лэмба служат *наклонные преобразователи* (рис. 3.5.8, *б*). Все эти волны возбуждаются в контролируемом изделии путем трансформации продольных волн, падающих на границу раздела "преобразователь - изделие" под различными углами. При приеме происходит обратная трансформация.

Применяют также другие пьезопреобразователи - *широкополосные, с регулируемыми углами наклона, фокусирующие, многоэлементные (матричные)* и т.п. Для передачи упругих волн между этими преобразователями и контролируемыми объектами необходимо наличие материальной среды, создающей акустический контакт. Этот контакт реализуется через:

тонкий слой жидкости (контактный способ);

слой жидкости толщиной h порядка длины волны λ в ней (щелевой способ);

толстый слой жидкости $h>>\lambda$ (иммерсионный способ);

слой эластичного пластика (сухой способ).

На низких частотах (до 60 - 100 кГц) применяют сухой точечный контакт через выпуклую поверхность наконечника преобразователя.

При решении специальных задач для излучения и приема упругих колебаний применяют бесконтактные преобразователи, в том числе:

электромагнитно-акустические (ЭМА), основанные на эффектах электромагнитного поля;

оптические, использующие лазерное возбуждение и интерференционный прием упругих колебаний;

пьезоэлектрические, излучающие и принимающие упругие волны через толстый ($h>>\lambda$) слой воздуха.

Однако по чувствительности бесконтактные преобразователи уступают пьезоэлектрическим с жидкостной связью с контролируемым объектом.

3.5.2. КЛАССИФИКАЦИЯ АКУСТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ

Акустические методы неразрушающего контроля делят на две большие группы - активные и пассивные методы (рис. 3.5.9).

Активные методы основаны на излучении и приеме упругих волн, пассивные - только на приеме волн, источником которых служит сам контролируемый объект.

Активные методы делят на методы прохождения, отражения, комбинированные (использующие как прохождение, так и отражение), импедансные и методы собственных частот.

Методы прохождения используют излучающие и приемные преобразователи, расположенные по разные или по одну сторону контролируемого изделия. Применяют импульсное или (реже) непрерывное излучение и анализируют сигнал, прошедший через контролируемый объект.

К методам прохождения относят:

амплитудный теневой метод, основанный на регистрации уменьшения амплитуды волны, прошедшей через контролируемый объект, вследствие наличия в нем дефекта (рис. 3.5.10, *а*);

временной теневой метод, базирующийся на регистрации запаздывания импульса, вызванного увеличением его пути в изделии при огибании дефекта (рис. 3.5.10, *б*); тип волны при этом не меняется;

велосимметрический метод, основанный на регистрации изменения скорости распространения дисперсионных мод упругих волн в зоне дефекта и применяемый при одностороннем и двустороннем доступе к контролируемому объекту (рис. 3.5.10, *в*). В этом методе обычно используются преобразователи с сухим точечным контактом. В варианте с односторонним доступом (рис. 3.5.10, *в*, верх) скорость возбуждаемой излучателем антисимметричной волны нулевого порядка (a_0) в отдельном дефектном слое меньше, чем в бездефектной зоне. При двустороннем доступе (рис. 3.5.10, *в*, внизу) в бездефектной зоне энергия передается продольной волной L, в зоне дефекта - волнами a_0, которые проходят больший путь и распространяются с меньшими скоростями, чем продольная волна. Дефекты отмечаются по изменению фазы или увеличению времени прохождения (только в импульсном варианте) по контролируемому изделию.

В ***методах отражения*** используют как один, так и два преобразователя; применяют импульсное излучение. К этой подгруппе относят следующие методы дефектоскопии.

Эхо-метод (рис. 3.5.11, *а*) основан на регистрации эхо-сигналов от дефекта. На экране индикатора обычно наблюдают посланный (зондирующий) импульс *I*, импульс *III*, отраженный от противоположной поверхности (дна) изделия (донный сигнал), и эхо-сигнал от дефекта *II*. Время прихода импульсов *II* и *III* пропорционально глубине залегания дефекта и толщине изделия. При совмещенной схеме контроля (рис. 3.5.11, *а*) один и тот же преобразователь выполняет функции излучателя и приемника. Если эти функции выполняют разные преобразователи, то схему называют раздельной.

Эхо-зеркальный метод основан на анализе сигналов, испытавших зеркальное отражение от донной поверхности изделия и дефекта, т.е. прошедших путь *АВСД* (рис. 3.5.11, *б*). Вариант этого метода, рассчитанный на выявление вертикальных дефектов в плоскости *EF*, называют методом *тандем*. Для его реализации при перемещении преобразователей *A* и *D* поддерживают постоянным значение $l_A + l_D = 2H \operatorname{tg}\alpha$; для получения зеркального отражения от невертикальных дефектов значение $l_A + l_D$ варьируют. Один из вариантов метода, называемый "*косой тандем*", предусматривает расположение излучателя и приемника не в одной плоскости (рис. 3.5.11, *б*, вид в плане внизу), а в разных плоскостях, но таким образом, чтобы принимать зеркальное отражение от дефекта. Еще один вариант, называемый *К-метод*, предусматривает расположение преобразователей по разные стороны изделия, например располагают приемник в точке *С*.

Дельта-метод (рис. 3.5.11, *в*) основан на приеме преобразователем для продольных волн *4*, расположенным над дефектом, рассеянных на дефекте волн, излученных преобразователем для поперечных волн *2*.

Дифракционно-временной метод (рис. 3.5.11, *г*), в котором излучатели *2* и *2'*, приемники *4* и *4'* излучают и принимают либо продольные, либо поперечные волны, причем могут излучать и принимать разные типы волн. Преобразователи располагают так, чтобы получать максимумы эхо-сигналов волн, дифрагированных на концах дефекта. Измеряют амплитуды и время прихода сигналов от верхнего и нижнего концов дефекта.

Реверберационный метод (рис. 3.5.11, *д*) использует влияние дефекта на время затухания многократно отраженных ультразвуковых импульсов в контролируемом объекте. Например, при контроле клееной конструкции с наружным металлическим слоем и внутренним полимерным слоем дефект соединения препятствует передаче энергии во внутренний слой, что увеличивает время затухания многократных эхо-сигналов во внешнем слое. Отражения импульсов в полимерном слое обычно отсутствует вследствие большого затухания ультразвука в полимере.

В *комбинированных методах* используют принципы как прохождения, так и отражения акустических волн.

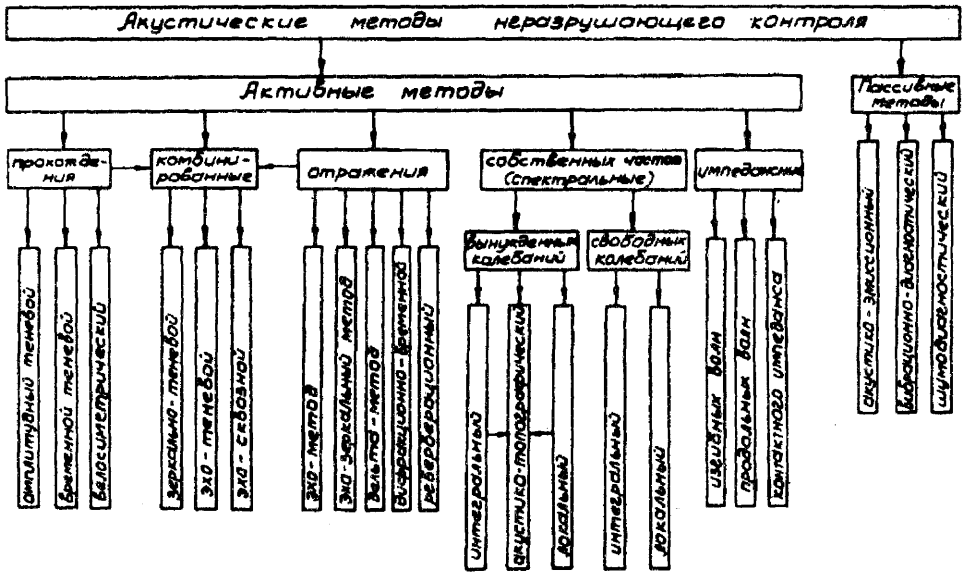


Рис. 3.5.9. Классификация акустических методов контроля

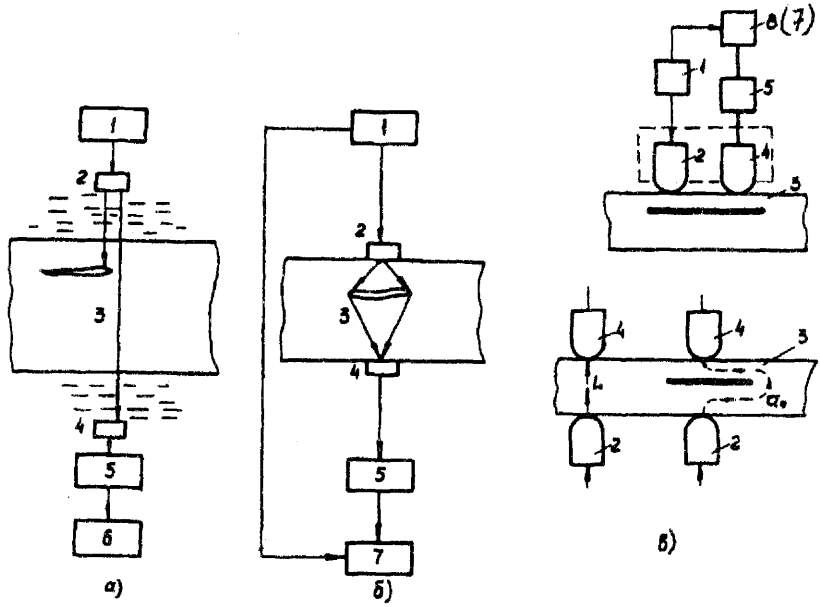


Рис. 3.5.10. Методы прохождения:
а - теневой; *б* - временной теневой; *в* - велосимметрический;
1 - генератор; *2* - излучатель; *3* - объект контроля; *4* - приемник; *5* - усилитель; *6* - измеритель амплитуды;
7 - измеритель времени пробега; *8* - измеритель фазы

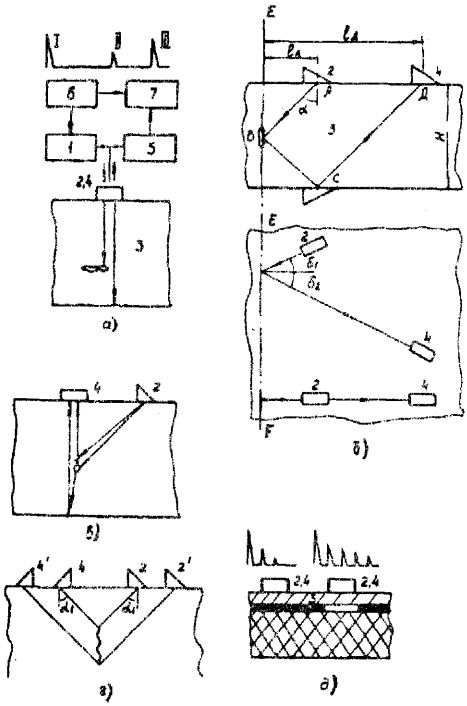


Рис. 3.5.11. Методы отражения:
а - эхо; *б* - эхо-зеркальный; *в* - дельта-метод; *г* - дифракционно-временной; *д* - реверберационный; *1* - генератор; *2* - излучатель; *3* - объект контроля; *4* - приемник; *5* - усилитель; *6* - синхронизатор; *7* - индикатор

Зеркально-теневой метод основан на измерении амплитуды донного сигнала. На рис. 3.5.12, *а* отраженный луч условно смещен в сторону. По технике выполнения (фиксирует эхо-сигнал) его относят к методам отражения, а по физической сущности контроля (измеряют ослабление сигнала, дважды прошедшего изделие в зоне дефекта) он близок к теневому методу.

Эхо-теневой метод основан на анализе как прошедших, так и отраженных волн (рис. 3.5.12, *б*).

В *эхо-сквозном методе* фиксируют сквозной сигнал, испытавший двукратное отражение в изделии, а в случае появления полупрозрачного дефекта - также сигналы, соответствующие отражениям волн от дефекта и испытавших также отражение от верхней и нижней поверхностей изделия. Большой непрозрачный дефект обнаруживают по исчезновению или сильному уменьшению сигнала, т.е. теневым методом.

Методы собственных частот основаны на измерении этих частот (или спектров) колебаний контролируемых объектов. Собственные частоты измеряют при возбуждении в изделиях как вынужденных, так и свободных колебаний. Свободные колебания обычно возбуждают механическим ударом, вынужденные - воздействием гармонической силы меняющейся частоты.

Различают интегральные и локальные методы. В интегральных методах анализируют собственные частоты изделия, колеблющегося как единое целое, в локальных - колебания отдельных его участков.

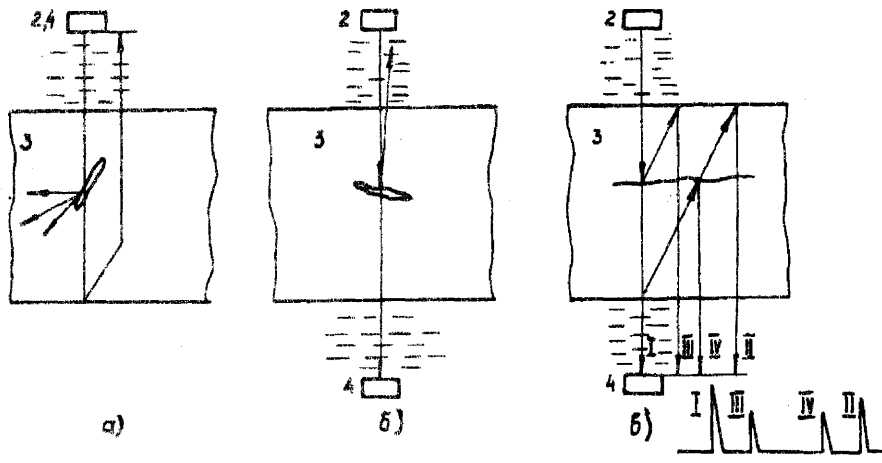


Рис. 3.5.12. Комбинированные методы, использующие прохождение и отражение:
а- зеркально-теневой; *б*- эхо-теневой; *в* - эхо-сквозной;
1 - дефект; *2* - излучатель; *3* - объект контроля; *4* - приемник

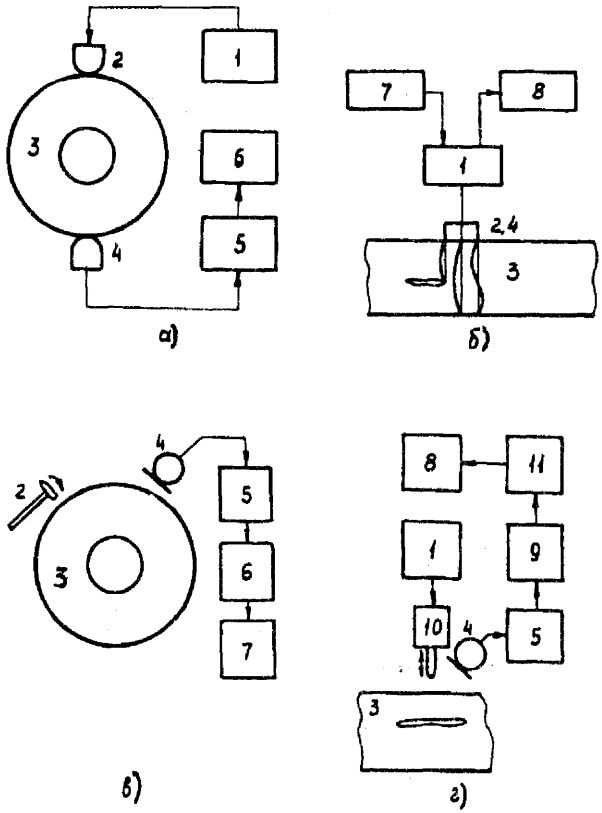


Рис. 3.5.13. Методы собственных частот с использованием вынужденных колебаний (*а* - интегральный; *б* - локальный) **и свободных** (*в* - интегральный; *г* - локальный)
1 - генератор непрерывных колебаний меняющейся частоты; *2* - излучатель; *3* - объект контроля; *4* - приемник; *5* - усилитель; *6* - индикатор резонанса; *7* - модулятор частоты; *8* - индикатор; *9* - спектроанализатор; *10* - ударный вибратор; *11* - блок обработки информации

Методы собственных частот, использующие ***вынужденные колебания***. *В интегральном методе* генератор *1* (рис. 3.5.13, *а*) регулируемой частоты соединен с излучателем *2*, возбуждающим упругие колебания (обычно продольные или изгибные) в контролируемом изделии *3*. Приемник *4* преобразует принятые колебания в электрический сигнал, который усиливается усилителем *5* и поступает на индикатор резонанса *6*. Регулируя частоту генератора *1*, измеряют собственные частоты изделия *3*. Диапазон применяемых частот до 500 кГц.

Локальный метод с использованием вынужденных колебаний (*ультразвуковой резонансный метод*) применяют в основном для измерения толщин. В изделии *3* (рис. 3.5.13, *б*) преобразователем *2*, *4* возбуждают упругие волны (обычно продольные) непрерывно меняющейся частоты. Фиксируют частоты, на которых отмечаются резонансы системы преобразователь - изделие. По резонансным частотам определяют толщину стенки изделия и наличие в нем дефектов. Дефекты, параллельные поверхности, меняют измеряемую толщину, а расположенные под углом к поверхности - приводят к исчезновению резонансов. Диапазон применяемых частот - до нескольких мегагерц.

Методы собственных частот, использующие ***свободные колебания***, также делят на интегральные и локальные.

В интегральном методе в изделии *3* (рис. 3.5.13, *а*) ударом молотка *1* возбуждают свободнозатухающие колебания. Эти колебания принимают микрофоном, усиливают и фильтруют полосовым фильтром, пропускающим только сигналы с частотами, соответствующими выбранной моде колебаний. Частоту измеряют модулятором *7*. Признаком дефекта служит изменение (обычно снижение) частоты. Как правило, используют основные собственные частоты, не превышающие 15 кГц.

В *локальном методе* (рис. 3.5.13, *г*) возбуждаемый генератором *1* вибратор *10* создает периодические удары по контролируемому изделию. Электрические сигналы с приемного микрофона *4* через усилитель *5* поступают на спектроанализатор *9*. Выделенный последним спектр принятого сигнала обрабатывается решающим устройством *11*, результат обработки появляется на индикаторе. Кроме микрофонов применяют пьезоприемники. Дефекты регистрируют по изменению спектра принятого импульсного сигнала. В отличие от интегрального метода контроль выполняется путем сканирования изделий. Обычный диапазон рабочих частот от 0,3 до 20 кГц.

Акустико-топографический метод имеет признаки интегрального и локального методов. Он основан на возбуждении в изделии интенсивных изгибных колебаний непрерывно меняющейся частоты и регистрации распределения амплитуд колебаний с помощью наносимого на поверхность порошка. Упругие колебания возбуждают преобразователем, прижимаемым к сухому изделию. Преобразователь питают от мощного (порядка 0,4 кВт) генератора непрерывно меняющейся частоты. Если собственная частота отделенной дефектом (расслоением, нарушением соединения) зоны попадает в диапазон возбуждаемых частот, колебания этой зоны усиливаются, покрывающий ее порошок смещается и концентрируется по границам дефектов, делая их видимыми. Диапазон используемых частот - от 40 до 150 кГц.

Импедансные методы используют зависимость импедансов изделий при их упругих колебаниях от параметров этих изделий и наличия в них дефектов. Обычно оценивают механический импеданс

$$Z = \dot{F} / \dot{v},$$

где $\dot{F}$ и $\dot{v}$ - комплексные амплитуды возмущающей силы и колебательной скорости соответственно. В импедансных методах используют изгибные и продольные волны.

При использовании изгибных волн преобразователь стержневого типа (рис. 3.5.14, *а*) содержит соединенный с генератором *1* излучающий *2* и приемный *4* пьезоэлементы. Через сухой точечный контакт преобразователь возбуждает в изделии *3* гармонические изгибные колебания. В зоне дефекта соединения модуль $|Z|$ механического импеданса $Z = |Z|e^{j\varphi}$ уменьшается и меняется его аргумент φ. Эти изменения регистрируются электронной аппаратурой. В импульсном варианте этого метода в системе преобразователь - изделие возбуждают импульсы свободно затухающих колебаний. Признаком дефекта служит уменьшение амплитуды и несущей частоты этих колебаний.

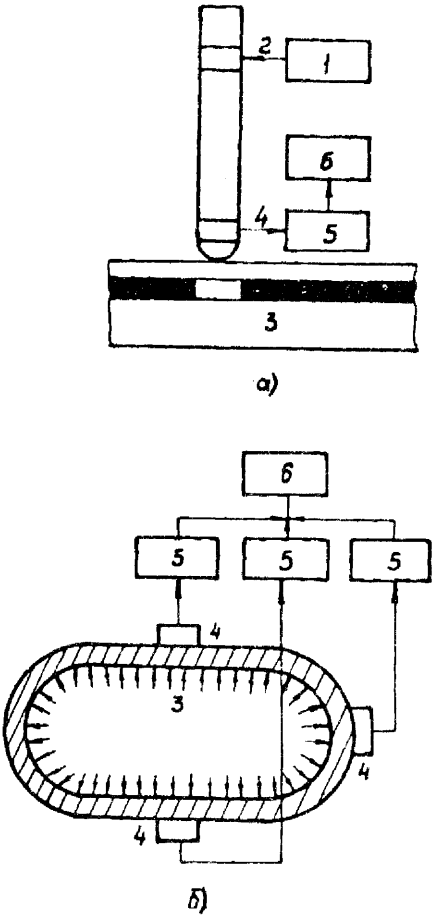


Рис. 3.5.14. Методы контроля:
а - импедансный; *б* - акустико-эмиссионный;
1 - генератор; *2* - излучатель; *3* - объект контроля;
4 - приемник; *5* - усилитель;
6 - блок обработки информации с индикатором

Кроме совмещенного преобразователя применяют раздельно-совмещенные преобразователи, имеющие в общем корпусе раздельные излучающий и приемный вибраторы. Эти преобразователи работают в импульсном режиме. При работе совмещенными преобразователями используют частоты до 8 кГц, раздельно-совмещенными - импульсы с несущими частотами 15 - 35 кГц.

В другом варианте в контролируемой многослойной конструкции с помощью плоского пьезопреобразователя возбуждают *продольные упругие волны* фиксированной частоты. Дефекты регистрируют по изменению входного электрического импеданса $Z_э$ пьезопреобразователя. Импеданс $Z_э$ определяется входным

акустическим импедансом контролируемой конструкции, зависящим от наличия и глубины залегания дефектов соединения между ее элементами. Изменения $Z_э$ представляют в виде точки на комплексной плоскости, положение которой зависит от характера дефекта. В отличие от методов, использующих изгибные волны, преобразователь контактирует с изделием через слой контактной смазки.

Метод контактного импеданса, применяемый для контроля твердости, основан на оценке механического импеданса зоны контакта алмазного индентора стержневого преобразователя, прижимаемого к контролируемому объекту с постоянной силой. Уменьшение твердости увеличивает площадь контактной зоны, вызывая рост ее упругого механического импеданса, что отмечается по увеличению собственной частоты продольного колеблющегося преобразователя, однозначно связанной с измеряемой твердостью.

Рабочие частоты твердомеров 25 - 80 кГц, диапазон измерений 20 - 68 HRC (50 - 990 HV). Ультразвуковые твердомеры портативны (1,5 - 3 кг) и позволяют измерять твердость в труднодоступных местах (зубья шестерен и т.п.).

Пассивные акустические методы основаны на анализе упругих колебаний волн, возникающих в самом контролируемом объекте.

Наиболее характерным пассивным методом является *акустико-эмиссионный метод* (рис. 3.5.14, *б*). Явление акустической эмиссии состоит в том, что упругие волны излучаются самим материалом в результате внутренней динамической локальной перестройки его структуры. Такие явления, как возникновение и развитие трещин под влиянием внешней нагрузки, аллотропические превращения при нагреве или охлаждении, движение скоплений дислокаций, - наиболее характерные источники акустической эмиссии. Контактирующие с изделием пьезопреобразователи принимают упругие волны и позволяют установить место их источника (дефекта).

Пассивными акустическими методами являются *вибрационно-диагностический* и *шумодиагностический*. При первом анализируют параметры вибраций какой-либо отдельной детали или узла (ротора, подшипников, лопатки турбины) с помощью приемников контактного типа, при втором - изучают спектр шумов работающего механизма, обычно с помощью микрофонных приемников.

По частотному признаку акустические методы делят на низкочастотные и высокочастотные. К первым относят колебания в звуковом и низкочастотном (до нескольких десятков кГц) ультразвуковом диапазонах частот. Ко вторым - колебания в высокочастотном ультразвуковом диапазоне частот: обычно от нескольких сот кГц до 20 МГц. Высокочастотные методы обычно называют ультразвуковыми.

Области применения методов. Из рассмотренных акустических методов контроля наибольшее практическое применение находит эхо-метод. Около 90 % объектов, контролируемых акустическими методами, проверяют эхо-методом. Применяя различные типы волн, с его помощью решают задачи дефектоскопии поковок, отливок, сварных соединений, многих неметаллических материалов. Эхо-метод используют также для измерения размеров изделий. Измеряют время прихода донного сигнала и, зная скорость ультразвука в материале, определяют толщину изделия при одностороннем доступе. Если толщина изделия неизвестна, то по данному сигналу измеряют скорость, оценивают затухание ультразвука, а по ним определяют физико-механические свойства материалов.

Зеркально-теневой метод используют вместо или в дополнение к эхо-методу для выявления дефектов, дающих слабое отражение ультразвуковых волн в направлении раздельно-совмещенного преобразователя.

Эхо-зеркальный метод также применяют для выявления дефектов, ориентированных перпендикулярно поверхности ввода.

Эхо-зеркальный метод в варианте "тандем" используют для выявления вертикальных трещин и непроваров при контроле сварных соединений. Дефекты некоторых видов сварки, например непровар при электронно-лучевой сварке, имеют гладкую отражающую поверхность, очень слабо рассеивающую ультразвуковые волны, но такие дефекты хорошо выявляются эхо-зеркальным методом. Дефекты округлой формы (шлаковые включения, поры) дают большой рассеянный сигнал и хорошо регистрируются совмещенным преобразователем.

Дельта и дифракционно-временной методы также используют для получения дополнительной информации о дефектах при контроле сварных соединений.

Для создания хорошего контакта приемного прямого преобразователя с поверхностью сварного соединения валик усиления зачищают. С помощью этого метода довольно точно определяют положение дефекта вдоль сварного шва, что важно для его автоматической регистрации.

Эхо-теневой метод применяют также при контроле сварных соединений. Например, при автоматическом контроле сварных соединений искатели располагают по обе стороны от шва и принимают как отраженные, так и прошедшие сигналы. Последние используют для контроля качества акустического контакта и обнаружения дефектов, ориентированных таким образом, что эхо-сигналы от них очень слабы.

Теневой и эхо-сквозной методы используют только при двустороннем доступе к изделию, для автоматического контроля изделий простой формы, например листов в иммерсионной ванне. Чувствительность теневого метода к дефектам в 10 - 100 раз меньше, чем эхометода в связи с большим влиянием помех. Применение эхо-сквозного метода в значительной мере устраняет этот недостаток.

Теневой метод применяют также для контроля изделий с большим уровнем структурной реверберации, т.е. шумов, связанных с отражением ультразвука от неоднородностей, крупных зерен, дефектоскопии многослойных конструкций и изделий из слоистых пластиков. При контроле тонких изделий с очень высоким уровнем структурных шумов более высокую чувствительность обеспечивает временной теневой метод. Теневой и временной методы позволяют обнаруживать крупные дефекты в материалах, где контроль другими акустическими методами затруднен или невозможен: крупнозернистой аустенитной стали, сером чугуне, бетоне, огнеупорном кирпиче.

Теневой метод применяют вместо эхометода при исследовании физико-механических свойств материалов с большим затуханием и рассеянием акустических волн, например при контроле прочности бетона по скорости ультразвука. Для этой цели применяют не только теневой метод, но (в более общем виде) метод прохождений. Например, излучатель и приемник располагают с одной стороны изделия, на одной поверхности и измеряют время и амплитуду сквозного сигнала головной волны.

Локальный метод вынужденных колебаний применяют для измерения малых толщин при одностороннем доступе. В настоящее время для ручного контроля применяют импульсные толщиномеры. Для автоматического измерения толщины стенок тонких труб лучший результат дает иммерсионный резонансный толщиномер.

Интегральный метод вынужденных колебаний применяют для определения модулей упругости материала по резонансным частотам продольных, изгибных или крутильных колебаний образцов простой формы, вырезанных из материала изделия, т.е. при разрушающих испытаниях.

Интегральный метод свободных колебаний используют для проверки бандажей вагонных колес или стеклянной посуды "по чистоте звона" с субъективной оценкой результатов на слух.

Реверберационный, импедансный, велосиметрический, акустико-топографический методы и локальный метод свободных колебаний используют в основном для контроля многослойных конструкций. Акустико-топографический метод применяют для обнаружения дефектов преимущественно в металлических многослойных конструкциях (сотовые панели, биметаллы и т.п.).

Вибрационно-диагностический и шумодиагностический методы служат для диагностики работающих механизмов. Метод акустической эмиссии применяют в качестве средства исследования материалов, конструкций, контроля изделий (например, при гидроиспытаниях) и диагностики во время эксплуатации. Его важными преимуществами перед другими методами контроля является то, что он реагирует только на развивающиеся, действительно опасные дефекты, а также возможность проверки больших участков или даже всего изделия без сканирования его преобразователем.

3.5.3. МЕТОДИКИ КОНТРОЛЯ МЕТАЛЛОВ

Контроль отливок. Ультразвуковой контроль отливок проводится эхо- и зеркально-теневым методами, обычно с помощью нормальных преобразователей. Дефекты литья (поры, раковины, шлаковые включения) имеют объемный характер и могут быть обнаружены при прозвучивании с разных сторон. Поэтому контроль ведут, как правило, в одном направлении по кратчайшему расстоянию от поверхности, удобной для ввода УЗК. Однако имеются опасные зоны, которые должны быть проверены в направлении, перпендикулярном к плоскости наиболее вероятного развития трещин. Кроме того, в отливках встречаются волосовидные дефекты, плохо отражающие ультразвук. О наличии таких дефектов судят по ослаблению донного сигнала.

Ввиду того, что поверхность отливок шероховатая и сложной формы, целесообразно применять специальные преобразователи для контроля грубой поверхности. Вогнутые переходные поверхности удобно контролировать преобразователями с локальной ванной в форме катка.

Ультразвуковому контролю следует подвергать стальные отливки после высокотемпературной термической обработки, измельчающей структуру. Частота ультразвуковых колебаний 1 - 2 МГц. Чувствительность дефектоскопа обычно настраивают по плоскодонным отражателям площадью 7 - 80 мм^2. Удовлетворительно контролируются отливки центробежного литья (например, трубы).

Чугун контролируется хуже, чем стальные отливки. Наибольшую чувствительность удается получить при контроле отбеленного чугуна и чугуна с шаровидным графитом. Значительно хуже контролируется чугун, особенно при наличии крупных графитных включений.

Эхо-метод применяют для обнаружения грубых дефектов в слитках из различных ме-

таллов и сплавов, предназначенных для изготовления изделий ответственного назначения. Простая форма слитка благоприятствует контролю. Однако слитки имеют крупнозернистую структуру, что требует уменьшения частоты и снижает чувствительность метода контроля. Слитки из углеродистой стали могут быть прозвучены на толщину до 1 м при частоте 0,25 - 1 МГц. Слитки из легированной стали прозвучиваются значительно хуже. Слитки из титановых и алюминиевых сплавов могут быть проконтролированы на глубину не более 1 м при частоте 1 - 1,5 МГц. Для обеспечения акустического контакта вдоль боковых поверхностей слитка зачищают полосы шириной 50 - 70 мм от окалины и других неровностей.

Контроль поковок и штамповок. Поковки (типа роторов и дисков турбин, заготовок штампов, станин, валов, деталей самолетов, в том числе из легких сплавов, и т.п.) контролируют эхо-методом. В этих изделиях могут быть выявлены флокены, остатки усадочных раковин, инородные включения, окисные плены, ликвационные скопления и другие внутренние дефекты, которые практически невозможно обнаружить просвечиванием. Контроль ведется на частоте 2 - 5 МГц эхо- и зеркально-теневым методами. Для ответственных изделий предусматривается прозвучивание каждого объема в трех взаимно перпендикулярных направлениях или близких к ним. Поковки менее ответственного назначения контролируют прямым преобразователем по поверхности, со стороны которой производится последний этап ковки, так как большинство дефектов расположено параллельно этой поверхности. Наклонными преобразователями контролируют участки, опасные с точки зрения возможного возникновения трещин, а также места, где обнаружены дефекты прямым преобразователем.

Уровень фиксации устанавливают в пределах 3 - 20 мм^2. Недопустимыми считают дефекты с эквивалентной площадью 3 - 70 мм^2 в зависимости от толщины изделия. Кроме того, накладываются ограничения на протяженность дефектов, их число и суммарную эквивалентную площадь на определенной площади поверхности изделия.

Штамповки имеют часто сложную форму. Их контроль проводится эхо-методом продольными волнами при частоте 2 - 5 МГц. Волны рекомендуется направлять перпендикулярно к поверхности металла. В этом случае эффективно применение иммерсионных установок, в которых преобразователь автоматически ориентируется в требуемом направлении. Для контроля некоторых типов штамповок (лопаток турбин и компрессоров, камер сгорания турбин) успешно используют волны Рэлея и Лэмба.

Контроль проката и проволоки. Листы и плиты толщиной 6 - 60 мм контролируют теневым, эхо-, эхо-сквозным и зеркально-теневым методами на частотах 2 - 3 МГц. При контроле эхо-методом чувствительность фиксации устанавливают по плоскодонным отверстиям площадью 7; 19,6; 50,2 мм^2. Для других методов чувствительность фиксации устанавливается по ослаблению донного или сквозного сигнала.

Листы толщиной более 60 мм контролируют эхо- (совместно с зеркально-теневым) или эхо-сквозным методом. Преимуществом последнего является независимость показаний прибора от перемещения листа между преобразователями при иммерсионном контроле.

Листы толщиной 3 мм и менее эффективно контролировать эхо- и теневым методом с использованием волн Лэмба. Одним или двумя преобразователями можно проконтролировать полосу шириной 0,3 - 0,5 м при скорости ее движения 0,5 м/с.

Контроль листов и заготовок при 900 - 1000^0 С позволяет своевременно выявить часть металла, подлежащую обрезке. Для возбуждения и приема УЗК применяют ЭМА-способ или помещают преобразователи в канал, расточенный в валках прокатного стана. Акустический контакт при этом достигается путем сильного прижатия валка к поверхности листа или заготовки.

Прутки и заготовки круглого и прямоугольного сечений контролируют эхо-методом прямыми (иногда также наклонными) преобразователями. Прокат делят на четыре группы качества в зависимости от условий протяженности дефектов. В случае, если требуется контролировать только центральную часть прутка, используют три преобразователя, расположенных вокруг прутка с углом между осями 60^0. Пруток перемещают поступательно, сканирования по всей поверхности не производят.

Бесшовные металлические трубы проверяют эхо-методом с помощью иммерсионных установок с локальными ваннами.

Для проверки всего металла трубы необходимо обеспечить взаимное перемещение преобразователя и трубы по винтовой линии. Более производителен способ, при котором преобразователи вращаются вокруг поступательно-движущейся трубы. Установка, в которой труба совершает одновременно вращательное и поступательное движения, менее производительная, но позволяет проверять трубы в более широком диапазоне диаметров.

Для контроля проволоки применяют волны стержневого типа. Проволока проходит через локальную иммерсионную ванну, в которой проверяется теневым или эхо-методом с производительностью 0,5 - 1 м/с.

Прокатом сложного профиля являются рельсы. Их контролируют теневым, зеркально-теневым и эхо-методами.

При контроле рельсов, уложенных в пути, ультразвук вводится со стороны поверхности катания головки рельса, а при изготовлении рельс - с других поверхностей.

Наиболее распространенные дефекты в шейке рельса и вблизи мест ее перехода в головку и подошву - вертикальные и горизонтальные трещины и расслоения. Их выявляют зеркально-теневым методом с помощью прямого преобразователя по первому и второму донному импульсам или по их отношению.

Контроль основного металла головки по всей длине рельса осуществляется наклонным преобразователем с углом ввода луча $\alpha \approx 60^0$. Для выявления поперечных трещин, обычно расположенных в боковой части головки, преобразователь поворачивают относительно продольной оси рельса на угол $\gamma = 30 \div 37^0$. При этом дефекты обнаруживают лучом, отраженным от нижней поверхности головки рельса. Дефекты головки рельса выявляют также с помощью низкочастотных (около 100 кГц) волн, подобных стержневым. Они заполняют все сечение головки рельса, которая является как бы волноводом. Из одного положения преобразователя проверяется участок рельса длиной до 15 - 30 м.

Полный контроль рельсов зеркально-теневым и эхо-методами, а также выявление трещин вблизи болтовых отверстий проводят специализированными приборами. Указанная схема контроля реализуется также в вагонах-дефектоскопах, производительность которых достигает 10 м/с.

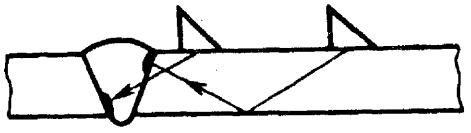


Рис. 3.5.15. Схема контроля стыкового сварного шва прямым и однократно отраженным лучами

Контроль сварных соединений. Ультразвуковой контроль сварных соединений проводят, как правило, эхо-методом с включением наклонного преобразователя по совмещенной схеме. Значительно реже применяют теневой и зеркально-теневой с раздельным и раздельно-совмещенным включением преобразователей соответственно и эхо-зеркальный методы. Угол ввода колебаний выбирают таким, чтобы расстояние от преобразователя до шва было как можно меньшим, а направление луча - возможно близким к нормали по отношению к сечению, в котором площадь ожидаемых дефектов максимальна (рис. 3.5.15). Контроль ведут прямым и однократно отраженным лучами. Двукратно и многократно отраженным лучом контролируют в случае, когда размеры усиления не позволяют прозвучивать его прямым или однократно отраженным лучом при оптимальном угле ввода луча.

Стыковые сварные соединения контролируют эхо-методом преобразователем, включенным по совмещенной схеме.

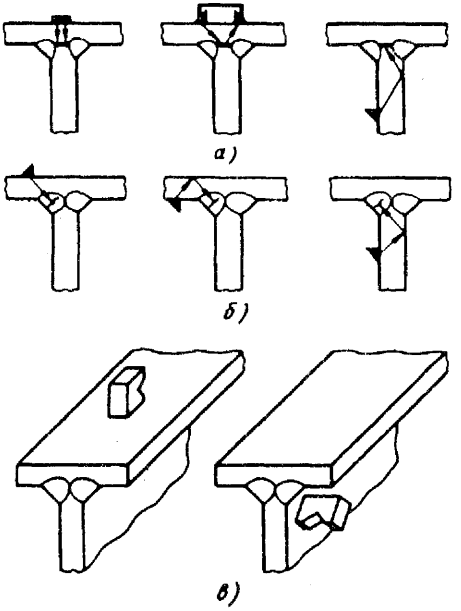


Рис. 3.5.16. Схемы контроля тавровых сварных соединений при выявлении дефектов:
а - непровара в корне шва; *б* - продольных трещин, пор и шлака; *в* - поперечных трещин

Тавровые соединения с полным проваром корня контролируют по схемам, приведенным на рис. 3.5.16. Предпочтительной является схема, приведенная на рис. 3.5.16, *б*.

Швы *контактной сварки* контролируют эхо-методом. Для более надежного выявления дефектов швы, выполненные сваркой оплавлением, прозвучивают по схеме тандем, поскольку дефекты в них расположены строго вертикально.

Эхо-метод с одним преобразователем применяют для контроля контактной сварки рельсов.

Сварные точки контролируют зеркально-теневым методом. Признаком отсутствия сварки является приход донного сигнала от первого листа к приемному преобразователю. Перемещая преобразователь по поверхности изделия, определяют размеры сварной точки.

Контроль сварных соединений в большинстве случаев осуществляют при сканировании преобразователем вручную (ручной контроль). При ручном контроле вследствие на-

рушения заданных параметров сканирования могут быть пропущены дефекты с малыми условными размерами. Для повышения вероятности обнаружения малых дефектов применяют приспособления для соблюдения параметров ручного сканирования и устройства механизированного и автоматизированного контроля.

Автоматический контроль целесообразен для протяженных сварных швов, так как для швов малой протяженности затраты на подготовку, установку и настройку аппаратуры неоправданно велики. Тонкие швы (до 5 - 6 мм) контролируют одним, а более толстые швы (20 - 40 мм) - несколькими преобразователями, захватывающими всю толщину шва, так что поперечное сканирование не требуется. Более толстые швы автоматически контролируют с продольно-поперечным сканированием.

3.5.4. МЕТОДИКА КОНТРОЛЯ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ И МНОГОСЛОЙНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Неметаллические материалы имеют ряд особенностей, влияющих на условия их контроля. Такие их свойства, как гетерогенность (бетон, горные породы), анизотропия (стекло-, угле- и органопластики), значительные коэффициенты затухания упругих волн усложняют контроль изделий из этих материалов.

Малые толщины отдельных слоев, резкие различия свойств применяемых в них материалов (от стали до пенопласта) и другие особенности многослойных конструкций затрудняют применение традиционных акустических методов. Поэтому для контроля многослойных конструкций часто используют *специальные низкочастотные акустические методы* - импедансный, локальный метод свободных колебаний, акустико-топографический, велосимметрический и др. Кроме того, применяют эхометод и его модификации, метод прохождения, акустико-эмиссионный метод и др.

Контроль керамики и фарфора. Эти материалы по акустическим свойствам (затуханию, скорости звука, характеристическому импедансу) близки к металлам. Поэтому их контролируют в основном эхо-методом. В некоторых видах керамики необходимо выявлять очень мелкие дефекты (порядка 70 - 100 мкм). В этих случаях применяют высокие частоты 50 - 200 Мгц.

Контроль шлифовальных кругов проводят путем измерения их собственных частот, по которым определяют скорость звука в материале, коррелирующую с эксплуатационными свойствами изделия. Частоты измеряют в режимах свободных или вынужденных колебаний. Тем же методом проверяют качество отливок.

Контроль резиновых шин выполняют иммерсионным теневым методом на специальных установках. Шину частично погружают в ванну с жидкостью. Цилиндрический излучатель помещают в центре полости шины. Снаружи располагают ряд приемников упругих колебаний, соединенных с многоканальной аппаратурой. Вращая шину, регистрируют все ее дефекты. Контроль ведут на частотах 100 - 150 кГц.

Контроль листов из полимерных композиционных материалов (стекло-, угле- и органопластиков) проводят разными методами.

Ультразвуковой амплитудный теневой метод в иммерсионном варианте используют для выявления расслоений, пористости и разрушений вследствие ударов. В зависимости от свойств материала и его толщины контроль осуществляют на частотах от 0,5 до 25 МГц. Применяют также катящиеся преобразователи с сухим контактом через мягкий полиуретан или резину при рабочей частоте до 1 МГц.

Возможен контроль листов велосиметрическим методом в варианте с двусторонним доступом к изделию и регистрацией дефектов по изменению фазы принятой волны.

Импедансным методом с раздельно-совмещенным преобразователем выявляют расслоения в листах толщиной до 10 - 12 мм. Для проверки на всю толщину листа необходим контроль с двух сторон последовательно, причем с каждой стороны выявляют расслоения на глубинах более 0,5 общей толщины.

Контроль многослойных конструкций. Элементы конструкций соединяются клеями, пайкой, сваркой и другими способами. Характерные дефекты многослойных конструкций - зоны нарушения соединений между элементами и расслоения в неметаллических слоях, дефекты сотовых заполнителей.

Сотовые панели с обшивками из полимерных композиционных материалов (ПКМ) и металлов проверяют преимущественно низкочастотными акустическими методами, не требующими применения контактной смазки.

Импедансным методом выявляют дефекты соединения обшивки с сотовым заполнителем, разрушения этого заполнителя и расслоения в обшивках из ПКМ. Применяют как совмещенные, так и раздельно-совмещенные преобразователи. Последние позволяют обнаруживать дефекты под более толстыми обшивками (до 3 мм для алюминиевых сплавов). С увеличением толщины обшивки чувствительность уменьшается. Для сотовых панелей, как и других конструкций с периодической структурой заполнителя, характерно периодическое изменение механического импеданса $Z_н$ в зонах доброкачественного соединения. Так, в сотовых панелях значения $|Z_н|$ минимальны над центрами ячеек и максимальны над их

вершинами. Соответственно изменяется уровень выходного сигнала преобразователя (рис. 3.5.17). Если сигнализатор дефектов срабатывает при уровне ниже отмеченного цифрой *I*, то регистрируются только дефектные зоны. При уровне *II* срабатывания сигнализатора сотовые ячейки регистрируются как дефекты. Разброс показаний в доброкачественных зонах тем больше, чем меньше жесткость обшивки и крупнее ячейки заполнителя. При неблагоприятных параметрах импедансы изделия в дефектных зонах и над центрами ячеек соизмеримы, что затрудняет контроль вручную. Указанные трудности устраняются при механизированном контроле с записью результатов.

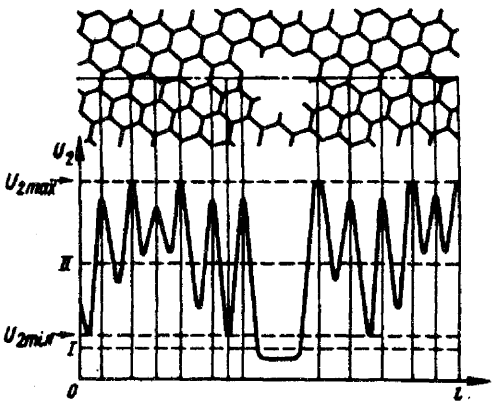


Рис. 3.5.17. Изменение амплитуды сигнала на выходе преобразователя при контроле сотовой панели (U_{2max} и U_{2min} - максимальный и минимальный уровни сигнала в доброкачественной зоне изделия)

Для механизации контроля используют установки, обеспечивающие сканирование изделия по заданной программе и запись результатов контроля. Диаграмма записи представляет собой план или развертку изделия в определенном масштабе и позволяет определить размеры, форму и расположение выявленных дефектов.

Применение записи с прорисовкой сот позволяет контролировать панели, проверка которых вручную затруднена вследствие соизмеримости механических импедансов на дефектах и над центрами ячеек. При выключении записи на более низком уровне сотовый заполнитель не прорисовывается.

Механизация повышает надежность контроля (исключается влияние оператора) и дает объективный документ о его результатах.

При контроле раздельно-совмещенными преобразователями следует учитывать неоднозначную зависимость выходного сигнала от импеданса нагрузки. Ее результат - увеличение уровня сигнала при обнаружении относительно глубоко залегающих дефектов и уменьшение этого уровня в зонах дефектов, близких (0,2 - 0,5 мм) к поверхности. Эта особенность учтена в импульсных дефектоскопах, АСД которых имеют верхний и нижний пороги срабатывания. В случаях, когда возможно обнаружение тех и других дефектов, используют оба порога.

Благодаря портативности (0,5 - 1,5 кг) и простоте в эксплуатации импульсные импедансные дефектоскопы используют для контроля сотовых конструкций авиационной техники в условиях эксплуатации.

Метод свободных колебаний (локальный) также позволяет выявлять дефекты сотовых конструкций. Он превосходит импедансный метод при выявлении дефектов под толстыми (более 2,5 мм для алюминиевых сплавов) обшивками и дефектов под противоположной обшивкой. Однако аппаратура для контроля этим методом тяжелее и сложнее импедансных дефектоскопов, а контроль сопровождается значительным шумом, ухудшающим условия работы оператора.

Сотовые панели контролируют также (главным образом за рубежом) теневым и эхометодами. Контроль амплитудным теневым методом ведут в иммерсионных ваннах (что требует защиты от проникновения воды в сотовый заполнитель) либо используют катящиеся преобразователи с сухим контактом через слой мягкого пластика.

При контроле эхо-методом о дефектах соединения обшивки с заполнителем судят по форме отраженного импульса - в зоне дефекта его длительность увеличивается. Контроль ведут на высоких частотах (10 - 25 МГц), используют иммерсионный или струйный способ акустического контакта.

Контроль конструкций типа силовой каркас - неметаллическое покрытие. В таких конструкциях силовые каркасы выполняют из металлов или ПКМ. Полимерные покрытия (внутренние и внешние) обычно имеют толщины от 1 мм и более.

Дефекты соединений металлических каркасов с внутренними неметаллическими покрытиями или заполнителями при доступе со стороны каркаса обнаруживают реверберационным методом. Ультразвуковые импульсы вводят в металл. Дефекты соединения с покрытием отмечают по увеличению времени затухания импульсов, многократно отраженных в слое металла. Реверберационный ме-

тод применяют при толщине каркаса более 1 - 2 мм. Используют частоты 5 - 20 МГц. Дефекты в покрытии (расслоения и др.) при этом не выявляются. При толщинах каркаса менее 1 - 2 мм возможно применение низкочастотных акустических методов.

При доступе со стороны полимерного покрытия толщиной до 12 - 15 мм изделия контролируют низкочастотными методами - импедансным, локальным методом свободных колебаний, велосиметрическим. При этом выявляют не только зоны нарушения соединения слоев, но и расслоения в полимерном покрытии. С увеличением толщины покрытия чувствительность снижается.

Конструкции, содержащие слои из материалов с низкими модулями упругости (резина, пенопласт и т.п.), при одностороннем доступе контролируют локальным методом свободных колебаний. При контроле со стороны резины толщиной до 15 мм выявляются зоны нарушений ее соединения с каркасом. Конструкции в виде обшивок, приклеенных к пенопласту, контролируют преимущественно тем же методом со стороны обшивки. С увеличением плотности и жесткости пенопласта чувствительность возрастает.

Пакет с пенопластовым заполнителем при двустороннем доступе контролируют амплитудным теневым методом с катящимися преобразователями на частотах порядка 40 - 100 кГц.

Глава 3.6

МАГНИТНЫЕ МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ

3.6.1. ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ

Магнитный вид неразрушающего контроля применяют в основном для контроля изделий из ферромагнитных материалов, т.е. из материалов, которые способны существенно изменять свои магнитные характеристики под воздействием внешнего (намагничивающего) магнитного поля. Операция намагничивания (помещения изделия в магнитное поле) при этом виде контроля является обязательной.

Основные информативные параметры:
коэрцитивная сила,
намагниченность,
индукция (остаточная индукция),
магнитная проницаемость,
напряженность,
эффект Баркгаузена.

По способу получения первичной информации различают **следующие методы магнитного вида контроля**:
магнитопорошковый (МП),
магнитографический (МГ),
феррозондовый (ФЗ)
эффекта Холла (ЭХ),
индукционный (И),
пондеромоторный (ПМ),
магниторезисторный (МР).

С их помощью можно осуществить контроль:
сплошности (методами дефектоскопии) (МП, МГ, ФЗ, ЭХ, И);
размеров (ФЗ, ЭХ, И, ПМ);
структуры и механических свойств (ФЗ, ЭХ, И).

Из перечисленных методов только магнитопорошковый требует обязательного участия в контрольных операциях человека; остальные методы позволяют получать первичную информацию в виде электрических сигналов, что делает возможным полную автоматизацию процессов контроля. Методы МП и МГ обнаружения несплошностей являются контактными, т.е. требуют соприкосновения преобразователя (магнитный порошок или магнитная лента) с поверхностью изделия; при остальных методах контроля съем информации осуществляется бесконтактно (хотя и на достаточно близких расстояниях от поверхности).

С помощью магнитных методов могут быть выявлены закалочные и шлифовочные трещины, волосовины, закаты, усталостные трещины и другие поверхностные дефекты шириной раскрытия несколько микрометров. Такие методы, как ФЗ, ЭХ, И, МГ, можно использовать на грубых поверхностях, при этом минимальная глубина выявляемых дефектов составляет трехкратную высоту шероховатостей поверхности.

Из геометрических параметров с помощью магнитных методов наиболее часто определяют толщину немагнитных покрытий на магнитной основе, толщину стенок изделий из магнитных и немагнитных материалов.

Контроль структуры и механических свойств изделий осуществляют путем установления корреляционных связей между контролируемым параметром (температурой закалки и отпуска, твердостью и т.д.) и какой-либо магнитной характеристикой (или несколькими). Успешно контролируется состояние поверхностных слоев (качество поверхностной закалки, азотирования и т.д.), а также наличие α-фазы.

Основные понятия и термины. *Намагниченность* есть векторная физическая величина, характеризующая состояние вещества при его намагничивании (воздействии на него магнитного поля H). Количественно она равна

$$M = \lim_{V \to 0} \frac{\sum m}{V},$$

где V - объем вещества; m - элементарный магнитный момент.

Намагниченность, как и магнитное поле, измеряется в А/м.

Магнитной индукцией называется силовая характеристика магнитного поля (величина векторная):

$$B = \mu_0 (H + M), \qquad (1)$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м - магнитная постоянная; H - напряженность магнитного поля. Единица измерения магнитной индукции - тесла (Тл).

Магнитная восприимчивость - безразмерная величина χ_m, характеризующая способность вещества (магнетика) намагничиваться в магнитном поле. Для изотропного магнетика

$$\chi_m = M / H. \qquad (2)$$

У диамагнетиков $\chi_m < 0$, у парамагнетиков $\chi_m > 0$, у ферромагнетиков $\chi_m >> 0$ (10^4 и более).

Кривыми намагничивания называют графические изображения функции $B = f(H)$. В зависимости от способа получения этих функций различают несколько типов кривых намагничивания:

начальная - получают постепенным увеличением H из состояния $B = 0$ и $H = 0$ до B_{max};

безгистерезисная (идеальная) - получают так же, но при измерении индукции в каждой точке кривой намагничивания при воздействии переменным полем с убывающей до нуля амплитудой (возможны другие воздействия, например механические, облегчающие процесс намагничивания);

основная (коммутационная) - получают при циклическом перемагничивании (кривая является местом вершин симметричных петель гистерезиса).

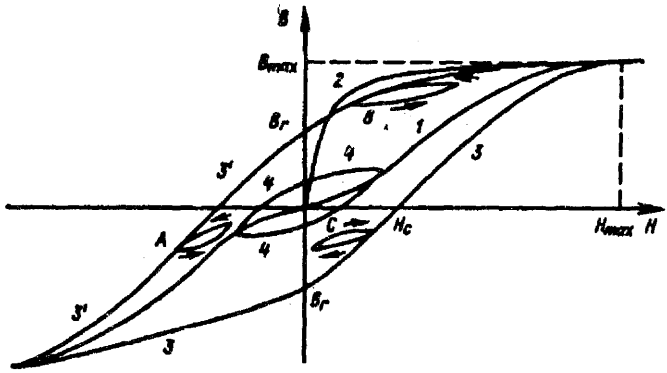


Рис. 3.6.1. Петли магнитного гистерезиса:
1 - основная кривая намагничивания; *2* - идеальная кривая намагничивания; *3*, *3'* - предельная петля гистерезиса; *4* - частный цикл гистерезиса; *A*, *B*, *C* - частные петли гистерезиса (*A*, *B* - частные петли возврата); *3* - восходящая ветвь гистерезиса, *3'* - нисходящая

Гистерезис. При циклическом перемагничивании ферромагнетика функция $B(H)$ образует петлю магнитного гистерезиса (рис. 3.6.1). Различают предельную петлю гистерезиса, получаемую переключением H_m (при $H > H_m$). Если перемагничивание производится не из состояния $B = 0$, $H = 0$, то имеют место частные петли гистерезиса; амплитуда перемагничивающего поля $H < H_m$(см. рис. 3.6.1). Эти петли гистерезиса являются симметричными. При уменьшении размагничивающего поля получают частные петли возврата.

Магнитной индукцией насыщения B_s называют индукцию, соответствующую максимуму H (дальнейшее увеличение B с ростом H осуществляется только за счет изменения (приращения) H).

Остаточной магнитной индукцией B_r называют индукцию, которая остается в предварительно намагниченном до насыщения материале после снятия магнитного поля.

Коэрцитивная сила H_c - напряженность магнитного поля, необходимая для полного размагничивания предварительно намагниченного ферромагнетика (получения $B = 0$ по предельной петле гистерезиса). Различают H_c по индукции и H_c по намагниченности H_{cM}. Их значения различаются существенно только для магнитотвердых материалов [с $H_c >$ (800 + 8000) А/м].

Магнитная проницаемость. Относительная магнитная проницаемость μ - безразмерная физическая величина, характеризующая магнитные свойства магнетиков: $\mu = 1 + \chi_m$. Из (1) и (2) имеем:

$$B = \mu_0(H + \chi_m H) = \mu_0 (1 + \chi_m)H = \mu_0 \mu H. \quad (3)$$

Величину $\mu_a = \mu_0\mu$ называют абсолютной магнитной проницаемостью. Зависимость магнитной проницаемости от напряженности магнитного поля показана на рис. 3.6.2. Различают максимальную μ_{max}, начальную $\mu_{нач}$ и дифференциальную μ_d магнитную проницаемость:

$$\mu_{нач} = \lim_{H \to 0} \frac{B}{\mu_0 H}; \quad \mu_d = \frac{dB}{\mu_0 dH}. \quad (4)$$

Нормальной проницаемостью называют величину μ, полученную из кривой *1* (рис. 3.6.2). При перемагничивании по петле гистерезиса используют значения μ_d, при этом зависимость $\mu_d(H)$ для восходящей и нисходящей ветвей разная.

Коэффициент размагничивания. При намагничивании изделий разомкнутой формы во внешнем поле H_e на их концах образуются полюса, создающие размагничивающее поле H_p, так что поле внутри изделия

$$H_i = H_e - H_p. \quad (5)$$

Приближенно

$$H_p = NM, \quad (6)$$

где N - коэффициент размагничивания (по намагниченности).

Магнитная проницаемость тела $\mu_т = B/\mu_0 H_e$. С учетом формул (3), (5) и (6) имеем

$$\mu_т = \frac{1}{1 + N(\mu - 1)}\mu. \quad (7)$$

При $\mu \to \infty$ $\mu_т = 1/N = \mu_ф$, где $\mu_ф$ - магнитная проницаемость формы, зависящая в основном от геометрии изделия. Для вытянутого сплюснутого эллипсоида с главными полуосями $a >> b >> c$

$$\mu_ф = \frac{a^2}{bc\left(\ln\frac{4a}{b+c} - 1\right)}; \quad (8)$$

для проволок $b = c = 0{,}5\ D$, $a/b = l/D = \lambda$ и

$$\mu_ф = \frac{\lambda^2}{\ln 2\lambda - 1}, \quad (9)$$

или приближенно

$$\mu_ф = 0{,}25\lambda^2.$$

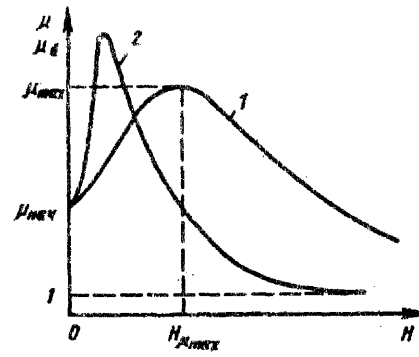


Рис. 3.6.2. Зависимость магнитной проницаемости μ (1) и дифференциальной магнитной проницаемости μ_d (2) от напряженности поля H

3.6.2. МАГНИТНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

В подавляющем большинстве случаев при магнитном контроле приходится иметь дело с измерением или индикацией магнитных полей вблизи поверхности изделий. В магнитопорошковых установках применяются различные порошки.

Магнитные порошки служат для визуального определения магнитных полей рассеяния над дефектами в магнитопорошковой дефектоскопии. На изолированную частицу в неоднородном магнитном поле вдоль оси x действует сила

$$F = \chi_m V H\, dH/dx,$$

где χ_m и V - магнитная восприимчивость и объем частицы. Следует иметь в виду, что во внешнем (намагничивающем) поле частицы обычно не существуют изолированно, а вследствие магнитной коагуляции образуют цепочки, длина которых определяется многими причинами, в том числе длительностью воздействия поля, вязкостью среды, в которую помещен порошок, и т.д.

Применяемые в дефектоскопии порошки по составу, физическим свойствам подразделяются на четыре вида:

1) железные порошки, получаемые термическим разложением пентакарбонила железа $Fe(Co)_5$ или диспергированием железа электрической дугой в керосине;

2) порошки, получаемые в шаровых мельницах измельчением окалины, возникающей при горячей обработке стали;

3) порошки технического и синтетического магнетика;

4) порошки ферромагнитной окиси железа, получаемые окислением магнетика.

Наибольшее распространение получили черный магнитный порошок, представляющий собой измельченную окись-закись железа Fe_3O_4 и буровато-красный порошок - γ-окись железа (γ-Fe_2O_3).

Для контроля деталей с темной поверхностью используют светлые порошки (с добавлением алюминиевой пудры ПАК-3) либо люминесцентные магнитные порошки. Распространенный люминесцентный магнитный порошок на 100 г γ-Fe_2O_3 содержит 15 г люминофора-люмогена светло-желтого цвета. Люминесцентные порошки используют при контроле как по темной, так и по светлым поверхностям, но при этом место контроля должно быть оборудовано ультрафиолетовым освещением.

Большое значение имеет размер частиц порошка. Средний размер одного зерна 0,1 - 60 мкм. Магнитные пасты, предназначенные для разведения в жидкости, кроме порошков содержат различные смачивающие, антикоррозионные и другие присадки.

Для улучшения условий осаждения порошка над дефектом применяют магнитные суспензии, представляющие собой взвесь магнитных частиц в жидкой среде. В большинстве случаев используют водные и масляные магнитные суспензии. Наиболее распространенные составы (г) водных магнитных суспензий следующие.

1.	Черный магнитный порошок	25±5
	или люминесцентный магнитный порошок	4±1
	Хромпик калиевый ($K_2Cr_2O_7$)	4±1
	Сода кальцинированная	10±1
	Эмульгатор ОП-7 или ОП-10	5±1
	Вода	1 л
2.	Черный магнитный порошок	25±5
	или люминесцентный магнитный порошок	4±1
	Нитрит натрия (химически чистый)	15±1
	Эмульгатор ОП-7 или ОП-10	5±1
	Вода	1 л
3.	Черный магнитный порошок	25±5
	или люминесцентный магнитный порошок	4±1
	Мыло хозяйственное*	1±0,5
	Сода кальцинированная	12±2
	Вода	1 л

* Мелко наструганное мыло растворить в горячей воде (50 - 70^0 С) и влить в содовый раствор после охлаждения до 20^0 С.

Состав 3 не вызывает коррозии высокопрочных сталей без покрытий. Состав 2 вызывает коррозию деталей, подвергнутых пескоструйной обработке, а также деталей с покрытиями из цинка и кадмия.

Масляные и керосино-масляные суспензии применяют следующих составов:

1.	Черный магнитный порошок, г ..	25±5
	или люминесцентный магнитный порошок, г	4±1
	Масло РМ, л	1
	Стабилизирующая присадка Акор-1, % от массы порошка	0,5-5
2.	Черный магнитный порошок, г ..	25±5
	Масло трансформаторное, л	0,5
	Керосин, л	0,5
	Стабилизирующая присадка Акор-1, % от массы порошка	0,5-5

В зависимости от объекта контроля применяют суспензии с другой концентрацией порошков, начиная с 5 г/л и выше. Низкие концентрации используют при контроле резьбы, деталей со структурной полосчатостью и т.п.

Методы и средства намагничивания и размагничивания деталей. Для намагничивания деталей применяют постоянный (двухполупериодный выпрямленный, трехфазный выпрямленный), переменный, однополупериодный выпрямленный и импульсный токи.

Дефекты оптимально обнаруживаются в случае, когда направление намагничивания контролируемой детали перпендикулярно направлению дефекта. Поэтому простые детали намагничивают в двух направлениях, а детали сложной формы - в нескольких направлениях.

Для создания оптимальных условий контроля применяют три способа намагничивания:

циркулярное,
продольное (или полюсное),
комбинированное.

Циркулярное намагничивание осуществляется при пропускании тока по контролируемой детали или через проводник (стержень), помещенный в отверстие детали. Наиболее эффективно циркулярное намагничивание деталей, имеющих форму тел вращения. При пропускании тока по деталям сложной формы выступы и другие неровности могут быть не намагничены до требуемой степени. В этих местах необходимо измерять напряженность намагниченного поля и специально следить, чтобы она достигла требуемой для контроля величины.

При циркулярном намагничивании направление магнитного потока перпендикулярно направлению тока, поэтому оптимально обнаруживаются дефекты, направление которых совпадает с направлением тока.

Одной из разновидностей циркулярного намагничивания является намагничивание путем индуцирования тока в контролируемой

детали. Устройства для такого намагничивания представляют собой трансформатор, вторичной обмоткой которого (или частью сердечника) служит контролируемая деталь.

Продольное (*полюсное*) намагничивание осуществляется с помощью электромагнитов, постоянных магнитов или соленоидов. При этом обычно деталь намагничивается вдоль своего наибольшего размера. На ее краях образуются полюсы, создающие поле обратного направления.

Разновидностью полюсного намагничивания является поперечное намагничивание, когда деталь намагничивается в направлении меньшего размера.

Комбинированное намагничивание осуществляется при одновременном намагничивании детали двумя или несколькими изменяющимися магнитными полями. При этом можно применять любое сочетание видов тока. При комбинированном намагничивании необходимо, чтобы суммарный вектор намагниченности поворачивался относительно оси детали хотя бы на 90^0. Это достигается в результате применения совместного продольного или циркулярного намагничиваний и использования для них токов одного вида, отличающихся по фазе (или времени включения, например, для импульсных токов), или токов разного вида с соответствующими моментами включения или изменения их величины и направления. В табл. 3.6.1 приведены основные способы намагничивания, виды и сочетания токов, применяемые при неразрушающем контроле магнитными методами.

Для успешного применения магнитных методов контроля необходимо соблюдать режимы намагничивания деталей. Это возможно, если требуемая напряженность магнитного поля рассчитана по величине поля или измерена.

Напряженность магнитного поля можно рассчитать по величине намагничивающего тока в ограниченном числе случаев, поэтому обычно ее вычисляют по следующим формулам.

1. На поверхности стержня или трубы при прохождении тока по телу детали напряженность поля (А/м) $H = I_{max}/2\pi r$, где r - радиус детали, м; I_{max} - максимальное (амплитудное) значение тока, А.

При намагничивании цилиндрической детали контактным способом приведенная формула справедлива для центральной части детали, если соблюдается соотношение

$$l / d \geq 5,$$

где l - расстояние между контактами; d - диаметр детали.

2. Для кольца с w витками, расположенными равномерно по периметру обмотки или вдоль его оси,

$$H = \frac{wI_{max}}{2\pi R_{c\,p}},$$

где $R_{c\,p}$ - средний радиус кольца.

3. Для пластины с отношением ширины к толщине более 10 - 15

$$H = \frac{I_{max}}{2b},$$

где b - ширина пластины.

При контроле крупных габаритных деталей, а также сварных швов с использованием электродов сила намагничивающего тока, межэлектродное расстояние и толщины детали выбираются из следующих условий:

Межэлектродное расстояние, мм	Сила тока I, А, при толщине стенки, мм	
	до 20	20 и более
50 - 100	200 - 300	300 - 400
Св. 100 до 150	300 - 400	400 - 600
150 - 200	400 - 600	600 - 800

Межэлектродное расстояние должно быть в диапазоне 80 - 200 мм. Чтобы избежать прижога металла при напряжении питания холостого хода источника тока выше 25, следует применять только свинцовые или алюминиевые электроды.

При намагничивании с помощью соленоида отношение длины к диаметру является решающим параметром.

Максимальная длина контролируемого участка не должна превышать 450 мм. Если деталь имеет большую длину, то намагничивание должно осуществляться несколько раз путем последовательного перемещения соленоида (или детали) так, чтобы длина каждого отрезка была не более 450 мм.

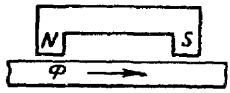
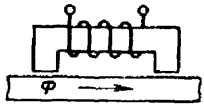
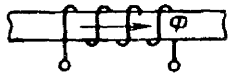
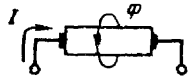
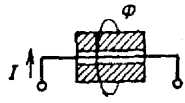
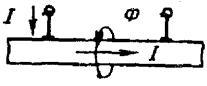
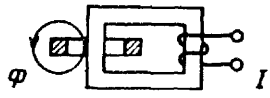
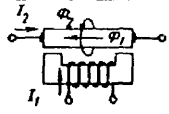
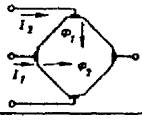
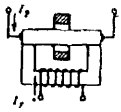
За диаметр принимают максимальный размер поперечного сечения, например диагональ квадратного сечения. В зависимости от отношения длины к диаметру используют формулы:

при $l/D > 4$

$$In = \frac{35000}{l / D + 2};$$

при $2 < l/D < 4$

3.6.1. Основные способы и схемы намагничивания деталей при магнитных методах неразрушающего контроля

Вид намагничивания (по форме магнитного потока)	Способ	Схема
Продольное (полюсное)	Постоянным магнитом	
	Электромагнитом	
	Соленоидом	
Циркулярное	Пропусканием тока по детали	
	С помощью провода с током, помещаемого в отверстие детали	
	С помощью контактов, устанавливаемых на деталь	
	Путем индуцирования тока в детали	
Комбинированное	Пропусканием тока по детали и с помощью электромагнита	
	Пропусканием двух (или более) сдвинутых по фазе токов по детали во взаимно перпендикулярных направлениях	
	Путем индуцирования тока в детали и током, проходящим по проводнику, помещаемому в отверстие детали	

Примечание: Род тока или комбинация токов:

для продольного (полюсного) и циркулярного намагничивания - П; Пер; Опв; И;

для комбинированного П и Пер; П и Опв; П и И; Пер и Пер; Пер и Опв; Пер и И; Опв и И; Опв и И; Опв и Опв; И и И; (для последней схемы в таблице комбинации токов П и И не применяют).

Обозначения тока: П - постоянный; Пер - переменный; Опв - однополупериодно выпрямленный; И - импульсный.

$$In = \frac{4500}{l / D},$$

где l - длина, In - ампер·витки.

Если $l/D < 2$, то достаточная степень намагничивания оценивается с помощью измерителя напряженности поля.

При циркулярном намагничивании сила тока зависит только от диаметра детали (деталь сплошная) и выбирается из следующих соотношений:

Диаметр, мм	Сила тока на 1 мм диаметра, I · мм
До 125	28 - 35
От 125 до 250	20 - 28
От 250 до 380	12 - 20
Свыше 380	4 - 13

При использовании в качестве намагничивающего устройства электромагнитов рекомендуется выбирать расстояние между полюсами не более 200 мм.

Применяют два основных способа размагничивания. Наиболее эффективный из них - нагрев изделия до температуры точки Кюри, при которой магнитные свойства материала пропадают. Этот способ применяют крайне редко, так как при таком нагреве могут изменяться механические свойства материала детали, что в большинстве случаев недопустимо.

Второй способ заключается в размагничивании детали переменным магнитным полем с амплитудой, равномерно уменьшающейся от некоторого максимального значения до нуля. В зависимости от материала изделия, его размеров и формы применяют переменные магнитные поля различных частот: от долей Гц до 50 Гц.

Чем больше магнитная проницаемость материала и толщина детали (стенки детали), тем ниже должна быть частота размагничивающего переменного магнитного поля.

Так, детали из материала с H_c = 10 + 15 А/см при толщине стенки до 2 - 3 мм могут быть размагничены при частоте поля 50 Гц. При частоте переменного магнитного поля 1 Гц детали из материалов с указанными магнитными свойствами могут иметь толщину стенки (толщина деталей) примерно до 30 мм.

Изделия из материалов с H_c = 40 + 50 А/см при приведенных выше частотах размагничивающего поля могут иметь толщины стенок примерно до 10 - 15 мм при 50 Гц и до 50 - 60 мм при 1 Гц.

Начальная амплитуда напряженности размагничивающего поля может быть несколько ниже напряженности намагничивающего поля.

Для качественного размагничивания важно соблюдать промежуток времени, в течение которого напряженность размагничивающего поля уменьшается от максимального значения до нуля. Это время определяется числом укладывающихся в него периодов изменения магнитного поля.

Для большинства материалов число размагничивающих периодов должно быть порядка 40 - 50. Если деталь не размагнитилась, процесс следует повторить. Минимальное число размагничивающих периодов должно быть не ниже 25.

Для размагничивания детали применяют различные демагнитизаторы. Они представляют собой соленоиды переменного тока различной частоты.

Деталь можно размагнитить с помощью циркулярного магнитного поля, создаваемого переменным током, проходящим по детали или по стержню, вставленному в отверстие детали. При этом ток должен плавно уменьшаться до нуля. Некоторые установки для контроля имеют устройства для автоматического уменьшения силы тока для размагничивания.

Магнитные поля рассеяния дефектов. Если в сечении детали имеет место нарушение сплошности или другая неоднородность, приводящие к изменению намагниченности, то в этом месте также образуются полосы, поле которых образует магнитное поле рассеяния дефекта.

Магнитное поле рассеяния дефекта $H_д$ тем больше, чем больше дефект и чем ближе он к поверхности, над которой проводится измерение.

В некоторых материалах (например, легированных и высокоуглеродистых сталях) $H_д$ имеет значительную величину при остаточной намагниченности. По величине и топографии (пространственному распределению) $H_д$ в принципе возможно судить о величине и расположении дефекта. Для оценки этой связи пользуются различными моделями и приближениями.

3.6.3. МАГНИТОПОРОШКОВЫЕ ДЕФЕКТОСКОПЫ

Магнитопорошковый дефектоскоп - устройство для выявления нарушений сплошности в изделиях с использованием в качестве индикатора магнитных порошков (магнитолюминесцентных, магниторадиоактивных и др.).

Основные узлы дефектоскопа следующие:

источники тока,

устройства для подвода тока к детали,

устройства для полюсного намагничивания (соленоиды, электромагниты),

устройства для нанесения на контролируемую деталь магнитной суспензии (или сухого порошка),

осветительные устройства,

измерители тока (или напряженности магнитного поля).

В дефектоскопах наиболее широкое распространение получили циркулярное намагничивание пропусканием переменного тока по детали (или через стержень, помещенный в отверстие детали) и продольное намагничивание постоянным (выпрямленным) током. В дефектоскопах используют также импульсные конденсаторные источники тока. В специализированных дефектоскопах (реже в универсальных) широко применяют индукционный способ намагничивания.

Многие магнитопорошковые дефектоскопы имеют трансформаторный выход.

Для магнитопорошкового контроля в основном применяют дефектоскопы трех видов:

1) стационарные универсальные;

2) передвижные и переносные универсальные;

3) специализированные (стационарные, передвижные, переносные).

Стационарные универсальные дефектоскопы получили широкое распространение на предприятиях крупносерийного (или мелкосерийного) производства разнотипных деталей. Такими дефектоскопами можно контролировать детали различной конфигурации с производительностью от десятков до многих сотен деталей в час. Скорость контроля значительно возрастает при использовании люминесцентного магнитного способа.

С помощью стационарных универсальных дефектоскопов можно производить намагничивание всеми известными способами (циркулярное, полюсное, комбинированное), контроль в приложенном поле и способом остаточной намагниченности.

Широкое распространение получили переносные и передвижные (менее мощные) дефектоскопы. Как правило, они представляют собой источники переменного, постоянного (однополупериодно-выпрямленного) и, реже, импульсного тока. Иногда один дефектоскоп позволяет работать с двумя видами тока.

Передвижные и переносные универсальные дефектоскопы предназначены для намагничивания и контроля деталей в условиях, когда невозможно применять стационарные дефектоскопы, например при намагничивании крупногабаритных деталей по частям, в случае работы в полевых условиях и т.п. Как правило, такие дефектоскопы снабжают комплектом деталей для контроля (сухие порошки и устройства для их напыления, сосуды с суспензией и т.п.).

Передвижные и переносные универсальные дефектоскопы позволяют производить циркулярное намагничивание с помощью токовых контактов, помещаемых на участке детали, продольное намагничивание с помощью кабеля, навиваемого на деталь, или иногда с помощью электромагнита.

Получили значительное распространение специализированные полуавтоматы для намагничивания деталей с последующим их контролем способом остаточной намагниченности.

Дефектоскоп импульсный роликовый является электромагнитным прибором, используется в контрольных операциях в цеховых и лабораторных условиях работы.

Прибор предназначен для импульсного намагничивания в открытой магнитной цепи соленоида относительно коротких массивных изделий с малой проницаемостью формы.

Принцип действия прибора основан на использовании явления "аномальной" намагниченности тел, возникающего в ферромагнитных проводящих изделиях (имеющих малую проницаемость формы) при быстром спаде намагничивающего поля.

Прибор обеспечивает одновременное выявление продольных и поперечных дефектов при одноразовом контроле их в ванне с магнитной суспензией.

Необходимой принадлежностью магнитопорошковых дефектоскопов являются контрольные образцы с тонкими дефектами. Они помогают установить, что оборудование и материалы для контроля являются качественными, а технология контроля соблюдается достаточно точно.

Чувствительность магнитопорошкового метода, определяемая минимальными размерами обнаруживаемых дефектов, зависит от многих факторов, таких, как магнитные характеристики материала контролируемой детали, ее формы и размеров, характера (типа) выявляемых дефектов, чистоты обработки поверхности детали, режима контроля, свойств применяемого магнитного порошка, способа нанесения суспензии, освещенности контролируемого участка детали и т.п.

Магнитное поле дефекта, индикация которого дает возможность его обнаружить, тем больше, чем выше индукция материала и меньше нормальная и дифференциальная магнитные проницаемости. Например, нарушение сплошности в виде щели с раскрытием 2 - 2,5 мкм и глубиной 25 мкм может быть обнаружено с помощью магнитной суспензии, содержащей высокочувствительный черный магнитный порошок, в детали из стали 30ХГСА (коэрцитивная сила H_c = 12 А/см) при индукции B = 1,5 Тл, из стали ШХ15 (H_c = 36

А/см) при B = 0,87 Тл, а из стали 95Х18 (H_c = 74 А/см) при индукции B = 0,53 Тл. Максимальные относительные магнитные проницаемости сталей приведены ниже.

Сталь	μ'_{max}	$\mu'_{d\,max}$
30ХГСА	500 - 520	640 - 670
ШХ15	90 - 110	200 - 230
95Х18	30 - 35	53 - 56

Наилучшими являются условия выявления дефектов в деталях в форме тел вращения (цилиндрах, трубах и т.п.), намагниченных циркулярно.

Чувствительность метода зависит от типа дефекта. Дефекты обтекаемой формы с округлыми краями выявляются хуже, чем дефекты с острыми краями. Например, волосовины выявляются значительно труднее, чем трещины. Так, в деталях из стали 15Х12Н2ВМФ с коэрцитивной силой $H_c \approx 10$ А/см в режиме остаточной намагниченности (B_r = 0,98 Тл) могут быть обнаружены шлифовочные трещины с раскрытием 2 - 2,5 мкм и глубиной 25 мкм; волосовины таких же размеров не выявляются.

На чувствительность контроля оказывает влияние местоположение дефекта в детали. Подповерхностные дефекты обнаруживаются хуже, чем поверхностные. До глубины залегания примерно 100 мкм чувствительность к обнаружению подповерхностных дефектов практически не уменьшается. На большем расстоянии от поверхности при прочих равных условиях могут быть обнаружены дефекты более грубые, чем поверхностные. В первом приближении можно принять, что на глубине 2 - 3 мм могут быть обнаружены дефекты, расстояние от поверхности которых примерно равно их глубине. Хуже обнаруживаются дефекты, плоскость которых составляет угол меньше 40 - 50^0 по отношению к поверхности детали.

Существенное влияние на чувствительность метода оказывает чистота обработки поверхности контролируемого объекта. Высокая чувствительность контроля может быть достигнута при параметре шероховатости контролируемой поверхности R_a = 1,6 мкм. Если параметр шероховатости контролируемой поверхности R_z = 40 мкм, то при прочих равных условиях могут быть обнаружены дефекты, примерно в 2 раза более грубые, т.е. с раскрытием вдвое большим, при равном отношении глубины к раскрытию или со значительно большей глубиной. Это связано с тем, что на шероховатой поверхности создаются локальные магнитные поля, вызывающие осаждение порошка в виде вуали, на фоне которой тонкие дефекты становятся невидимыми.

Режим контроля определяет возможность обнаружения дефектов требуемых размеров, характеризуется напряженностью намагничивающего поля, способом контроля (в приложенном поле или на остаточной намагниченности) и способом намагничивания.

Для обнаружения дефектов любых направлений применяют намагничивание в двух (или более) взаимно перпендикулярных направлениях или комбинированное. При раздельном намагничивании (в контроле) в двух взаимно перпендикулярных направлениях труднее выявить дефекты, расположенные под углом 45^0 к общим направлениям. Для обеспечения требуемой чувствительности контроля таких дефектов напряженность одного из намагничивающих полей необходимо увеличить в $\sqrt{2}$ = 1,41 раз. Обычно это проще сделать при циркулярном намагничивании.

Свойства применяемых магнитных порошков имеют существенное значение для обеспечения требуемой чувствительности контроля. Интегральным свойством порошков для магнитной дефектоскопии является их выявляемость, т.е. способность обнаруживать тонкие дефекты, размеры которых определяют наивысшую чувствительность метода.

Освещенность места контроля должна быть такой, чтобы валик магнитного или люминесцентного магнитного порошка над дефектом был хорошо различим на поверхности детали. При использовании ламп накаливания и в случае естественного освещения освещенность поверхности детали должна быть не менее 500 лк. Освещенность можно проверить с помощью люксметра Ю-116 при расположении его преобразователя на поверхности контролируемой детали в зоне осмотра.

При применении ультрафиолетового облучателя (контроль с помощью люминесцентных магнитных порошков и суспензий) диапазон излучения ультрафиолетовых облучателей должен быть в пределах 315 - 400 нм. Освещенность, измеренная с помощью люксметра Ю-116, должна быть не менее 50 лк.

На деталях из некоторых материалов с высокими магнитными свойствами могут быть обнаружены поверхностные дефекты с раскрытием не более 1 мкм и глубиной более 10 мкм. Однако такая высокая чувствительность недостижима для большинства ферромагнитных материалов. Поэтому высшая чувствительность метода ограничена дефектами с раскрытием (шириной) от 2,5 мкм и глубиной от 25 мкм. Основные магнитные характеристики сталей приведены в табл. 3.6.2.

3.6.2. Основные магнитные характеристики конструкционных сталей

Сталь	Термическая обработка	Коэрцитивная сила H_c, А/см	Остаточная индукция B_r, Тл	Напряженность, необходимая для получения B_r, А/см
20	В состоянии поставки	320	1,17	5600
10	То же	480	0,86	3200
45	- " -	640	1,12	7200
45	Закалка с (820 ± 10) °С в масле, отпуск при 160 °С	2160	1,18	15200
Ст5	В состоянии поставки	640	1,10	3600
ШХ15	Закалка с 840 °С в масле, отпуск при 160 °С, охлаждение на воздухе	3600	0,79	17600
Х12Ф1	Закалка с 1050 °С, отпуск при 470 °С	6800	0,41	16000
Р9	Закалка с 1240 °С, отпуск при 550 °С	3440	1,04	18400
Р18	Закалка с 1270 °С, отпуск при 550 °С	4160	0,91	14400
ХВГ	Закалка с 830 °С в масле, отпуск при 160 °С, охлаждение на воздухе	3920	0,85	13600
	Закалка с 830 °С в масле, отпуск при 250 °С	2080	1,18	11200
25ХСНВФА	В состоянии поставки	720	0,59	11600
25ХСНВФА	Отжиг при (750 ± 10) °С 1 ч, охлаждение на воздухе	880	0,50	8800
25ХСНВФА	Закалка в соляной ванне при (900±10) °С 8 мин, охлаждение в масле	3360	0,65	16800
12Н3А	Цементация при 910 ± 10 °С на всю глубину	1200	0,70	8000
12Х2Н4А	Нормализация при (860±20) °С, отпуск при 650 °С, цементация при (910 ± 10) °С, закалка с 830 °С в масле, отпуск при 160 °С	2880	0,74	19200
12Х2Н4А	Закалка с 790 °С в масле, отпуск при 160 °С, охлаждение на воздухе	1840	0,94	10400
14ХГСН2МА	Нормализация при 950 °С, отпуск при 650 °С	560	0,82	8800
18ХНВА	Цементация с твердым карбюризатором при (950 ± 10) °С, закалка с 860 °С, отпуск при 160 °С	3440	0,70	16800
18ХНВА	Закалка с 860 °С, охлаждение на воздухе, отпуск при 160 °С, охлаждение на воздухе	2080	0,83	16000
18ХНВА	Закалка с 860 °С, отпуск при 650 °С	800	1,11	20000
25Х2ГНТА	Закалка с (860 ± 10) °С в масле, отпуск при (200 ± 20) °С 1 ч	2080	1,31	9600
20Х3МВФ	В состоянии поставки	1440	0,67	6400
20Х3МВФ	Закалка с 1050 °С в масле, отпуск при 680 °С, охлаждение на воздухе	1360	1,33	4800
38ХА	В состоянии поставки	800	0,96	5600
38ХА	Закалка с 860 °С в масле, отпуск при 550 °С	1200	1,45	5200
25ХГСА	В состоянии поставки	1120	1,12	6000
25хГСА	Закалка с 890 °С в масле, отпуск при 225 °С, охлаждение в воде	2720	1,12	13600
30ХГСА	В состоянии поставки	800	1,07	6000
30ХГСА	Закалка с 900 °С в масле, отпуск при 500 °С, 1 ч	1200	1,33	6400

Продолжение табл. 3.6.2

Сталь	Термическая обработка	Коэрцитивная сила H_c, А/см	Остаточная индукция B_r, Тл	Напряженность, необходимая для получения B_r, А/см
18Х2РВФА	Закалка с 910 °С в масле, отпуск при (520 ± 10) °С, охлаждение на воздухе	3760	0,76	16800
12Х2РВФА	Закалка с 910 °С, отпуск при 550 °С	1760	0,90	12800
30Х2Н2ВА	Закалка с 860 °С в масле, отпуск при 580 °С, охлаждение на воздухе	1440	1,02	14400
40ХН2МА	Закалка с 840 °С, отпуск при 580 °С	1200	1,15	13600
30ХГСНА	Закалка с 900 °С в селитре при 320 °С 45 мин, отпуск при 250 - 300 °С 3 ч	1920	1,16	11200
30ХГСНА	Закалка с 900 °С в масле до HRC 46	2200	0,83	11600
30Х2ГСН2ВМ	В состоянии поставки	1040	0,66	15200
30Х2ГСН2ВМ	Закалка с 930 °С 13 мин	4000	0,65	20800
42Х2ГСНМА	В состоянии поставки	880	0,74	8000
42Х2ГСНМА	Закалка с 930 °С, отпуск при 200 °С, охлаждение на воздухе	4160	0,67	19200
32Х2НГСМ	Закалка с 940 °С 30 мин, отпуск при (270 ± 10) °С 4 ч, охлаждение на воздухе	2800	0,68	16800
37Х2НСМ	Закалка с 940 °С	2400	0,63	13200
37Х2НГСМ	Закалка с 940 °С, отпуск при 210 °С	4400	0,70	12800
42Х2НГСМ	Закалка с 940 °С 30 мин, отпуск при (220 ±10) °С 4 ч, охлаждение на воздухе	3600	0,51	12000
СП-28	В состоянии поставки	1440	1,12	6400
СП-28	Подогрев до 600 - 650 °С, быстрый перенос в электрическую печь с температурой 930 - 960 °С, охлаждение в масле, отпуск при (320 ± 30) °С, охлаждение на воздухе	3600	0,69	10400
ВКС-210	Закалка с 1200 ^{0}С 2 ч, охлаждение в воде; три раза перекристаллизация при 970 °С 1 ч, охлаждение в воде; старение при 520 °С 3 ч, охлаждение на воздухе	2240	0,69	12800
ВСН-17	В состоянии поставки	2000	0,50	11200
ВНЛ-3	Отливка	2960	0,40	24000
1Х12Н2ВМФ	Закалка с 1000 °С, отпуск при 550 °С	2320	0,67	9600
1Х12Н2ВМФ	Закалка с 1000 °С, отпуск при 680 °С	960	0,93	4800
60С2А	Отжиг при 650 - 700 °С 1,5 ч, охлаждение печью до 500 °С, затем на воздухе; закалка в соляной ванне с 860 °С 5 мин, охлаждение в масле, отпуск в электрической печи при (420 ± 10) °С 1,5 ч, охлаждение на воздухе	1840	1,05	13600

Продолжение табл. 3.6.2.

65Г	Закалка с (810 ± 10) °С в масле, отпуск при (360 ± 20) °С 1 ч, охлаждение на воздухе	1600	1,09	7200
ВКЛ-3	Отжиг при 900 °С 2 ч, охлаждение с печью до 680 °С, затем закалка с 900 °С 30 мин, охлаждение в масле; отпуск при 550 °С 2 ч, охлаждение на воздухе	1440	0,61	10400
27ХГСНМЛ	Нормализация при 890 °С 2 ч, охлаждение на воздухе; отпуск при 650 °С 2 ч, охлаждение на воздухе; закалка с 890 °С 30 мин, охлаждение в масле; отпуск при 220 °С 2 ч, охлаждение на воздухе	2640	0,65	20000
Х15Н5Д2Т	В состоянии поставки	2800	0,65	28000
Х16Н6	Закалка с (900 ± 10) °С 15 мин, охлаждение на воздухе; обработка холодом при -70 °С 2 ч, выдержка на воздухе; отпуск при (250 ± 10) °С 1 ч, охлаждение на воздухе	4000	0,50	14400
ВСН-2М	Смягчающий отжиг при 640 °С 1 ч	5200	0,44	17600
ВСН-2М	Отжиг при 640 °С 1 ч, нормализация при 950 °С 5 мин, отпуск при 450 °С 1 ч	3040	0,91	48000
9Х18	Закалка с 1030 °С, отпуск при 180 °С	6400	0,61	17600
9Х18	Закалка с 1050 °С в масле, обработка холодом при -70 °С 30 мин, выдержка на воздухе; отпуск при 550 °С 2 ч, охлаждение на воздухе	8000	0,45	20000
20Х13	Закалка с 1020 °С в масле, отпуск при 620 °С 3 ч	1120	0,58	11200
12Х13	Нормализация при 1020 °С, отпуск при 660 - 760 °С	400	1,11	3200
12Х21Н5Т	Закалка с 950 ^{0}С, охлаждение на воздухе	960	0,45	8000
14Х17Н2	В состоянии поставки	1760	0,59	10400
14Х17Н2	Закалка с 1030 °С	3600	0,62	12000
268Л	Нормализация при 1050 °С, охлаждение на воздухе	2800	0,73	9600
268Л	Закалка с 1030 °С в масле, отпуск при 680 °С, охлаждение на воздухе	1600	0,69	13600

Магнитопорошковый контроль состоит из следующих операций:

подготовка детали к контролю,

намагничивание детали,

нанесение на деталь магнитного порошка или суспензии,

осмотр детали,

разбраковка,

размагничивание.

Если выяснено, что деталь можно проверить способом остаточной намагниченности, для определения режимов контроля по кривым намагничивания находят напряженность приложенного поля, намагничивающего деталь до уровня, начиная с которого остаточная индукция практически не уменьшается. Напряженность намагничивающего поля при контроле сварных соединений при заданной чувствительности должна быть установлена на валике усиления. При этом индукция в детали вблизи валика усиления должна быть выше по сравнению с индукцией на валике настолько, насколько толщина детали вместе с валиком усиления сварного шва больше ее толщины вне сварного шва.

Отливки можно контролировать только с более низкой чувствительностью, чем детали, изготовленные из предварительно деформированного металла. При этом более высокую чувствительность можно получить при проверке деталей, изготовленных методами точного литья.

Оптимальный способ нанесения суспензии заключается в окунании детали в бак, в котором суспензия хорошо перемешана, и в медленном удалении из него. Однако этот способ не всегда технологичен. Чаще суспензию наносят с помощью шланга или душа. Напор струи должен быть достаточно слабым, чтобы не смывался магнитный порошок с дефектных мест. При сухом методе контроля эти требования относятся к давлению воздушной струи, с помощью которой магнитный порошок наносят на деталь. Время стекания дисперсионной среды, имеющей большую вязкость (например, трансформаторного масла), относительно велико, поэтому производительность труда контролера уменьшается.

Действие прибора для контроля магнитных порошков и суспензий основано на создании искусственного, контролируемого по величине, локального магнитного поля на магнитной ленте. Разработанная методика индикации этого поля с помощью контролируемых магнитных порошков (суспензий) позволяет с высокой точностью определять их качество (выявляемость). Могут быть забракованы магнитные и люминесцентные магнитные порошки, выявляемость которых различается на 10-15 %.

Контролер должен осмотреть деталь после стекания с нее основной массы суспензии, когда картина отложений порошка становится неизменной.

Это положение относится к контролю способами приложенного поля и остаточной намагниченности. Различие заключается в следующем. В первом случае суспензия стекает с детали во время ее намагничивания. Этот способ применяют, когда магнитные характеристики материала детали таковы, что при выключении намагничивания магнитное поле дефекта уменьшается до такой степени, что не может удерживать частицы порошка. В случае, когда при намагничивании деталь сильно нагревается или имеется опасность прижогов мест соприкосновения с токовыми контактами, намагничивание можно периодически прерывать. При этом время действия магнитного поля (время прохождения тока по детали) может составлять 0,1 - 0,5 с, а перерывы 1 - 2 с. Чем меньше вязкость суспензии, тем длительнее должно быть время действия тока и меньше перерывы (для водной суспензии соответственно 0,3 - 0,5 с и 1 с).

При контроле способом остаточной намагниченности намагничивание, нанесение суспензии и осмотр могут быть разделены во времени промежутком до 1 ч.

Детали проверяют визуально, но в сомнительных случаях и для расшифровки характера дефектов применяют оптические приборы, тип и увеличение которых устанавливают по нормативным документам. Увеличение оптических средств не должно превышать ×10.

Разбраковку деталей по результатам контроля должен производить опытный контролер. На рабочем месте контролера необходимо иметь фотографии дефектов или их дефектограммы (реплики с отложениями порошка, снятые с дефектных мест, с помощью клейкой ленты или другими способами), а также контрольные образцы с минимальными размерами недопустимых дефектов.

Вид и форма валиков магнитного и люминесцентного магнитного порошка во многих случаях помогают распознать нарушения сплошности. Труднее выявить дефекты в виде тонких волосовин. В большинстве сталей они могут быть обнаружены только способом приложенного поля. Отложения порошка на волосовинах имеют вид прямых или слегка изогнутых тонких линий. Степень четкости валиков порошка зависит от отношения глубины волосовин к их раскрытию и их расположения относительно поверхности контролируемой детали.

Во многих случаях можно примерно оценить глубину дефектов, изменяя режимы и способ контроля. Дефекты с большим отношением глубины к раскрытию могут быть обнаружены при небольших намагничивающих полях, а также способом остаточной намагниченности.

Подповерхностные дефекты дают менее четкое отложение валика порошка и, как правило, могут быть обнаружены (при глубине залегания более 200 - 300 мкм) только способом приложенного поля.

Местный наклеп - один из частных видов ложных дефектов. Он является следствием ударов, надавливаний, клеймения, бросков и т.п. В случаях легких деформаций отложения порошка неустойчивы и при повторном контроле могут пропадать. Сильные деформации дают устойчивое отложение порошка. Такая возможность ложного оседания магнитного порошка в результате местных наклепов должна учитываться при переносе и хранении деталей.

Ложное оседание магнитного порошка может явиться результатом так называемой магнитной записи, т.е. соприкосновения детали с намагниченным телом. В большинстве случаев она пропадает при перемагничивании детали в направлении, перпендикулярном направлению первого намагничивания.

В местах резкого изменения сечения контролируемых деталей также возможно ложное оседание магнитного порошка, в частности, когда на небольшом расстоянии от поверхности детали (до 2- 3 мм) имеются углубления, резьба, небольшие отверстия и т.п.

Глава 3.7

КАПИЛЛЯРНЫЕ МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ

3.7.1. ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ

Капиллярные методы контроля основаны на капиллярном проникновении индикаторных жидкостей (пенетрантов) в полости поверхностных и сквозных несплошностей материала объектов контроля и регистрации образующихся индикаторных следов визуальным способом или с помощью преобразователя.

Капиллярный контроль предназначен для обнаружения невидимых или слабовидимых невооруженным глазом поверхностных и сквозных дефектов в объектах контроля, определения их расположения, протяженности (для дефектов типа трещин) и ориентации по поверхности. Этот вид контроля позволяет диагностировать объекты любых размеров и форм, изготовленные из черных и цветных металлов и сплавов, пластмасс, стекла, керамики, а также других твердых неферромагнитных материалов.

Капиллярный контроль применяют также для объектов, изготовленных из ферромагнитных материалов, если их магнитные свойства, форма, вид и месторасположение дефектов не позволяют достичь требуемой чувствительности магнитопорошковым методом или магнитопорошковый метод контроля не допускается применять по условиям эксплуатации объекта.

Капилляр, выходящий на поверхность объекта контроля только с одной стороны, называют поверхностной несплошностью, а соединяющий противоположные стенки объекта контроля - сквозной. Если поверхностная и сквозная несплошности являются дефектами, то допускается применять вместо них термины "поверхностный дефект" и "сквозной дефект".

Изображение, образованное пенетрантом, в месте расположения несплошности и подобное форме сечения у выхода на поверхность объекта контроля называют индикаторным рисунком (след). Применительно к несплошности типа единичной трещины вместо термина "индикаторный рисунок" допускается применение термина "индикаторный след".

Глубина несплошности - размер несплошности в направлении внутрь объекта контроля от его поверхности. Длина несплошности - продольный размер несплошности на поверхности объекта. Раскрытие несплошности - поперечный размер несплошности у ее выхода на поверхность объекта контроля.

Необходимым условием выявления дефектов нарушения сплошности материала типа полостных капиллярным контролем, имеющим выход на поверхность объекта и глубину распространения, значительно превышающую ширину их раскрытия, является относительная их незагрязненность посторонними веществами.

Следует различать максимальную, минимальную и среднюю глубину, длину и раскрытие несплошности. Если не требуется заранее оговаривать, какое из указанных значений размеров имеется в виду, то для исключения недоразумений следует принять термин "преимущественный размер". Для несплошностей типа округлых пор раскрытие равно диаметру несплошности на поверхности объекта.

Все методы капиллярного неразрушающего контроля по характеру взаимодействия проникающих пенетрантов с объектом контроля рассматриваются как молекулярные.

Капиллярные методы подразделяют на основные, использующие капиллярные явления, и комбинированные.

Основные капиллярные методы контроля подразделяют в зависимости от типа проникающего вещества на следующие:

1. *Метод проникающих растворов* - жидкостный метод капиллярного неразрушающего контроля основанный на использовании в качестве проникающего вещества жидкого индикаторного раствора.

2. *Метод фильтрующихся суспензий* - жидкостный метод капиллярного неразрушающего контроля, основанный на использовании в качестве жидкого проникающего вещества индикаторной суспензии, которая образует индикаторной рисунок из отфильтрованных частиц дисперсной фазы.

Капиллярные методы в зависимости от способа выявления индикаторного рисунка подразделяют на следующие:

люминесцентный, основанный на регистрации контраста люминесцирующего в длинноволновом ультрафиолетовом излучении видимого индикаторного рисунка на фоне поверхности объекта контроля;

цветной, основанный на регистрации контраста цветного в видимом излучении индикаторного рисунка на фоне поверхности объекта контроля;

люминесцентно-цветной, основанный на регистрации контраста цветного или люминесцирующего индикаторного рисунка на фоне поверхности объекта контроля в видимом или длинноволновом ультрафиолетовом излучении;

яркостный, основанный на регистрации контраста в видимом излучении ахроматического рисунка на фоне поверхности объекта контроля.

Комбинированные методы капиллярного контроля сочетают два или более различных по физической сущности методов контроля, один из которых обязательно жидкостный.

Комбинированные капиллярные методы контроля подразделяют, в зависимости от характера физических полей (излучений) и особенностей их взаимодействия с контролируемым объектом.

Капиллярно-электростатический метод основан на обнаружении индикаторного рисунка, образованного скоплением электрически заряженных частиц у поверхностной или сквозной несплошности неэлектропроводящего объекта, заполненного ионогенным пенетрантом.

Капиллярно-электроиндуктивный метод основан на электроиндуктивном обнаружении электропроводящего индикаторного пенетранта в поверхностных и сквозных несплошностях неэлектропроводящего объекта.

Капиллярно-магнитопорошковый метод основан на обнаружении комплексного индикаторного рисунка, образованного пенетрантом и ферромагнитным порошком, при контроле намагниченного объекта.

Жидкостный капиллярно-радиационный метод изучения основан на регистрации ионизирующего излучения соответствующего пенетранта в поверхностных и сквозных несплошностях, а капиллярно-радиационный метод поглощения - на регистрации поглощения ионизирующего излучения соответствующим пенетрантом в поверхностных и сквозных несплошностях объекта контроля.

3.7.2. ДЕФЕКТОСКОПИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ

3.7.2.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Капиллярный дефектоскопический материал применяют при капиллярном контроле и используют для пропитки, нейтрализации или удаления избытка проникающего вещества с поверхности и проявления его остатка с целью получения первичной информации о наличии несплошности в объекте контроля.

Дефектоскопические материалы выбирают в зависимости от требований, предъявляемых к объекту контроля, его состояния и условий контроля. Их укомплектовывают в целевые наборы, в которые входят полностью или частично взаимообусловленные дефектоскопические материалы, приведенные ниже.

Набор дефектоскопических материалов взаимозависимое целевое сочетание дефектоскопических материалов: индикаторного пенетранта, проявителя, очистителя и гасителя.

Индикаторный пенетрант (пенетрант) И капиллярный дефектоскопический материал, обладающий способностью проникать в несплошности объекта контроля и индицировать их.

Очиститель от пенетранта (очиститель) М - капиллярный дефектоскопический материал, предназначенный для удаления индикаторного пенетранта с поверхности объекта контроля самостоятельно или в сочетании с органическим растворителем или водой.

Гаситель пенетранта (гаситель) Г - капиллярный дефектоскопический материал, предназначенный для гашения люминесценции или цвета остатков соответствующих индикаторных пенетрантов на поверхности объекта контроля.

Проявитель пенетранта (проявитель) П - капиллярный дефектоскопический материал, предназначенный для извлечения индикаторного пенетранта из капиллярной полости несплошности с целью образования четкого индикаторного рисунка и создания контрастирующего с ним фона.

Специализированные составы, предназначенные для выявления поверхностных дефектов методами капиллярной дефектоскопии, имеют следующие условные групповые обозначения:

$И_1$ - цветные пенетранты, имеющие характерный цветовой тон при наблюдении в видимом излучении;

$И_2$ - люминесцентные пенетранты, излучающие свет под воздействием длинноволнового ультрафиолетового излучения;

$И_3$ - люминесцентно-цветные пенетранты, имеющие характерный цветовой тон при наблюдении в видимом излучении и люминесцирующие под воздействием длинноволнового ультрафиолетового излучения;

$И_4$ - химические активные пенетранты, предназначенные для химического взаимодействия с соответствующими проявителями для образования специфического индикаторного следа, меняющего цвет, способность люминесцировать или образовывать продукты реакции, дающие информацию о наличии несплошностей;

$И_5$ - ахроматические пенетранты, которые под воздействием видимого излучения дают черное или серое показание;

$И_6$ - прочие пенетранты;

$М_1$ - органические очистители;

$М_2$ - водяные очистители;

$М_3$ - прочие очистители;

Г - гасители пенетранта;

$П_1$ - порошковые проявители, сорбционные, представляющие собой сухой, преимущественно белый мелкодисперсный сорбент, поглощающий пенетрант;

$П_2$ - суспензионные проявители, сорбционные, представляющие собой белый сорбент, диспергированный в летучих растворителях, воде или быстросохнущих смесях, поглощающие пенетрант;

$П_3$ - красочные проявители (лаки), диффузионные, состоящие из пигментированного или бесцветного быстросохнущего жидкого раствора, связывающие, поглощающие пенетрант;

$П_4$ - пленочные проявители, диффузионные, представляющие собой бесцветную или белую накладную пленку с проявляющим липким слоем, поглощающим пенетрант;

$П_5$ - прочие проявители.

Очистители и гасители в зависимости от характера взаимодействия с индикаторным пенетрантом подразделяют на растворяющие, самоэмульгирующие и эмульгирующие при внешнем воздействии.

Индикаторные пенетранты подразделяют в зависимости от физического состояния и светоколористических признаков в соответствии с табл. 3.7.1.

В зависимости от физических свойств бывают различные пенетранты.

Магнитный пенетрант является суспензией, частицы твердой фазы которой имеют ферромагнитные свойства, а жидкий носитель представляет собой молекулярную или коллоидную дисперсию люминофора, красителя или другого индикатора.

Электропроводящий пенетрант имеет нормированную электрическую проводимость.

Ионизирующий пенетрант испускает ионизирующее излучение. Поглощающий пенетрант поглощает ионизирующее излучение.

Комбинированный пенетрант сочетает свойства двух или более индикаторных пенетрантов.

По технологическим признакам пенетранты можно разделить следующим образом.

Органосмываемый пенетрант смывается с поверхности объекта контроля органическими безводными антикоррозионными составами: растворителями, маслами или их смесями.

Водосмываемый пенетрант смывается водой или водосодержащими составами.

Пенетрант последующего эмульгирования образует эмульсию в воде, очищающей поверхность объекта контроля, после его предварительного взаимодействия с очистителем от пенетранта или ПАВ.

Обеспечивающий пенетрант, особенность которого заключается в том, что люминесценция или его цвет уничтожается специально подобранным гасителем.

Проявители подразделяют в зависимости от состояния в соответствии с табл. 3.7.2.

Проявитель разделяют в зависимости от характера взаимодействия его с индикаторным пенетрантом.

Химически пассивный проявитель не меняет колористические свойства индикаторного пенетранта, а активный проявитель предназначается для химического взаимодействия с индикаторным пенетрантом с образованием специфического индикаторного рисунка (следа), меняющего цвет, способность люминесцировать или давать продукты реакции, индуцирующие несплошность.

Магнитный проявитель, обычно сорбционный или диффузионный, содержит ферромагнитный порошок, выявляющий несплошности извлечением из индикаторного пенетранта и осаждением магнитного порошка в магнитном поле несплошности намагниченного объекта контроля.

3.7.2.2. НАБОРЫ ДЕФЕКТОСКОПИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

Разработан значительный ассортимент материалов, применяемых при капиллярном неразрушающем контроле и предназначенных для пропитки, нейтрализации или удаления избытка проникающего вещества с поверхности и проявления его остатков с целью получения первичной информации о наличии несплошности в объекте контроля.

Эффективность дефектоскопического контроля определяется материалами: пенетрантом, проявителем и очистителем или гасителем. Взаимозависимое целевое сочетание материалов наиболее распространенных отечественных наборов дефектоскопических материалов приведено в табл. 3.7.3.

С помощью высокочувствительных наборов (№ 1, 2) можно обнаружить поверхностные дефекты типа трещин и пор величиной в десятые доли микрона. Наборы средней чувствительности (№ 3, 4, 6, 7, 9) позволяют обнаружить дефекты с раскрытием более 1 мкм. Наборы пониженной чувствительности (№ 5, 8) дают возможность выявлять грубые дефекты с раскрытием более 100 мкм.

3.7.1. Характеристики индикаторных пенетрантов

Физическое состояние	Колористический признак	Колористическая характеристика индикаторного следа дефекта
Раствор	Ахроматический	Черный, серый, бесцветный
	Цветной	Имеет характерный цветной тон при наблюдении в видимом излучении
	Люминесцентный	Испускает видимое излучение под воздействием длинноволнового ультрафиолетового излучения
	Люминесцентно-цветной	Имеет характерный цветной тон при наблюдении в видимом излучении и люминесцирует под воздействием длинноволнового ультрафиолетового излучения
Суспензия	Люминесцентный или цветной	Скопление люминесцентных или цветных частиц суспензии в устье дефекта

3.7.2. Характеристики проявителей

Физическое состояние	Принцип действия	Характеристика
Порошок	Сорбционный	Сухой, преимущественно белый сорбент, поглощающий индикаторный пенетрант
Суспензия		Преимущественно белый сорбент, поглощающий индикаторный пенетрант, диспергированный в летучих растворителях, воде или быстросохнущих смесях
Краска (лак)	Диффузионный	Связывающий пигментированный или бесцветный быстросохнущий раствор, поглощающий индикаторный пенетрант
Пленка		Бесцветная или белая накладная лента с проявляющим, например, липким слоем, поглощающим индикаторный пенетрант, отделяемая с индикаторным следом от контролируемой поверхности

В качестве очищающих составов применяют, например, водные и спиртовые растворы различных ПАВ. Проявителями могут служить специально приготовленные окись магния, силикагель, каолин, тальк, двуокись титана, их водные и спиртовые суспензии, растворы этилцеллюлозы в различных растворителях и др.

Набор № 1 (люминесцентный), нашедший широкое применение, и набор № 2 (цветной) - наиболее эффективны и позволяют обнаруживать поверхностные дефекты с раскрытием около 0,1 мкм.

Набор № 3 содержит проявитель, обладающий пониженной токсичностью и пожароопасностью, и нанесение его возможно как кистью, так и воздушным распылением.

В настоящее время большое внимание уделяют качеству литых деталей, поэтому весьма актуальной задачей является разработка для этой цели дефектоскопических материалов с различной чувствительностью.

3.7.3. Наиболее распространенные наборы дефектоскопических материалов

№ набора	Дефектоскопические материалы набора			Показатели назначения набора			
	Пенетрант	Проявитель	Очиститель	Материал объекта контроля	Параметр шероховатости поверхности *Ra*, мкм	Диапазон температур объекта контроля, °С	Класс чувствительности
1	ЛЖ-6А	ПР-1	ОЖ-1	Металлы, пластмассы, стекло, керамика	2,5 - 5,0	15 ... 35	I
2	"К"	"М"	Маслокеросиновая смесь	Металлы, стекло, керамика	5,0 - 10,0	-40 ... 40	I
3	ЛЖ-6А	ПР-4	ОЖ-1	Металлы, пластмассы, стекло, керамика	2,5 - 5,0	15 ... 35	II
4	ЛЖ-12	Окись магния	ОЖ-1	То же	Необработанная поверхность (12,5 - 50,0)	15 ... 35	II
5	ЛЖ-4	То же	Вода с ПАВ	- "-	То же	15 ... 35	III
6	ЛЖ-12	ПР-5	ОЖ-1	- " -	(2,5 - 5,0)	15 ... 35	II
7	ЛЖ-1 или керосиновый раствор ЛЖ-1К	ПР-4	ОЖ-1	- " -	Необработанная поверхность (12,5 - 50,0)	15 ... 35	II
8	ЛЖ-1 или керосиновый раствор ЛЖ-1К	Окись магния	Вода с ПАВ	- " -	То же	15 ... 35	III
9	Нориол-А Керосиновый раствор	ПР-4	ОЖ-1	- " -	(2,5 - 5,0)	15 ... 35	II

Набор № 4, применяемый для контроля стальных литых деталей, по интенсивности свечения индикаторного следа показывает лучшие результаты. Почти на таком же уровне по интенсивности свечения находится набор, в котором в качестве пенетранта применяется ЛЖ-6А с тем же проявителем и очистителем. Однако вследствие того, что этот пенетрант более токсичен, чем ЛЖ-12, рекомендуется для выявления тонких дефектов (раскрытие менее 10 мкм) применять набор с пенетрантом ЛЖ-12.

Набор № 5 рекомендуется применять для дефектоскопирования литых стальных деталей, имеющих дефекты с раскрытием 10 - 20 мкм. Смывка пенетранта осуществляется водным раствором ПАВ. Окись магния, используемая в наборе с названными выше люминесцентными пенетрантами, дает несколько лучшие результаты, чем силикагель, поэтому в указанных выше наборах рекомендуется применять окись магния.

Набор № 6 содержит проявитель ПР-5, который можно наносить на поверхность детали как пульверизацией, так и окунанием. Он отличается от проявителя ПР-1 пониженной токсичностью. Проявитель ПР-5 может быть удален с поверхности детали как протиркой или смывкой водой, так и нагревом (до 30 мин) ее температуры 300 °С и выше. Этот проявитель также может быть применен с пенетрантом ЛЖ-6А и очистителем ОЖ-1, обеспечивая обнаружение дефектов величиной около 1 мкм.

Набор № 7 средней чувствительности имеет низкую токсичность. С помощью этого набора можно надежно выявлять дефекты с раскрытием около 2 мкм. Вместе с тем сравнительно высокая чувствительность набора не препятствует применению его для деталей с различной шероховатостью поверхности, в том числе и для литья, так как пенетрант имеет высокую текучесть, легко удаляется с поверхности и несамоэмульгирует. Регулировать чувствительность можно также путем изменения времени выдержки контролируемой детали в очистителе. Максимальной чувствительности можно достичь при одноминутной выдержке.

В настоящее время применяют пенетранты, представляющие собой растворы люминофоров и в ряде случаев смачивающих других добавок в одном или нескольких органических растворителях. Количество растворенных продуктов составляет обычно 0,1 - 1,0 %. Таким образом, на заводах-изготовителях в процессе приготовления пенетрантов используют большое количество растворителей. Экономически целесообразно приготавливать концентрат пенетранта - раствор всех добавок в небольшом количестве растворителя, который перед применением будет смешиваться в необходимой пропорции с основным количеством легкодоступного растворителя.

Набор № 8 содержит концентрат пенетранта ЛЖ-1К, который при 15 - 20 °С растворяется в керосине (15 г ЛЖ-1К в 1 кг керосина) и обеспечивает выявление дефектов с раскрытием от 6 мкм и более. Раствор хорошо удаляется с поверхности деталей, что создает высокую контрастность светящихся под ультрафиолетовыми лучами следов дефектов и обеспечивает достаточную надежность контроля. Он может быть использован на деталях из алюминиевых и магниевых сплавов с различной шероховатостью поверхности (в том числе и литья в землю). В качестве очистителя в этом наборе применяют водный раствор (2 - 4 %) эмульгатора, а проявление осуществляют окисью магния. Следует отметить хорошую смываемость пенетранта с поверхности контролируемых деталей водным раствором эмульгатора с последующей промывкой в теплой проточной воде, четкое выявление дефектов (трещины, пористость, рыхлота), хорошую технологичность набора.

Очиститель, индикаторный пенетрант, гаситель и проявитель характеризуют данными о составе, способах приготовления и хранения, приводимыми в рецептурных бланках.

Совместимость дефектоскопических материалов в наборе или сочетаниях обязательна. Составы набора не должны ухудшать эксплуатационные качества материала контролируемого объекта.

3.7.2.3. ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

В табл. 3.7.4 и 3.7.5 приводятся данные об отдельных материалах, используемых в качестве основных составляющих компонентов дефектоскопических материалов.

3.7.4. Перечень материалов для люминесцентной дефектоскопии

Материалы	Тип (цвет свечения)
Люминофоры неорганические для светящихся красок, используемые в фильтрующихся дефектоскопических суспензиях	ФК-1 (синий); ФК-2 (голубой); ФК-3 (зеленый); ФК-4 (желто-зеленый); ФК-5 (желтый); ФК-6 (оранжевый); ФК-7 (оранжево-красный); ФК-8 (красный); ФК-9 (белый)
Дневные флюоресцентные пигменты ДФП для флюоресцентных эмалей, используемые в фильтрующихся суспензиях	№ 69 (зеленый); № 418 (лимонно-желтый); № 430 (желто-оранжевый); № 1033 (оранжевый); № 1040 (оранжево-красный);

Продолжение табл. 3.7.4.

Люминофоры органические, люминофоры[1], универсального назначения	455 ВТ (бесцветный); 458 Т (водно-голубой); 495 РТ (желтый 23); 525 Т (желтый); 540 Т (желто-зеленый); 612 Т (оранжево-красный); 496 Т (светло-зеленый); 452 ТР (сине-фиолетовый); 525 Т (зеленый)

[1]Название люминофора отражает его способность люминесцировать в твердом состоянии (Т), органических растворителях (Р), в воде (В).

3.7.5. Перечень материалов, применяемых для магнитолюминесцентного и магнитопорошкового контроля

Тип	Наименование
Люмагпор-1	Магнитолюминесцентный порошок
Люмагпор-3Б	То же
Люмагпор-5	То же
МЛ-1	Магнитолюминесцентная паста
МК-1	Паста-присадка для водных магнитолюминесцентных суспензий
МК-2	То же (пониженной токсичности)
КВ-1	Паста магнитная красная для водной суспензии
К-МК	Паста магнитная для маслокеросиновой суспензии
СП	Светлый магнитный порошок
СВ	Светлая паста для водной суспензии
СМ-К	Светлая паста для маслокеросиновой суспензии

3.7.2.4. РЕКОМЕНДАЦИИ ПО КОНТРОЛЮ КАЧЕСТВА МАТЕРИАЛОВ

Данные рекомендации распространяются на материалы для капиллярной дефектоскопии и контроля параметров (табл. 3.7.6).

Плотность вещества определяется как отношение массы m к объему V, т.е.

$$\rho = m / V.$$

Пикнометрический метод. Плотность определяется при температуре 20 °С и указывается в г/см^3.

Вязкость - это свойство жидкого вещества к восприятию сдвигающего напряжения τ, вызываемого деформацией сдвига и зависящего от градиента среза D. Коэффициент пропорциональности

$$\eta = \frac{\tau}{D}$$

называется динамической вязкостью и выражается в Па·с.

Кинематическая вязкость - это отношение динамической вязкости η к плотности ρ, т.е.

$$\nu = \eta/\rho.$$

Она определяется на конечных точках соответствующего температурного диапазона и выражается в м^2/с.

Применяют капиллярный вискозиметр по Уббелоде на температурный диапазон 10 - 100 °С, а также вискозиметр с падающим шариком по Хапплеру на температурный диапазон -60 + +150 °С.

Поверхностное натяжение σ - это напряжение на поверхности, стремящееся уменьшить данную поверхность. Оно измеряется в Н/м при температуре 20 °С. Применяют тензиометр с пластиной, дугой или кольцом.

Смачиваемость - это адгезия жидкости на поверхности твердого тела, т.е. образование малого контактного угла (< 90°) между поверхностью жидкости и поверхностью твердого тела. В случае полного смачивания этот контактный угол равен 0°.

Плоская пластина из стекла, стали, алюминия, латуни площадью 100 × 100 мм тщательно очищается, например, щелочным промывочным средством, при помощи целлюлозной бумаги с использованием трихлорэтилена, этиленгликоля, ацетона или окунанием в ацетон, обезжиривается и сушится. Шероховатость шлифованных или имеющихся в состоянии поставки металлических пластин должна составлять по показателю Ra = 3 + 5 мкм. На середину горизонтально установленной пластины наносится 0,04 мл пенетранта и определяется средний диаметр смачиваемой площади (в качестве меры смачиваемости) в зависимости от времени.

Проникающая способность - это свойство пенетрантов к проникновению в капиллярные несплошности. Скорость проникновения пенетрантов может быть определена приближенно путем сложения двух мерительных плиток, при помощи стяжного устройства устанавливается щель шириной в несколько мкм. На верхнюю сторону щели напыляется проявитель, а на нижнюю сторону наносится капля пенетранта. Измеряется время от момента нанесения пенетранта до первых признаков окраски проявителя.

3.7.6. Параметры качества материалов, подлежащих контролю

Параметр качества	Дефектоскопический материал		
	Пенетрант	Очиститель	Проявитель
Вязкость	+	+	+
Температура воспламенения	+	+	+
Характеристика взрывоопасности	+	+	+
Коррозионное поведение	+	+	+
Светостойкость и стойкость к УФ-лучам	+	-	-
Стойкость при хранении	+	+	+
Время сушки	+	-	+
Санитарно-гигиенические свойства	+	+	+
Выявляемость дефектов	Совместное испытание всего набора материалов		

Примечание. + параметры обязательные; - параметры необязательные.

Выявляемость дефектов (визуальная в отличие от статистической выявляемости) указывает на то, какой определенный наименьший поверхностный дефект (например, ширина трещины) еще визуализируется данным набором материалов. Она определяется на естественных или искусственных дефектах при температуре 20 °С, причем необходимо применять установленную заводом-изготовителем технологию контроля. Для испытаний используют стандартные образцы.

Образец выполняют из измерительных плиток так, что последние образуют калиброванную клинообразную капиллярную щель, как описано выше при испытании проникающей способности пенетранта.

Пластина из азотированной стали, деформированная шариком. Изготовляется пластина из азотируемой стали размерами 50 × 50 × 3 мм, поверхность которой шлифуется так, чтобы шероховатость составила Ra = 3 + 4 мкм. В середине сверлят проходное отверстие диаметром 5 мм, фаска с обеих сторон 60°. После этого пластина азотируется (глубина азотирования 0,2 - 0,7 мм), очищается от окалины мелкой шлифовальной бумагой и кладется на стальное кольцо (внутренний диаметр 30 мм, высота 25 мм, наружный диаметр около 60 мм). На противоположной стороне 20-миллиметровый стальной шар вдавливается с помощью испытательной машины в отверстие силой около 2 - 3 кН, пока треск не укажет на образование трещин в зоне растяжения. Трещины измеряют под микроскопом. Путем повторного надавливания на переднюю или обратную сторону плитки можно управлять раскрытием трещин. Ширина трещины определяется с помощью растрового сканирующего электронного микроскопа при необходимом увеличении. Глубина трещин определяется по поперечным шлифам.

Деформируемая азотированная стальная пластина. Стальная пластина размерами 70 × 30 × 3 мм с шероховатостью не более Ra = 3 + 4 мкм азотируется. Пластина опирается на концах и медленно нагружается в середине цилиндрическим стальным телом, пока азотированный слой не растрескается и не образуются трещины необходимой величины. В дальнейшем проводится исследование, как описано выше.

Цветовые качества цветных и люминесцентных пенетрантов характеризуются светоабсорбционной способностью, которая зависит от длины волны.

Цветовые качества определяют спектрофотометром для цветных пенетрантов в диапазоне волн 500 - 600 нм и для люминесцентных пенетрантов в диапазоне длин волн 300 - 400 нм. Измерения проводят в растворе пенетранта (2 мл в 1000 мл изопропанола или другого растворителя). Измеряется светопоглощение (E) в зависимости от длины волны. При этом

$$E = \log J_0 / J,$$

где J_0 - падающий световой поток; J - прошедший световой поток.

Находят максимум светопоглощения и соответствующую длину волны.

Методом мениска цветовую интенсивность цветного пенетранта и световую интенсивность люминесцентного пенетранта характеризуют минимальной, еще выявляемой толщиной цветового или флюоресцентного слоя. На обезжиренную ровную стеклянную плитку наносится 1 - 2 капли пенетранта, сверху накладывается выпуклая линза малой кривизны, линза легко прижимается. Белое пятно, которое образуется на месте контакта, рассматривается и измеряется под просвечивающим микроскопом при нужном увеличении.

Цветовую интенсивность цветного пенетранта и световую интенсивность люминесцентного пенетранта оценивают визуально путем растворения 2 мл соответствующего пенетранта в 1000 мл изопропанола, метиленхлорида или другого подходящего растворителя. Исследуемые растворы, а также стандартные растворы наливаются в пробирки. Растворы рассматриваются в диффузном белом или ультрафиолетовом свете (в случае люминесцентных пенетрантов). Сравнительно оценивается яркость, цвет или интенсивность люминесцентных растворов.

Белизна проявителей определяется как относительное отражение, которое представляет собой отношение всего отраженного светового потока к падающему световому потоку. Белизна определяется в установленном спектральном диапазоне и служит для характеристики белых проявителей.

Коррозия - это исходящее с поверхности разрушение объектов вследствие химической или электрохимической реакции с дефектоскопическим материалом. При коррозионном испытании определяется, оказывает ли материал на выбранные объекты коррозионное воздействие. Контролю подвергаются все материалы набора (пенетрант, очиститель, проявитель).

Чаще проводят кратковременное коррозионное испытание. Листы из меди (электролитической), латуни, стали, алюминия или магния площадью не менее 750 мм^2 обрабатывают шлифовальной шкуркой 400. Круглые материалы обтачивают. Образцы чистят ватой, смоченной бензином и этанолом или ацетоном. Соответственно два одинаковых образца, которые не должны соприкасаться, подвешивают в стеклянный сосуд с данным дефектоскопическим материалом и выдерживают в течение трех часов при температуре 50 °С. После этого образцы следует обмыть, сушить и при 20-кратном увеличении визуально сравнить с необработанными образцами. Образцы не корродировали, если на поверхности нет цветовых изменений. Более точно измеряют состояние поверхности путем измерения освещенности при помощи люксметра с селеновым фотоэлементом, причем обработанный и необработанный образец освещается при определенных условиях лампой в затемненном помещении, например освещение под углом 30° и измерение под углом 60° к нормали при постоянном расстоянии.

Галоиды и сера, которые ускоряют коррозию, выявляют в случае необходимости, например, при контроле аустенитных сталей, титановых и никелевых сплавов по стандартам.

Из полученных данных можно сделать выводы о возможностях применения дефектоскопических материалов для особых объектов.

Светостойкость - это устойчивость пенетрантов к воздействию света дневного или полученного от искусственных источников, определяется по изменению цветовых качеств. Светостойкость определяют при освещении, например, галоидной (йодной) кварцевой лампой накаливания мощностью 1000 Вт. Для этого 5 мл пенетранта наливают в стеклянную чашку размерами 100 × 20 мм и в течение 24 ч поверхность пенетранта подвергается воздействию освещенности 3000±300 лк. При этом температура пенетранта не должна повышаться более чем на 20 °С и превышать 50 °С. После этого определяют цветовые качества цветных и люминесцентных пенетрантов.

Устойчивость к УФ-лучам - это стабильность люминесцентного пенетранта по отношению к излучению данного УФ-облучателя, определяемая по изменениям цветовых качеств.

Температурная устойчивость и стабильность при хранении. Устойчивость капиллярных дефектоскопических материалов при переменах температуры означает постоянство цветовых качеств, вязкости и структуры при многократной перемене температуры в диапазоне -15 + ± 60 °С или в диапазоне температур, установленном заводом-изготовителем. При испытании на температурную устойчивость 100 мл контролируемого материала в стеклянном сосуде 250 мл подвергают четырехкратному циклу изменения температуры от -15 °С до +60 °С и времени выдержки соответственно 1 ч. Последняя температура должна составлять -15 °С. Определяют цветовые качества пенетрантов и вязкость всех материалов набора при температуре 20 °С.

Время сушки. Под временем сушки понимается продолжительность периода от момента нанесения материала до момента, когда при легком соприкосновении образца со стержнем из ваты не наблюдается следов дефектоскопического материала на вате. Для этого обезжиренную стеклянную плитку размером 26 × 76 мм окунают приблизительно на 50 мм или на нее напыляют материал. Затем плитка подвешивается в вертикальном положении и сушится на воздухе (неподвижном) при температуре 20±2 °С. Высыхание проверяют каждые 15 мин на верхней половине стеклянной плитки.

Дефектоскопы с источниками УФ-излучения снабжают встроенными или отдельными устройствами, защищающими лицо и глаза работающего от воздействия УФ-излучения. Для индивидуальной защиты глаз следует применять защитные очки со светофильтрами из желтого стекла ЖС4 толщиной не менее 2 мм для контроля объектов в условиях затемнения или светофильтрами С-4 ... С-9 толщиной 3,5 мм для обслуживания и наладки облучательных устройств с неспециализированными ртутными лампами со снятыми светофильтрами и кожухами.

В качестве пленочного защитного негорючего материала, поглощающего УФ-излучение, но пропускающего видимый свет, следует применять полиамидную пленку типа ПМ марки А толщиной не менее 30 мкм.

В составных частях стационарных дефектоскопов, предназначенных для использования цветного и ахроматического методов капиллярной дефектоскопии с визуальным способом выявления дефектов, следует применять комбинированное освещение (общее и местное).

Комбинированную освещенность обработанной проявителем контролируемой поверхности в зависимости от ее особенностей выбирают в пределах 750 - 4000 лк при применении люминесцентных источников света или 500 - 3000 лк при использовании ламп накаливания. Общая составляющая освещенности (за вычетом местной) соответственно должна составлять от 300 до 750 лк или от 200 до 500 лк.

Помещения для стационарных дефектоскопов, содержащих УФ-облучатели с неспециализированными ртутными лампами, обеспечивают вентиляцией.

Проверку чувствительности дефектоскопов проводят визуальной оценкой выявляемости соответствующих дефектов в объектах контроля либо в одном из типов образцов для испытаний, приведенных с соблюдением требований к УФ-облучателям.

3.7.3. ПРОВЕДЕНИЕ КАПИЛЛЯРНОГО КОНТРОЛЯ

3.7.3.1. ОСНОВНЫЕ ОПЕРАЦИИ

Основными операциями капиллярного неразрушающего контроля являются:

подготовка объектов к контролю;

обработка объекта дефектоскопическими материалами;

проявление дефектов;

обнаружение дефектов и расшифровка результатов контроля;

окончательная очистка объекта.

Технологический режим операций контроля (продолжительность, температуру, давление) устанавливают в зависимости от используемого набора дефектоскопических материалов, особенностей объекта контроля и типа искомых дефектов, условий контроля и используемой аппаратуры.

Подготовка объектов к контролю включает очистку контролируемой поверхности от всевозможных загрязнений, удаление лакокрасочных покрытий, моющих составов и дефектоскопических материалов, оставшихся от предыдущего контроля, а также сушку объекта контроля.

Для предварительной очистки поверхностей применяют механическую очистку объекта контроля струей песка, дроби, косточковой крошки, другими диспергированными абразивными материалами или резанием, в том числе обработку поверхности шлифованием, полированием, шабровкой.

Для окончательной очистки контролируемых объектов используют следующие виды очисток:

в парах органических растворителей,

растворяющую очистку воздействием на объект контроля удаляющих загрязнения водяных или органических растворителей, в том числе посредством струйной промывки, погружения, протирки;

химическую очистку водными растворами химических реагентов, взаимодействующих с удаляемыми загрязнениями, не повреждая объект контроля;

электрохимическую очистку водными растворами химических реагентов с одновременным воздействием электрического тока;

ультразвуковую очистку органическими растворителями, водой или водными растворами химических соединений в ультразвуковом поле с использованием режима ультразвукового капиллярного эффекта. Ультразвуковой капиллярный эффект - явление аномального увеличения высоты и скорости подъема жидкости в капиллярной полости под действием ультразвука;

анодно-ультразвуковую очистку водными растворами химических реагентов с одновременным воздействием ультразвука и электрического тока;

тепловую очистку путем прогрева при температуре, не вызывающей недопустимых изменений материала объекта контроля;

сорбционную очистку смесью сорбента и быстросохнущего органического растворителя, наносимой на очищаемую поверхность выдерживаемой и удаляемой после высыхания.

Необходимые способы очистки, их сочетание и требуемую чистоту контролируемых поверхностей определяют в технической документации на контроль. При высоком классе чувствительности контроля предпочтительны не механические, а химические и электрохимические способы очистки, в том числе с воздействием на объект контроля ультразвука или электрического тока. Эффективность этих способов обусловлена оптимальным выбором очищающих составов, режимов очистки, сочетанием и последовательностью используемых способов очистки, включая сушку.

При поиске сквозных дефектов в стенках трубопроводных систем, баллонов, агрегатов и аналогичных полостных объектов, заполненных газом или жидкостью и находящихся под избыточным давлением, полости таких объектов освобождают от жидкости и доводят давление газа в них до атмосферного.

Этап обработки объекта дефектоскопическими материалами заключается в заполнении полостей дефектов индикаторным пенетрантом, удалении его избытка и нанесении проявителя.

Для заполнения дефектов индикаторным пенетрантом применяют следующие способы:

капиллярное, самопроизвольное заполнение полостей несплошностей индикаторным пенетрантом, наносимым на контролируемую поверхность смачиванием, погружением, струйно, распылением с помощью сжатого воздуха, хладона или инертного газа;

вакуумное заполнение полостей несплошностей индикаторным пенетрантом при давлении в их полостях менее атмосферного;

компрессионное заполнение полостей несплошностей индикаторным пенетрантом при воздействии на него избыточного давления;

ультразвуковое заполнение полостей несплошностей индикаторным пенетрантом в ультразвуковом поле с использованием ультразвукового капиллярного эффекта;

деформационное заполнение полостей несплошностей индикаторным пенетрантом при воздействии на объект контроля упругих колебаний звуковой частоты или статического нагружения, увеличивающего раскрытие несплошностей.

Для выявления сквозных дефектов пенетрант допускается наносить на поверхность, противоположную контролируемой.

Температура контролируемого объекта и индикаторного пенетранта, а также продолжительность заполнения полостей дефектов должны быть в пределах, указанных в технической документации на данный дефектоскопический материал и объект контроля.

Избыток индикаторного пенетранта удаляют или гасят на контролируемой поверхности одним из следующих способов:

протиранием салфетками с применением в необходимых случаях очищающего состава или растворителя;

промыванием водой, специальным очищающим составом или их смесями; погружением, струйно или распылением;

обдуванием струей песка, дроби, косточковой крошки, древесных опилок или другого абразивного очищающего материала;

воздействием на пенетрант гасителем люминесценции или цвета.

Проявитель наносят указанными способами:

распылением жидкого проявителя струей воздуха, инертного газа или безвоздушным методом;

электрораспылением проявителя в электрическом поле струей воздуха или механическим;

созданием воздушной взвеси порошкообразного проявителя в камере, где размещен объект контроля;

нанесением жидкого проявителя кистью, щеткой или заменяющими их средствами;

погружением объекта контроля в жидкий проявитель;

обливанием жидким проявителем;

электроосаждением проявителя путем погружения в него объекта контроля с одновременным воздействием электрического тока;

посыпанием порошкообразного проявителя, припудривание или обсыпание объекта контроля;

наклеиванием ленты пленочного проявителя прижатием липкого слоя к объекту контроля.

При использовании самопроявляющихся, фильтрующихся и других подобных индикаторных пенетрантов проявитель не наносят.

Проявление следов дефектов представляет собой процесс образования рисунка в местах наличия дефектов, для чего используют один из способов проявления индикаторных следов:

выдержку объекта контроля на воздухе до момента появления индикаторного рисунка;

нормированное по продолжительности и температуре нагревание объекта контроля при нормальном атмосферном давлении;

выдержку в нормированном вакууме над поверхностью объекта контроля;

упругодеформированное воздействие на объект посредством вибрации, циклического или повторного статического его нагружения.

Обнаружение дефектов представляет собой сочетание или отдельное использование способов наблюдения и регистрации индикаторного следа.

Способы обнаружения индикаторного следа:

визуальное обнаружение, в том числе с применением оптических или фотографических средств, оператором видимого индикаторного следа несплошности, выявленной люминесцентным, цветным, люминесцентно-цветным и яркостным методами;

фотоэлектрическое обнаружение и преобразование с применением различных средств косвенной индикации и регистрации сигнала видимого индикаторного следа несплошности, выявленной люминесцентным, цветным, люминесцентно-цветным и яркостным методами;

телевизионное обнаружение, преобразование в аналоговую или дискретную форму с соответствующим представлением на экран, дисплей, магнитную пленку сигнала от видимого индикаторного следа несплошности, выявленной люминесцентным, цветным, люминесцентно-цветным и яркостными методами;

инструментальное обнаружение косвенными приемами сигнала от невидимого глазом индикаторного следа несплошности или сигнала от индикаторного пенетранта, находящегося внутри полости несплошности.

Окончательную очистку объектов контроля осуществляют одним или несколькими технологическими приемами удаления проявителя, а при необходимости и остатков индикаторного пенетранта:

протиранием салфетками в необходимых случаях с применением воды или органических растворителей;

промыванием объекта в воде или органических растворителях с необходимыми добавками и применением вспомогательных средств, в том числе щеток, ветоши, губок;

ультразвуковой обработкой объекта в воде или органических растворителей с необходимыми добавками;

анодной электрохимической обработкой объекта растворами химических реагентов с одновременным воздействием электрического тока;

обдуванием покрытого проявителем объекта абразивным материалом в виде песка, крошки или гидроабразивными смесями;

выжиганием проявителя путем нагревания объекта до температуры сгорания проявителя;

отклеиванием ленты пленочного проявителя от контролируемой поверхности с индикаторным следом несплошности;

отслоением слоя проявителя от контролируемой поверхности с индикаторным следом несплошности.

Объекты, прошедшие капиллярный контроль, следует подвергать антикоррозионной защите.

3.7.3.2. ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ И ОЦЕНКА РЕЗУЛЬТАТОВ КОНТРОЛЯ

Чувствительностью капиллярного НК называют качество капиллярного неразрушающего контроля, характеризуемое порогом, классом и дифференциальной чувствительностью средства контроля в отдельности либо целесообразным их сочетанием.

Порог чувствительности капиллярного НК - раскрытие несплошности типа единичной трещины определенной длины, выявляемое с заданной вероятностью по заданным геометрическому или оптическому параметрам следа. Верхнему порогу чувствительности соответствует наименьшее выявляемое раскрытие, а нижнему - наибольшее.

Геометрический параметр индикаторного рисунка - отношение среднего значения ширины индикаторного следа к раскрытию выявленной несплошности.

Оптический параметр индикаторного рисунка - отношение среднего значения яркости индикаторного следа к среднему значению яркости фона.

Фон поверхности - бездефектная поверхность объекта контроля, обработанная дефектоскопическими материалами.

Дифференциальная чувствительность средства капиллярного НК - отношение изменения оптического и (или) геометрического параметра индикаторного следа к вызывающему его изменению раскрытия при неизменной глубине и длине несплошности типа единичной трещины.

Класс чувствительности капиллярного НК - диапазон значений преимущественного раскрытия несплошности типа единичной трещины определенной длины при заданных условиях вероятности выявления, геометрическом и (или) оптическом параметрах следа.

Класс чувствительности контроля определяют в зависимости от минимального размера выявляемых дефектов в соответствии с табл. 3.7.7. Постигаемую чувствительность в необходимых случаях определяют на натурных объектах или искусственных образцах с естественными или имитируемыми дефектами, размеры которых уточняют металлографическими или другими методами анализа.

3.7.7. Определение класса чувствительности капиллярного контроля

Класс чувствительности	Минимальный размер (ширина раскрытия) дефектов, мкм	Ультрафиолетовая облученность при использовании люминесцентных методов (Л, ЛЦ, ФЛ, ФЛЦ)		Освещенность при использовании цветных и яркостных методов (Ц, Я, ФЦ) для ламп, лк			
				люминесцентных		накаливания	
		отн. ед.	мкВт/см^2	комбинированная	общая	комбинированная	общая
I	Менее 1	300$_{-100}$	3000$_{-1000}$	2500*	750	2000*	500
II	1 ... 10						
III	10 ... 100	150±50	1500±500	2000	500	1500	400
IV	100 ... 500	75±25	750±250	750	300	500	200
Технологический	Не нормируют	До 50	До 500				

*При цветном методе с диффузионным проявлением допускается принимать значения соответственно 4000 и 3000 лк.

Глава 3.8

ТОМОГРАФИЯ

3.8.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Томография промышленных объектов может быть осуществлена с применением различных видов зондирующего излучения - радиационного, электромагнитного, акустического и т.д. Однако наиболее развита рентгеновская томография. Это сложилось исторически, поскольку развитие томографии началось с медицинских применений. Вместе с тем применительно к контролю изделий машиностроения в настоящее время развиты следующие виды томографии:

- радиационная, в том числе рентгеновская;
- ЯРМ-томография, то-есть томография на основе ядерного магнитного резонанса;
- акустическая, в том числе ультразвуковая;
- оптическая, в том числе тепловая;
- СВЧ.

3.8.2. РАДИАЦИОННАЯ ТОМОГРАФИЯ

Развитие средств промышленной радиационной вычислительной томографии (ПРВТ) базируется на достижениях в рентгеновской вычислительной томографии для медицины. Главная цель ПРВТ можно сказать, как в медицине - это контроль и диагностика с той лишь разницей, что ПРВТ диагностирует физико-механические свойства объектов, произведенных в различных отраслях промышленности. Одна из главных задач ПРВТ - прогноз прочностных свойств технических изделий.

Основные области применения ПРВТ - это контроль:

в космической промышленности - твердого топлива, узлов двигателей и элементов конструкций ракет, спутниковой аппаратуры;

в авиационной промышленности - лопаток и деталей турбин, лопастей, крыльев, элементов силового и электронного оборудования;

в атомной энергетике - тепловыделяющих элементов, узлов реактора, трубопроводов, энергетического оборудования;

в нефтяной промышленности - платформ, элементов бурового оборудования, трубопроводов, элементов перекачивающего оборудования;

в электротехнической промышленности - двигателей, коаксиальных кабелей;

в строительстве - несущих конструкций и опор из стали и бетона, мостовых и строительных колонн;

в транспортной и автомобильной промышленности - карбюраторов, топливных баков, корпусов, шин, несущих элементов;

в оборонной промышленности - зарядов, снаряжения, элементов конструкций;

- в химической промышленности - трубопроводов, контейнеров, фильтров;
- в металлургической промышленности - металлоконструкций, сварных соединений;
- в электронной промышленности - компонентов электронной техники и микроэлектроники;
- в деревообрабатывающей промышленности - свай, колонн, шпал, растущих деревьев.

В отличие от применения в медицине, где поперечный размер объекта около 0,5 м, в случае промышленного использования диапазон поперечных размеров объектов томографии очень широк - от десятков микрометров до 200 - 250 см; плотность имеет значения от 0,05 до 10 г/см^3 и более. Поэтому энергия квантов излучения должна лежать в пределах от 20 кэВ до 15 - 20 МэВ. Дозная нагрузка в медицине четко ограничена; при томографии промышленных изделий таких ограничений нет, и это приводит к возможности повышения производительности контроля. В медицине пространственное разрешение лучше 0,5 - 1 мм обычно не требуется, следовательно, достаточное число точек в реконструированном изображении должно составлять примерно $2,5 \cdot 10^5$. При диагностировании некоторых ответственных промышленных объектов это число должно достигать 10^8. В медицине время сканирования одного сечения составляет одну-несколько секунд, а время обработки данных 5 - 30 с. В промышленной томографии высокая производительность бесспорно желательна, однако важнее получить высококачественную и достоверную информацию об объекте, поэтому время сбора информации иногда составляет десятки минут и более. Особенность ПРВТ также в том, что в ряде случаев доступ к объекту односторонний, т. е. полный набор проекций не может быть собран, и реконструкция должна производиться по неполному набору данных.

Следует отметить, что, учитывая сложность и высокую стоимость средств контроля на основе ПРВТ, целесообразно их использовать для контроля особо ответственных изделий, от которых требуется высокая функциональная надежность или большая структурная однородность, высокая степень воспроизводимости параметров в серийном изготовлении.

ПРВТ можно использовать при производстве и эксплуатации ответственных изделий машиностроения:

- в составе диагностического комплекса для автоматизированной паспортизации ресурса и показателей надежности изделий;

- для контроля химического состава при отработке технологии;
- для управления технологическим режимом в процессе отработки изделий при постановке их на производство;
- для диагностики с целью определения остаточного ресурса изделий в процессе эксплуатации;
- для исследования физико-механических и структурных свойств изделий в процессе научно-исследовательской разработки.

Существо метода ПРВТ - реконструкция пространственного распределения линейного коэффициента ослабления зондирующего излучения в объеме контролируемого объекта в результате вычислительной обработки теневых интегральных проекций, полученных при рентгеновском просвечивании объекта в некотором достаточном количестве ракурсов. При этом удается детально контролировать геометрическую структуру и характер объемного распределения плотности и элементарного состава материалов без разрушения изделия любой сложной конфигурации.

Обычный рентгеновский снимок есть двумерная интегральная проекция объекта контроля в расходящемся пучке излучения. По набору таких проекций, представленных в численной форме, в принципе может быть восстановлено трехмерное распределение линейного коэффициента ослабления в объекте контроля. Однако такая задача чрезвычайно объемна, и поэтому в современной томографии трехмерную задачу сводят к двумерной и, следовательно, восстанавливают распределение линейного коэффициента ослабления в плоском сечении объекта по набору одномерных линейных проекций. Трехмерный объект может быть восстановлен в этом случае по набору плоских сечений.

Использование метода томографии обусловливает принципиально новые возможности неразрушающего контроля с помощью радиационного излучения:

- способность воспроизводить, анализировать внутреннюю структуру неоднородных промышленных изделий сложной формы и конфигурации без взаимного наложения изображений элементов внутренней структуры;
- в десятки раз большую, чем у радиографии, чувствительность обнаружения локальных нарушений сплошности, включений, разноплотностей;
- получение количественной цифровой информации о контролируемой структуре, что создает предпосылки для автоматизации обработки и использования результатов контроля.

Достоинства метода ПРВТ позволяют существенно расширить представления о потенциальной эффективности применения проникающих излучений в неразрушающем контроле.

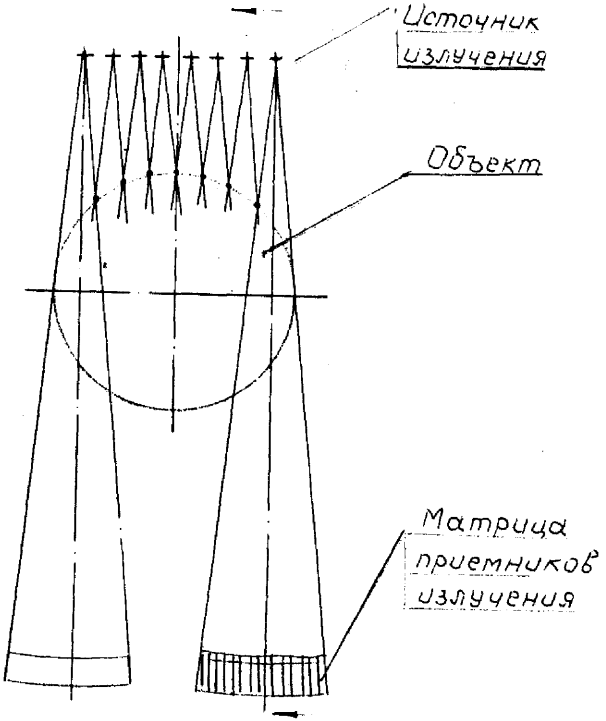


Рис. 3.8.1. Принцип работы ПРВТ

Принцип реализации ПРВТ показан на рис. 3.8.1, т.е. взаимное перемещение объекта контроля и плоского узкого расходящегося пучка проникающего излучения. При этом единичный приемник излучения или набор единичных приемников (матрица) фиксируют сигнал, определяемый интегральным ослаблением излучения по прямолинейной траектории, соединяющей источник и единичный приемник (детектор). Сигнал детектора в каждом положении определяется толщиной и элементным составом материала объекта по траектории луча.

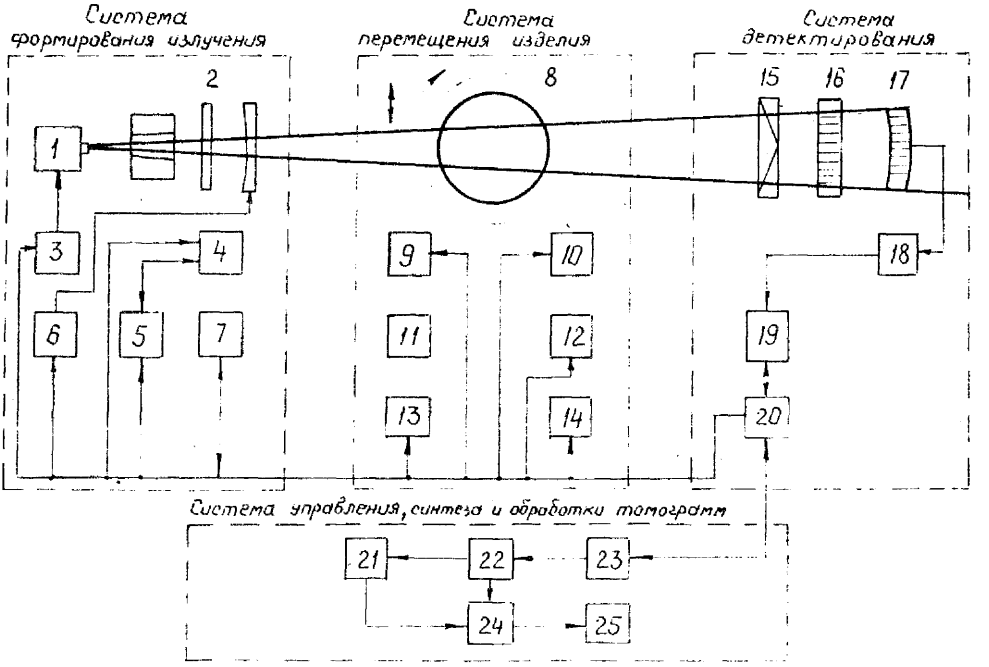


Рис. 3.8.2. Типичная структура ПРВТ

На самом деле промышленный томограф представляет собой сложную техническую систему, содержащую большое число устройств. Типичная структура промышленного томографа показан на рис. 3.8.2. Комплекс томографа включает в себя четыре системы - систему формирования излучения (*1* - *7*), систему перемещения изделия (*8* - *14*), систему детектирования (*15* - *20*), систему управления комплексом, синтеза и обработки томограмм (*21* - *25*).

Три основные этапа работы томографа:

1) сбор проекционных данных и ввод в ЭВМ;

2) предварительная обработка данных для их нормирования и учета искажающих влияний;

3) реконструкция, отображение, архивирование.

Первый этап состоит в управлении процессом генерации зондирующего излучения и многоракурсной регистрации излучения, прошедшего объект, аналоговом и аналого-цифровом преобразовании данных и буферизации в памяти системы обработки данных. Этот этап характеризуется управлением в реальном масштабе времени сканирующей системой с высокой точностью позиционирования или измерения относительного положения объекта и систем зондирования и регистрации, вводом в режиме *on-line* примерно 10^6 отсчетов за один цикл измерений в темпе, регламентированном временем сканирования.

Этап предварительной обработки включает максимальное снижение влияния методических и инструментальных погрешностей. Ряд источников погрешностей вызывает необходимость принятия мер для их компенсации. К ним относят:

- непостоянство характеристик излучения по интенсивности, пространству и спектру, формы и длительности импульса при импульсном характере излучения;
- влияние квантовой природы излучения;
- неравномерность относительного движения изделия, неточное определение координат изделия в пространстве в каждый момент;
- неидентичность и непостоянство во времени характеристик детекторов;

- неидентичность и непостоянство во времени характеристик канальной электронной аппаратуры;
- ограничение числа отсчетов в проекции и числа проекций (погрешность дискретности), ограничение числа дискрет при представлении непрерывного ядра свертки;
- погрешность из-за неточной обработки данных и т.д.

Реализация ПРВТ с высокими характеристиками возможна только при сбалансированных характеристиках систем и подсистем комплекса, оптимизированном выборе параметров элементов ПРВТ. Все это требует математического моделирования на начальной стадии разработки комплекса. Моделированию подлежат физические процессы при трансмиссионном многоракурсном сборе данных в сканирующей подсистеме. Учитывая обусловленность статистического подхода в описании процессов переноса излучения в многокомпозиционных средах, целесообразно использовать метод Монте-Карло для расчетной модели сканирующей системы с объектом контроля. При этом должен моделироваться реальный спектр источника излучения. Математическое моделирование должно способствовать оптимизации энергетических параметров источника излучения, решению композиционных и геометрических задач, отработке технологии производства материалов и конструкции детекторов, определению технических требований к элементам и системам томографа.

Коротко задачи математического моделирования можно сформулировать следующим образом. Пусть объект характеризуется некоторой количественной величиной μ, однако измерению подлежит некоторая косвенная величина

$$\rho = A\mu,$$

где оператор A определяется как характером объекта и взаимодействия зондирующего излучения с объектом, так и свойствами измерительного комплекса.

При моделировании строится оператор A, адекватно описывающий объект и процедуру измерения, формализуются количественные характеристики μ и ρ, по ρ определяются μ, для чего приведенное выше уравнение решается относительно μ. При этом на первом этапе моделирования выбирается класс функций, моделирующих свойства исследуемого объекта, а также их конечномерная аппроксимация.

В промышленной томографии в качестве объекта можно взять класс функций μ (линейный коэффициент ослабления рентгеновского излучения), финитных в пространстве R^3 и имеющих ограниченную полную вариацию, а в качестве дискретного аналога класса можно рассматривать M_N - конечномерное множество ступенчатых функций, определенных на некоторых разбиениях носителя указанных финитных функций на конечные семейства попарно не пересекающихся подмножеств. Значения функций μ или $\hat{\mu} \in M_N$ характеризуют величину линейного коэффициента ослабления исследуемого объекта.

На втором этапе строят математическую модель $\rho = A\mu$, описывающую физические процессы, происходящие при распространении излучения в исследуемом объекте для заданной геометрии томографических измерений.

На третьем этапе выбирают и разрабатывают алгоритмы определения значений оператора A на заданном классе функций, моделирующих физические характеристики известного объекта (прямая задача) и по построенным значениям и другой известной информации об объекте находят устойчивые к малым изменениям исходных данных приближения к искомым физическим характеристикам μ (обратная задача).

Наконец, на четвертом этапе целенаправленно оптимизируют конкретные характеристики выбранного варианта структурной организации томографа на основе вариации исходных данных. Для оценки вариантов должен быть выбран критерий оценки. В соответствии с этим критерием выбирают параметры, минимизирующие расхождение между изображением объекта (фантома) и реконструированным изображением.

3.8.2.1. ВЫБОР АЛГОРИТМА РЕКОНСТРУКЦИИ ТОМОГРАФИЧЕСКОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ

Все алгоритмы реконструкции изображения сечения объекта по проекционным данным предполагают редукцию основного операторного уравнения метода вычислительной томографии

$$R\mu = US_{\mu}^{-1}\psi = p \qquad (1)$$

к интегральным или дифференциальным уравнениям математической физики, или к системе линейных алгебраических уравнений, нахождение решения которых с соответствующими дополнительными условиями и ограничениями является более простой задачей, чем непосредственное решение (1).

Здесь μ - искомое пространственное или пространственно-временное распределение некоторой физической величины, описывающей определенные элементы внутренней структуры исследуемого объекта;

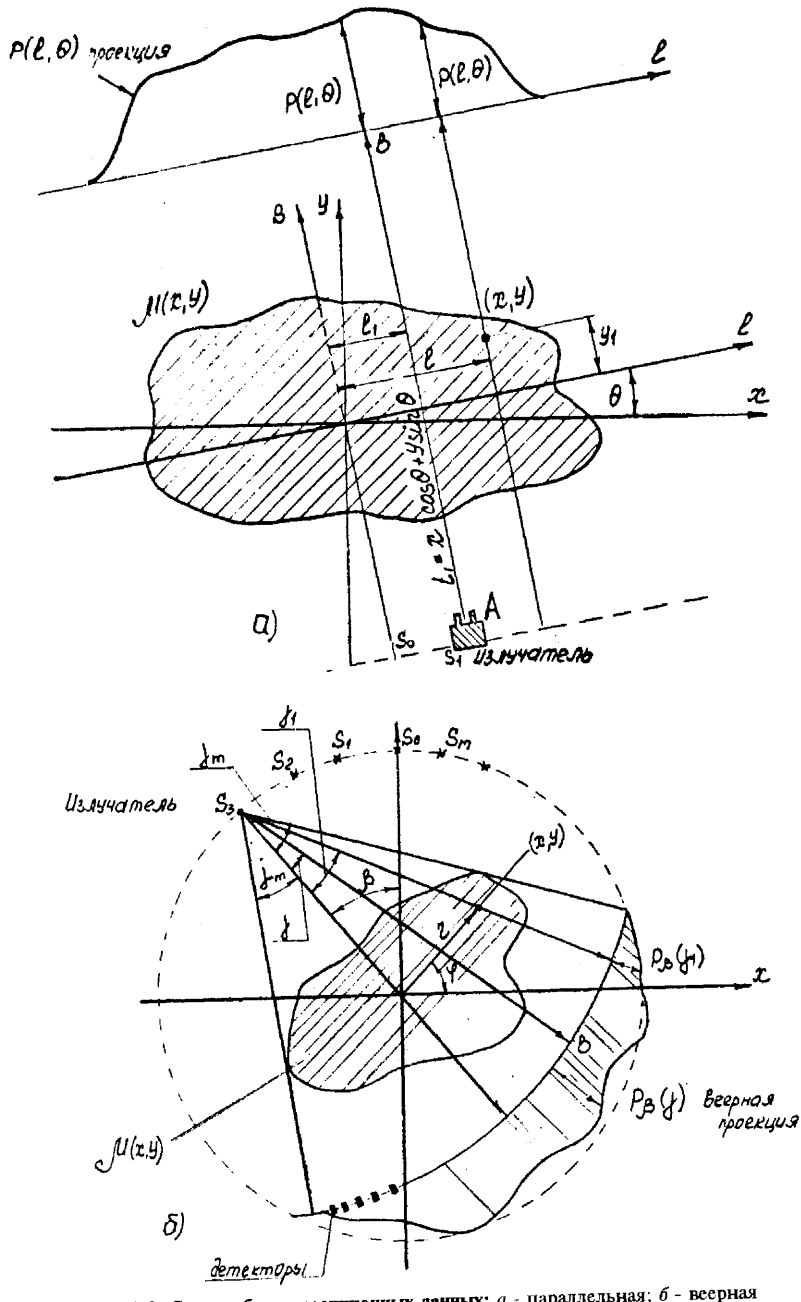


Рис. 3.8.3. Схемы сбора проекционных данных: *а* - параллельная; *б* - веерная

$F \in \mu$ - нормированное функциональное пространство;

p - интегральная проекция;

$P \in p$ - пространство исходных томографических данных;

$S_{\mu}^{-1}\psi$ - выражение, характеризующее поле проникающего излучения и его источников;

U - оператор, действующий из функционального пространства Ф, которому принадлежит ψ, в пространство P;

R - оператор метода вычислительной томографии, действующий из F в P.

Все множество алгоритмов реконструкции изображения можно разбить на две основные группы:

1) алгоритмы, основанные на использовании преобразования;

2) алгоритмы реконструкции, основанные на разложении функций в ряд.

Эти алгоритмы существенно отличаются друг от друга как последовательностью и сложностью вычислительных процессов при обработке исходных томографических данных, так и точностью реконструкции изображения.

Существуют две схемы сбора измерительных данных. Первая приведена на рис. 3.8.3, *а*. Характер многообразий $\{S(\bar{l})\}$, по которым производится интегрирование при получении множеств проекций $\{p\}$, в этой схеме есть семейство прямых линий, инвариантных относительно группы вращения вокруг центра декартовой системы координат (x,y). Число шагов различных положений источника проникающего излучения во время тактов сбора измерительных данных обозначено точками $S_0, S_1, \ldots, S_M$. Полоса детекторов, регистрирующих проникающее излучение, состоит из $2N + 1$ расположенных по прямой детекторов.

Двумерная функция $\mu(x,y)$, изображение которой необходимо реконструировать, является пространственно-ограниченной; значения ее вне окружности диаметра d принимаются равными нулю. Прямые, параллельные оси S и расположенные к оси y под углом θ, являются проецирующими лучами и описываются уравнением

$$l = x\cos\theta + y\sin\theta,$$

где l - длина перпендикуляра, опущенного из начала координат (x,y) на отдельный луч.

На рис. 3.8.3, *б* показана геометрия веерного сбора проекционных данных. Более широко распространена первая схема.

В общем виде задача реконструкции функции $\mu(x,y)$ по идеальным проекциям была решена Радоном, который показал, что

$$\mu(x,y) = \frac{1}{2\pi^2}\int_0^{\pi}\int_{-r}^{r}\frac{1}{x\cos\theta + y\sin\theta - l}\times$$

$$\times\frac{\partial p(l,\theta)}{\partial l}\,dl\,d\theta.$$

Дискретные версии обратного преобразования Радона, которые позволяют реконструировать $\mu(x,y)$ по ее радоновскому образу через известные значения x и y и вектор измерений $\bar{P}$, называют *алгоритмами с преобразованием*.

Алгоритмы реконструкции с преобразованием базируются на важном допущении, что функции $\mu(x,y)$ и $R\mu$ относятся к классу функций, которые однозначно определяются конечным числом отсчетов, лежащих внутри области

$$x^2 + y^2 \le \left(\frac{d}{2}\right)^2,$$

т.е. имеют ограниченную протяженность спектра и обусловленную этим правомерность их разложения с использованием бесконечного ряда при интервале дискретизации $\le \dfrac{1}{2K_m}$, где K_m - граничная частота.

Реконструкцию обычно осуществляют на квадратной решетке дискретных значений декартовых координат

$$x = m_x\Delta S, \quad y = m_y\Delta S,$$

по M угловым интегральным проекциям, лежащим в интервале от 0 до 180^0 для схемы измерения в параллельных лучах и от 0 до 360^0 для схемы с геометрией в веерных лучах, где

ΔS - интервал дискретизации квадратной решетки восстанавливаемой томограммы;

$\Delta\theta = \dfrac{\pi}{M}$ - интервал дискретизации по углу;

$\Delta l = \dfrac{d}{2N+1}$ - интервал дискретизации проекции;

m_x, m_y - целые числа.

Наиболее распространен алгоритм обратного проецирования с фильтрацией сверткой (АОПФС). Данный алгоритм основан на следующем соотношении:

$$f(x,y) = \int_0^{\pi}\hat{p}_\theta(x\cos\theta + y\sin\theta)\,d\theta,$$

где $\hat{p}_\theta(l)$ - фильтрованные проекции, связанные с полученными проекциями следующим соотношением:

$$\hat{p}_\theta(l) = \int_{-\infty}^{\infty} p(\theta, l) h(l-\alpha) d\alpha,$$

где импульсная характеристика фильтра $h(l)$ представляет собой обратное преобразование Фурье от функции $|\omega|$ в частотной области,

$$h(l) = \int_{-\Omega}^{\Omega} |\omega| \exp(2\pi i k \omega) d\omega =$$

$$= 2\Omega_m^2 \mathrm{sinc}(2\Omega_m l) - \Omega_m^2 \mathrm{sinc}(\Omega_m l),$$

где Ω_m - частота, выше которой спектральная энергия в любой проекции равна нулю.

Если $\Omega_m = \dfrac{1}{2\Delta l}$, причем Δl равно расстоянию между соседними отсчетами в дискретизованной проекции, то

$$h(l) = \frac{1}{2\Delta l^2} \frac{\sin(2\pi l / 2\Delta l)}{2\pi l / 2\Delta l} - \frac{1}{4\Delta l^2} \times$$

$$\times \left(\frac{\sin(\pi l / 2\Delta l)}{\pi l / 2\Delta l} \right)^2.$$

Поскольку данные измеряются с интервалом дискретизации Δl и соответственно ограничиваются по полосе частот, для цифровой обработки нужно знать импульсную характеристику в пределах этой полосы и, следовательно, с тем же интервалом дискретизации. Из (2)

$$h(n\Delta S) = \begin{cases} \dfrac{1}{4\Delta l^2} & n = 0 \\ 0 & n - \text{четное} \\ \dfrac{1}{n^2 \pi^2 \Delta l^2} & n - \text{нечетное} \end{cases} \quad (n = 0, \pm 1, \pm 2, \ldots). \tag{3}$$

Дискретный алгоритм реконструкции для параллельной схемы сбора проекционных данных описывается следующими выражениями:

$$\mu^*(m_x \Delta S, m_y \Delta S) =$$

$$= \frac{\pi}{M} \sum_{n=0}^{M-1} \tilde{p}\left[Z(m_x \Delta S, m_y \Delta S, n\Delta\theta), n\Delta\theta \right] \times$$

$$\times \varphi(m_x \Delta S, m_y \Delta S, n\Delta\theta); \tag{4}$$

$$\tilde{p}(Z, n\Delta\theta) = \sum_{m=-N}^{N} \hat{p}(m\Delta l, n\Delta\theta) g(Z - m\Delta l); \tag{5}$$

$$\hat{p}(m\Delta l, n\Delta\theta) = \Delta l \sum_{g=-N}^{N} p(g\Delta l, n\Delta\theta) h((m-g)\Delta l); \tag{6}$$

$$Z(m_x \Delta S, m_y \Delta S, n\Delta\theta) = m_x \Delta S \cos n\Delta\theta +$$

$$+ m_y \Delta S \sin n\Delta\theta,$$

$$\varphi(m_x \Delta S, m_y \Delta S, n\Delta\theta) = 1.$$

Для схемы с веерными лучами не будем приводить выражения ввиду их громоздкости.

Выражение (4) есть процедура обратного проецирования; (6) есть дискретная свертка проекции p с ядром h, значения которого рассчитывают для случая ограничения пространственного спектра частотой Ω_m.

Таким образом, для получения дискретной оценки искомого изображения $\mu^*(x, y)$ по конечному множеству измерительных данных необходимо выполнить следующие этапы работы:

1) для каждого n в интервале $0 \le n \le M-1$ вычислить значения $\hat{p}(m\Delta l, n\Delta\theta)$ для $-N \le m \le N$, при этом получаем значения свернутой или фильтрованной проекции;

2) определить вклад в величину оценки $\mu^*(x, y)$ каждой свернутой проекции при фиксированном n и изменяющихся значениях m_x, m_y;

3) по интервальному процессу получить дискретную оценку искомого изображения.

Фурье-алгоритм (АФР) основан на так называемой теореме о проекциях, которая устанавливает фундаментальное соотношение между преобразованием Радона функции $\mu(x, y)$, двумерными преобразованиями Фурье функции $\mu(x, y)$ и одномерным преобразованием Фурье проекции $p(l, \theta)$ по первой переменной. Если известны все проекции и их преобразования Фурье в диапазоне углов

$0 \le \theta \le \pi$ для геометрии измерений в параллельных лучах и охваченным оказывается все пространство спектров, то известным становится и двумерное преобразование Фурье томограммы $M(k_x, k_y)$, из которого можно определить $\mu(x, y)$.

Первым этапом АФР является вычисление дискретного Фурье-образа по переменной l от дискретной проекции p.

Далее оценка $\mu^*(x, y)$ находится с помощью двумерного дискретного преобразования Фурье.

Использование одномерного и двумерного БПФ сокращает объем вычислений. Однако при этом точки, в которых необходимо определить значения $M(k_x, k_y)$, должны лежать на эквидистантной прямоугольной решетке. В связи с этим в АФР, использующем БПФ, предусматривается дополнительная процедура перехода от полярной решетки к прямоугольной.

Алгоритм реконструкции методом фильтрации обратного проецирования (АФОП) основан на соотношении между двумерным Фурье-образом искомого изображения $\mu(x, y)$ и радоновским образом того же изображения, подвергнутого процедуре обратного проецирования. Расчет оценки изображения $\mu^*(x, y)$ по проекции p для схемы с геометрией измерения в параллельных лучах распадается на следующие этапы:

1) обратное проецирование, как и в АОПФС;

2) вычисление двумерного дискретного преобразования Фурье функции $\hat{\mu}(m_x \Delta S, m_y \Delta S)$;

3) получение новой функции $\tilde{M}(k_x, k_y)$, что эквивалентно фильтрации двумерной сверткой функции $\bar{\mu}(m_x, m_y)$ в пространственной области;

4) нахождение оценки изображения $\mu^*(m_x \Delta S, m_y \Delta S)$ с использованием обратного двумерного преобразования Фурье.

Использование алгоритма БПФ на последнем этапе, так же как и в АФР, позволяет существенно сократить объем вычислений при получении оценки $\mu^*(x, y)$.

Алгоритмы реконструкции изображения, основанные на разложении функции в ряд, условно можно разбить на три группы:

1) алгебраические алгоритмы реконструкции;

2) алгоритмы реконструкции с квадратичной оптимизацией;

3) неитерационные алгоритмы реконструкции.

Алгебраические алгоритмы реконструкции (ААР) разделяют на аддитивные и мультипликативные. Для аддитивных ААР характерно то, что в процессе единственной итерации текущая оценка изображения $\vec{X}^{(k+1)}$ обновляется путем добавления к ней скалярной величины, кратной транспонированной строке проекционной матрицы R, в то время как в мультипликативных ААР обновление $\vec{X}^{(k+1)}$ происходит путем почленного умножения вектора-столбца $\vec{X}^{(k)}$ на величины, которые также кратны транспонированной строке проекционной матрицы R.

Основой алгоритмов реконструкции изображения с квадратичной оптимизацией, как и алгебраических алгоритмов реконструкции, является итерационный процесс, с помощью которого ищут решение совместной системы уравнений, минимизирующее обобщенную квадратичную функцию расхождения.

Искомая оценка вектора изображения $\vec{X}^{(*)}$ может также быть найдена по методу наименьших квадратов.

Сравнительный анализ алгоритмов реконструкции

Диагностические возможности, а также технико-экономические показатели систем промышленной томографии в немалой степени определяются выбранным алгоритмом реконструкции изображения внутренней пространственной структуры контролируемых объектов. Рассмотренное множество алгоритмов принципиально позволяет с любой наперед заданной точностью реконструировать искомое распределение $\mu(x, y)$.

Однако для получения с помощью разных алгоритмов сравнимых по качеству изображений требуются различные временные затраты, определяемые не только мерой сложности вычислений, но и такими параметрами, как число перемещений данных и вспомогательных неарифметических операций, общая структурная сложность алгоритма, возможности средств вычислительной техники. Кроме того, комплекс измерительной аппаратуры и средств обработки данных имеют собственные погрешности, которые в комплексе с погрешностями метода реконструкции определяют точность воспроизведения изображения.

Поскольку эффективность использования алгоритмов определяется многими факторами, ограничимся сравнительными оценками, в наибольшей степени характеризующими алго-

ритмы. Это достижимый уровень точности или качества реконструкции и мера сложности вычислений, позволяющая оценить временные затраты, связанные с получением искомой оценки.

Для сравнения сложности вычислительных процессов вводится понятие меры сложности вычислений $t(A_i)$, где t - число, характеризующее сложность работы алгоритма A_i применительно к исходным данным. Во многих случаях t характеризуется или числом элементарных шагов (например, числом арифметических операций, характеризующих длительность вычислительного процесса), или объемом памяти, который может понадобиться для реализации всех выкладок по ходу решения.

Менее строгой оценкой точности воспроизведения изображений является субъективная экспертиза, заключающаяся в сравнении реконструированного данным алгоритмом изображения $\mu(x,y)$ с исходным $\mu_э(x,y)$, которое является или математической моделью объекта, дискретная версия которой хранится в памяти ЭВМ, или реальной физической моделью с заранее известными структурными свойствами. Однако визуальная оценка базируется на психофизических свойствах зрительной системы человека и поэтому не является надежной. Специалисты довольно часто расходятся в том, какое из двух изображений точнее воспроизводит третье.

Строгим подходом к качественной оценке верности воспроизведения изображения является мера, которая выражается числовым результатом взаимного сравнения двух изображений.

Из сравнения мер различия можно видеть, что качество реконструкции изображения алгоритмами обратного проецирования с фильтрацией сверткой по массиву достаточно точных исходных данных практически выше, чем у других алгоритмов, однако это не означает, что не существует случаев, когда изображения более высокого качества не могут быть получены другими методами. Так, при высоком уровне шумов в исходных данных, например алгебраические алгоритмы реконструкции, являющиеся в отличие от детерминированных методов реконструкции с преобразователем в большинстве случаев вероятностными и обладающие в силу этого большей устойчивостью к погрешностям, позволяют восстанавливать в присутствии шумов изображения более высокого качества, чем АОПФС.

С достаточной степенью точности процесс реконструкции изображения $\mu^*(x,y)$ можно считать линейным и инвариантным относительно пространственного сдвига. Систему вычислительной томографии можно рассматривать поэтому как многомерный линейный пространственный фильтр, а исходное распределение $\mu(x,y)$ как входной сигнал. Следовательно, точность воспроизведения будет зависеть как от передаточной функции системы $H(K_x, K_y)$, так и от спектрального состава исходного распределения $M(K_x, K_y)$.

Поэтому в ряде работ предлагается по реконструкции точечного объекта, помещенного в начало координат, оценивать качество реконструкции изображения. Получившееся после реконструкции изображение называют *функцией импульсного отклика* или *функцией рассеяния точки*.

Критериями точности воспроизведения изображения по передаточной функции, описывающей процедуру реконструкции изображения, являются полуширина функции рассеяния точки на полувысоте, интенсивность первого бокового лепестка и интенсивность фона на большом расстоянии от максимума вдоль соответствующего направления.

Например, с использованием критерия качества по функции рассеяния точки были проведены исследования влияния различных функций ядра дискретной свертки и интерполирующей функции на точность воспроизведения изображения и определены их оптимальные сочетания при реконструкции по методам АОПФС и АФОП. Рекомендации сводятся в основном к реализации сильной низкочастотной фильтрации изображений и проекций, следствием чего является вывод о безусловной оптимальности линейной интерполяции и низкочастотности ядер свертки.

Кроме погрешностей, обусловленных особенностями алгоритмов реконструкции, существует и большая группа погрешностей, связанная с организацией сбора данных. Они являются неотъемлемыми спутниками измерительной аппаратуры вычислительной томографии и существенно влияют на точность воспроизведения пространственной структуры контролируемых объектов. К ним относятся:

- квантовая природа используемого рентгеновского излучения;
- нестабильности свойств излучателя;
- нестабильность детекторов;
- погрешности измерительной электроники, сканирующей системы и др.

Несмотря на такое многообразие источников ошибок, практически во всех коммерческих системах промышленной вычислительной томографии точность воспроизведения томограмм доведена до уровня методических ограничений за счет оптимизации конструкции, тщательного изучения систематических составляющих погрешностей измерения и их коррекции как на аппаратном, так и программном уровнях.

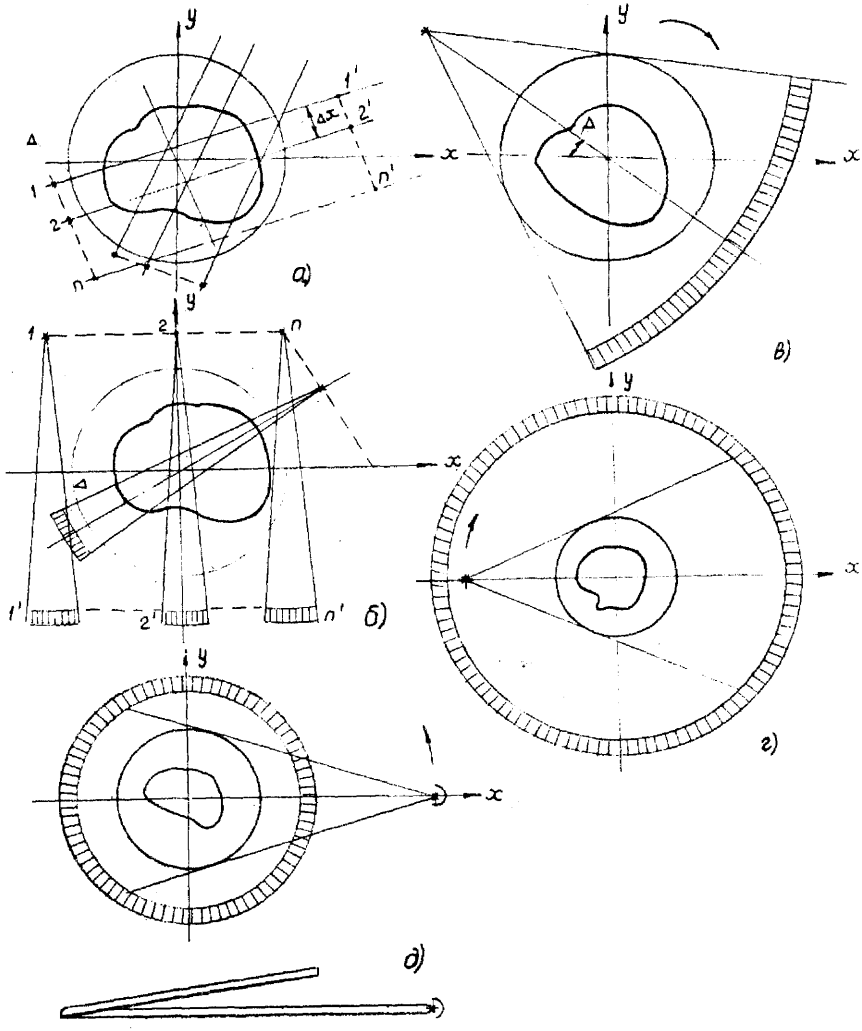


Рис. 3.8.4. Схемы сканирования поколений:
а - первого; *б* - второго; *в* - третьего; *г* - четвертого; *д* - пятого

В реальных томографических системах по ряду причин находит почти исключительное применение алгоритм обратного проецирования с фильтрацией сверткой. Известны отдельные случаи применения Фурье-алгоритма; для изделий определенной конфигурации при ограниченном числе проекций целесообразно применение итерационного метода. В то же время алгоритму обратного проецирования с фильтрацией сверткой свойственно высокое быстродействие при приемлемой точности, поскольку для его реализации требуется относительно малое число операций. Кроме того, он позволяет осуществлять обратное проецирование отдельной обработанной проекции независимо от совокупности остальных, так что полное изображение может быть получено непосредственно после обработки отдельной проекции. Такая реконструкция близка к реконструкции в реальном времени.

3.8.2.2. ОСНОВНЫЕ СИСТЕМЫ РАДИАЦИОННЫХ ТОМОГРАФОВ

Сканеры

Трехмерная структура объекта реально реконструируется последовательно, слой за слоем. В этом случае для реконструкции необходимо иметь данные ослабления излучения по траекториям, лежащим в плоскости слоя.

Для эффективной реконструкции этот набор должен быть полным. Понятие полноты проекционных данных базируется на следующем:

- проекционные данные получены по направлениям с равным угловым интервалом в пределах 180^0 или 360^0;
- по всем дискретным направлениям получены равноотстоящие проекционные данные;
- каждая точка в поперечном сечении объекта контроля дает вклад в проекционные данные по всем дискретным угловым направлениям.

От числа и точности проекционных данных зависит погрешность реконструкции. Используют схемы сканирования, которые можно разбить на несколько классов, традиционно именуемых поколениями. Поколения различаются видом относительного движения источника излучения и детектирующей системы, числом детекторов, временем сбора проекционных данных.

Наиболее простой является схема 1-го поколения, включающая источник и детектор (рис. 3.8.4, *а*). Система источник (*1* ... *n*) - детектор (*1'* ... *n'*) перемещается параллельно самой себе с шагом Δx. После сканирования всей области реконструкции при положении параллельных прямых под углом Δ к оси x система источник-детектор поворачивается на малый дискретный угол и аналогично происходит получение новой дискретной проекции. Процесс сбора заканчивается, когда полный угол поворота составит 180^0 или 360^0. При использовании этой схемы за счет возможности сильного коллимирования пучка мало влияние рассеянного излучения. Требования к детектору не являются жесткими. Возможна калибровка детектора в ходе контроля. Легко меняется шаг сканирования и угол поворота системы. Основной недостаток - большое время сканирования.

В схеме 2-го поколения (рис. 3.8.4, *б*) источник излучения формирует плоский веерный пучок с углом раскрытия в несколько градусов. В качестве приемника используется линейка с несколькими коллиминированными детекторами. В результате линейного перемещения производится измерение данных одновременно для стольких наборов параллельных проекций, сколько детекторов в матрице. Каждый набор соответствует проекциям 1-го поколения, повернутым на единичный угол, образуемый направлениями от фокуса источника излучения на центры соседних детекторов. Поскольку за один цикл линейного перемещения формируется столько параллельных проекций, сколько детекторов в матрице, время сбора проекций сокращается во столько же раз по сравнению с 1-м поколением.

В схемах 1-го и 2-го поколений должны формироваться проекции, содержащие информацию в виде отсчетов, разделенных равными интервалами, привязанными к координатам объекта контроля. Это предъявляет определенные достаточно высокие требования к точности линейного перемещения и отсчета координат в процессе перемещения. Исключение линейного перемещения осуществляется в схеме сканирования 3-го поколения (рис. 3.8.4, *в*). В этой схеме система источник-матрица детекторов совершает только вращательное движение вокруг исследуемого объекта, или соответственно объект вращается внутри неподвижной системы.

Веерный пучок излучения, формируемый коллиматором, имеет угол раскрытия, охватывающий максимальный поперечный размер контролируемого объекта. Прошедшее объект излучение регистрируется большим числом детекторов. Отличие 3-го поколения от 1-го и 2-го заключается в том, что проекция формируется одномоментно по данным всех детекторов. Таким образом, формирование параллельных проекций в этой схеме в принципе невозможно, формируются так называемые веерные проекции.

Детекторы в этой схеме должны обладать высокой идентичностью параметров и стабильностью, поскольку прямые источник-детекторы всегда проходят через объект при любом возможном положении системы и поэтому калибровка детекторов в ходе измерений не осуществима. Для обеспечения идентичности каналов регистрации используют однородные детекторы.

Преимущество схемы 3-го поколения - одномоментное получение всей проекции. Поэтому полный набор проекций в угле 360^0 получается очень быстро, при непрерывном относительном вращении объекта и системы излучатель-приемники. Здесь скорость вращения обусловлена временем накопления квантов излучения для получения отсчета проекции. Эта схема сканирования наиболее широко используется в медицинской томографии, так как время сбора всех проекций составляет несколько секунд.

Еще более быстродействующей за счет движения детекторов является схема сканирования 4-го поколения (рис. 3.8.4, *г*). В схеме детекторы размещены неподвижно по окружности, внутри которой источник излучения перемещается по окружности меньшего радиуса, а в центре находится объект исследований. Кроме ускорения процесса сканирования преимуществом является возможность калибровки детекторов в моменты, когда прямая от источника к детектору не пересекает объект. Наиболее серьезный недостаток - влияние рассеянного излучения на качество реконструкции.

Общее число детекторов составляет 500 - 1000 и более.

Дальнейшим улучшением схемы 4-го поколения является схема 5-го поколения (рис. 3.8.4, *д*). В отличие от 4-го поколения кольцо детекторов качается в плоскости, параллельной пучку излучения таким образом, чтобы для каждого положения источника регистрация проводилась только наиболее отдаленными детекторами. За счет того, что источник выносится за кольцо детекторов, коэффициент использования детекторов возрастает. Одновременно решается проблема равноудаленности детекторов от источника излучения.

В промышленной томографии применяют в основном схемы 2-го поколения, сочетающие относительную простоту и высокое быстродействие, реже 3-го поколения, 4-е и 5-е поколения практически не применяются.

Для получения томограмм подвижных объектов используется схема с большим (до 28) количеством источников излучения, которые включаются и выключаются в определенной последовательности. В этом случае время полного сбора проекционных данных может быть ~0,01 с.

Диапазон сканеров и их характеристик весьма широк. Сканеры делят приблизительно на три группы:

1) для микротомографов;

2) для универсальных томографов;

3) для томографии крупногабаритных объектов.

Поскольку в большинстве случаев используется схема 2-го поколения, все сканеры осуществляют типичный набор перемещений - по x, y, z и φ. Сканеры микротомографов имеют расход стола при возвратно-поступательном перемещении по x до 100 мм при точности позиционирования линейной до 1 - 5 мкм; перемещение по y ручное или автоматическое для изменения коэффициента увеличения; вращение по φ осуществляется дискретно, через 3; 6; 9^0 или другой угол в зависимости от числа детекторов в пределах 180 или 360^0. Угловая точность позиционирования порядка 1′. Самые большие сканеры имеют расход до нескольких метров при точности позиционирования 0,1 - 0,3 мм; требования по угловому перемещению аналогичны. Масса объекта может достигать 50 т. Одновременно с перемещением осуществляется измерение координат объекта. Движением сканера управляет компьютер.

Источники излучения

В системах радиационной томографии используют различные типы источников излучения в зависимости от характеристик изделия и требований к контролю. Используют обычные рентгеновские трубки, высокоэнергетические источники излучения и микрофокусные излучатели, а также радионуклидные источники.

Наиболее разработаны для целей промышленной томографии источники излучения на рентгеновских трубках. Типичны источники излучения фирм Philips и Zeiferf, а также ряда других.

Фирмы поставляют аппараты с напряжением на трубке: до 100, 160, 300 (320), 420 кВ. При этом напряжение на трубке изменяется или ступенями по 1 кВ, или плавно с точностью установки порядка 1 %. Как правило, аппараты имеют два фокуса излучения, например 1,5 × 1,5 мм и 0,4 × 0,4 мм (Philips, *MCN* 101), 1,8 × 1,8 мм и 0,8 × 0,4 мм (Philips, *MCN* 322), 3 × 3 мм и 0,5 × 0,5 мм (Zeifert, Isovolt 160), 4 × 4 мм и 1,5 × 1,5 мм (Zeifert, Isovolt 320). Соответственно максимальный ток 15 (5) мА, 5 (2) мА, 20 (3) мА, 10 (5) мА. Ток обычно изменяется ступенями по 1 мА с точностью установки 0,3 - 1 %. Угол выхода излучения от 25 до 40^0. Время экспозиции достигает 100 мин при гарантированной стабильности параметров, что является необходимым для получения высокой чувствительности по плотности материала объекта.

При необходимости применения излучения более высоких энергий в радиационной томографии в зависимости от толщины изделия и атомного номера вещества объекта используют линейные ускорители, бетатроны или микротроны.

Наиболее высокими радиационными характеристиками обладают *линейные ускорители*. Они могут применяться для радиационного контроля и томографии толстостенных стальных изделий с толщиной до 600 мм в направлении излучения. Эти ускорители используют для контроля объектов атомного машиностроения и других уникальных изделий.

Разработан перспективный ряд ЛУЭ. Распространены ускорители Linatron фирмы Varian с энергией: 4; 8; 9; 16 мэВ и мощностью дозы: 500; 2000; 3000; 6000 Р/мин·м соответственно, а также российские ускорители ЛУЭВ-5-1500Д, ЛУЭВ-10-5000Д, ЛУЭВ-15-10000Д соответственно с энергией 6; 9; 13 мэВ и мощностью дозы: 1370; 4100 и 8650 Р/мин·м. ЛУЭ сочетают высокую энергию проникающего излучения с высокой мощностью дозы при достаточной стабильности параметров, что делает их пригодными для томографии толстостенных объектов из материалов с высоким атомным номером.

Микротроны, циклические ускорители электронов, имеют радиационные характеристики, близкие характеристикам линейных ускорителей на средние энергии; сравнительно небольшие массу и габариты; невысокую стоимость и простоту в изготовлении и обслуживании. Микротроны могут найти применение при томографии изделий из стали с толщиной до 400 мм.

Наиболее дешевым, простым и доступным источником является индукционный ускоритель электронов - *бетатрон*. Однако интенсивность тормозного излучения бетатрона на один-два порядка меньше, чем у ЛУЭ и микротрона. По этой причине бетатроны применяются при контроле изделий из стали, суммарная толщина которых не превышает 150 - 200 мм.

Параметры бетатронов:

МИБ-4 (1 - 4 МэВ, 1,0 Р/мин · м);

МИБ-6 (2 - 6 МэВ, 3,0 Р/мин · м);

Б-18 (18 МэВ, 50 Р/мин · м);

Б-35/8 (10 - 35 МэВ, 300 Р/мин · м);

бетатрон В-31 фирмы "Brown Bovery" (Германия) (31 МэВ, 185 Р/мин · м);

VT-25 (Япония) (4 - 25, 6 - 15 МэВ, 90 Р/мин · м).

Дальнейшее совершенствование бетатронов связано с повышением интенсивности тормозного излучения как за счет увеличения частоты циклов ускорения, так и путем увеличения ускоряемых электронов в цикле. Для этого нужно совершенствовать схему питания электромагнита, оптимизировать параметры тока инжекции и корректировать управляющее поле в момент инжекции.

Детекторы

Совершенствование систем радиационной томографии заключается прежде всего в повышении быстродействия и разрешающей способности, что связано с увеличением числа детекторов, уменьшением их размеров без снижения надежности и качества. Соответственно должна совершенствоваться технология детекторов. Общие требования к современным детекторам для томографии:

- высокая эффективность поглощения и преобразования излучения;
- динамический диапазон по интенсивности излучения $\geq 10^3$ - 10^4;
- высокая идентичность характеристик (0,1 - 0,5 %);
- высокое быстродействие (10^{-4} - 10^{-5} с);
- высокое отношение сигнал/шум;
- высокая стабильность и воспроизводимость характеристик детекторов;
- малая апертура и малое междетекторное расстояние;
- минимальное взаимное влияние;
- радиационная стойкость.

Диапазон энергий излучения в радиационной томографии от 10 - 50 кэВ до 20 МэВ. Число детекторов в матрице от 32 до 1 024 и более.

Типичный многоэлементный детектор - ионизационная камера. Бывают камеры малого (до 0,5 МПа) и высокого (до 5 МПа) давления. Эффективность камер 50 %, пространственное разрешение (межэлектродное расстояние) до 1 мм, быстродействие 10^{-4} - 10^{-5} с. Линейность очень высока (в диапазоне 15 порядков). Однако для преодоления рекомбинации приходится прикладывать сильное электрическое поле. Так, для жидкости при комнатной температуре $E \geq 10$ кВ/см. Использование жидкого ксенона позволяет получить пространственное разрешение до 0,4 мм при регистрации фотонов до 500 кэВ. Число элементов до 523.

Комбинированные детекторы (КД) наряду с ионизационными камерами - самый распространенный тип детектора. Комбинированный детектор состоит из рентгенооптического преобразователя (РОП) и фотоприемника (ФП). В табл. 3.8.1 приведены часто используемые РОП.

3.8.1. Характеристики РОП

Материал	$Z_{эфф}$	Плотность, г/см^3	Высвечивание		Гигроскопичность	Эффективность по NaJ (Tl), %
			Спектральный максимум, нм	Время, мкс		
NaJ (Tl)	50	3,67	410	0,25	Да	100
CsJ (Na)		4,51	420	0,63		85
CsJ (Tl)	54	4,51	565	1,0	Нет	45
CdF_2 (Eu)		3,19	435	0,94		50
$Bi_4Ge_3O_{12}$		7,13	480	0,3		12
$CaWO_4$	59	7,90	425			80
ZnSe (Tl)	33	5,40	640			50
$ZnWO_4$		7,87	480	5,0		26
$CdWO_4$		7,90	540	5,0		40

При сравнительно небольших энергиях возбуждения целесообразно использовать поликристаллические люминофоры, так как потери света в монокристаллических преобразователях существенны из-за отражения света и выигрыш в поглощении не покрывает уменьшения эффективности. Для уменьшения разброса параметров РОП используют измельченные неоднородные кристаллы, что позволяет повысить однородность световыхода.

Одной из важнейших характеристик комбинированного детектора является спектральное соответствие РОП и ФП, поскольку все ФП являются селективными. Удовлетворительным можно считать коэффициент спектрального соответствия не менее 0,6.

Системы сцинтиллятор - ФЭУ продолжают развиваться. Известны многоканальные системы с 300 ФЭУ для томографии. Однако наиболее широко применяются в комбинации со сцинтиллятором полупроводниковые фотоприемники, обычно фотодиоды (ФД). При максимальном спектральном соответствии излучения сцинтиллятора и фоточувствительности приемника дальнейшее повышение чувствительности детектора возможно при увеличении эффективности собирания света, которое зависит от геометрии детектора, оптического контакта, типа и конструкции отражателя. Наиболее часто используемая комбинация - CsJ(Tl) + кремниевый ФП.

Отечественные сцинтилляторы NaJ(Tl), CsJ(Tl), CsJ(Na) в сущности не уступают зарубежным и имеют те же недостатки - малую радиационную устойчивость, высокий уровень послесвечения, который нарастает с увеличением мощности дозы облучения.

Кристаллические сцинтилляторы CWO и ZnSe лишены этих недостатков, причем ZnSe не имеет аналогов. Преимущество CWO - в 2 раза больший атомный номер (66). Недостаток - в 3-4 раза более низкий (с кремниевым ФД) световыход. Оба материала дополняют друг друга для использования в широком энергетическом диапазоне (0,1 - 20 МэВ).

Применение полупроводникового детектора (ППД) имеет очевидные преимущества - более высокая чувствительность, уменьшение потерь энергии излучения, повышение надежности и стабильности.

Наиболее перспективны в томографии Si, Ge, CdTe, HgT_2 и некоторые другие. Проведенные исследования ППД по сравнению с комбинированным детектором (CsJ + Si) при напряжении на излучателе 125 кВ показали, что сигнал кремниевого поверхностно-барьерного детектора с рабочей площадью 2 × 15 мм^2 и толщиной 40 мм в 7 раз превышал сигнал КД при приемлемом отношении сигнал/шум в диапазоне $0{,}03 \cdot 10^{-3}$ - 2,5 Р/с (чувствительность 0,33). Чувствительность германиевого ППД при толщине детектора 10 мм еще в 2 раза выше, однако сигнал германиевого ППД нестабилен при импульсном возбуждении и нелинеен от мощности дозы. Наилучшие результаты получены для детектора из высокоомного легированного CdTe(Cl) с барьером Шоттки - при максимально допустимом напряжении смещения 300 В сигнал был почти на порядок больше, чем в КД. Детекторы CdTe(Cl) можно использовать при комнатной температуре.

Считают, что для диапазона энергий до 150 кэВ ППД наиболее перспективны. Для высокоэнергетичного диапазона перспективны КД (сцинтиллятор + ФП) с высокоатомным рентгеновским преобразователем на основе вольфраматов кадмия и кальция и ZnSe и кремниевых приемников со спектральной чувствительностью в диапазоне 300 - 600 нм.

Для детекторов вычислительной томографии приемлемы следующие характеристики: чувствительность 0,01 - 0,05, фотопамять 10^{-3} через 20 мс, нелинейность 1 % в динамическом диапазоне 10^3, тепловой ток менее 1 мкА, собственная емкость не более 200 пФ.

Система сбора данных

Современная система сбора данных компьютерного томографа имеет 32 - 254 канала по числу детекторов в матрице, а также несколько каналов для калибровки данных в прямом пучке, то-есть не проходящем через объект контроля. Аналоговые сигналы отдельных детекторов интегрируются и с помощью системы мультиплексирования подаются на один или несколько аналогово-цифровых преобразователей (АЦП), которые осуществляют преобразование в интервале между соседними временными отсчетами при использовании схемы сканирования второго поколения. Трудность реализации АЦП заключается в сочетании высокой разрядности (до 14 - 15), высокого быстродействия (10^{-5} с на преобразование), высокой помехозащищенности, требуемой из-за низкого уровня сигналов детекторов, и высокого уровня помех от мощных импульсных источников излучения.

Вычислительный комплекс

Вычислительный комплекс обеспечивает управление сканированием, сбором данных, их предварительную обработку, реконструкцию томограммы по обработанным и откорректированным проекционным данным, визуализацию, обработку визуализированного изображения и документирование томограммы и определенных по ней характеристик контролируемого объекта.

В современных томографах формат томографического изображения не ниже 512 × 512, при этом проекции содержат 512 отсчетов, а общее число проекций составляет 1000 - 2000. Разрядность томограммы 16. Массив проекци-

онных измерительных и вспомогательных данных, который участвует в синтезе томограммы, значительно превышает объем томограммы. Следует учесть, что объем вычислительных операций пропорционален N^3, где N - характеристика формата изображения.

Поэтому для реализации вычислений в приемлемое время требуется компьютер с быстродействием более 100 млн. операций в секунду или должен иметься быстродействующий спецпроцессор параллельного действия для конвейерной обработки проекций при реализации алгоритма обратного проецирования с фильтрацией сверткой. Современные томографы имеют обычно в составе вычислительных средств центральный процессор, большую оперативную память, быстродействующий спецпроцессор синтеза томограммы, процессор предварительной обработки проекционных данных, интерфейс ввода-вывода данных, видеотерминал, устройство документирования томограмм.

Программное обеспечение томографа включает:

- базовую операционную систему;
- управляющую программу (монитор);
- программы:

сбора данных,

формирования вспомогательных массивов,

формирования проекций (предобработки),

коррекции систематических погрешностей измерительных каналов,

реконструкции,

обработки томограммы, вычисления количественных характеристик,

визуализации,

документирования томограмм,

диагностики состояния подсистем,

моделирования данных и узлов томографа,

юстировочные,

прикладные диагностирования объектов, принадлежащих к различным классам;

- данные фантомов.

В режиме интерактивной обработки томограммы обычно выполняются следующие операции:

- работа с томограммой в амплитудном окне посредством изменения центра и ширины амплитудного окна визуализируемой томограммы,
- высокочастотная и низкочастотная фильтрация томограммы,
- псевдоокрашивание томограммы в соответствии с выбранными амплитудными уровнями,
- выделение зон интереса,
- вывод на экран интересующей области сечения,
- определение и вывод на экран координат и количественных характеристик в выбранных точках и статических характеристик в пределах области интереса,
- построение гистограмм распределения плотности вдоль линий интереса и в пределах области интереса,
- сложение, вычитание или другие операции с томограммами различных сечений одного объекта,
- вывод на экран знаковой и буквенной информации, дополняющей томограмму,
- архивирование томограммы,
- работа с архивированными томограммами,
- корректировка проекционных данных,
- синтез и визуализация томограммы по исправленным проекционным данным.

3.8.2.3. УНИВЕРСАЛЬНЫЕ ПРОМЫШЛЕННЫЕ КОМПЬЮТЕРНЫЕ ТОМОГРАФЫ

Весь спектр радиационных томографов делят на три группы в соответствии с типичными классами объектов:

1) универсальные промышленные томографы;
2) высокоэнергетичные томографы;
3) микротомографы.

Первая включает системы и средства для контроля наиболее массовой группы объектов средних размеров и средней плотности;

вторая - для контроля в основном уникальных крупногабаритных и толстостенных изделий средней плотности или изделий из высокоплотных материалов;

третья - для контроля микрообъектов.

Томографы первой группы наиболее развиты и доведены до коммерческого уровня, имеют наибольшее число моделей и наиболее отработаны.

Параметры объектов для этой группы томографов:

диаметр от 20 - 25 до 100 - 150 см,

длина до 300 - 350 см,

масса до 100 - 500 кг,

средняя плотность до 2 - 2,5 г/см^3.

Отличительной чертой моделей этой группы является полная укомплектованность для быстрого получения точных плотностных, размерных и дефектоскопических характеристик любого объекта в широком диапазоне размеров, простой или сложной конфигурации. Достоинством является развитое математическое обеспечение, позволяющее проводить множество операций с реконструированным изображением, определять количественные и качественные показатели, а также решать побочные задачи - автоматическое проектирование и т.д.

Наиболее типичными являются томографы: модели 201C1TA фирмы SMS (США),

BAM-II (Германия), Magic фирмы Intercontrole (Франция), Toscaner-4200 фирмы Toshiba (Япония), XIM фирмы General Electric (США).

Характеристики томографов:

точность позиционирования объекта линейная 0,01 мм; угловая 0,004 - 0,01 ° ;

перемещение вертикальное до 700 мм;

горизонтальное до 1 500 мм;

угол поворота до 180 или 360 ° ;

толщина слоя от 5 до 10 мм;

пространственное разрешение 0,5 - 1 мм (обычное), 0,25 мм (высокое);

обнаруживают:

пустоты до 0,3 мм^3,

включения до 0,03 мм^3,

трещины с разрывом до 0,025 мм.

Выше рассматривались томографы стационарные. Это ограничивает возможность их применения. Портативные *передвижные томографы* могут быть доставлены к объекту и размещены вокруг него.

Компанией изотопных исследований (ФРГ) совместно с Марбургским университетом разработан передвижной томограф MST-3.

Внутренний диаметр, соответствующий максимальному размеру исследуемых объектов, составляет 700 мм. Источником излучения является ^{137}Cs или ^{60}Co, матрица детекторов имеет три детектора на основе сцинтиллятора NaJ и ФЭУ. Томограф MST-3 был успешно применен для томографии деревьев.

Компания Rigaku (Япония) разработала большой и малый передвижные сканеры для контроля деревьев и строительных колонн. Излучателями большого и малого томографов являются рентгеновские трубки соответственно 350 и 40 - 120 кВ, матрица имеет три детектора NaJ с ФЭУ. Максимальный диаметр объектов 1 300 мм в большом сканере и 200 мм в малом.

Высокоэнергетические радиационные томографы

К высокоэнергетичной радиационной томографии относят системы с энергией зондирующего излучения свыше 420 кэВ - 1 МэВ. Три эффекта существенны при взаимодействии фотонов с веществом: фотоэлектрический эффект, комптоновское рассеяние и формирование пар электрон-позитрон. В зависимости от энергии фотонов преобладает тот или иной эффект.

При малых энергиях преобладает фотоэлектрический эффект. При энергиях менее 10 МэВ существенным является комптоновское рассеяние, при котором первичный фотон отклоняется от первоначальной линии перемещения, теряет некоторое количество энергии в точке взаимодействия и выбивает атомный электрон с его энергетической орбиты.

Процесс рождения элементарных пар, в ходе которого полностью поглощается фотон, становится преобладающим в качестве процесса поглощения при энергиях выше 1,02 МэВ.

Кроме указанных эффектов существенное значение имеют также неэкранированное излучение, возникающее в источнике, рассеянное излучение от конструкций, приближенных к объекту, обратное рассеяние от участков, расположенных сзади приемников излучения. Рассеянное излучение от всех источников снижает контрастность, делает неясным изображение на приемной среде. Только первичные фотоны способствуют формированию правильного изображения и прежде всего для дефектов, лежащих близ передней поверхности объекта со стороны источника излучения.

Типичные объекты высокоэнергетичной томографии имеют следующие параметры:

поперечный размер 500 - 2 500 мм;

длину до 5 000 мм;

толщину по стали в направлении луча до 500 - 600 мм;

соответственно требуется пространственное разрешение 0,5 - 2,5 мм;

толщину слоя 2 - 10 мм;

длительность сканирования слоя не более 15 мин;

время реконструкции изображения не более 30 с;

размеры обнаруживаемых пустот 0,3 мм^3;

раскрытие трещин 0,05 - 0,08 мм.

В состав томографического комплекса входит прецизионный сканер, управляющая ЭВМ, излучатель на основе ускорителя, матрица детекторов, систем сбора данных и ввода в ЭВМ, реконструкционный процессор, система обработки реконструкционного изображения и документирования.

К высокоэнергетичной томографии следует отнести системы для контроля высокоплотных тепловыделяющих элементов (ТВЭЛ) реакторов и изделий из стали.

Уникальными являются высокоэнергетичные вычислительные радиационные томографы, разработанные специально для контроля деталей ракет, вооружения, космических объектов, прежде всего, ракетных двигателей.

Томограф AF/ACTS-1 позволяет анализировать объекты диаметром до 870 мм и массой до 2,5 т с помощью рентгеновского излучателя 420 кВ. Эти характеристики у томографа AF/ACTS-2 составляют соответственно до 254 см и до 55 т. В нем используется линейный ускоритель Linatron 6000. Механическая система имеет стол, который обеспечивает возвратно-поступательное перемещение и вращение изделия с погрешностью позиционирования линейной 0,005 см и угловой 5″, и две консоли, несущие синхронно перемещаемые в вертикальном направлении излучатель и детекторную систему.

Энергия квантов в AF/ACTS-2 составляет 16 МэВ, поэтому условия детектирования излучения, прошедшего объект, более сложны, поскольку кроме фотоэлектронов в материале объекта возникают электронно-позитронные пары и эмиссия нейтронов.

Во избежание влияния радиации на фотодетекторы последние отделены от сцинтилляторов, воспринимающих излучение, и связаны с ними стекловолоконными линиями.

Томограф ВТП-1500 предназначен для неразрушающего контроля изделий диаметром 500 - 1 500 мм и длиной 1 000 - 5 000 м. Реализуется схема сканирования 3-го поколения. В качестве источника излучения используют линейный ускоритель с энергией тормозного излучения 5,5; 8; 10 МэВ с частотой 80 - 320 Гц и длительностью импульсов 4,5 мкс. Диаметр фокусного пятна 2 мм. Матрица детекторов содержит 128 детекто- ров (сцинтиллятор CsJ, кремниевый ФД). Матрица обрабатываемых данных имеет формат 1440 × 256. Время сбора данных 3 мин, время реконструкции 3 мин. Пространственное разрешение 5 мм.

Рентгеновская микротомография

Анализ состояния армирующих волокон, адгезии наполнителя композитов, микрообъектов требует повышения пространственного разрешения вплоть до единиц-десятков микрометров.

Прямой метод повышения пространственного разрешения в рентгеновской промышленной томографии заключается в создании микротомографов, то-есть томографических систем с пространственным разрешением на микронном и субмикронном уровне.

В развитии рентгеновской микротомографии могут быть выделены три направления в создании систем:

- по стандартной томографической схеме на основе микрофокусной рентгеновской трубки;
- микротомографии на основе растрового электронного микроскопа (РЭМ);
- микротомографии на основе синхротронного излучения.

Структурная схема компьютерного микротомографа на основе РЭМ представлена на рис. 3.8.5.

Луч электронного зонда *1* развертывается по мишени *2* в направлениях *X* и *Y* с помощью команд ЭВМ через интерфейс с помощью блоков *8* и *9* формирования сигналов перемещения по *X* и по *Y* (БФСу). При перемещении луча по мишени образуется перемещающийся точечный источник рентгеновского излучения, проходящего через объект *3*, установленный на столе *4*. Сканирование в определенном угловом ракурсе осуществляется перемещением зонда по *X* при неподвижном объекте, а изменение ракурса производится дискретным вращением объекта на определенный угол с помощью шагового привода. Переход к новому слою может осуществляться перемещением луча по *Y* или вертикальным перемещением объекта. Прошедшее объект излучение фиксируется детекторной системой сцинтиллятор *6* - фотопреобразователь *7*.

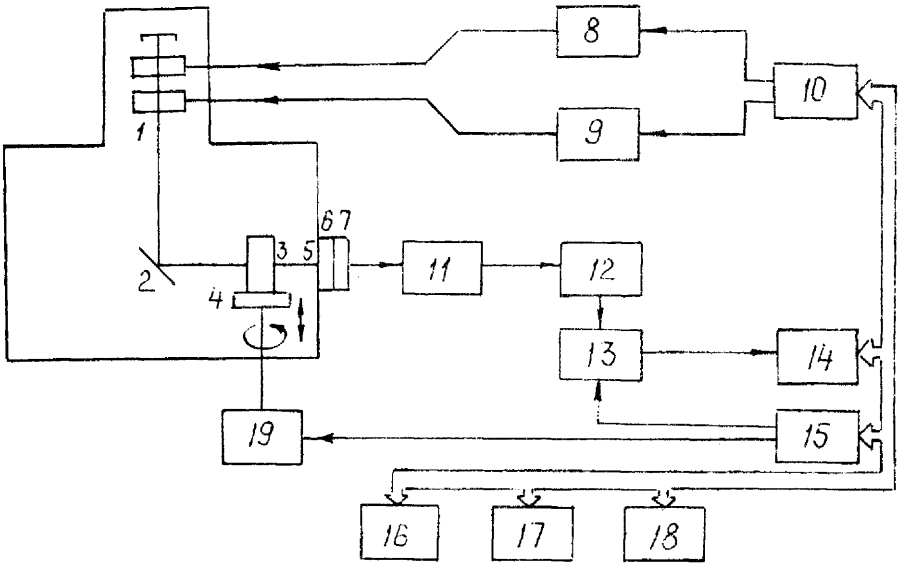


Рис. 3.8.5. Структурная схема микротомографа на основе РЭМ

Формирование пучка рентгеновского излучения может осуществляться двояко при бомбардировке сфокусированным электронным пучком:

1) массивной мишени (медь), вследствие чего образуется пучок тормозного излучения;

2) тонкой мишени "на прострел".

Пространственное разрешение определяется геометрией сбора. Реально при 40 - 100 кВ пространственное разрешение составляет несколько микрометров.

Вместе с тем ряд факторов ухудшает пространственное разрешение. Качество выполнения механических систем, поверхности мишени, отбор пленки в конечном итоге определяют результат. Реальное пространственное разрешение составляет 15 мкм.

Характеристики острофокусных излучателей были приведены выше. Использование того или иного излучателя определяется классом объекта. При общем требовании обеспечения наивысшего пространственного разрешения анализ биологических объектов или объектов из легких материалов может быть обеспечен излучателем с напряжением 5 - 30 кВ, а микротомография объектов с высокой плотностью и большим атомным номером потребует повышения энергии квантов и, следовательно, напряжения анода до 160 кВ и более. Ток анода обусловливает время сбора информации, определяющее уровень статической квантовой погрешности.

Микрофокусные излучатели бывают откачиваемые со сменным анодом и отпаянные. Первые обеспечивают большой ток и излучаемую мощность, возможность замены анода продляет срок службы, однако они более громоздки и дороги. Отпаянные более удобны, однако эффективное применение связано с необходимостью повышения мощности излучения за счет повышения нагрузочной способности материала мишени.

Отметим, что если в медицинской томографии поток квантов на детекторе составляет 10^{10} квант/с, то в микротомографии $3 \cdot 10^6$ квант/с, что приводит к необходимости работать не в токовом, а счетном режиме.

Параметры электромеханических узлов томографа и системы отсчета координат имеют большое значение, ибо точность позиционирования непосредственно влияет на пространственное разрешение. Если оно должно составить 1 мкм, то точность позиционирования должна быть выше; отсчет координат с помощью лазерного интерферометра удовлетворяет самым жестким требованиям. Управляемый ЭВМ шаговый привод в сочетании с интерферометром позволяет оптимизировать процесс сбора данных.

Замечательными характеристиками с точки зрения микротомографии обладают источники синхротронного рентгеновского излучения (СИ), то-есть электромагнитного излучения, испускаемого заряженными частицами, движущимися по круговым орбитам с ультрарелятивистскими скоростями. Источники СИ весьма разнообразны по характеристикам излучения, габаритам и т.п. Их отличает исключительно высокая интенсивность, на несколько порядков превышающая интенсивность обычных рентгеновских источников излучения. При этом формируется практически параллельный, весьма слабо расходящийся пучок излучения. Чрезвычайно удобной является возможность перестраивать энергию и полосу излучения.

Пространственное разрешение определяется:

- рассеянием оптического излучения в приемном люминесцентном экране;
- качеством оптики и пространственным разрешением приемника.

Преимущество синхротронного источника заключается в возможности сканирования при энергиях выше и ниже характеристического поглощения некоторого элемента. При этом можно избирательно получать карту пространственного распределения элементов.

Комптоновская томография

Томография на комптоновском обратном рассеянии (СТ) используется в условиях одностороннего доступа. Для получения изображения внутренней структуры объекта применяют комптоновское рассеянное в заднее полупространство излучение из элементарного объема. Форма и размеры этого элементарного объема определяются формирующими коллиматорами источника излучения и детекторами; размеры должны быть сравнимы с требуемым пространственным разрешением. Следовательно, особенностями метода являются регистрация потоков излучения малых геометрических размеров и малой интенсивности, ограниченные возможности для получения разноракурсных проекций.

Главные преимущества - односторонний доступ, создающий возможность эффективного контроля изделий широкого класса, а также возможность получения томографического изображения без выполнения сложных математических преобразований большого массива данных, существенно меньший объем массива данных, большая простота реализации.

Главные трудности - низкая интенсивность потоков излучения из элемента объема малых размеров, влияние неоднородности среды вне объема элемента на результат измерения электронной плотности в нем.

Наиболее характерна разработанная фирмой Philips инспекционная система Comscan 160 на основе рентгеновского излучателя 160 кВ, 19 мА с излучателем, коллимированным в окне 0,4 × 0,4 мм. Система содержит

22 элемента детектирования на основе BGO размером 1 × 2 × 60 мм, сопряженных с ФЭУ. Область сканирования 50 × 100 мм. Одновременно можно сканировать до 22 слоев. Строится матрица изображения 250 × 500 × 8 бит в слое. Пространственное разрешение 0,4 × 0,4 × 0,4 мм в пределах диапазона по глубине: для пластика или композитов 50 мм, алюминия 20 мм, стали 5 мм. Время сканирования от 75 до 375 с. Таким образом, система может осуществлять контроль 3-мерного объема объекта инспекции.

3.8.3. УЛЬТРАЗВУКОВАЯ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТОМОГРАФИЯ (УВТ)

3.8.3.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

При ультразвуковой ВТ возможно восстановление различных акустических характеристик объекта - скорости звука (показатель преломления), коэффициента поглощения и коэффициента отражения. На основе измерения указанных акустических характеристик среды может быть восстановлено пространственное распределение таких исходных физических характеристик объекта, как плотность, величина модуля упругости, коэффициент затухания.

Существуют две группы методов УВТ - *трансмиссионные* и *отражательные*.

Основными характеристиками средств УВТ являются чувствительность и разрешающая способность.

Чувствительность определяется минимальной величиной площади объекта контроля, которая регистрируется с требуемой степенью достоверности. Она определяется затуханием звука в материале, структурной реверберацией и уровнем шумов приемного тракта. Системы когерентной обработки сигнала, к которым относится и УВТ, позволяют существенно повысить чувствительность метода по сравнению с методами обычной ультразвуковой дефектоскопии. Имеются сведения об обнаружении УВТ дефекта в стали площадью 10 мм^2 на глубине около 100 мм. Ориентация дефектов и их толщина существенно меняют их отражательную способность и, следовательно, чувствительность.

Разрешающая способность УВТ не может быть меньше длины волны звука на данной частоте в исследуемом материале.

Увеличение рабочей частоты приводит к сильному затуханию, которое существенно усложняет решение задачи.

Предельное разрешение в металлах составляет 1 - 3 мм, в неметаллах примерно на порядок ниже.

Задачи измерения локальных физических характеристик и обнаружения аномалий объемной структуры материалов (рыхлоты и изменения плотности могут быть решены с использованием одного из методов трансмиссионной УВТ, которую в свою очередь можно разделить на две группы:

1) методы, использующие алгоритмы рентгеновской томографии (*время-пролетная* УВТ);

2) методы дифракционной томографии, основанные на решении волнового уравнения в том или ином приближении.

Методы отражательной УВТ пригодны для обнаружения полостей и трещин в материалах и конструкциях. Методы дифракционной томографии не требуют всестороннего осмотра объекта. При одностороннем доступе к контролируемому объекту возможно использование голографического метода или метода фокусированной синтезированной апертуры. При этом, однако, возникает проблема распознавания по полученным изображениям реального объекта.

3.8.3.2. ТРАНСМИССИОННАЯ УВТ

В основе УВТ заложена возможность реконструкции двумерного распределения скорости звука в среде (время-пролетная методика) или ослабления (аттенюации) ультразвука вдоль выбранного направления. В аттенюационной методике возникают трудности, связанные с большим динамическим диапазоном измеряемой величины. Кроме того, лучевой интеграл связан с результатами измерений нетривиально, вследствие чего измерительная процедура усложняется.

Использование время-пролетной методики снижает требования к динамическому диапазону регистрирующего устройства, поскольку скорость ультразвука в объекте изменяется в сравнительно небольших пределах. Измеренная величина времени прохождения ультразвука через исследуемый объект является непосредственно лучевым интегралом:

$$t_L = \int_0^L \frac{dl}{C(l)} = C_0^{-1} \int_0^L n(l)\, dl, \qquad (7)$$

где L - длина пути ультразвука в объекте в направлении $\vec{q}_L$;

C_0, $C(l)$ - скорости распространения ультразвука в воде и в объекте соответственно;

$n(l) = C_0 / C(l)$ - пространственное распределение локального коэффициента преломления в объекте в направлении $\vec{q}_L$.

Для регистрации t_L как длины распространения фронта упругой волны давления

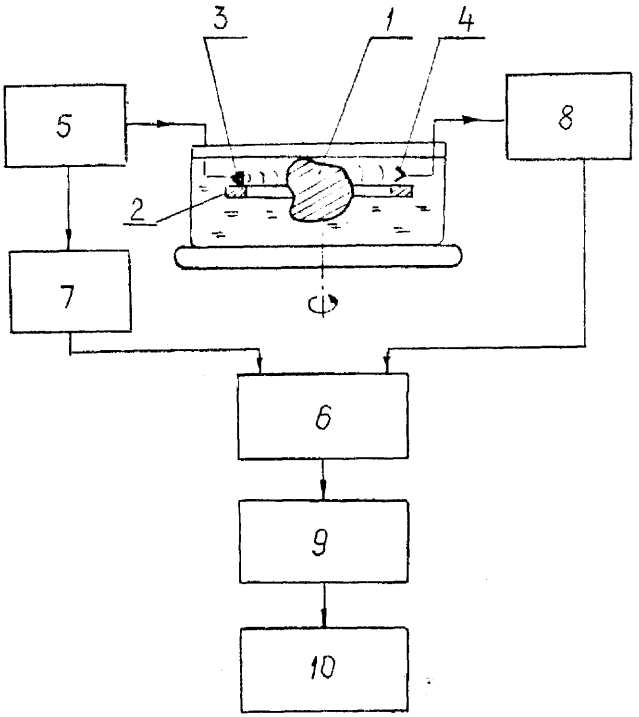


Рис. 3.8.6. Структурная схема УЗТ (*9* - ЭВМ)

можно использовать сравнительно простые аппаратные средства.

На рис. 3.8.6 представлена упрощенная схема ультразвукового трансмиссионного томографа, основанного на время-пролетных измерениях с последующей реконструкцией поля скоростей или коэффициентов преломления ультразвука.

Исследуемый объект *1* располагается в ванне, заполненной иммерсионной жидкостью. На раме *2* жестко укреплены излучатель *3* и приемник *4*, частотные и геометрические характеристики которых согласованы и обеспечивают формирование ультразвукового пучка с поперечными размерами, обеспечивающими требуемую разрешающую способность.

Блок *5* обеспечивает формирование на излучателе короткого ультразвукового импульса, который распространяется сквозь исследуемый объект вдоль линии, соединяющей излучатель и приемник. Блок *5* генерирует также электрический импульс, запускающий измеритель времени *6* через линию задержки *7*. Приемник *4* улавливает прошедший через жидкость и объект ультразвуковой импульс и формирует пропорциональный электрический сигнал, который после усилителя *8* запускает процесс измерения времени.

Усилитель *8* формирует запускающий сигнал в момент прихода фронта ультразвукового сигнала на приемник *4*. Сигнал прекращения счета времени формирует схема *7*. Проекция образуется поступательным перемещением рамы *2*.

После получения отсчетов по всем лучам данного положения рама поворачивается на небольшой угол и цикл измерений повторяется для следующей проекции и так далее до поворота на 180 °. Затем ЭВМ (9) по полученным проекциям производит реконструкцию поля скоростей в выделенном слое объекта. Восстановленное распределение визуализируется с помощью полутонового дисплея *10* в виде дискретной матрицы изображения. Яркость элементов пропорциональна скорости.

Описанная процедура может дать хороший результат, если ультразвуковые волны не испытывают значительной рефракции на границах объект-иммерсионная среда и в объекте отсутствуют сильно преломляющие структуры; спектральный состав ультразвукового сигнала не зависит от особенностей распространения

ультразвука в исследуемом объекте, а временная привязка не чувствительна к изменению формы фронта и амплитуды входного электрического сигнала.

Реконструкция распределения скорости звука по данной проекции производится алгебраическим методом, в Фурье-области или обратным проецированием с фильтрацией сверткой.

Алгебраическая реконструкция сводится к непосредственному решению системы линейных уравнений типа (7), с учетом разреженности матрицы, неустойчивости, неполноты или избытка данных, наличия априорной информации. Имеется большое число алгоритмов, учитывающих эти особенности.

Решение системы уравнений может быть сведено к вычислению сверток проекций с обратным преобразованием Фурье от некоторой функции в ограниченной полосе и затем суммированию результатов по всем профилям. Этот метод эффективнее метода алгебраической реконструкции, поскольку он позволяет использовать быстрое преобразование Фурье. Методы алгебраической реконструкции имеют большие возможности.

В основе методов реконструкции в Фурье-области лежит тот факт, что преобразование Фурье от проекции объекта есть некоторый слой Фурье-преобразования объекта. Таким образом, при достаточно большом числе проекций можно получить преобразование Фурье от всего объекта и таким образом реконструировать сам объект.

Учет искривления лучей устраняет некоторые артефакты в изображениях, однако не улучшает разрешающей способности таких томографических методов, поскольку для улучшения разрешающей способности требуется учет дифракционных эффектов, при этом вычислительные трудности возрастают значительно.

Для преодоления описанных недостатков УВТ нужно осуществить переход от лучевых методов к методам, основанным на решении волнового уравнения, учитывающим дифракционные эффекты при распространении ультразвука в неоднородной среде.

Качество полученных в результате изображений зависит от качества схемы измерения, полноты проекционных данных, размеров приемной матрицы, помех при измерениях и т.д. Наилучшая разрешающая способность определяется разрешающей способностью матрицы приемников. Предел разрешающей способности дифракционной томографии стремится к дифракционному пределу (порядка длины волны звука).

Методы дифракционной томографии имеют существенное ограничение - рассеянное объектом поле должно быть существенно меньше падающего.

3.8.3.3. ОТРАЖАТЕЛЬНАЯ УВТ

Если схема измерений организована определенным образом, набор отраженных сигналов можно интерпретировать как контурный интеграл коэффициента отражения среды по определенной кривой. Например, при использовании сферического источника измеренный в некоторой заданной точке в выбранный момент времени отраженный сигнал будет пропорционален интегралу коэффициента отражения объекта по сфере.

Чтобы использовать хорошо разработанные алгоритмы трансмиссионной УВТ при обработке отраженных сигналов, предпочтительно использовать данные о коэффициенте отражения вдоль прямой линии. С этой целью предложено использовать фокальную плоскость слабо фокусирующих преобразователей (рис. 3.8.7).

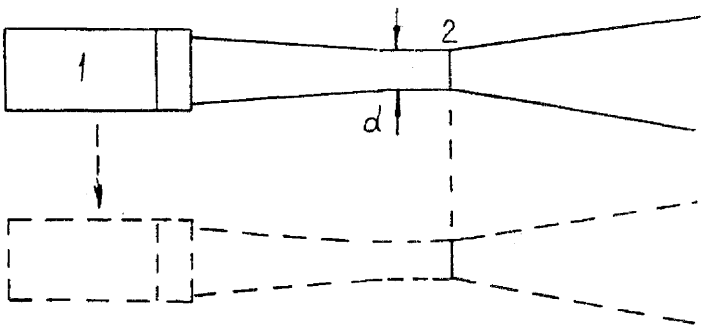


Рис. 3.8.7. Формирование фронта плоской волны в отражательной томографии

При сканировании преобразователя в направлении стрелки в фокальной плоскости получается синтезированная плоская волна. Отраженные импульсы для каждого положения преобразователя суммируются, образуя интегральную характеристику (псевдопроекцию) подлежащего восстановлению коэффициента отражения объекта вдоль прямой линии. Достаточная для восстановления коэффициента отражения информация получается за счет временного сканирования, изменяющего положение прямых параллельных линий в объекте при достаточном количестве направлений облучения, обеспечиваемых поворотом объекта относительно измерительного устройства. Далее для восстановления можно использовать один из известных алгоритмов УВТ. Этот метод называется *восстановлением по псевдопроекциям*.

Используя данные, полученные в измерительной схеме (рис. 3.8.7), коэффициент отражения объекта можно восстановить при помощи другого алгоритма. Метод называется "*суммированием B-сканированных изображений с фильтрацией*". Записанные на каждом шаге сканирования отраженные видеоимпульсы свертываются с некоторой функцией фильтра, а затем полученные выражения интегрируются по всем углам наблюдения. В результате такой операции восстанавливается распределение рассеянного назад (отражен-ного) звукового поля в каждой точке объекта. Поскольку облучающее поле всегда одно и то же, то полученное распределение отраженного поля совпадает с распределением коэффициента отражения по исследуемой плоскости сечения объекта. Второй метод дает существенно лучшие результаты. Разрешающая способность второго метода равна поперечному разрешению B-сканированных изображений.

Наилучших результатов можно ожидать при использовании когерентных методов получения изображений, поскольку в этих методах регистрируется и обрабатывается наиболее полная информация.

Реконструкцию изображения высокого качества можно достичь путем совместной обработки голограмм, полученных при достаточном количестве ракурсов.

Предложен алгоритм восстановления изображения неоднородностей среды по многоракурсным многочастотным голограммам методом проекции в спектральном пространстве.

Отражательная УВТ материалов с сильной внутренней неоднородностью. К материалам с неоднородной внутренней структурой относятся в первую очередь строительные материалы - бетон, железобетон и т.д. Неоднородности их внутренней структуры велики по размерам и различиям физико-механических свойств материала в разных точках объема. Например, зерна крупного *наполнителя* в бетоне имеют размеры от 10 до 70 мм. Плотность материала наполнителя может меняться в 1,5 - 2 раза, скорость звука - еще более. Наиболее приемлемым является диапазон от 50 до 120 кГц, что соответствует длинам волн УЗ-колебаний порядка 3 - 10 см.

В указанном диапазоне частот излучатели и приемники ультразвука практически не имеют направленности, так как их размеры соизмеримы с длиной волны. Кроме того, существенная неоднородность внутренней структуры является причиной очень высокого уровня структурных помех. В частности, при эхо-импульсном контроле изделий из бетона отношение сигнал/шум в большинстве случаев много меньше единицы.

Структурная реверберация в бетоне приводит к тому, что акустический шум, принимаемый УЗ-преобразователем, затухает с момента излучения зондирующего импульса существенно медленнее, чем без учета вторичного и более сложных рассеяний.

Закон распределения структурного шума близок к нормальному с нулевым математическим ожиданием, а дисперсия шума в интервале 50 - 500 мкс от момента излучения зондирующего импульса уменьшается в среднем со скоростью 0,05 - 0,1 дБ/мкс. По указанным причинам возможно лишь применение метода фокусируемой синтезированной апертуры с томографическим отображением информации. Метод синтезированной апертуры, фокусируемой в произвольную точку полупространства (SAFT) с когерентной обработкой данных, можно отнести к одной из разновидностей многочастотной голографии. Разрешение метода по глубине определяется пространственной протяженностью акустического импульса, а по фронту близко к длине акустической волны.

Метод SAFT применяется с целью улучшения разрешающей способности и повышения качества изображений.

Сущность метода заключается в облучении выбранной точки исследуемого пространства с разных направлений, с поверхности контроля, в приеме эхо-сигналов от этой точки также с разных направлений и суммировании принятых сигналов с предварительным введением в них временных задержек, компенсирующих различия в расстояниях от точек поверхности контроля до выбранной точки исследуемого полупространства. Для получения двумерного изображения сечения контролируемого объема (томограммы) описанная процедура повторяется для всех точек выбранного сечения, независимо от его ориентации относительно доступной поверхности.

Применительно к условиям низких отношений сигнал/шум, характерных при контроле структурно-неоднородных материалов,

апертура синтезируется *антенной матричной решеткой* (*АР*), излучение и прием УЗ-колебаний в которой производится поочередно всеми возможными попарными комбинациями активных элементов. Шаг, с которым расположены элементы в АР, выбирается в соответствии с радиусом пространственной корреляции структурных помех в материале. Если апертура синтезируется n элементами, то каждый из них должен сначала проработать в паре с остальными $n-1$ элементами апертуры в качестве излучателя (или приемника) УЗ-колебаний, а затем как совмещенный УЗ-преобразователь.

Общее число реализаций N, получающееся при комбинационном зондировании полупространства n-элементной синтезированной апертурой,

$$N = \frac{n(n+1)}{2}.$$

Эта формула также характеризует увеличение отношения сигнал/шум в построенном изображении путем накопления сигнала из всех реализаций.

В результате отношение сигнал/шум в построенном изображении получается на 20 - 30 дБ выше, чем в исходных реализациях входных колебаний. Поступательное перемещение АР по поверхности контроля позволяет реконструировать изображение внутренней структуры контролируемого объекта требуемых размеров.

Достигнутые технические характеристики аппаратуры являются близкими к предельно допустимым, так как размеры обнаруживаемых дефектов даже несколько меньше длины УЗ волны и приближаются к размерам зерен крупного наполнителя, что накладывает естественное ограничение на увеличение чувствительности аппаратуры. Производительность контроля при использовании специализированных процессоров, выполняющих пространственно-временную обработку сигналов, может быть повышена примерно на порядок и доведена до естественного предела, определяемого временем затухания структурной ревербации в материале.

3.8.4. СВЧ-ТОМОГРАФИЯ

СВЧ-томография, использующая радиоволны сверхвысоких частот в диапазоне приблизительно 10 см ... 1 мм, находится на начальной стадии. В США разработан и опробован экспериментальный образец СВЧ-томографа; применение его - медицинское.

Другой перспективной областью применения СВЧ-томографии является неразрушающий контроль ответственных изделий из диэлектрических полимерно-композиционных материалов. Могут решаться такие задачи, как контроль многослойных конструкций с малыми отклонениями по плотности, текстуры, напряженно-деформированного состояния, остаточных тепловых и механических напряжений.

Для томографических систем могут быть эффективны алгоритмы, основанные на инверсном преобразовании Радона многоракурсных результатов регистрации.

Задачи рентгеновской томографии сводятся к нахождению решения системы линейных уравнений вида

$$[c][d]=[p],$$

где $[c]$ - матрица коэффициентов; $[d]$ - вектор неизвестных плотностей, взятых в точках некоторой координатной сетки, а в $[p]$ содержатся значения линейных интегралов, измеренных по отдельным траекториям. При визуализации же в радиоволнах результатирующая система уравнений будет

$$[c(d)][d]=[p],$$

где матрица коэффициентов $[c(d)]$ зависит от искомой плотности и, следовательно, задача становится нелинейной.

Разработанный в рентгеновской томографии алгоритм непосредственно использовать нельзя, поскольку траектории, по которым измеряются нелинейные интегралы, неизвестны и, следовательно, требуется нелинейная процедура восстановления.

Предложен метод обобщения хорошо известного алгебраического метода реконструкции на нелинейный случай. Вначале задается некий исходный профиль проводимости (диэлектрической проницаемости, плотности), а затем методом конечных разностей рассчитывается потенциал (напряжен-ность электрического поля), подчиняющийся заданной системе граничных условий. Если для реконструкции используется итеративная процедура, то вычисление может производиться после каждой итерации, а траектории должны соответствующим образом изменяться.

В методе линейного восстановления процедура решения состоит в разбиении сечения на небольшие элементы и вычислении электрического поля в центре каждого элемента с помощью метода моментов. Во всех случаях максимальный размер элемента находится между

$$0{,}1\lambda/\sqrt{\varepsilon} \text{ и } 0{,}2\lambda/\sqrt{\varepsilon},$$

где λ - длина волны в свободном пространстве; ε - относительная диэлектрическая проницаемость элемента.

Затем передатчик перемещается по окружности объекта контроля и вычисления проводят при различных положениях приемника. При повышении частоты передатчика можно получить более точную информацию о распределении диэлектрической проницаемости.

Еще одним направлением в разработке томографических систем на СВЧ является применение допплеровского метода. Суть метода в следующем. СВЧ антенна используется для облучения вращающегося объекта с некоторой заданной мощностью излучения на одной частоте. Эта же антенна используется и для приема отраженных сигналов. Исследуемый объект поворачивается на угол 360°, при этом на каждом угле наблюдения фиксируются амплитуда и фаза сигналов. Поскольку исследуемый объект поворачивается относительно неподвижной антенны, центры рассеяния энергии облучения внутри объекта дают отраженные сигналы, сдвинутые по частоте относительно исходной на величину, зависящую от скорости перемещения отдельных отражателей.

Если объект вращается с постоянной угловой скоростью, то центры рассеяния, лежащие на линии постоянной поперечной дальности, будут иметь одинаковую составляющую скорости в направлении на антенну. Таким образом, в данный момент времени все эти центры рассеяния будут отражать сигнал и все отраженные ими сигналы будут иметь один и тот же допплеровский сдвиг частоты.

Измеряя выходной сигнал приемника на некоторой частоте, получим сумму (линейный интеграл) рассеянного излучения на данной поперечной дальности, соответствующей этой частоте. Амплитуда отраженных сигналов на других частотах дает линейные интегралы для рассеивателей на других поперечных дальностях. График зависимости мгновенной амплитуды от частоты можно интерпретировать как томографическую проекцию. Через некоторое время исследуемый объект повернется в новое положение и будут получены новые проекции и т.д.

Таким образом, за полный оборот исследуемого тела будет получен набор проекций. Алгоритм томографической реконструкции по данным, получаемым из этих проекций, дает изображение распределения центров рассеяния в облучаемом объекте.

Восстановление изображения по когерентной допплеровской томограмме состоит в вычислении двумерного преобразования Фурье.

Главное преимущество когерентной допплеровской томографии состоит в том, что она обладает высоким пространственным разрешением, которое можно получить при непрерывном излучении, не прибегая к использованию широкополосных сигналов. К недостаткам относится наличие больших боковых лепестков у передаточной функции точки, которые ограничивают динамический диапазон и ухудшают разрешение.

Наибольший интерес в обращении волнового уравнения, необходимого для количественных оценок, достигнут в реконструктивной томографии при работе в трансмиссионном режиме. Примером такого подхода являются методы СВЧ-томографии, основанные на принципах *СВЧ-радиовидения* и *многочастотной радиоголографии*.

Принцип многочастотной голографии наиболее перспективен для формирования томографических изображений в СВЧ-диапазоне. Для голографии присуща возможность избирательного восстановления определенной части образной информации об источниках волнового поля в процессе реконструкции. Однако разрешающая способность не одинакова в различных координатных направлениях и зависит от метода регистрации голограмм. Так, предложено использовать для облучения объектов широкополосные сигналы. Применение широкополосных сигналов в радиоголографии позволяет: во-первых, значительно улучшить разрешающую способность в радиальном направлении и повысить качество изображений; во-вторых, осуществить синтезирование приемной апертуры.

Синтезирование приемной апертуры осуществляется при облучении исследуемой среды широкополосным квазигармоническим сигналом с линейной частотной модуляцией или дискретной перестройкой частоты. При этом сканирование одной из координат в пространстве заменяется сканированием частотой.

При реализации методов многочастотной радиоголографии для облучения объекта используют зондирующий сигнал в виде короткого импульса, в виде квазигармонического сигнала с линейной частотной модуляцией или дискретной перестройкой частоты. При этом разрешающая способность не зависит от вида используемого сигнала и определяется только шириной его спектра и размерами приемной апертуры.

Метод многочастотной голографии обеспечивает улучшение характеристик томографических систем в диапазоне СВЧ. При получении изображений объектов, скрытых неоднородными средами, метод наиболее эффективно подавляет ложные изображения.

Применение широкополосных зондирующих сигналов, улучшая разрешающую способность по глубине, открывает перспекти-

вы построения изображений объектов по сечениям.

Описанные выше методики и алгоритмы могут быть использованы при решении прикладных задач по контролю изделий из диэлектрических полимерно-композиционных материалов. Может использоваться метод когерентной допплеровской томографии для контроля и диагностики изделий в виде тел вращения из радиопрозрачных полимерно-композиционных материалов и многочастотный метод послойного зондирования. В другом случае методика может быть основана на радиоволновом методе синтезирования огибающей радиоимпульсного сигнала во временной области по данным измерений на многих частотах отражающей способности исследуемых структур при их электромагнитном облучении в диапазоне СВЧ. Данная методика может быть использована для следующего:

измерения общей электрической толщины слоистой структуры;

измерения электрических толщин каждого из слоев структуры;

определения геометрических толщин каждого из слоев структуры;

измерения расстояния от апертуры антенны до передней грани образца;

выявления внутренних неоднородностей в слоях и определения глубины их залегания;

определения эффективной относительной диэлектрической проницаемости материала каждого из слоев;

определения модуля коэффициента отражения всей структуры и границы раздела между слоями.

В результате использования данной методики и сканирования объекта может быть получено квазитомографическое изображение поперечного сечения исследуемого объекта в отраженных волнах.

3.8.5. ТОМОГРАФИЯ НА ОСНОВЕ ЯДЕРНОГО МАГНИТНОГО РЕЗОНАНСА (ЯМР)

Среди магнитно-резонансных методов для томографии могут быть использованы ЯМР и *электронный парамагнитный резонанс* (ЭПР). Эти методы основаны на том, что обладающие магнитным моментом ядра атомов (ЯМР) или парамагнитные атомы (ЭПР), помещенные в однородное магнитное поле, избирательно взаимодействуют с магнитной компонентой электромагнитной волны, частота которой строго определена. ЯМР и ЭПР отличаются исключительной чувствительностью к самым тонким особенностям физических и химических свойств различных веществ и биологических объектов. Поэтому методы ЯМР и ЭПР томографии позволяют не только обнаруживать нарушения сплошности в контролируемых материалах, но обнаруживать так же и различия в материалах, отличающихся по химическому составу, но совпадающих по элементному.

Вначале ЯМР использовался для ЯМР-спектроскопии. Были достаточно хорошо разработаны импульсные методы ЯМР-спектроскопии, однако первые ЯМР-изображения модельных образцов имели низкое качество и требовали больших затрат времени. Поэтому интенсивно разрабатывались методы построения ЯМР-изображений. Были предложены методы построения изображений, причем не только спиновой плотности, но и времен релаксации резонирующих магнитных моментов. ЯМР-томография развивалась в направлении повышения чувствительности, разрешающей способности и сокращения времени построения видеоизображений. Одновременно была решена проблема создания высокооднородных магнитных полей в больших объемах, что позволило создать лабораторные образцы ЯМР-томографов.

Пространственное разрешение ЯМР томографов в медицине составляет ~ 0,1 мм. Медицинские томографы обычно работают на ядрах водорода ^{1}H, углерода ^{13}C, фтора ^{19}F, натрия ^{23}Na и фосфора ^{31}P.

В начале 80-х годов ЯМР-томографы, первоначально разработанные для медицины, стали применяться в промышленности. Широкое применение нашли сравнительно простые ЯМР-спектрометры и ЯМР-релаксометры с вынесенным полем. Такие приборы применяются для анализа горных пород и могут быть использованы как миноискатели. ЯМР-томография может быть использована для неразрушающего контроля неметаллических материалов и изделий.

Возрос интерес исследователей к ЯМР-томографии твердого тела (полимеры, керамика, резина и т.д.). Основной трудностью здесь является получение высокого пространственного разрешения, поскольку линии ЯМР твердого тела имеют большую ширину, а разрешение обратно пропорционально ширине линии. Применяют в основном два метода сужения линии: вращение образца с большой скоростью и использование специальных импульсных последовательностей с последующей математической обработкой. Предложен метод вращающегося магнитного поля; при этом нет необходимости вращать образец. Применение этого метода для интроскопии изделий из полимеров позволило получить пространственное разрешение около 50 мкм.

Сложность обусловлена необходимостью получения однородных магнитных полей напряженностью до 2 - 5 Тл и импульсных переменных полей с заданными градиентами в

объемах до 1 м^3. Для ЯМР-томографии выпускают сверхпроводящие соленоиды с горизонтально расположенным рабочим каналом диаметром 1 м и длиной 0,85 м.

Структурная схема системы ЯМР-томографии приведена на рис. 3.8.8.

Объект исследования *14* помещается в зазор между полюсами сверхпроводящего соленоида *1* и датчиком ЯМР *8*, который в свою очередь заключен в гелиевый криостат *2*. Поле соленоида *1* возбуждается от специального источника питания *5*, в основу которого положен преобразователь, состоящий из генератора и усилителя мощности. Блок управления *4* задает режим работы сверхпроводящего соленоида *1* с помощью ключа *3*. Создаваемая соленоидом однородность и стабильность поля в объеме 1 см^3 должна быть на уровне 10^{-7} Тл.

Поскольку соленоид работает в наиболее экономичном "замороженном" режиме, для развертки поля применяется дополнительная двухслойная сверхпроводящая обмотка *6*, помещенная в рабочее отверстие соленоида, а с помощью блока развертки поля *7* значительно снижаются искажения однородности поля. Возникающие в объекте исследования *14* сигналы свободной прецессии улавливаются датчиком *8* и поступают на низкочастотный тракт *10*, который соединен с устройствами документирования *9*, реконструкционным спецпроцессором *12*, вычислительной машиной *11* и пультом управления *13*.

Синтез томограммы реализуется с помощью хорошо отработанного Фурье-алгоритма. Исследован механизм возникновения и разработаны процедуры коррекции геометрических и амплитудных искажений изображения.

ЯМР-томографы выпускаются в Германии (Bruker, Siemens), США (General Electric), Японии (Hitachi, Toshiba, Sanyo), Финляндии.

Ниже даны характеристики этих ЯМР-томографов: диаметр рабочего отверстия от 70 до 900 мм,

индукция магнитного поля от 0,02 до 9,4 Тл,

тип соленоида - резистивный или сверхпроводящий магнит.

Достигнутое пространственное разрешение (при интроскопии изделий из полимеров) 25 - 100 мкм. Основное применение - в медицине. В этих странах, а также в России ведутся исследования по применению ЯМР для контроля изделий из керамики, полимерных материалов и резины (в частности, для контроля процесса полимеризации резиноподобных материалов), для анализа качества угля и жидкого топлива в топливно-энергетическом комплексе. ЯМР создает уникальную возможность измерения расхода жидкого топлива и измерения профиля скоростей в потоке без внесения дополнительного гидравлического сопротивления в систему топливоподачи. Применение таких расходомеров на порядок повышает производительность труда при регулировке двигателей на топливную экономичность, гарантирует создание обоснованных норм расхода топлива.

Метод ЯМР широко применяется как инструмент научных исследований при изучении тончайших свойств большинства веществ - структуры молекул, скорости реакций и химического равновесия, химических связей, кристаллических структур, внутренних движений в твердых телах и жидкостях, электронных плотностей в металлах, сплавах и полупроводниках, внутренних полей в ферромагнитных и антиферромагнитных веществах.

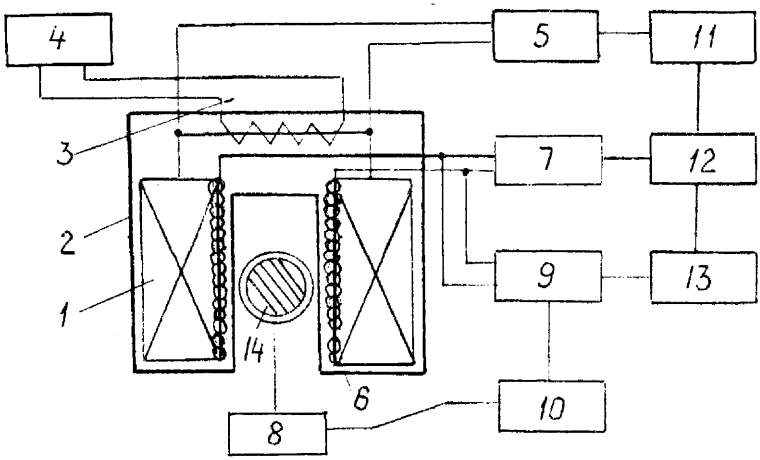


Рис. 3.8.8. Структурная схема системы ЯМР-томографии

Недостатком метода является необходимость создания особых условий для нормальной работы - защищенности от электромагнитных помех транспорта, лифтов, электромедицинской аппаратуры, специальных фундаментов и экранов, системы охлаждения основного соленоида до температуры жидкого гелия.

Глава 3.9

ДРУГИЕ МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ

3.9.1. ВИЗУАЛЬНО-ОПТИЧЕСКИЙ МЕТОД

Принцип действия и основной результат - осмотр с помощью оптических средств поверхностей ОК на наличие дефектов и аномалий; осуществляется независимо и в сочетании с другими методами контроля.

Физические основы метода

Зондирующая среда и/или источник энергии - видимая область спектра (длинноволновая ультрафиолетовая область спектра с флуоресцирующими материалами).

Характер сигнала и/или информационные характеристики - отраженное, прошедшее, рассеянное и индуцированное излучение.

Способ детектирования и/или восприятия - оптические средства, увеличительные стекла, бороскопы, видео- и пленочные фотокамеры.

Способ индикации и/или регистрации - визуальное изображение.

Метод расшифровки - анализ изображения; используется в сочетании с другими методами для непосредственной расшифровки (капиллярный, фильтрующихся частиц, магнитопорошковый).

Цели использования

Выявление дефектов типа нарушения сплошности - трещины, раковины, поры и включения.

Измерение размеров и метрология - измерения механическими средствами.

Определение физико-механических свойств - шероховатость, зерно и пленка.

Определение компонентного и химического состава.

Определение динамических характеристик - видимые реакции напряженности слоя.

Области использования

Контролируемые материалы - неограниченный круг материалов.

Объекты контроля и технологические операции - поверхности, слои, пленки, покрытия, целые объекты, контроль и регулирование в производственной линии и вне ее.

Диагностика - все виды технологических операций и испытаний.

Примеры - механически обработанные детали, внутренние поверхности, объекты контроля, элементы изделий, узлы и системы.

Ограничения

По технологичности - визуальный доступ. Обычно требуются специальные оптические средства.

По расшифровке - требуется дополнительное применение других методов контроля для различения, выявления и измерения дефектов.

По чувствительности и/или разрешению - различные кратности увеличения.

Родственные методы контроля - бороскопия, рефрактометрия, дифрактометрия, интерферометрия, рефлектометрия, микроскопия, телескопия, радиометрия в видимой области спектра, фазово-контрастный и шлирен-методы.

3.9.2. ТЕЧЕИСКАНИЕ

Принцип действия и основной результат - проникновение через сквозные дефекты пробных веществ: газов и жидкостей.

Физические основы метода

Зондирующая среда и/или источник энергии - пробные вещества: гелий, водород, криптон-85, спирт, ацетон, вода при гидроиспытаниях.

Характер сигнала и/или информативные характеристики - натекание.

Способ детектирования и/или восприятия - масс-спектрометрический, галогенный, пузырьковый, манометрический.

Способ индикации и/или регистрации - анализ газа, наблюдение пузырьков, показания манометра.

Метод расшифровки - анализ изображения, показания приборов.

Цели использования

Выявление дефектов типа нарушения сплошности - сквозные отверстия и трещины.

Измерение размеров и метрология.

Определение физико-механических свойств.

Определение компонентного и химического состава.

Определение динамических характеристик.

Области использования

Контролируемые материалы - металлы и смешанные непористые материалы.

Объекты контроля и технологические операции - оболочки, камеры и герметичные

соединения; контроль качества оболочек, камер и герметичных соединений.

Диагностика - проверка экспериментального и рабочего оборудования на отсутствие вакуумных течей.

Примеры - сварные, паяные и клеевые соединения; стеклянные оболочки; вакуумные камеры; эластомерные и металлические уплотняющие прокладки; топливные стержни реакторов; узлы и контейнеры для жидких металлов.

Ограничения

По технологичности - требуется непосредственный доступ по крайней мере к одной стороне и косвенный доступ к другой. Специальный зонд или течеискатель.

Другие ограничения - местоположение и размеры течи обычно трудно выявить; частицы металла, образующиеся при трении поверхностей, или загрязняющие вещества могут закупоривать канал течи; возможны радиационная и прочие опасности, связанные с остаточным газом.

По чувствительности и/или разрешению - чувствительность порядка 10^{-7}.

Родственные методы контроля - гидростатические испытания.

3.9.3. ВИХРЕТОКОВЫЙ МЕТОД

Принцип действия и основной результат - анализ взаимодействия электромагнитного поля вихретокового преобразователя с электромагнитным полем вихревых токов, наводимых в ОК.

Физические основы метода

Зондирующая среда и/или источник энергии - локальный индуцированный ток в диапазоне от 10 Гц до 6 Мгц.

Характер сигнала и/или информативные характеристики - возмущение индуцированного тока и, следовательно, индуцированного магнитного поля.

Способ детектирования и/или восприятия - катушка индуктивности; преобразователь Холла.

Способ индикации и/или регистрации - отклонение указателя измерительного прибора; осциллограмма.

Метод расшифровки - разностная или сравнительная; для каждого типа дефекта требуется эталонный образец.

Цели использования

Выявление дефектов типа нарушения сплошности - трещины, волосовины, включения.

Измерение размеров и метрология - толщина стенок и толщина покрытий.

Определение физико-механических свойств.

Определение компонентного и химического состава.

Определение динамических характеристик. Влияние термообработки.

Области применения

Контролируемые материалы - металлы, сплавы и электропроводники.

Объекты контроля и технологические операции - подповерхностные слои и подложки; геометрически правильные и однородные формы. Управление сортировкой материалов и деталей с обратной связью.

Диагностика - выявление эксплуатационных дефектов.

Примеры - трубы, проволока, шарикоподшипники, неметаллические покрытия, рельсы и колеса поездов, элементы авиационных конструкций, турбинные лопатки, турбинные диски и трансмиссионные валы для автомобилей.

Ограничения

По технологичности - преобразователь не контактирует с поверхностью, но располагается в непосредственной близости от нее. Преобразователь обычно изготовляется в соответствии с геометрией детали.

По расшифровке - ложные показания возможны вследствие смешанных переменных, краевых эффектов и эффектов обработки ОК.

Другие ограничения - малая глубина проникновения (ограничивается тонкими стенками или приповерхностными дефектами).

По чувствительности и/или разрешению - трещины длиной до 0,2 мм.

Родственные методы контроля - метод магнитостатического поля, магнитопорошковый и электрический.

3.9.4. РАДИОВОЛНОВЫЙ МЕТОД

Принцип действия и основной результат - регистрация изменений параметров электромагнитных волн радиодиапазона, взаимодействующих с ОК.

Физические основы метода

Зондирующая среда и/или источник энергии - электромагнитные волны сверхвысокочастотного диапазона (СВЧ) с длинами волн от 3 до 0,03 см.

Характер сигнала и/или информативные характеристики - рассеяние, отражение и/или ослабление излучения, амплитуда, фаза, поляризация, частота, геометрия распространения вторичных волн.

Способ детектирования и/или восприятия - СВЧ-волновод, термопары, терморезисторы, полупроводниковые диоды.

Способ индикации и/или регистрации - отклонение указателя измерительного прибора; координатный график.

Метод расшифровки - сравнительная фазоамплитудная дифференциация; требуется эталонный образец.

Цели использования

Выявление дефектов типа нарушения сплошности - трещины, пористость, отверстия и нарушения сцепления.

Измерение размеров и метрология - толщина и положение.

Определение физико-механических свойств - неоднородность; диэлектрические свойства.

Определение компонентного и химического состава - изменение состава, влагосодержание и степень отверждения.

Определение динамических характеристик - вибрационные характеристики.

Области использования

Контролируемые материалы - пластмассы, целлюлоза, керамика, жидкости и эластомеры.

Объекты контроля и технологические операции - поверхность, объемный материал и покрытия. Регулирование толщины и/или положения с обратной связью.

Примеры - армированные пластмассовые конструкции, пенополиуретан, оболочки для твердого (ракетного) топлива и кожухи двигателей.

Ограничения

По технологичности - контакт с поверхностью не требуется, но позиционирование изделия может иметь критическое значение.

По расшифровке - пространственное разрешение дефектов зависит от размеров измерительного преобразователя.

Другие ограничения - соосность и связь волновода и детектора имеют критическое значение; конфигурация волновода обычно сложная.

По чувствительности и/или разрешению - изменения толщины до 25 мкм.

Родственные методы контроля - диэлектрический метод и метод коронного разряда.

3.9.5. НЕЙТРОННАЯ РАДИОГРАФИЯ

Контролируемый объект просвечивают нейтронным пучком от реактора, ускорителя или радионуклидного источника; нейтронный пучок, ослабленный контролируемым объектом, используется для отображения или выявления внутренней структуры и/или дефектов, которые плохо выявляются при просвечивании рентгеновским и гамма-излучением.

Принципиальные основы

Зондирующая среда и/или источник энергии - нейтронный пучок.

Характер сигнала и/или информативные характеристики - прохождение или ослабление излучения объектом в зависимости от его параметров.

Способ детектирования и/или восприятия - радиографическая пленка или электронные методы (такие, как нейтроночувствительный усилитель изображения или свечение, наблюдаемое на экране).

Способ индикации и/или регистрации - радиографическое изображение; денситометрия.

Основа для расшифровки - непосредственная расшифровка (стандартные эталоны чувствительности для индикации качества изображения); критическое значение имеет регулирование контраста, разрешение и плотность.

Цели использования

Несплошности и разделения - раковины, пористость, включения и трещины.

Структура - внутренние дефекты структуры, аномалии и/или неправильное относительное расположение.

Размеры и метрология - толщина, диаметры и зазоры.

Компонентный и химический состав - загрязнения; распределение и/или идентификация элементов и/или изотопов.

Напряжение и динамические характеристики - с помощью нейтронной радиографии в реальном масштабе времени.

Области использования

Материалы - металлы, неметаллы, композиционные и смешанные материалы.

Элементы и формы - целые объекты или конструкции и структуры; широкий круг форм и размеров.

Контроль на месте и диагностика.

Примеры - пиротехнические устройства, смолы, пластики, органические вещества, сотовые конструкции, интегральные микросхемы, ядерные топливные элементы, радиоактивные материалы, металлы высокой плотности, материалы, содержащие водород.

Ограничения

Доступ, контакт и/или подготовка - доступ для размещения объекта между источником излучения и детекторами.

По зондированию и объекту - коллимация, фильтрация и замедление нейтронного пучка.

Чувствительность и/или разрешение - чувствительность 1 - 3 %.

По расшифровке - чувствительность снижается с увеличением толщины.

Прочие условия и ограничения - трещины должны быть сориентированы параллельно пучку; качество изображения варьируется в зависимости от источника нейтронов; радиационная опасность.

Родственные методы - рентгенография и гаммаграфия.

Родственные термины - нейтронография.

3.9.6. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ МЕТОД

Через контролируемую деталь или зону проходит ток; на силу или плотность тока между парой электродов, соприкасающихся с поверхностью, влияют неоднородности и несплошности.

Принципиальные основы

Зондирующая среда и/или источник энергии - ток, проходящий между парой поверхностных контактов или измерительных преобразователей.

Характер сигнала и/или информативные характеристики - падение напряжения и возмущение внешнего магнитного поля.

Способ детектирования и/или восприятия - электропотенциальный зонд, преобразователь Холла или индукционная катушка.

Способ индикации и/или регистрации - показание потенциометра; осциллограмма.

Основа для расшифровки - сравнительная; требуются стандартные дефекты и калибровочные кривые.

Цели применения

Несплошности и разделения - трещины и включения.

Структура - ликвации и ориентация зерен.

Размеры и метрология - измерения толщины.

Физико-механические свойства - удельное сопротивление, удельная проводимость и напряжение или деформация при обработке в холодном состоянии.

Напряжение и динамические характеристики - коррозия, эрозия, влияние износа, усталостные повреждения и распространение трещин.

Анализ информативных характеристик.

Области применения

Материалы - металлические материалы и электропроводники.

Элементы и формы - поверхности и подслои (подложки); однородные, геометрически правильные площади и формы.

Контроль технологического процесса.

Контроль на месте и диагностика - сканирование железнодорожных путей.

Примеры - сортовой прокат, плиты, рельсы, крепежные изделия и соединения; резервуары высокого давления, емкости и корпуса.

Ограничения

Доступ, контакт и/или подготовка - требуется хороший контакт с поверхностью.

По зондированию и объекту - расстояние между электродами или измерительными преобразователями и контакт имеют критическое значение.

Чувствительность и/или разрешение - может показывать (относительную) глубину трещин.

По расшифровке - зависит от формы и ориентации несплошности.

Прочие условия и ограничения - краевые эффекты и загрязнение поверхности ограничивают полезность метода; возможны наружные повреждения поверхности.

Родственные методы - метод магнитостатического поля и вихретоковый метод.

Родственные термины - электротоковый метод.

3.9.7. ТЕПЛОВЫЕ МЕТОДЫ

Электродвижущая сила, возникающая в точке контакта между преобразователем и изделием в результате температурного градиента, свидетельствует об изменениях в составе поверхности и/или подложки.

Принципиальные основы

Зондирующая среда и/или источник энергии - температурный градиент, создаваемый зондом с нагревателем.

Характер сигнала и/или информативные характеристики - термоЭДС на биметаллическом стыке.

Способ детектирования и/или восприятия - потенциометрическая схема, включающая изделие и подложку.

Способ индикации и/или регистрации - потенциометр.

Основа для расшифровки - сравнительная или разностная; для калибровки требуется эталонная или стандартная поверхность.

Цели применения

Несплошности и разделения - пористость.

Структура - ликвация и обеднение.

Размеры и метрология - изменения толщины.

Физико-механические свойства - термоэлектрические свойства.

Компонентный и химический состав поверхности.

Напряжение и динамические характеристики.

Анализ информативных характеристик.

Области применения

Материалы - металлы и электропроводящие подложки.

Элементы и формы - предповерхностные слои и подложки; покрытия.

Контроль технологического процесса - сортировка металлов и контроль толщины покрытий.

Контроль на месте и диагностика.

Примеры - диффузионные покрытия и слои, металлы с керамическим покрытием, *p- n* - переходы в полупроводниковых, графитовые изделия.

Ограничения

Доступ, контакт и/или подготовка - требуются незагрязненные поверхность и плотный контакт.

По зондированию и объекту - критическое значение имеют материал, твердость и окисление наконечника преобразователя (зонда).

Чувствительность и/или разрешение - распознаются ЭДС в отдельных зернах металла.

Ограничения по расшифровке - полезность метода ограничивается колебаниями контактного давления, колебаниями радиуса и затуплением зонда.

Прочие условия и ограничения - метод носит в основном экспериментальный характер.

Родственные методы - термохромный, инфракрасная радиометрия, электролитический микроанализ и вихретоковый метод.

3.9.8. ХИМИКО-АНАЛИТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ

3.9.8.1. ХИМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

От контролируемого объекта берут небольшую пробу материала; химический состав определяют, воздействуя на частицы образца серией реактивов.

Принципиальные основы

Зондирующая среда и/или источник энергии - химическая реакция.

Характер сигнала и/или информативные характеристики - изменения цвета и/или границы раздела фаз; выпадение осадка.

Способ детектирования и/или восприятия - визуальный.

Способ индикации и/или регистрации - непосредственное наблюдение.

Основа для расшифровки - качественный анализ; стандартизованные методики приготовления реактивов и последовательности применения.

Цели применения

Несплошности и разделения.

Структура.

Размеры и метрология.

Физико-механические свойства.

Компонентный и химический состав - элементный состав и идентификация.

Напряжение и динамические характеристики.

Анализ информативных характеристик.

Области применения

Материалы - металлы и сплавы.

Элементы и формы - поверхности и подповерхностные слои.

Контроль технологического процесса - применяется перед операциями соединения и изготовления.

Контроль на месте и диагностика - металлургические образцы.

Примеры - идентификация материала заготовок; детали двигателей.

Ограничения

Доступ, контакт и/или подготовка - требуются полумикроскопические частицы образца, отбираемого от детали.

Ограничения по зондированию и объекту - специальный набор готовых химических реактивов.

Чувствительность и/или разрешение - позволяет идентифицировать приблизительно 150 металлов и сплавов.

Ограничения по расшифровке - предполагается, что частицы взятого образца репрезентативны для всей детали.

Прочие условия и ограничения - трудно установить количественные значения обнаруженных компонентов; удаляется крошечное количество материала.

Родственные методы - искровый метод и метод искрового окисления.

3.9.8.2. ЛАЗЕРНЫЙ АНАЛИЗ

На контролируемом объекте микрофокусируют лазерный пучок для определения состава и/или микроструктуры; выполняется спектроскопический анализ мельчайших количеств испарившегося вещества.

Принципиальные основы

Зондирующая среда и/или источник энергии - пульсирующий лазерный пучок и электровозбуждение.

Характер сигнала и/или информативные характеристики - проба султана ионизирующего пара.

Способ детектирования и/или восприятия - спектрометр.

Способ индикации и/или регистрации - спектрограф.

Основа для расшифровки - дифференциальный и/или количественный анализ.

Цели применения

Структура - зерно и/или микроструктура; анализ включений, зерен, границ зерен.

Компонентный и химический состав - состав и распределение элементов и примесей.

Напряжение и динамические характеристики.

Анализ информативных характеристик.

Области применения

Материалы - металлы, неметаллы и композиционные материалы.

Элементы и формы - поверхности, подповерхностные слои, отложения и покрытия.

Контроль технологического процесса.

Контроль на месте и диагностика - металлургические образцы и анализ минеральных веществ.

Примеры - элементы двигателей самолетов, втулки реактивных несущих винтов, экспериментальные образцы.

Ограничения

Доступ, контакт и/или подготовка - требуются оптический обзор и доступ к поверхности.

Ограничения по зондированию и объекту - фокусирование и микроминиатюризация диаметра пучка.

Чувствительность и/или разрешение - анализ с точностью до 5 %.

Ограничения по расшифровке - зависит от регулирования и воспроизводимости диаметра и энергии лазерного пучка.

Прочие условия и ограничения - удаляется мельчайшее количество материала.

Родственные методы - ионный микроанализ, метод ионного рассеяния и химический капельный анализ.

Родственные термины - лазерный микроанализ.

3.9.8.3. РЕНТГЕНОФЛУОРЕСЦЕНТНЫЙ АНАЛИЗ

Облучение поверхности образца рентгеновскими лучами вызывает флуоресценцию; путем спектрографического сканирования эмиссии идентифицируют элементный состав.

Принципиальные основы

Зондирующая среда и/или источник энергии - рентгеновское излучение при уровне напряжения до 100 кВ.

Характер сигнала и/или информативные характеристики - вторичное излучение или флуоресценция.

Способ детектирования и/или восприятия - кристаллический анализатор, сцинтилляционный и ионизационный счетчик.

Способ индикации и/или регистрации - координатный графопостроитель.

Основа для расшифровки - количественный спектрографический анализ; основан на эмпирических калибровочных кривых и/или стандартных образцах.

Цели применения

Несплошности и разделения.

Структура.

Размеры и метрология - толщина.

Физико-механические свойства.

Компонентный и химический состав - элементный состав и примеси.

Напряжение и динамические характеристики - воздействие коррозии и наутлерожи-вания.

Анализ информативных характеристик.

Области применения

Материалы - твердые вещества (металлы) и жидкости.

Элементы и формы - поверхности, подповерхности, покрытия, пленки и слои.

Контроль технологического процесса.

Контроль на месте и диагностика.

Примеры - металлургические образцы; сырьевые материалы; топлива; растворы; корпуса, диффузоры и фланцы турбин, элементы самолетов.

Ограничения

Доступ, контакт и/или подготовка - для достижения высокой точности необходима подготовка поверхности образца или пробы.

Ограничения по зондированию и объекту - можно приспособить только небольшие образцы и площади.

Чувствительность и/или разрешение - чувствителен к содержанию следов элементов до 0,1 %.

Ограничения по расшифровке - низкие атомные номера и высокая чувствительность требуют заключения образцов в вакуумную оболочку.

Прочие условия и ограничения - радиационная опасность.

Родственные методы - оже-анализ, ионный микроанализ, метод ионного рассеяния и метод активации заряженными частицами.

3.9.8.4. РЕНТГЕНОСТРУКТУРНЫЙ АНАЛИЗ

Пробу, взятую от контролируемого объекта, облучают рентгеновским излучением; интенсивность рассеянного излучения изменяется в зависимости от углов дифракции, характерных для присутствующих кристаллических веществ.

Принципиальные основы

Зондирующая среда и/или источник энергии - монохроматическое рентгеновское излучение.

Характер сигнала и/или информативные характеристики - дифракционная картина.

Способ детектирования и/или восприятия - сцинтилляционный счетчик и фотоэмульсия.

Способ индикации и/или регистрации - дифрактометрический фотоснимок и координатный график.

Основа для расшифровки - аналитическая; дифференциальная; зависит от картотеки эталонных картин.

Цели применения

Несплошности и разделения.

Структура - величина, ориентация, структура и относительная деформация кристаллов; деформация кристаллической решетки; аморфная структура; фазовые превращения.

Размеры и метрология.

Физико-механические свойства.

Компонентный и химический состав - результаты химической реакции.

Напряжение и динамические характеристики - остаточное напряжение.

Анализ информативных характеристик.

Области применения

Материалы - кристаллические материалы.

Элементы и формы - поверхностные образцы (отложения и слои).

Контроль технологического процесса - изготовление магнитных и керамических материалов.

Контроль на месте и диагностика.

Примеры - электроосажденные материалы, тянутая проволока, тонколистовой прокат, анализ минеральных веществ, элементы самолетов.

Ограничения

Доступ, контакт и/или подготовка - предпочтительны порошковые пробы, но применим также к твердым объектам.

Ограничения по зондированию и объекту - заключение пробы в специальную емкость.

Чувствительность и/или разрешение - для выявления компонентов, содержащихся в низкой концентрации, отношение пик-фон должно превышать 1:1.

Ограничения по расшифровке - могут не выявляться аморфные компоненты.

Прочие условия и ограничения - конечные размеры кристаллов в образце вносят статические погрешности в подсчет сцинтилляций; радиационная опасность.

3.9.9. МЕТОДЫ АНАЛИЗА ИЗОБРАЖЕНИЙ

3.9.9.1. УСИЛЕНИЕ ВИДЕОИЗОБРАЖЕНИЙ

Изображение просматривается видеокамерой, которая преобразует значения плотности изображения в сигналы, которые усиливаются электронными средствами; производное изображение выводится на телевизионный монитор.

Принципиальные основы

Зондирующая среда и/или источник энергии - видимая область спектра.

Характер сигнала и/или информативные характеристики - изменения плотности исходного изображения.

Способ детектирования и/или восприятия - видиокамера.

Способ индикации и/или регистрации - телевизионный дисплей.

Основа для расшифровки - вспомогательные средства; зависят от выбора способа усиления.

Цели применения

Несплошности и разделения - трещины, раковины, включения, пористость и т.д.

Структура - аномалии структуры и/или неправильное относительное расположение.

Размеры и метрология - линейные и угловые измерения.

Физико-механические свойства - плотность.

Компонентный и химический состав.

Напряжение и динамические характеристики.

Анализ информативных характеристик.

Области применения

Материалы - радиографические, фотографические и металлографические снимки.

Элементы и формы - диапозитивы и непрозрачные пленки.

Контроль технологического процесса.

Контроль на месте и диагностика - в сочетании с видеорадиографией.

Ограничения

Доступ, контакт и/или подготовка - требуется подача изображения к камере.

Ограничения по зондированию и объекту - для различных применений требуются специальные системы линз.

Чувствительность и/или разрешение - приращения плотности до 0,05 единицы фотоплотности.

Ограничения по расшифровке - обычно воспринимают 32 уровня плотности.

Родственные методы - фотографическое выделение, сканер с бегущим лучом - цифровой преобразователь и лазерный фильтр.

3.9.9.2. ПОЗИТРОННЫЙ МЕТОД

Измеряется время жизни позитронов и характеристики аннигиляционного излучения в контролируемом материале. При появлении в материале дефектов с пониженной электронной плотностью время жизни возрастает от 100 - 150 пс до 200 - 500 пс. Регистрация времени жизни обеспечивает выявление субмикроскопических дефектов размером 0,2 - 1 нм.

Физические основы метода

Зондирующая среда и/или источник энергии - в качестве источника излучения используются позитронно-активные радионуклиды, преимущественно ^{22}Na, ^{44}Ti. Первичная энергия позитронов составляет 0,1 - 1,5 МэВ, активность источников $5 \cdot 10^5$ - $5 \cdot 10^6$ Бк.

Характер сигнала и/или информативные характеристики - фиксируется длительность временных интервалов между моментами срабатывания детектора ядерных γ -квантов источника и детектора квантов, возникающих при аннигиляции позитронов в контролируемом материале.

Способ детектирования и/или восприятия - гамма-кванты регистрируются быстродействующими сцинтилляционными детекторами.

Способ индикации и/или регистрации - времяамплитудное преобразование, многоканальная регистрация амплитуд сигналов, аналогово-цифровое преобразование информации.

Метод расшифровки - регистрация разностных спектров времен жизни в эталоне и контролируемом объекте; двух- трехкомпонентный анализ спектров времен жизни позитронов.

Цели использования

Выявление дефектов типа нарушения сплошности - в кристаллических материалах обнаруживаются вакансии, дислокации, микропоры, субмикротрещины.

Измерение размеров и метрология - возможен контроль толщины материалов в диапазоне 10^{-5} - 10^2 мм по стали.

Определение физико-механических свойств - усталостные свойства, термические микронапряжения, размеры микроскопических зерен, структурное состояние.

Определение компонентного и химического состава - в ряде случаев выявляются сегрегации атомов примесей в металлах.

Определение динамических характеристик.

Области использования

Контролируемые материалы - кристаллические металлические, полупроводниковые и диэлектрические материалы.

Объекты контроля и технологические операции - полупроводниковые пластины, покрытия, конструкционные стали, инструмент.

Диагностика - выявление дефектов, возникающих при радиационном воздействии на материалы; обнаружение зарождающихся субмикротрещин; прогнозирование эксплуатационных свойств материалов.

Примеры - большие интегральные схемы; материалы для трубопроводов и резервуаров.

Ограничения

По технологичности - возможен контроль преимущественно плоских объектов толщиной до 8 - 10 мм по стали; необходимо высокое качество поверхности объекта; в ряде случаев значительно влияние химического состава и структуры материала; глубина зоны контроля ограничена поверхностным слоем толщиной 50 - 200 мкм.

По расшифровке - при многокомпонентном анализе спектров требуется обработка данных на ЭВМ; необходима предварительная градуировка для каждого типа контролируемого материала.

Другие ограничения - требуется высококачественная стабилизация режимов аппаратуры; время контроля превышает 10 - 15 мин и в ряде случаев достигает 2 - 3 ч.

По чувствительности и/или разрешению - высокая чувствительность к некоторым примесям и их структурному состоянию; требуется использование аппаратуры с разрешением 200 - 300 пс.

Родственные методы контроля - рентгеновская дифрактометрия; метод электросопротивления.

3.9.9.3. ГАЗОСОРБЦИОННЫЙ МЕТОД

Контролируемый объект выдерживают в среде радиоактивного индикаторного газа, после чего проводят регистрацию картины распределения остаточной радиоактивности по поверхности объекта. Это обеспечивает выявление поверхностных дефектов раскрытием 0,01 - 10 мкм.

Физические основы метода

Зондирующая среда и/или источник энергии - в качестве индикаторного газа используют преимущественно ^{85}Kr, максимальная энергия β -излучения которого составляет 0,672 МэВ. Из-за существенного превышения внутренней поверхности дефектов типа трещин, площади их раскрытия в полости дефекта сорбируется значительное количество газа.

Характер сигнала и/или информативные характеристики - информацией о дефектах служит изображение остаточной радиоактивности; наличие почернений в изображении свидетельствует о появлении поверхностных дефектов.

Способ детектирования и/или восприятия - излучение радиоактивного газа фиксируется с помощью наносимых на поверхность объекта ядерных эмульсий, а также рентгеновских пленок и радиоскопической аппаратуры.

Способ индикации и/или регистрации - авторадиографический.

Метод расшифровки - визуальный анализ, автоматическая расшифровка изображений.

Цели использования

Выявление дефектов типа нарушения сплошности - поверхностные микротрещины раскрытием 0,01 - 10 мкм, глубиной 0,01 - 1 мм, микропоры размером до 10 мкм, непровары раскрытием от 1 до 10 мкм.

Определение физико-механических свойств - усталость материалов; контроль прижогов.

Области использования

Контролируемые материалы - металлы, композиционные материалы.

Объекты контроля и технологические операции - авиационная техника; подшипниковые материалы; электронно-лучевая сварка; шлифованные поверхности.

Диагностика - оценка времени службы деталей.

Примеры - диски газотурбинных двигателей; подшипники; литые лопатки двигателей.

Ограничения

По технологичности - требуется использование специальных боксов для насыщения объектов радиоактивным газом; при контроле изделий сложной формы необходим контакт эмульсии с поверхностью детали.

По расшифровке - необходима отстройка от "ложных" дефектов, в ряде случаев проявляемых на изображении объекта.

Другие ограничения - время контроля составляет от нескольких единиц до десятков часов; требуется принятие мер радиационной безопасности.

По чувствительности и/или разрешению - метод не чувствителен к дефектам, раскрытие которых превышает 10 мкм; не выявляются подповерхностные дефекты; несообщающиеся с поверхностью детали.

Родственные методы контроля - капиллярный метод; магнитографический метод.

3.9.9.4. ЭКЗОЭЛЕКТРОННЫЙ МЕТОД

Регистрируют эмиссию электронов с поверхности объекта, подвергнутых износу, растрескиванию, деформации, окислению и другим воздействиям. В дефектных местах поверхности вероятность эмиссии повышается. Регистрация распределения интенсивности эмиссии по поверхности объекта обеспечивает выявление зон деформации и трещинообразования.

Физические основы метода

Зондирующая среда и/или источник энергии - источниками экзоэлектронов являются выделение энергии при локальном разогреве окисляемых участков металла, перестройка энергетических уровней при локализации дефектов в окисной пленке, разрывах окисной пленки, адсорбции газов на поверхности металла, воздействии ультрафиолетовым облучением.

Характер сигнала и/или информативные характеристики - фиксируется запись аналогового сигнала, пропорционального эмиссии, при сканировании поверхности объекта.

Способ детектирования и/или восприятия - детектирование экзоэлектронов осуществляется открытыми электронными умножителями, микроканальными пластинами, ионизационными камерами, фотопленкой.

Способ индикации и/или регистрации - электронно-лучевой, графический.

Метод расшифровки - анализ электронограмм, наблюдение изображений на ЭЛТ.

3.9.1. Промышленная рентгенотехника

Тип радиационной системы	Чувствительность контроля, %	Области применения				
		Машиностроение	Газопроводы	Металлургия	Авиакосмос	Строительство
Стационарные рентгеновские установки	1 - 2	+	-	-	+	+
Передвижные рентгеновские аппараты	1,5 - 3	+	+	-	+	+
Моноблочные рентгеновские аппараты	1,5 - 3	+	+	-	-	+
Промышленные ускорители электронов (бетатроны, микротроны и др.)	1 - 2	+	-	+	-	-
Гаммадефектоскопы	2 - 3	+	-	-	-	+
Кроулеры	2 - 3	-	+	-	-	-
Проявочные машины	-	+	-	-	+	-
Промышленные рентгенотелевизионные системы	1 - 3	+	-	+	+	-
Установки для контроля багажа и почтовых отправлений	3 - 4	-	-	-	+	-
Электрорентгенографические установки	1,5 - 2	+	-	+	-	+
Рентгеновские пленки	-	+	+	+	+	+

3.9.2. Ультразвуковой неразрушающий контроль

Метод	Дефектоскопия		Контроль размеров		Структура; физико-механические свойства	Контроль технического состояния	Область эффективного применения		
	Минимальный размер дефекта, мм	Максимальная глубина залегания, мм	Диапазон, мм	Погрешность, %			Транспорт	Энергетика	Строительство
Эхо-метод	0,05	5 000	0,1 - 1 000	0,5	+	+	+	+	+
Метод прохождения	2	2 000	-	-	+	-	+	+	+
Резонансный:									
локальный	5	20	0,1 - 10	1	+		+	+	-
интегральный	-	-	-	-	+		+	+	+
Метод свободных колебаний:									
локальный	10	30	-	-	+	-	+	+	-
интегральный	-	-	-	-	+	+	+	-	+
Импедансный	4	15	-	-	-	+	+	-	-
Акустико-эмиссионный	Микротрещины	5 000	-	-	-	+	+	+	+
Акустико-топографический	5	6	-	-	-	-	+	-	-
Шумодиагностический	-	-	-	-	-	+	+	+	-
Комбинированные	2	5	-	-	+	+	+	+	+

3.9.3. Вихретоковый неразрушающий контроль

Физический принцип: преобразователь	Дефектоскопия			Структуроскопия; контроль усталостных напряжений	Контроль размеров		Металлоискание; максимальная глубина залегания	Область эффективного применения		
	Максимальная чувствительность, мм	Разрешающая способность, мм	Максимальная глубина залегания, мм		Диапазон, мкм	Погрешность, %		Транспорт	Энергетика	Безопасность
Одночастотный с амплитудно-фазовой селекцией	0,04 × 0,1 × 2	2	5	Сортировка металлов по маркам	10 - 2 000	3	-	+	+	+
Одночастотный с фазовой селекцией	0,2 × 0,1 × 2	2	5	± 2 % при контроле электропроводности	-	-	-	+	+	+
Одночастотный с амплитудной селекцией	0,5 × 0,1 × 5	2	2	-	-	-	-	-	-	+
Одночастотный на срыве генератора	0,04 × 0,1 × 2	2	2	-	10 - 2 000	3	9Д*	+	+	+
Многочастотный с амплитудно-фазовой селекцией	0,04 × 0,1 × 2	2	5	Послойный контроль на глубине до 5 мм	10 - 2 000	3	-	+	+	+
Импульсный	0,04 × 0,1 × 2	2	7	± 2 % при контроле электропроводности	-	-	11Д	+	-	+
Высших гармоник	-	-	-	Разделение на классы сортности изделия. Число классов до 10. Достоверность 90 %	-	-	-	+	+	-

* Д - диаметр преобразователя.

3.9.4. Магнитный неразрушающий контроль

Физический принцип; преобразователь	Дефектоскопия			Структуроскопия; контроль усталостных напряжений	Контроль размеров		Область эффективного применения		
	Максимальная чувствительность, мм	Разрешающая способность, мм	Максимальная глубина залегания, мм		Диапазон, мкм	Погрешность, %	Трубопроводы	Энергетика, транспорт	Безопасность
Магнитный порошок	0,1 × 5	10	20	-			+	+	+
Индукционный	0,1 × 0,1 × 2	5	30	-	0,05 - 2	3	+	+	+
Эффект Холла (магнитодиоды)	0,2 × 0,11 × 2	5	30	-	0,05 - 12,5	5	+	+	+
Феррозонд	0,1 × 0,1 × 2	5	30	-	0,05 - 20	1 - 3	+	+	+
Шумы Баркгаузена	-	-	-	Контроль напряжений с погрешностью 10 %	-	-	+	+	+
Магнитография (пленка)	0,1 × 0,1 × 2	5	20	-	-	-	+	+	+
Коэрцитиметрия	-	-	-	Фаза, твердость, глубина закаленного слоя, диапазон 40 - 4800 А/м, погрешность ± 5 %			+	+	+

Направление развития - расширение микро- и макродиапазона.

3.9.5. Вычислительная томография

Физический принцип	Максимальный диаметр объекта, мм	Диаметр рабочего поля томограммы, мм	Толщина контролируемого слоя, мм	Время сканирования, мин	Дефектоскопия сложных изделий и узлов					Область эффективного применения			Виды объектов
					Пространственное разрешение, пер/см	Чувствительность				Энергетика	Авиакосмос	Строительство	
						к дефектам в виде пор, мм^3	к металлическим включениям, мм^3	к трещинам, мкм	полутоновая, %				
Радиационная вычислительная томография	9 500	1280 - 100	8 - 0,5	5 - 20	10	20 - 0,3	1 - 0,03	100	1	+	+	+	Полимерные изделия, строительные конструкции, трубы, изделия машиностроения, ракетные и авиационные двигатели, цистерны
Рентгеновская вычислительная томография	400	300 - 25	4 - 0,5	3 - 10	20	0,3	0,03	20	0,5	+	+	+	Полимерные изделия, двигатели, трубы, изделия машиностроения, снаряды
Рентгеновская вычислительная микротомография	50	15 - 1,28	0,1 - 0,04	5 - 12	200	0,03	0,003	1 - 5	1 - 2	+	+	-	Полимерные изделия, микроэлектроника, электронная техника
Ультразвуковая эхоимпульсная вычислительная томография	1 000	950	20 - 50	10 - 30	50-80 мм по фронту и глубине	Сфера или диск диаметром 30 мм	Сфера или диск диаметром 50 мм	50		+	+	+	Железобетонные изделия
ЯМР-томография	700	700	0,5	20	20	10^{-3}	-	-	0,5	-	+	+	Водородсодержащие вещества
Оптическая томография	0,1 - 10,0	-	0,01	1	10^4	10^{-3}	10^{-3}	1,0	1	+	+	+	Оптические прозрачные объекты

3.9.6. Системы технического зрения

Тип системы	Характеристики			Область эффективного применения		
	Формат изображения, пикселл	Число полутонов	Время кадра, с	Авиакосмос	Энергетика	Медицина
Оптико-телевизионные	512×512	256	0,02	+	+	+
Лазерные сканеры	1024×1024	1024	0,02	+	-	+
Тепловизионные	256×256	512	0,04	+	+	+
Рентгенотелевизионные	512×512	256	0,02	+	+	+
Звуковизионные	128×128	128	0,1	+	-	+
Эндоскопические	512×512	256	0,02	+	+	+
Стереоскопические	1024×1024	128	0,04	+	+	-
Голографические	256×256	128	0,04	+	-	-

3.9.7. Контроль оптический, тепловой

Метод контроля	Чувствительность				Области применения			
	Дефектоскопия	Структуроскопия	Контроль размеров	Контроль состояния	Авиакосмос	Медицина	Энергетика	Экология
Тепловизионный	0,1 °С	0,1 °С	-	1 °С	+	+	+	+
Пирометрический	0,05 °С	0,05 °С	-	0,5 °С	+	+	+	+
Активный тепловой	0,1 °С	1 °С	2 %	1 °С	+	-	-	+
Визуально-оптический	1 %	0,1 %	0,001 мм	1 %	+	+	+	+
Оптико-телевизионный	1 %	1 %	0,001 мм	1 %	+	+	-	+
Лазерный (интерферометр и др.)	0,1 %	0,1 %	0,1 мкм	0,1 %	+	-	-	-
Голографический	0,1 %	0,1 %	0,1 мкм	0,1 %	+	+	-	-
Денситометрический	1 %	1 %	0,1 мм	-	+	+	-	-
Спектрометрический	0,1 %	1 %	0,1 мм	1 %	+	+	-	+
Поляриметрический	1 %	1 %	0,1 мм	-	+	-	+	+
Интроскопический	1 %	2 %	0,1 мм	1 %	+	+	+	+
Люминесцентный	1 %	1 %	-	1 %	+	+	+	+

3.9.8. Приборы течеискания и передвижные лаборатории

Тип приборов	Основные параметры			Область эффективного применения		
	Размер контролируемого участка	Разрешающая способность	Диапазон рабочих частот	Водоснабжение	Электротепло-снабжение	Магистральные газонефтепроводы
Ультразвуковые бесконтактные расходомеры	-	1 л/ч	1 МГц	+	+	-
Акустические корреляционные течеискатели	До 2 км	0,2 м	70 Гц - 5 кГц	+	+	+
Акустические бесконтактные течеискатели	3 - 5 м	0,1 м	60 Гц - 2,5 кГц	+	+	+
Акустические контактные течеискатели	0,1 - 0,5 м (по стыку)	0,005 м	60 Гц - 2,5 кГц	+	+	+
Ультразвуковые бесконтактные течеискатели	0,1 - 0,2 м (по стыку)	0,01 м	38 - 42 кГц	+	+	+
Передвижные лаборатории						
Экологические лаборатории	Число параметров 10 Время измерения 3 ч			+	+	+
Течеискания лаборатории	Частота 60 Гц - 42 кГц Напряжение 35, 70, 140 кВ			+	-	+
Кабельные лаборатории				-	+	-

Перспективные направления развития - многофункциональность, экспертные системы.

3.9.9. Прочие методы неразрушающего контроля

Физический принцип	Дефектоскопия		Структуроскопия	Контроль размеров	Контроль состояний	Область эффективного применения		
	Максимальная чувствительность	Максимальная глубина залегания				Транспорт	Энергетика	Безопасность
Электрический:								
разности потенциалов	0,5 мм	120 мм	-	+	+	+	+	+
термоэлектрический	-	-	+	-	+	-	+	-
электрического пробоя	-		-	-	+	+	-	-
энергетический	-	-	+	-	+	-	-	+
электронной эмиссии			-	-	+	+	-	-
электрического сопротивления			+	+	-	+	+	+
электростатический			-	+	+	+	-	+
электроемкостный			+	-	+	-	-	+
Капиллярный	1 мкм	100 мкм	-	-		+	+	+
Радиоволновой	100 мкм	500 мкм	+	+	+	+	-	+

3.9.10. Вибродиагностика

Физический принцип; преобразователь	Измеряемые параметры вибрации						Динамическая сила, Н	Частота, Гц	Область эффективного применения			Виды продукции
	абсолютной			относительной					Энергетика	Нефтехимия	Авиакосмос	
	Перемещение, мкм	Скорость, мм/с	Ускорение, м/с^2	Перемещение, мкм	Скорость, мм/с	Ускорение м/с^2						
Пьезоэлектрический	0,1 - 100	0,2 - 2000	10^{-6} - 10^6	-	-	-	$5 \cdot 10^{-3}$ - 10^6	0,3 - $5 \cdot 10^4$	+	+	+	Датчики вибрации и удара
Вихретоковый	-	-	-	0,1 - $3 \cdot 10^3$	0,1 - $3 \cdot 10^3$	10^{-3} - 10^4	-	0 - 10^4	+	+		Измерители, регистраторы и анализаторы
Индукционный	0,1 - $2 \cdot 10^6$	0,02 - 10^4	10^{-5} - 10^3	-	-	-	-	0,03 - $5 \cdot 10^3$	+		+	Контрольно-сигнальная и виродиагностическая аппаратура
Оптический (в т.ч. лазерный)	-	-	-	$3 \cdot 10^{-2}$ - 10^6	10^{-2} - 10^5	До 10^6	-	1 - 10^5				Оборудование для вибрационных и ударных испытаний

Цели использования

Выявление дефектов типа нарушения сплошности - обнаружение поверхностных трещин размером 0,1 - 1,0 мкм.

Определение физико-механических свойств - усталость материалов, степень окисления поверхности, износ.

Определение динамических характеристик - контроль зарождения и роста трещин.

Области использования

Контролируемые материалы - металлы.

Объекты контроля и технологические операции - износ подшипников, механическая обработка металлов.

Диагностика - выявление зарождающихся дефектов в напряженных конструкциях.

Примеры - подшипники, авиационная техника.

Ограничения

По технологичности - требуется плотный контакт системы детектирования электронов с поверхностью объекта или размещение объекта и этой системы в вакууме.

По расшифровке - необходимо идентифицировать сигналы от окисных пленок и дефектов.

Другие ограничения - существенно влияние загрязнений на поверхности объекта.

По чувствительности и/или разрешению - метод не чувствителен к внутренним дефектам объекта.

Родственные методы контроля - акустикоэмиссионный метод.

3.9.10. ХАРАКТЕРИСТИКИ МЕТОДОВ И СРЕДСТВ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ

Данные об основных параметрах современных средств и методов неразрушающего контроля приведены в табл. 3.9.1 - 3.9.10 (см. с. 390 - 399).

Глава 3.10

ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ КОНТРОЛЯ И ТЕХНИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ

1. ИНТЕЛЛЕКТУАЛИЗАЦИЯ МЕТОДОВ И СРЕДСТВ КОНТРОЛЯ И ТЕХНИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ (ТД).

В основе решения диагностических задач лежит прежде всего оптимальный выбор физического явления, дающего наиболее объективную информацию о параметре диагностирования. Важнейшей проблемой становится не фиксация дефекта как уже возникающего отклонения от нормируемого параметра, а исследование и регистрация физических и других эффектов, предшествующих времени перехода материала или изделия в "дефектное" состояние. Акустическая эмиссия, механоэмиссия, возникающее при деформациях диэлектриков и металлов электромагнитное излучение в диапазоне от радиоволнового до жесткого рентгеновского излучения, включая весь промежуточный диапазон видимого, инфракрасного и ультрафиолетового излучений, демонстрируют далеко не использованные физические возможности создания нового уровня интеллектуальных средств контроля и ТД.

Интеллект диагностики начинается прежде всего с правильного выбора физического эквивалента, наиболее адекватного изучаемому явлению, характеризующему работоспособность объекта. На основе этого должна проектироваться диагностическая технология. Для решения этой проблемы используются датчики на базе микроэлектронной технологии, построенные на основе самых различных физических явлений.

Широкая номенклатура преобразователей и сенсоров требует обоснованного выбора оптимального варианта использования их на практике, согласования с исследуемыми параметрами и функциями управления объектов контроля.

Интеллектуализация современных методов контроля и ТД связана с их интенсивной компьютеризацией, широким использованием встроенных персональных и мини-ЭВМ, разработкой большого ряда алгоритмов тестового и функционального диагностирования. Стали нормой перевод диагностической информации в двух- и трехмерное изображение с последующей обработкой в реальном масштабе времени, амплитудофазочастотная обработка многомерного сигнала, реконструктивная томография, томосинтез и т.д. Это потребовало введения в аппаратуру множества специальных процессоров.

Переход на экспертные диагностические системы, многомашинные испытательные комплексы для крупных промышленных объектов - актуальнейшая проблема научно-технического прогресса (НТП).

2. РАЗРАБОТКА ЕДИНОЙ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ ТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ И ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ.

С увеличением масштаба НТП, постоянными стихийными бедствиями (землетрясения, цунами, смерчи и т.п.), бурным ростом экологических проблем регионов все более необходимой становится неразрывная взаимосвязь методов и средств определения состояния крупных промышленных объектов и окружающей среды.

Диагностирование объектов даже с приближенной точностью не может быть выполнено без исследования основных воздействующих факторов.

Чем более крупное по масштабам событие ожидается, тем более комплексной должна быть физическая диагностика с полным набором различных по сути и принципам взаимодействия используемых полей и излучений. Нельзя ограничивать виброакустической диагностикой прогнозирование землетрясений. Изменение электромагнитных излучений, связанных с накоплением энергии Земли, исследование распределения теплового поля, уровня воды, газового анализа и многие другие сопутствующие (предшествующие) явления и геофизические поля должны быть изучены, зарегистрированы и сориентированы на принятие важнейшего заключения о достоверности появляющейся аномалии окружающей среды. Постоянный или периодический выездной мониторинг территории с помощью стационарных и передвижных диагностических станций, лабораторий, спутников, аэрофотосъемки и т.д. должен накапливать статистический многофункциональный материал, после математической обработки которого можно принимать окончательные организационные решения по обеспечению безопасности людей и сооружений.

Диагностика экологической обстановки территории должна стать неотъемлемой частью жизни и развития всех предприятий региона. Необходима прямая системная ее связь с диагностикой оборудования и всех рабочих мест внутри предприятия. Очень важно признать, что многие измерительные каналы, алгоритмы диагностирования, методы и устройства преобразования информации, используемые физические эффекты и технические средства идентичны при диагностировании предприятия и окружающей среды. Они должны быть унифицированы и системно спроектированы для решения общей задачи обеспечения безопасности людей и работоспособности всех объектов производственного процесса.

В то же время наглядно прослеживается развитие диагностических систем и устройств для исследования микрообъектов в связи с бурным развитием микроэлектроники, биотехнологии и других направлений НТП. Микротомография, рентгенотелевизионная микроскопия, микротомоскопия, микроэндоскопия и прочие важнейшие разделы интроскопии будут помогать проводить исследования и создавать новые материалы и объекты на микроуровне. Диапазон объектов контроля и диагностирования не ограничен ни по нижнему, ни по верхнему пределу геометрического размера, и это должно учитываться при создании единого оптимизированного и экономически обоснованного ряда приборов и систем НК.

3. СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ ТЕХНОЛОГИЙ.

Технические средства контроля и ТД включают в себя аппаратурную часть, программное обеспечение и эксплуатационно-техническую документацию. К сожалению, разработкам необходимой технологической документации, методикам, исследованию оптимальных процедур контроля и ТД уделяется явно недостаточное внимание. Контрольно-диагностические операции следует рассматривать как важнейший, обеспечивающий качество технологический предел со всеми вытекающими из этого выводами. От правильного выбора контроля в большой степени зависит эффективность конечного результата - долговременная работоспособность объектов при минимальных затратах. В качестве примера можно привести широко применяющийся до сих пор метод испытания труб большого диаметра с помощью гидропрессов, для которого строят специальные цехи и многотонное испытательное оборудование.

В то же время автоматизированный ультразвуковой дефектоскоп позволяет выявить дефекты с большей достоверностью, чем гидроиспытания, при этом затраты на контроль уменьшаются в сотни раз. Алгоритмы испытаний должна формировать диагностическая технология, с тем чтобы определить что и как следует применять. Именно технология должна минимизировать диагностические параметры, методы и средства, обеспечивающие достоверность определения аномального события.

Можно утверждать, что нет ни одного безошибочного метода контроля. Могут встречаться непредвиденные условия эксплуатации, поэтому диагностические технологии должны быть "избыточными" в отношении применения комплекса различных по физической сути методов и приемов контроля, которые бы дополняли друг друга для обеспечения максимальной гарантии качества изделия. Технология должна предусматривать спектр различных конструкций контрольно-диагностических приборов - от ручного до автоматизированного исполнения при рациональном сочетании их применения в процессах производства, испытаний и эксплуатации объектов. Она должна иметь библиотеку алгоритмов и программ диагностирования, выполненных применительно к конкретным изделиям, операциям и задачам обнаружения дефектов. Самый важный момент - принятие решения о несоответствии изделия предъявляемым требованиям и прекращении его эксплуатации или производства - должен быть особо отмечен и научно обоснован в технологии. Фундаментом этого решения является предварительно набранный статистический материал.

Диагностические технологии необходимо предварительно опробовать, они не могут содержать неразумных требований в виде "не допускаются никакие виды дефектов", должны работать только на опережение, надежно рас-

познавать предаварийную ситуацию, никаким образом не допускать аварийной эксплуатации изделий.

4. ОРГАНИЗАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ КОНТРОЛЯ И ТД.

Разработка новых машин не может не предусматривать затраты на их контрольно-диагностическое сопровождение. За технический уровень и качество отвечает главный конструктор изделия, который должен правильно сформулировать контрольно-диагностическую политику и нести за нее ответственность. Однако слабая осведомленность многих разработчиков в контроле и ТД приводит к созданию контроленепригодных изделий, изделий с избыточными массами и габаритными размерами и неопределенными показателями надежности. В результате этого значительно сокращается срок жизни изделий, возникают аварийные ситуации и необоснованно удорожаются конструкции машин.

Необходимо предусматривать специальные материальные средства на контрольно-измерительное оборудование с выделением на них как минимум 3 – 7 % капитальных вложений при новом строительстве и реконструкции предприятий, а также при создании новых объектов.

С целью проведения единой политики в области контроля и ТД для максимального использования научно-технических достижений и разработок во всех отраслях машиностроительного и других комплексов необходимо создание межотраслевых и международных ассоциаций, которые могли бы объединить усилия различных ведомств и фирм на создание современных контрольно-диагностических систем многофункционального применения.

Крайне важно организовать территориальные центры диагностики, оснащенные всем спектром современной контрольно-диагностической аппаратуры (рентгеновскими вычислительными томографами, рентгенотелевизионными системами, тепловизорами, звуковизорами, телеэндоскопами и т.д.), которые могли бы квалифицировано разрабатывать диагностические технологии и осуществлять экспертный контроль качества сырья, промежуточных и целевых продуктов многих предприятий.

Для создания средств контроля и ТД новых поколений необходимо повысить эффективность координации академической, вузовской и отраслевой науки, международного сотрудничества путем создания совместных научно-технических программ и проектов, а также проведения регулярных международных выставок и конференций. Должна быть внедрена единая международная система сертификации персонала и техники контроля и ТД.

Завершающим и **конечным результатом** любых контрольно-диагностических операций является **определение степени риска эксплуатации и остаточного ресурса объекта обследования.**

Настало время перехода от измерения и выводов по одному или нескольким диагностируемым параметрам (дефекты типа нарушение сплошности, изменение размера, физико-механических характеристик, смещения, вибраций, химического состава, электрических, температурных и др. величин) к многофункциональной диагностике, по результатам которой главный конструктор утверждает (согласовывает) правила (методику) оценки остаточного ресурса изделия, подготовленные специалистами по надежности машин и элементов конструкций с учетом основных неблагоприятных факторов и законодательного оформления сроков и режимов эксплуатации, экологической и климатической обстановки, периодичности и объема получаемой диагностической информации, присутствия и квалификации обслуживающего персонала, возможности ремонта и дублирования и также ряда других условий.

Важнейшей проблемой становится принятие многочисленных решений о продлении срока эксплуатации объектов, в том числе дорогостоящих и особой важности после выработки их ресурса. Это также должно осуществляться только по результатам всестороннего диагностирования.

Направление создания методик и правил определения и продления остаточного ресурса объектов эксплуатации является наиболее сложным, так как интегрирует в себе весь объем получаемой диагностической информации и знаний о конструкции и надежности функционирования объекта. **Научное обоснование остаточного ресурса – это базовая гарантия безопасной эксплуатации объектов любого уровня сложности и ответственности.** Эксплуатация должна реально осуществляться по состоянию, а не до аварии объекта, что часто встречается на практике.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Акустическая** эмиссия и ее применение для неразрушающего контроля в ядерной энергетике / Под ред. К.Б. Вакара. М.: Атомиздат, 1980. 216 с.

2. **Баранов В.М.** Ультразвуковые измерения в атомной технике. М.: Атомиздат, 1975. 220 с.

2. **Балтер М.А.** и др. Фрактография – средство диагностики разрушенных деталей. М.: Машиностроение, 1987. 160 с.

4. **Боровиков А.С., Прохоренко П.П., Дежкунов Н.В.** Физические основы и средства капиллярной дефектоскопии. Минск: Наука и техника, 1983. 256 с.

5. **Валуев Н.П., Жихарев А.Н.** Быстродействующий позитронный дефектоскоп // Дефектоскопия, 1989. № 4, С. 87–88.

6. **Герасимов В.Г., Клюев В.В., Шатерников В.Е.** Методы и приборы электромагнитного контроля промышленных изделий. М.: Энергоатомиздат, 1983. 272 с.

7. **Гурвич А.К.** и др. Неразрушающий контроль. Кн. 1. Общие вопросы. Контроль проникающими веществами. М.: Высшая школа, 1992. 242 с.

8. **Дорофеев А.Л., Казаманов Ю.Г.** Электромагнитная дефектоскопия. М.: Машиностроение, 1980. 232 с.

9. **Добромыслов В.А., Румянцев С.В.** Радиационная интроскопия. М.: Атомиздат, 1972. 352 с.

10. **Дефекты** стали. Справ. изд. / Под ред. С.М. Новокщеновой, М.И. Виноград. М.: Металлургия, 1984. 199 с.

11. **Ермолов И.Н.** Теория и практика ультразвукового контроля. М.: Машиностроение, 1981. 240 с.

12. **Иванов В.И., Белов В.М.** Акусто-эмиссионный контроль сварки и сварных соединений. М.: Машиностроение, 1981. 84 с.

13. **Испытание** магнитных материалов и систем / Под ред. А.Я. Шихина. М.: Энергоатомиздат, 1984. 376 с.

14. **Крауткремер Й., Крауткремер Г.** Ультразвуковой контроль материалов: Справочник. М.: Металлургия, 1991. 752 с.

15. **Ланге Ю.В.** Акустические низкочастотные методы и средства контроля многослойных конструкций. М.: Машиностроение, 1991. 272 с.

16. **Леонов Б.И., Соснин Ф.Р., Валуев Н.П.** Неразрушающий контроль. М.: Знание, 1985. 64 с.

17. **Лозовский В.Н.** и др. Диагностика авиационных деталей. М.: Машиностроение, 1988. 280 с.

18. **Матис И.Г.** Электроемкостные преобразователи для неразрушающего контроля. Рига: Зинатне, 1982. 304 с.

19. **Неразрушающий** контроль. В 5 кн.: Практ. пособие / Под ред. В.В. Сухорукова. М.: Высшая школа. 1991–1993.

20. **Неразрушающий** контроль и диагностика: Справочник / В.В. Клюев, Ф.Р. Соснин, В.Н. Филинов и др.; Под ред. В.В. Клюева. М.: Машиностроение, 1995. 488 с.

21. **Неразрушающие** методы контроля сварных соединений / С.В. Румянцев, В.А. Добромыслов, О.И. Борисов, Н.Т. Назаров. М.: Машиностроение, 1976. 335 с.

22. **Неразрушающий** контроль с источниками высоких энергий / В.В. Клюев, Ф.Р. Соснин и др. М.: Энергоатомиздат, 1989. 176 с.

23. **Потапов А.И.** Контроль качества и прогнозирование надежности конструкций из композиционных материалов. Л.: Машиностроение, 1980. 282 с.

24. **Промышленная** радиационная интроскопия / В.В. Клюев, Б.И. Леонов и др. М.: Энергоатомиздат, 1985.

25. **Прохоренко П.П., Мигун Н.П.** Введение в теорию капиллярного контроля / Под ред. А.С. Боровикова. М.: Наука и техника, 1983. 207 с.

26. **Растровая** электронная микроскопия. Разрушение, Справоч. изд. / Л. Энгель, Г. Клингеле. Пер. с нем. М.: Металлургия, 1986. 232 с.

27. **Рентгенотехника:** Справочник. В 2-х книгах / Под ред. В.В. Клюева. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1992.

28. **Румянцев С.В., Штань А.С., Гольцев В.А.** Справочник по радиационным методам неразрушающего контроля (Под ред. С.В. Румянцева). М.: Энергоатомиздат, 1982. 235 с.

29. **Румянцев С.В., Добромыслов В.А., Борисов О.И.** Типовые методики радиационной дефектоскопии и защиты. М.: Атомиздат, 1976. 198 с.

30. **Румянцев С.В., Фурман К.С.** Газосорбционная дефектоскопия. М.: Атомиздат, 1979.

31. **Справочник** технолога-машиностроителя. В 2-х т. Т. 1 / Под ред. А.Г. Косиловой и Р.К. Мещерякова. 4-е изд. перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1985. 656 с.

32. **Тихонов А.Н., Арсенин В.Я., Тимонов А.А.** Математические задачи компьютерной томографии. М.: Наука, 1987. 159 с.

33. **Тибор Терек, Иожеф Мика, Эрно Гегуш.** Эмиссионный спектральный анализ. В 2-х ч. Пер. с англ. М.: Мир, 1982 г. Ч. I, 286 с.; Ч. II, 464 с.

34. **Фрактография** и атлас фрактограмм. Пер. с англ. М.: Металлургия, 1982. 489 с.

35. **Химченко Н.В., Бобров В.А.** Неразрушающий контроль в химическом и нефтяном машиностроении. М.: Машиностроение, 1978. 264 с.

36. **Цветное** литье: Справочник / Н.М. Галдин и др.; Под общ. ред. Н.М. Галдина. М.: Машиностроение, 1989. 528 с.

37. **Челноков Н.М., Власьевнина Л.К., Адамович Н.А.** Технология горячей обработки материалов: Учебник. М.: Высшая школа, 1981. 296 с.

38. **Явойский В.И.** и др. Неметаллические включения и свойства стали. М.: Металлургия, 1980. 176 с.

39. **Экологическая диагностика.** Серия "Безопасность России" / Под ред. В.В. Клюева. М.: Машиностроение, 2000. 496 с.

РАЗДЕЛ 4

ТЕХНИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА

Глава 4.1

ОСНОВНЫЕ ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Техническая диагностика представляет теорию, методы и средства обнаружения и поиска дефектов объектов технической природы. Под дефектом понимают любое несоответствие свойств объекта заданным, требуемым или ожидаемым. Обнаружение дефекта есть установление факта его наличия или отсутствия в объекте. Поиск дефекта заключается в указании с определенной точностью его местоположения в объекте.

Основное назначение технической диагностики состоит в повышении надежности объектов на этапе их производства, эксплуатации и хранения.

Диагностическое обеспечение позволяет повысить достоверность правильного функционирования объектов, увеличить срок их службы и наработку на отказ.

Требования, которым должен удовлетворять изготовленный (новый) или эксплуатируемый объект, определяются соответствующей нормативно-технической документацией. Объект, удовлетворяющий всем требованиям нормативно-технической документации, является *исправным* или говорят, что он находится в *исправном техническом состоянии*.

Для условий эксплуатации важным является понятие *работоспособного технического состояния объекта*. Объект *работоспособен*, если он может выполнять *все заданные функции* с сохранением значений заданных параметров (признаков) в требуемых пределах.

Правильно функционирующим является объект, значения параметров (признаков) которого в момент применения объекта по назначению находятся в требуемых пределах.

Неисправное и *неработоспособное техническое состояние*, а также *техническое состояние неправильного функционирования* объекта могут быть детализированы путем указания соответствующих дефектов, нарушающих исправность, работоспособность или правильность функционирования и относящихся к одной или нескольким составным частям объекта, либо к объекту в целом.

Обнаружение и поиск дефектов являются процессами *определения технического состояния* объекта и объединяются общим термином "*диагностирование*"; *диагноз* есть результат диагностирования.

Диагностирование технического состояния любого объекта осуществляется теми или иными *средствами диагностирования*. Средства могут быть аппаратурными или программными; в качестве средства диагностирования может также выступать человек-оператор, контролер, наладчик. Средства и объект диагностирования, взаимодействующие между собой образуют *систему диагностирования*. Различают системы *тестового* и *функционального диагностирования*. В системах тестового диагностирования на объект подаются специально организуемые *тестовые воздействия*. В системах функционального диагностирования, которые работают в процессе применения объекта по назначению, подача тестовых воздействий, как правило, исключается; на объект поступают только *рабочие воздействия*, предусмотренные его алгоритмом функционирования.

Система диагностирования в процессе определения технического состояния объекта реализует некоторый *алгоритм* (*тестового* или *функционального*) *диагностирования*. Алгоритм диагностирования в общем случае состоит из определенной совокупности так называемых *элементарных проверок* объекта, а также правил, устанавливающих последовательность реализации элементарных проверок, и правил анализа результатов последних. Каждая элементарная проверка определяется своим тестовым или рабочим воздействием, подаваемым или поступающим на объект, и *составом контрольных точек*, с которых снимаются ответы объекта на это воздействие.

При разработке систем диагностирования должны решаться задачи изучения объекта, его возможных дефектов и признаков проявления, выбора или построения модели поведения исправного объекта и его неисправных модификаций.

Уточним понятия "управление", "контроль" и "диагностирование". Под *управлением* понимают процесс выработки и осуществления целенаправленных (управляющих) воздействий на объект.

Контроль есть процесс сбора и обработки информации с целью определения событий. Если событием является факт достижения некоторым параметром объекта определенного заданного значения (уставки), то говорят о контроле параметров. Если фиксируемым событием является установление факта пребывания объекта в исправном или неисправном, работоспособном или неработоспособном состоянии, или состоянии правильного или неправильного функционирования, то можно говорить о контроле технического состояния объекта.

Системы тестового диагностирования являются системами управления, поскольку в них реализуется выработка и осуществление специально организованных тестовых (т.е. управляющих) воздействий на объект с целью определения технического состояния последнего.

Системы функционального диагностирования является типичными системами контроля (в широком смысле этого слова), не требующими подачи на объект целенаправленных воздействий.

С изложенной точки зрения, например, системы, получившие название систем неразрушающего контроля, являются классом систем тестового диагностирования, а виброакустические системы контроля технического состояния - классом систем функционального диагностирования.

Формализованной моделью объекта (или процесса) является его описание в аналитической, графической, табличной или другой форме. Для простых объектов диагностирования удобно пользоваться так называемыми **явными моделями**, содержащими наряду с описанием исправного объекта описание каждой из его неисправных модификаций.

Неявная модель объекта диагностирования предполагает наличие только одного описания, например исправного объекта, формализованных моделей дефектов и правил получения по заданному описанию и по моделям дефектов описаний всех неисправных модификаций объекта.

Модели объектов бывают *функциональные* и *структурные*. Первые отражают только выполняемые объектом (исправным или неисправным) функции, определенные относительно рабочих входов и выходов объекта, а вторые, кроме того, содержат информацию о внутренней организации объекта, о его структуре. Функциональные модели позволяют решать задачи проверки работоспособности и правильности функционирования объекта. Для проверки исправности (в общем случае) и поиска дефектов с глубиной большей, чем объект в целом, требуются структурные модели.

Модели объектов диагностирования могут быть *детерминированными* и *вероятностными*. К вероятностному представлению прибегают при невозможности детерминированного описания поведения объекта.

Модели объектов диагностирования нужны для построения алгоритмов диагностирования формализованными методами.

Построение алгоритмов диагностирования заключается в выборе такой совокупности элементарных проверок, по результатам которых в задачах по обнаружению дефектов можно отличить исправное или работоспособное состояние, или состояние правильного функционирования объекта от его неисправных состояний, а также в задачах поиска дефектов различать неисправные состояния.

При построении алгоритмов диагностирования по явным моделям объектов элементарные проверки выбирают путем попарного сравнения тех описаний, технические состояния которых требуется различать. В задачах тестового диагностирования составы контрольных точек объекта часто определены предварительно, и они одинаковы для всех элементарных проверок. В таких случаях выбирают только входные воздействия элементарных проверок - это задачи *построения тестов*. В задачах функционального диагностирования, наоборот, входные воздействия элементарных проверок определены заранее рабочим алгоритмом функционирования объекта и выбору подлежат только составы контрольных точек.

Для решения одной и той же задачи диагностирования (например, проверки исправности) можно построить несколько алгоритмов, различающихся либо составом элементарных проверок, либо последовательностью их реализации.

Необходимость увеличения производительности труда на операциях диагностирования, сокращения времени обнаружения, поиска и устранения неисправностей, уменьшения объемов и сложности средств диагностирования вызывает интерес к разработке методов построения *оптимальных алгоритмов*, требующих минимальных затрат на их реализацию.

Средства диагностирования могут быть *аппаратными* или *программными*, *внешними* или *встроенными*, *ручными*, *автоматизированными* или *автоматическими*, *специализированными* или *универсальными*.

Средства функционального диагностирования являются, как правило, встроенными и поэтому разрабатываются и создаются одновременно с объектом.

Уровень контролепригодности объектов определяет степень эффективности решения задач тестового диагностирования их технического состояния, влияет на производительность процесса их производства и качество выпускаемых изделий, а при эксплуатации уровень контролепригодности объектов определяет их коэффициенты готовности и затраты, связанные с ремонтом.

Контролепригодность обеспечивается преобразованием структуры проверяемого объекта к виду, удобному для диагностирования. Для этого в объект еще на этапе его проектирования вводят дополнительно встроенные средства тестового диагностирования.

Задачи диагностирования - это задачи определения технического состояния, в котором находится объект в настоящий момент времени. Задачи диагностирования - предсказание технического состояния, в котором объект окажется в некоторый будущий момент времени.

Задачи первого типа формально следует отнести к технической диагностике, а второго типа - к технической прогностике.

Есть еще третий тип задач - определения технического состояния объекта в некоторый момент в прошлом (*задачи технической генетики*). Задачи технической генетики возникают, например, в связи с расследованием аварий и их причин, когда техническое состояние объекта в рассматриваемое время отличается от состояния, в котором он был в прошлом, в результате появления первопричины, вызвавшей аварию. Эти задачи решаются путем определения вероятных предысторий, ведущих в настоящее состояние объекта. К задачам технической прогностики относятся, например, задачи, связанные с определением срока службы объекта или с назначением периодичности его профилактических проверок и ремонтов. Эти задачи решаются путем определения возможных или вероятных эволюций состояния объекта, начинающихся в настоящий момент времени.

Решение задач прогнозирования весьма важно, в частности, для организации *технического обслуживания объектов по состоянию* (вместо обслуживания по ресурсу). Непосредственное перенесение методов решения задач диагностирования на задачи прогнозирования невозможно из-за различия моделей, с которыми приходится работать: при диагностировании моделью обычно является описание объекта, в то время как при прогнозировании необходима модель процесса эволюции технических характеристик объекта во времени.

Главными показателями качества систем диагностирования являются гарантируемые ими полнота обнаружения и глубина поиска дефектов.

Глава 4.2

ВИБРОДИАГНОСТИКА

4.2.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Диагностирование состояния машин и оценка степени опасности повреждения на основе данных контроля вибрации - один из наиболее эффективных методов повышения надежности оборудования.

Вибрационное диагностирование объектов проводится в три этапа: первичное описание вибрационного состояния объекта, выделение признаков и принятие решения.

На этапе поиска информативных признаков ограничивают число измеряемых параметров вибрации, шума и ударов. При этом из множества параметров, характеризующих вибрационный процесс, выделяют только те, которые прямо или косвенно характеризуют состояние объекта. По этим параметрам формулируют информативную систему признаков, используемых при диагностировании.

Основные параметры различных вибрационных процессов, измеряемые для определения состояния машин методами вибродиагностики, приведены в табл. 4.2.1.

Выбор диагностических параметров вибрации зависит от типов исследуемых механизмов, амплитудного и частотного диапазона измеряемых колебаний.

В низкочастотном диапазоне чаще измеряют параметры *виброперемещения*, в среднечастотном - *виброскорости*, а в высокочастотном - *виброускорения*.

Виброперемещение представляет интерес в тех случаях, когда необходимо знать относительное смещение объекта или деформацию. Если исследуют эффективность вибрационных машин, а также воздействие вибраций на организм человека, то изучают скорость вибрации, поскольку именно она определяет импульс силы и кинетическую энергию. При оценке надежности объектов основным измеряемым параметром является виброускорение.

В зависимости от спектрального состава, распределения уровней вибрации в диапазоне частот и во времени, а также от нормирования допустимого уровня измеряют амплитудные, средние или средние квадратические значения. Основным преимуществом измерения средних квадратических значений является независимость этих значений от сдвигов фаз между отдельными составляющими спектров измеряемой вибрации.

При измерении параметров вибрации используют два метода измерения: кинематический и динамический.

Кинематический метод заключается в том, что измеряют координаты точек объекта относительно выбранной неподвижной системы координат. Измерительные преобразователи, основанные на этом методе измерения, называют преобразователями относительной вибрации.

Таблица 4.2.1. Основные параметры различных вибрационных процессов

Основные измеряемые параметры	Математическое описание	Обозначения
1	2	3
	Моногармоническая вибрация	
Виброперемещение	$x(t) = X_0 \sin(\omega t + \varphi)$	X_0 -амплитуда виброперемещения
Виброскорость	$v(t) = V_0 \cos(\omega t + \varphi)$	$V_0 = \omega X_0$
Виброускорение	$a(t) = A_0 \sin(\omega t + \varphi)$	$A_0 = \omega^2 X_0$; ω, φ - круговая частота и фаза колебания соответственно
Резкость	$u = da(t) / dt$	
	Полигармоническая вибрация	
Размах колебания	$x(t) = \frac{X_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} X_n (n\omega t + \varphi_n)$	$X_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2}$; $n = 1, 2, 3, \ldots$; $a_n = \frac{2}{T}\int_0^T x(t)\cos n\omega t\, dt$; $b_n = \frac{2}{T}\int_0^T x(t)\sin 2n\omega t\, dt$; $\varphi_n = \operatorname{arctg}(b_n / a_n)$
	Широкополосная случайная вибрация	
Дисперсия	$D_x = \lim_{T\to\infty} \frac{1}{T}\int_o^T [x(t) - m_x(t)]^2 dt$ Для стационарного эргодинамического процесса $D_x = \overline{x^2(t)} - [\bar{x}(t)]^2$	$m_x(t) = \lim_{T\to\infty} \frac{1}{T}\int_o^T x(t)dt$ - среднее значение
Среднеквадратическое отклонение	$\sigma_x = \sqrt{D_x}$	
Спектральная плотность мощности	$S(\omega) = \frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{+\infty} R(\tau)\, e^{-i\omega t} d\tau$	$R(\tau) = M[x(t)x(t+\tau)]$ - корреляционная функция; M - математическое ожидание
	Акустическая вибрация	
Среднеквадратическое значение звукового давления	$p = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T p^2(t)dt}$	$p(t)$ - мгновенное значение звукового давления; T - время интегрирования

Продолжение табл. 4.2.1

1	2	3
Уровень акустической мощности	$\text{УМЗ} = \lg\left(\frac{W}{W_0}\right) = 20\lg\left(\frac{\bar{p}}{p_0}\right) + 10\lg\left(\frac{2\pi R^2}{S_0}\right)$	W - определяемая акустическая мощность машин; W_0 - акустическая мощность, принимаемая за опорную; $\bar{p}$ - среднее измеренное звуковое давление; $p_0 = 2 \cdot 10^{-3}$ Н/м^2; $S_0 = 1$ м^2
	Ударная вибрация	
Линейное перемещение	$x = \begin{cases} X_0 + \int_0^t \text{v}(t)\,dt & \text{при } 0 \le t \le t_\text{к}; \\ X_0 + \int_0^{t_\text{к}} \text{v}(t)\,dt & \text{при } t \ge t_\text{к} \end{cases}$	$t_\text{к}$ - длительность ударного процесса по ускорению на нулевом уровне
Линейная скорость	$\text{v} = \begin{cases} \text{v}_0 + \int_0^t a(t)\,dt & \text{при } 0 \le t \le t_\text{к}; \\ \text{v}_0 + \int_0^{t_\text{к}} a(t)\,dt & \text{при } t \ge t_\text{к} \end{cases}$	
Линейное ускорение	$a = \begin{cases} 0 & \text{при } t \le 0; \\ a(t) & \text{при } 0 \le t \le t_\text{к}; \\ 0 & \text{при } t \ge t_\text{к}. \end{cases}$	
Ударный спектр	$S(f) = 2\pi f\left[F(t)\right]$	$F(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} F(t)\,\mathbf{e}^{-i\omega t}\,dt$ - преобразование Фурье
Длительность удара (на уровне 3 дБ)	$\Delta\tau$	

Динамический метод основан на том, что параметры вибрации измеряют относительно искусственной неподвижной системы отсчета, в большинстве случаев инерционного элемента, связанного с объектом через упругий подвес. Такие приборы называют преобразователями абсолютной вибрации, чаще сейсмическими системами.

Измерительные преобразователи вибрации основаны на различных физических принципах преобразования механических колебаний в электрический сигнал.

Типы измерительных преобразователей:

1. Преобразователи абсолютной вибрации:
   - генераторные:
     - пьезоэлектрические;
     - индукционные;
     - на основе эффекта Холла
   - параметрические:
     - резисторные;
     - пьезорезисторные;
     - индуктивные;
     - трансформаторные;

магнитоупругие;
емкостные;
электронно-механические;
вибрационно-частотные;
предельно контактные;
импедансные.

2. Бесконтактные измерители относительной вибрации:
магнитные;
радиоволновые;
электромагнитные;
акустические;
радиационные;
оптические.

В бесконтактных измерителях реализуют кинематический метод измерения параметров относительной вибрации на основе использования оптических радиоволновых и др. электромагнитных полей. Наибольшее применение в бесконтактной вибродиагностике нашли оптические методы и средства измерения параметров вибрации, которые по способу выделения информации об измеряемом параметре делят на амплитудные и частотные. К амплитудным методам измерений относят фотоэлектронные, дифракционные и интенференционные методы измерения, а также методы с использованием пространственной модуляции светового потока.

Измерение параметров вибрации, основанное на измерении частоты излучения оптического квантового генератора, отраженного от объекта, проводят измерительными устройствами, действие которых основано на использовании *эффекта Допплера*.

Преобразователи значений **вибрации** в электрический сигнал делят на два класса: генераторные, преобразующие энергию механических колебаний в электрическую; параметрические, преобразующие механические колебания в изменение параметров электрических цепей, например, индуктивности, емкости, активного сопротивления, частоты или сдвига фаз и т.д.

Для вибродиагностики машин и механизмов используют в основном пьезоэлектрические и электродинамические преобразователи, относящиеся к генераторным, а также индуктивные, вихретоковые и емкостные, относящиеся к параметрическим.

Пьезоэлектрические преобразователи применяют для измерения параметров абсолютных колебаний невращающихся частей механизмов. Пьезоэлектрические преобразователи обладают высокими метрологическими свойствами, широким амплитудным и частотным диапазоном, высокой надежностью и сравнительно низкой стоимостью. Основными их недостатками являются высокое выходное сопротивление и низкая помехозащищенность. В меньшей степени эти недостатки свойственны пьезорезистивным преобразователям, относящимся к классу параметрических преобразователей.

Простейший пьезоэлектрический преобразователь можно представить в виде пластины, изготовленной из кварца или искусственной пьезокерамики. Для изготовления пьезокерамики применяют цирконат титанат свинца (ЦТС), титанат висмута (ТВ) и др. Пластину прикрепляют к воспринимающему внешние колебания основанию, на другой стороне пластины располагают груз массой m. Собственная частота сейсмической системы такого преобразователя

$$f_0 = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{c_1}{m}},$$

где c_1 - коэффициент упругости пьезоэлемента в направлении приложения силы инерции груза массой m.

В частотном диапазоне $f_1 << f_0$ на выходе преобразователя образуется заряд $q(t)$, пропорциональный воспринимаемому виброускорению $a(t)$:

$$q(t) = d_{11}\, k\, a(t),$$

где d_{11} и k - пьезомодуль и коэффициент преобразования соответственно.

Величина заряда $q(t)$ преобразуется в электрическое напряжение или ток.

При выборе пьезоэлектрических преобразователей для конкретных испытаний необходимо учитывать их температурный, амплитудный и частотный диапазоны, коэффициенты преобразования, частоту установочного резонанса и т.д.

Электродинамические преобразователи применяют для измерения параметров вибрации в частотном диапазоне 1 Гц - 2 кГц.

Электродинамический преобразователь содержит магнитную систему, в зазоре которой расположена катушка с проводом. Обычно магнитная система закреплена на основании, а катушка жестко соединена с сейсмической массой.

При воздействии внешней вибрации $e(t)$ и относительных колебаниях $x(t)$ в катушке наводится ЭДС

$$e(t) = B W l_{\text{ср}} \frac{d\,x(t)}{dt},$$

где B, W, $l_{\text{ср}}$ - магнитная индукция в зазоре, число витков и средний диаметр витка подвижной катушки соответственно.

Электродинамические преобразователи работают на частотах, значительно превышающих собственную частоту сейсмической системы, т.е. при $y >> 1$.

ЭДС на выходе катушки пропорциональна виброскорости гармонических колебаний:

$$e(t) = k\omega e_a \cos\omega t, \quad \text{где} \quad k = BWl_{\text{ср}}.$$

При работе электродинамических преобразователей в первом частотном диапазоне и $y << 1$ ЭДС на его выходе будет пропорциональна резкости, т.е.

$$e(t) = k\frac{d^3 e(t)}{dt^3}.$$

К преимуществам электродинамических вибродатчиков следует отнести широкий амплитудный диапазон, низкое выходное сопротивление и возможность передачи сигналов по длинной линии связи.

Действие большинства параметрических преобразователей основано на изменении комплексных сопротивлений или проводимости электрических цепей.

Наибольшее распространение получили преобразователи индуктивные, трансформаторные, вихретоковые, магнитоупругие, механотронные и емкостные.

4.2.2. МЕТОДЫ ВИБРОДИАГНОСТИКИ

Выбор метода вибродиагностики зависит от структурного, функционального и вибрационного состояний объекта. Классификация объектов контроля и методов вибродиагностики приведена в табл. 4.2.2.

Структурное состояние характеризуется свойствами конструкции - геометрией элементов и взаимосвязями между ними. Это состояние объекта характеризуется в основном периодическими колебательными процессами; в этом случае адекватным методом является метод следящего спектрального анализа.

По порядку гармоник вибрации можно идентифицировать ее источники; амплитуды этих гармоник характеризуют распределение энергии, связанное с состоянием объекта. При развитии дефекта энергия колебаний увеличивается.

В роторных и зубчатых механизмах структурное состояние характеризуется ударными процессами. В этом случае адекватным является метод конкретного накопления, при котором выделяют ударные импульсы от каждого зуба диагностируемой шестерни. Частота следования импульсов определяет источник (шестерню), различие уровней - причину (неисправный зуб), а абсолютное значение уровней импульсов - степень неисправности.

Вибрационное состояние определяется совокупностью вибрационных характеристик объекта и является следствием структурного и функционального состояний и динамических свойств объекта. Даже при нормальном структурном и функциональном состояниях вибрационное состояние может быть неудовлетворительным из-за резонансных эффектов и паразитных колебаний.

Перспективными являются методы, использующие динамические изменения в объекте, простейшие из которых - изменение знака, скорости и характера процессов. Эти признаки отражают развитие дефекта во времени, что позволяет делать прогноз будущего состояния и работоспособности объекта.

Алгоритм анализа корреляционно-спектральных характеристик вибросигнала включает в себя: дискретизацию вибросигнала, цифровую фильтрацию, вычисление информативных параметров и определение технического состояния объекта. Программа, моделирующая объект, позволяет имитировать сигналы как исправного, так и неисправного механизма.

Одним из эффективных инструментов исследований вибрационных процессов, является **моделирование механической конструкции объекта**. При построении моделей определяют основные связи между элементами объекта и присущие ему закономерности. Удобными для исследования являются математические и электромеханические модели.

Если спектр виброакустического сигнала модулирован одной или несколькими частотами, что характерно для объектов, содержащих зубчатые кинематические пары, то эффективно сжатие информации путем логарифмирования и осуществление преобразования Фурье от логарифмического спектра мощности, называемого кепстром. Такой метод позволяет выделить информацию о сигнале, из результата многократных отражений при нелинейных преобразованиях и модуляции. При этом вся энергия виброакустического сигнала, рассеяная по множеству гармоник в спектральном методе, локализуется в одной составляющей при кепстральном методе анализа сигнала.

Кепстральный метод используют для формирования диагностических признаков только в тех случаях, когда колебательный процесс имеет периодически модулированный спектр, что наблюдается при явлениях нелинейного взаимодействия узлов и деталей механизмов, при наличии амплитудной и частотной модуляции, при преобразованиях типа свертки нескольких временных процессов, а также при изменении физических параметров механизма, износе, изменении жесткости, ударных взаимодействиях.

4.2.2. Классификация объектов контроля и методов вибродиагностики

Объект контроля	Современные методы диагностики	Основные диагностические признаки
Элементы конструкции: стержни, балки, диски и т.д.	Простукивание; динамическое нагружение	Изменение собственных частот $\Delta\omega_0$, добротности Q, декремента затухания δ
демпфирующие элементы, пружины и т.д.	Возбуждение нелинейных колебаний	Изменение жесткости ΔC, декремента затухания δ, интенсивности силы σ сухого трения
Многослойные конструкции, обшивки и т.д.	Локальные свободные колебания	Изменение собственных частот $\Delta\omega_0$, импеданса ΔZ
Корпус работающего механизма, трубопроводы, двигатели внутреннего сгорания	Анализ сигнатуры колебаний Сличение спектров Компарирование	Превышение шума над пороговым уровнем $\Delta S = S_c - S_{эт}$, $\Delta A = A_c - A_{порог}$
	Выделение корреляционных функций	Изменение корреляционных и передаточных параметров
Механизм роторного действия, зубчатые передачи и т.д.	Спектральный анализ	Изменение спектральных составляющих сигнала ΔS_n; появление комбинационных частот $\omega = n\omega_0 \pm m\omega_в$
	Кепстральный анализ	Изменение временных характеристик кепстра $\Delta\tau$
Объект сложной конструкции, летательные аппараты	Экстремальная фильтрация; динамическое нагружение	Изменение амплитуд ΔA и форм колебаний ΔA_n, собственных частот $\Delta\omega_0$, подвижности Y, добротности резонанса Q_p

Примечание. S_c, $S_{эт}$ - спектры исследуемого и эталонного сигналов соответственно; A_c, $A_{порог}$ - уровни исследуемого и допустимого сигналов; $\omega_в$ - циклическая частота возбуждения.

Наибольшее распространение кепстральный метод получил при диагностике зубчатых колес редукторных механизмов, имеющих разный износ поверхностей.

Виброизмерительная аппаратура содержит:

1. Комплекс стационарных лабораторных приборов:

многоканальные приборы:
- последовательного действия;
- параллельного действия

многофункциональные приборы:
- анализаторы вибрации;
- микропроцессоры

2. Комплекс переносных лабораторных и промышленных приборов.
3. Комплекс приборов для испытательной техники:
   приборы с управлением вибрационным процессом;
   многокомпонентные приборы;
   приборы для формирования и измерения широкополосной случайной вибрации.

Комплекс стационарных лабораторных приборов предназначен для исследования и отработки различных объектов и их элементов при воздействии на них механических нагрузок.

Комплекс переносных приборов предназначен для последовательного или параллельного контроля уровней вибрации и шума в одной или несколько точках объекта, технической диагностики и балансировки вращающихся частей машин и механизмов и включает в себя контрольно-сигнальную, балансировочную и вибродиагностическую аппаратуру.

Комплекс приборов для испытательной техники предназначен для испытания продукции на воздействие вибрационных, ударных нагрузок и акустических шумов и включает приборы и средства задания, воспроизведения механических нагрузок, аппаратуру управления, контроля и измерительную аппаратуру. Эти приборы должны обеспечивать достоверность проведения испытаний и соответствовать требованиям технических условий на объект и условиям их эксплуатации.

многоканальная виброизмерительная аппаратура, широко применяемая в системах вибродиагностики, классифицируется по основным принципам измерения:

последовательное измерение параметра вибрации в отдельных точках объекта;

параллельное измерение параметра вибрации одновременно во всех контролируемых точках объекта;

комбинированные приборы с параллельной записью параметров вибрации во всех исследуемых точках и с последовательным измерением этого параметра в каждой точке.

При использовании аппаратуры последовательного измерения параметра вибрации на объекте в контрольных точках закрепляют вибродатчики, подключаемые через согласующие предусилители к электромеханическому или электронному коммутатору, с помощью которого они поочередно подключаются к измерительному прибору.

Аппаратура для параллельного измерения параметра вибрации имеет столько канальных усилителей и измерителей, сколько датчиков установлено на объекте. Такая аппаратура представляет собой набор одноканальных виброизмерительных приборов.

Комбинированные приборы являются более перспективными, поскольку они позволяют контролировать параметры вибрации в каждой точке объекта, оперативно оценивать их экстремальное значение, проводить коммпарирование с допустимыми уровнями вибрации, исключая тем самым отдельные, но характерные для объекта точки контроля. Такая аппаратура широко используется для вибродиагностики объектов со сложной механической конструкцией.

Основной тенденцией развития контрольных устройств для вибродиагностики является создание многоканальных систем с параллельной селекцией сигналов.

Комбинированные селекторы позволяют управлять режимом испытаний по максимальному, минимальному и среднему уровням вибрации.

При выборе аппаратуры в первую очередь необходимо установить местоположение точек контроля, необходимое и достаточное число контролируемых точек, число измеряемых компонентов в каждой точке измерения, контролируемый параметр вибрации, диапазон частот, в котором возникновение характерного и опасного дефекта приводит к изменению амплитуд отдельных гармонических составляющих спектра или общего уровня вибрации.

Статистическая обработка материалов вибрационных исследований машин позволяет составлять *карты распознавания дефектов*. По этим данным можно судить о признаках дефектов и выбрать частотный диапазон аппаратуры, необходимый для обнаружения характерных неисправностей машины. Во всех случаях верхняя граница частотного диапазона не должна быть ниже удвоенной рабочей частоты вращения ротора.

Для измерения и анализа вибрации аналоговыми способами, обработки результатов цифровыми способами и получения на выходе гистограмм распределения уровней вибрации, фазовых диаграмм, частотной и временной зависимости уровня или фазы вибрации используют многофункциональные системы.

Автоматизированные системы подразделяют на три основные группы.

В первой группе ЭВМ используют для оперативной обработки сигналов.

Во второй группе ЭВМ обрабатывает сигналы и выдает сигнал корреляции при изменении режима испытаний.

К третьей группе относят полностью автоматизированные системы, в которых ЭВМ включена в цепь обработки, анализа и управления всем режимом работы по программе исследований. Простейшие автоматизированные системы оперативно измеряют и анализируют характерные вибрации и сличают их с эталонными.

Случайная вибрация. Реальные вибрации являются случайными, поэтому для анализа объектов диагностирования необходимо измерять параметры широкополосной случайной вибрации.

Особенностью аппаратуры для измерения параметров случайной вибрации является наличие в ней частотно-избирательных цепей.

При образовании дефекта происходит изменение уровня вибрации в полосе частот $\Delta\omega$.

Для повышения информативности параметров вибрации в виброизмерительных приборах применяются фильтры, которые пропускают только составляющие спектра с частотами, лежащими в пределах $\Delta\omega_0$. В этом случае сигнал на выходе фильтра состоит из суммы гармонического сигнала с амплитудой A_0 и шумом $P(t)$.

Существует много типов фильтров, применяемых в вибродиагностической аппаратуре: активные аналоговые фильтры, множительные избирательные устройства, цифровые фильтры, механические и т.д.

Анализ случайной вибрации диагностируемого объекта целесообразно проводить с помощью двухканальных анализаторов в реальном времени. В каждом канале анализатора устанавливают процессор для быстрого преобразования Фурье и оперативной обработки информации. Наличие двух каналов обеспечивает возможность оценки состояния объекта по спектрально-корреляционным функциям, а также по кепстру. Результаты анализа выводятся на дисплей.

4.2.3. АКУСТИЧЕСКИЙ ШУМ

Акустический шум представляет собой случайный процесс, и поэтому при измерении его используют такие же характеристики, как при измерении случайной вибрации.

В простейшем случае измеряют уровень звукового давления акустического шума. Однако такое измерение не дает представления ни о распределении частот шума, ни о его восприятии человеком. Поэтому в аппаратуру для измерения акустического шума вводят корректирующие фильтры, частотные характеристики которых обозначаются буквами А, В, С и Д. Характеристика А в наибольшей степени приближает измерение акустического шума к восприятию звука человеком. Характеристика В более расширена в область низких частот. Характеристика С в незначительной степени зависит от частоты в области слышимых частот. Частотная коррекция с помощью характеристики Д предназначена для измерений авиационного шума.

Для измерения акустического шума применяют измерительные микрофоны.

Микрофон - электроакустический преобразователь, с помощью которого акустические колебания в воздушной среде преобразуют в электрический сигнал.

Наибольшее распространение получили измерительные микрофоны конденсаторной, пьезоэлектрической и электродинамической систем.

Действие конденсаторного микрофона основано на преобразовании звукового давления, на мембрану в изменение емкости конденсатора, образуемого мембраной и неподвижным электродом.

Действие пьезоэлектрического микрофона основано на возникновении переменного электрического потенциала на пьезоэлектрической пластине при воздействии на нее звукового давления.

С помощью микрофонов измеряют шумы машин, транспорта, частотные характеристики измерительной и вещательной аппаратуры. При этом микрофон располагают в контрольной точке поля или в точках поля, равномерно распределенных на измерительной поверхности. Контроль звукового поля проводят путем измерения зависимости звукового давления от расстояния до акустического центра источника и сравнения измеренной зависимости с теоретической.

Методом диффузного (или отраженного) *звукового поля* измеряют шумы машин, звукоизоляцию отражающих конструкций, звукопоглощение материалов, характеристики акустической аппаратуры по диффузному полю. Микрофон располагают в нескольких точках области диффузного поля и определяют среднее по объему значение звукового давления.

По методу в резонансных трубах, каналах, полостях определяют коэффициент звукопоглощения материалов при нормальном падении звуковой волны, характеристики акустических фильтров, глушителей шума, уровень звукового давления шума чистых тонов или в полосе частот, а также распределение звукового давления по сечению и вдоль канала.

Прибор для измерения шума состоит из измерительного микрофона, усилителя, корректирующих цепей, детектора и индикатора, шкала которого проградуирована в децибелах относительно звукового давления $2 \cdot 10^{-5}$ Па.

Для быстрого измерения уровня шума предназначены миниатюрные шумомеры. Их используют с конденсаторными и пьезоэлектрическими микрофонными капсюлями.

Для измерения импульсных шумов применяют специальные шумомеры, отличительными особенностями которых являются широкий частотный и динамический диапазон, возможность удержания пикового и средне-

квадратичного значений сигнала, наличие корректирующих схем.

Уровень шума, производимый механизмом, зависит от многих причин, поэтому рекомендуется измерять шум в определенных условиях.

В полевых условиях используют запись акустического шума на магнитную ленту с помощью портативных магнитофонов. Запись калибруют с помощью эталонного сигнала, создаваемого пистонфоном или акустическим калибратором. С целью получения оперативной информации о частотном составе исследуемого шума проводят спектральный анализ шума октавными или третьоктавными фильтрами.

Система измерения шума с измерительным усилителем и набором полосовых фильтров позволяет осуществить более точные измерения и анализ шума в стационарных условиях.

Для исследования статистического распределения уровней шума во времени, а также вероятности обнаружения шума в заданном интервале или превышения заданного уровня используют анализатор статистического распределения.

Для измерения мощности звука, производимого механизмами, используют многоканальные системы. Микрофоны устанавливают вокруг исследуемой машины в расчетных точках и через переключатель каналов подключают последовательно а анализатору в реальном масштабе времени, а результаты записывают или анализируют с помощью ЭВМ. В результате определяют средние значения звукового давления и вычисляют мощность звука в отдельных частотных полосах.

Удар. Преимущество цифровой аппаратуры для измерения ударных импульсов состоит в том, что информация о параметрах ударного импульса, например о его длительности в пиковом значении, может сохраняться в оперативной памяти до прихода очередного импульса. Кроме того, такая аппаратура, имеет цифровой выход, что удобно при анализе результатов измерения на ЭВМ.

Измерение пикового ускорения основано на последовательном ступенчатом сравнении на нуль-органах измеряемого сигнала с сигналом по цепи обратной связи с уменьшающимся шагом ступеньки по мере приближения к пику измеряемого сигнала. Длительность ударных процессов определяется путем заполнения импульсами стабилизированной частоты.

Подобным прибором измеряют пиковое значение и длительность как одиночных, так и многократных ударов.

Наряду с приборами, имеющими цифровую индикацию параметров удара, распространены приборы, позволяющие также наблюдать форму ударных процессов.

Частотный анализ проводят путем многократного воспроизведения записи ударного импульса с магнитной ленты и обработки этого сигнала с помощью БПФ.

Механические удары измеряют одновременно в нескольких точках исследуемого объекта; при этом используют многоканальную запись ударов и сравнение с принятым за эталон образцовым ударом.

Для решения диагностических задач перспективны малогабаритные приборы, содержащие ударник с нормированной силой удара и портативной измерительный прибор на базе спецпроцессора. Такие приборы позволяют проводить оперативное простукивание объекта и измерять виброакустические сигналы, несущие информацию о состоянии объекта.

Глава 4.3

ДИАГНОСТИКА В УСЛОВИЯХ АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОИЗВОДСТВА

4.3.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

В условиях автоматизации производства диагностированию подвергают несущие конструкции, двигатели, привод, основные механизмы, вспомогательные устройства, системы управления, информационные системы. В случае необходимости контролируют состояние внешней среды (температуру, влажность, запыленность, загазованность, радиацию), а также параметры инструмента и заготовки в зоне обработки. Часть информации можно использовать для диагностирования или прогнозирования состояния модуля и его элементов, что повышает экономичность диагностических схем (ДС).

При разработке системы диагностирования сложного технологического оборудования в зависимости от назначения применяют встроенные или внешние системы.

Основные функции систем диагностирования технического оборудования приведены в табл. 4.3.1.

Для количественной и качественной оценки свойств гибких производственных систем (ГПС) применяю следующие характеристики и показатели качества.

Оперативность характеризует возможность своевременного и обоснованного выбора управляющих воздействий в процессе функционирования системы с целью учета изменений в обстановке и ситуации. Она выражается временем цикла управления (отрезок времени между двумя очередными моментами выработки управляющих воздействий).

Гибкость системы определяет возможность ее перепрограммирования или перестройки на различные условия и режимы работы.

4.3.1. Основные функции систем диагностирования технологического оборудования

Область применения	Системы диагностирования		
	встроенные	мобильные	стационарные
Разработка и создание			
Выявление дефектов конструкции и ее улучшение	+	+	(+)
Контроль функционирования	(+)	–	–
Защита от аварий	(+)	–	–
Эксплуатация			
Адаптация к изменению технологического процесса	(+)	–	–
Адаптация к изменению внешней среды	(+)	–	–
Обнаружение неисправных узлов (элементов)	+	+	–
Контроль параметров	+	+	–
Регулировка по динамическим параметрам	+	(+)	–
Накопление данных о параметрах, частоте и видах отказов	(+)	+	–
Прогнозирование	+	(+)	–
Ремонт			
Контроль качества ремонта	+	+	–

Примечание. Знак + соответствует применению системы; знак (+) - предпочтительному применению.

Мобильность определяет быстроту перепрограммирования или перестройки, **живучесть** характеризует возможность временного продолжения функционирования (хотя бы с ограничением возможностей) в случае повреждения отдельных деталей или узлов.

Многие из свойств ГПС, создают благоприятные условия для повышения производительности, надежности, ритмичности выпуска продукции и снижения стоимости ДС. К ним относятся: гибкость, мобильность, непрерывность, централизация. С другой стороны, ДС повышает надежность, живучесть, обоснованность и категоричность принимаемых решений. Применению ДС способствует наличие в ГПС многоуровневой системы управления, включающей, кроме ЭВМ, средства отображения информации, а также квалифицированный персонал.

В ГПС применяют двух-, трех- и четырехуровневые системы управления сбора и хранения данных, что позволяет распределять между ними часть функций ДС.

К ДС применимы общие принципы системного анализа: принцип целеобусловленности создания системы (совокупности технических средств и обслуживающих их людей) с количественным измерением параметров, определяющих цель создания ДС; принцип относительности, когда совокупность элементов ДС может рассматриваться как часть (подсистема) другой, большей системы; принцип управляемости, определяющей возможности изменения структуры ДС и иерархичности ее построения; принцип связанности в этой иерархической системе; принцип модулируемости, обеспечивающий возможность прогнозирования состояния объекта диагностирования или развития самой ДС; принцип симбиозности, при котором человек рассматривается как звено ДС; принцип оперативности.

Этот подход основан на количественном определении требований к ДС, строгом обосновании методов, выбора алгоритмов, порядка разработки структуры элементов ДС для определения работоспособности, поиска дефектов и прогнозирования технического состояния.

На подготовительном этапе формируются требования к объектам диагностирования (ОД) и ведется разработка принципов построения, а затем и проектирование диагностических систем (ДС) для всех стадий жизни машины. При этом используется и пополняется библиотека методов Д и уточняются требования к квалификации персонала диагностических подразделений. Требования к объекту диагностирования, результаты моделирования динамических систем и испытания аналогов используются при проектировании опытного и серийного образцов машин.

Результаты испытаний и диагностирования и данные об отказах оборудования хранятся в банке данных. При организации банка данных следует учитывать, что некоторые показатели качества, в связи с приработкой, изменяются в процессе эксплуатации. Поэтому они должны фиксироваться с указанием дли-

тельности эксплуатации. Данные банка позволяют сравнивать конструкции автоматического оборудования одного назначения, разрабатывать более совершенные системы обслуживания и ремонта, оценивать результаты модернизации, сравнивать качество эксплуатации и ремонта на различных заводах.

В процессе эксплуатации диагностирование машин осуществляется бортовыми системами, переносной аппаратурой, передвижными станциями диагностики на стендах.

Передвижные станции выгодны для небольших предприятий, которые не могут приобретать и эксплуатировать сложную, дорогую аппаратуру (кинокамеры, вибродиагностическую аппаратуру, системы технического зрения и др.).

При разработке ДС важное значение имеют метрологическая подготовка и метрологическое обеспечение средств ТД, включающие проверки (аттестацию), юстировку и ремонт этих средств.

Автоматизированные системы сбора и обработки экспериментальных данных основаны на применении ЭВМ, программируемых контролеров, микро ЭВМ, микропроцессоров.

Организационное обеспечение диагностирования включает описание:

организационной структуры систем диагностирования;

человеко-машинных операций процесса диагностирования;

перечень диагностической документации;

оборудования встроенных и внешних датчиков;

и требований к квалификации обслуживающего персонала.

При описании человеко-машинных операций процесса диагностирования уточняются: возможность оператора воспринимать информацию от приборов и других средств информационной системы за заданный период времени; вероятность принятия оператором правильного решения; распределение операций, выполняемых оператором по времени выполнения ГПС заданной работы (до начала работы, пуск, нормальная эксплуатация, запланированные перерывы в работе, в момент нарушения работоспособности и т.п.).

Эти данные служат также основой для решения вопросов дальнейшего повышения уровня автоматизации процессов диагностирования.

Основная **цель диагностирования металлорежущего оборудования** связана с оценкой его выходных параметров и выявлением причин их отклонения от заданных значений. При этом необходимо учитывать весь диапазон режимов его работы и условий эксплуатации и их вероятностную природу, а также возможность изменения выходных параметров машины во времени, т.е. ее параметрическую надежность. Задачи диагностирования машины нередко переплетаются с задачами, возникающими при ее испытании. Применение методов диагностирования позволяет сделать испытания машины более информативными и повысить их эффективность.

Наибольший эффект достигается в том случае, если диагностирование осуществляется не по отдельным показателям машины и не для отдельных ее узлов, а для комплексной оценки работоспособности машины. Ниже указаны два основных вида диагностики машин.

Эксплуатационная диагностика связана с тем, что имеется широкий диапазон условий и режимов эксплуатации, а также вариация начальных показаний качества машины, которые приводят к значительной дисперсии времени достижения машиной предельного состояния. Поэтому необходима разработка методов и средств для оценки и прогнозирования технического состояния машины, выявления причин нарушения работоспособности, установления вида и места возникновения повреждений.

Предэксплуатационная диагностика проводится на стадии проектирования опытных образцов или обработки уникальных машин. При этом определяется выполнение требований технического задания, выявляются возможности расширения области работоспособных состояний и улучшения рабочих характеристик, а в случае необходимости уточняется техническая документация (увеличение или уменьшение норм на отдельные параметры). Приходится разграничивать дефекты, связанные с неблагоприятными динамическими характеристиками, не учтенными при проектировании, и дефекты, возникшие из-за несовершенства технологии изготовления опытного образца.

Предварительно с помощью средств диагностирования проверяется качество обкатки и осуществляется более точная регулировка машины, включая ее систему управления, что облегчает выявление других дефектов.

На основании метода исследований машин-автоматов циклического действия может быть рекомендована схема проведения испытаний и диагностирования на стадии проектирования опытных образцов или обработки уникальных машин, в основе построения которой лежит расчленение испытаний на этапы, позволяющие более оперативно использовать результаты и уменьшить трудоемкость эксперимента. Последовательность и содержание этапов работ по диагностированию модулей ГПС на станкостроительном заводе представлены в табл. 4.3.2.

4.3.2. Последовательность и содержание этапов работ по диагностированию модулей ГПС на станкостроительном заводе

Этапы	Содержание работ	Ожидаемые результаты
1	2	3
Исследование опытных образцов оборудования, входящего в модуль, на стендах	Определение показателей качества основных устройств и сравнение их с данными аналогов. Уточнение паспортных данных. Получение данных для математического моделирования. Предварительный выбор диагностических параметров. Выявление дефектов конструкции	Отбор образца для серийного производства Разработка предложений по улучшению конструкции. Определение необходимых метрологических характеристик встроенных датчиков. Уточнение математических моделей работы основных механизмов. Получение исходных данных для разработки диагностических систем и математического обеспечения.
Математическое моделирование работы основных механизмов	Исследование на математической модели работы механизмов в широком диапазоне изменяемых параметров и при различных дефектах.	Уточнение допустимых режимов работы. Разработка методов регулировки по динамическим параметрам
Исследование серийных модулей со встроенными диагностическими системами на стендах	Определение показателей качества модуля. Установление связи между показателями надежности, кинематическими, точностными и динамическими показателями. Установление чувствительности диагностических параметров к приработке механизмов	Предварительная разработка диагностической системы, составление дефектных карт. Назначение допусков на динамические параметры. Проверка и дополнение паспортных данных. Уточнение методов диагностирования, получение данных для прогнозирования надежности и назначения сроков ремонта. Разработка предложений по повышению надежности и обкатке по фактической потребности. Уточнение математического обеспечения для системы диагностирования
Производственные испытания модулей в цехе станкостроительного завода	Испытание всех систем и механизмов в реальной производственной обстановке. Определение фактических показателей надежности для группы модулей. Накопление данных по изменению и величине диагностических параметров до полной приработки станков и устройств модуля. Проведение регулировки по кинематическим и динамическим параметрам	Разработка предложений по повышению надежности модулей. Корректировка технической документации, передаваемой заказчику. Уточнение методики диагностирования, сроков регламентных диагностических работ, математического обеспечения. Отработка технологии регулирования основных устройств и механизмов. Разработка технологии диагностирования в процессе эксплуатации и ремонта у заказчика. Уточнение состава датчиков и приборов, необходимых для диагностических подразделений.

Продолжение табл. 4.3.2

1	2	3
Наблюдение за работой модуля у потребителя	Выполнение диагностических работ при монтаже оборудования ГПС у потребителя. Обмен данными по надежности поставщиком и потребителем и анализ качества документации. Обработка статической информации по диагностическим параметрам с целью уточнения норм.	Ускорение пуска ГПС у заказчика. Выявление новых признаков неисправностей. Уточнение процедур постановки диагноза, увеличение глубины поиска отказов. Разработка методов дифференцированного назначения допусков на параметры с учетом влияния приработки станков

Средства диагностики должны быть удобны для применения в заводских условиях, обеспечивать диагностирование в минимальное время, обладать достоверностью показаний, особенно при высоких требованиях к надежности изделий, осуществлять контроль без разработки, желательно и без нарушения работы механизма. Конструкция машины должна быть приспособлена для нужд автоматизированной диагностики - либо иметь встроенные приборы, оценивающие ее параметры (давление в гидросистеме, температуру энергозаряженных узлов, точность движения, скорость и т.д.), либо иметь возможность подключать специальное устройство, осуществляющему контроль основных параметров машины и дающему заключение о ее состоянии.

Применение диагностики при испытании опытного образца машины связано, как правило, с созданием специальных испытательно-диагностических комплексов, с помощью которых машина подвергается комплексными испытаниями с применением методов моделирования и прогнозирования.

Ниже приведены параметры технического состояния, по которым можно судить об объекте и которые контролируются в процессе диагностирования.

Выходные параметры машины непосредственно характеризуют ее работоспособность и связана с ее целевым назначением. Ими могут служить характеристики, связанные с качеством обрабатываемой продукции (технологические машины), показатели точности перемещения узлов машины, КПД и мощность (двигателя), скорость перемещения (транспортные машины), производительность и т.д.

Износ, деформации являются динамическими признаками, по которым также можно сделать вывод о техническом состоянии машины, так как они являются первопричиной отказа.

Следует контролировать те параметры, о которых заранее известно, что их изменение является основной причиной потери машинной работоспособности, например износ направляющих в станках, коробление станины и корпусных деталей, коррозия резервуаров и др.

Косвенные признаки функционально или стохастически связаны с выходными параметрами машины. К ним относятся виброакустические характеристики, тепловые поля, наличие в смазочном материале продуктов износа и др. Существенным преимуществом использования косвенных признаков является возможность их оценки в процессе работы машины.

На стадии освоения новых образцов машин с высокими требованиями к их техническому уровню диагностика может стать особенно действенным инструментом для оптимизации параметров машины по критериям качества и надежности, поскольку позволяет:

оценить вклад отдельных элементов и узлов в формирование выходных параметров и выявить причины их отклонения от установленных требований;

дать информацию для прогнозирования изменения выходных параметров машины, т.е. данные, необходимые для оценки параметрической надежности машины;

оценить реакцию машины на различные внешние воздействия и выявить наиболее целесообразные условия ее эксплуатации;

определить процессы, которые происходят в машине и влияют на ее выходные параметры, показатели работоспособности.

При разработке систем диагностирования следует учитывать, что их технические характеристики изменяются во времени из-за действия различных процессов, которые по скорости их протекания можно разделить на три категории.

Быстропротекающие процессы имеют периодичность, измеряемую долями секунды. Эти процессы заканчиваются в пределах цикла работы машины и вновь возникают при следующем цикле. Это вибрация узлов, изменения сил трения в подвижных соединениях,

колебания рабочих нагрузок и другие процессы, влияющие на взаимное положение узлов машины в каждый момент времени.

Процессы средней скорости протекают за время непрерывной работы машины (минуты или часы) и приводят к постепенному изменению начальных параметров. К ним относятся как обратимые процессы, например, изменения температуры окружающей среды, как и необратимые, например изнашивание режущего инструмента, которое протекает во много раз интенсивнее, чем износ деталей и узлов станка.

Медленные процессы протекают в течение всего периода эксплуатации машины (дни и месяцы). К ним относятся: изнашивание основных механизмов машин, перераспределение внутренних напряжений в деталях, ползучесть металлов, загрязнение поверхностей трения, коррозия, сезонные изменения температуры.

4.3.2. ОСНОВНЫЕ СРЕДСТВА И МЕТОДЫ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ

Метод временных интервалов заключается в сравнении экспериментально определенных временных интервалов элементов циклограммы объекта с их нормами, что дает возможность осуществлять первичную локализацию места неисправности. Применяется при контроле и диагностировании всех видов оборудования для анализа простоев; определения показателей надежности, контроля режимов работы; системы управления; расчета кинематических параметров, получения циклограмм для модулей или автоматических цепей. Кроме встроенных средств, для более детального обследования используют внешние, временно устанавливаемые датчики кинематических и силовых параметров, электросекундомеры (если они не встроены в оборудование).

Метод эталонных (нормированных) модулей пригоден для всех видов оборудования. Он основан на сравнении экспериментально определенных и расчетных значений параметров и показателей качества (мощности, КПД, сил, крутящих моментов, давлений, ускорений, подачи, амплитуд вибраций и т.п.) с их паспортными данными и нормами технических условий. С помощью модулей кинематических и силовых параметров могут быть рассчитаны квалиметрические показатели, используемые для оценки качества механизмов и при диагностировании.

Оценка качества машин работающих в широком диапазоне режимов и условий, возможна лишь в вероятностной трактовке.

Оценка надежности машины по выходным параметрам возможна при сочетании испытания и прогнозирования, так как форсирование испытаний для получения показателей надежности, как правило, не может дать достоверных результатов, а ресурсные испытания при обычных режимах слишком длительны.

Программным методом испытания машин называется метод, при котором в режиме автоматизированного испытания с применением диагностических процедур оценивается качество и надежность машины по ее выходным параметрам во всем диапазоне режимов и условий работы с учетом вероятностной природы внешних воздействий. Управление испытанием осуществляется ЭВМ по программе, отражающей весь диапазон условий эксплуатации машины, а также применение специальных нагрузочных устройств, управляемых от ЭВМ.

Реализация этого метода осуществляется в специальных испытательно-диагностических комплексах или при применении мобильных средств эксплуатационной диагностики.

Основная цель испытания - оценить сопротивляемость машины спектру внешних воздействий и выявить области рабочих состояний.

Область состояний - это многомерное пространство, поскольку для каждой машины устанавливают показатели, которые должны находиться в пределах, установленных нормативно-технической документацией. Для независимых выходных параметров эта область может быть представлена в виде набора отдельных областей состояний. Область состояния является комплексной характеристикой качества машины, так как определяет ее реакцию на внешние и внутренние воздействия. Чем меньше область состояний тем выше начальное качество машины, а чем медленнее она изменяется во времени, тем выше ее надежность.

При испытании машины области состояний сравниваются с соответствующими областями работоспособности (область допустимых значений выходных параметров). В результате определяются показатели качества и параметрической надежности по каждому из параметров.

Области работоспособности устанавливаются исходя из требований нормативно-технической документации и стандартов к выходным параметрам машины, которые указываются в технических требованиях к машине.

Для металлорежущих станков и других технологических машин выходными параметрами могут служить характеристики траекторий целевых узлов машины.

Основными выходными параметрами станка являются характеристики точности осуществления заданных движений формообразующих узлов, несущих инструмент и заготовки.

Для испытуемого станка надо оценить отклонения перемещения от идеальных траекторий, которые и будут характеризовать его качество.

Характеристики точности движения включают такие показатели, как точность положения траектории в выбранной системе координат, отклонения в плоскости или пространстве, точность фиксации конца траектории (точность позиционирования), кривизна траектории, точность осуществления движения во времени и др.

Если в качестве выходных параметров машины принимаются не характеристики траекторий движения их узлов, а другие показатели, например КПД, мощность, динамические нагрузки, скорость перемещения, грузоподъемность и другие, то эти параметры также могут быть представлены в виде некоторых функций (траекторий) в координатах "параметр - время" при данных условиях работы.

Параметры траекторий, как и другие показатели качества, проявляются как случайные величины или функции, что связано с рассеянием начальных характеристик машин, с работой системы при различных режимах, с неоднородностью заготовок (для технологических машин), со случайными воздействиями окружающей среды.

Поэтому выходные параметры должны характеризоваться законами распределения или их числовыми характеристиками.

Внезапная остановка станка, обнаружение при контроле значений параметров отклонений, брака продукции являются началом поиска дефектов.

В сложных станках и в линиях с автоматизированными системами диагностирования при выявлении неработоспособности запоминается и указывается место и причина отказа, что особенно важно при обслуживании длинных автоматических линий, а также в тех случаях, когда дефекты, не выявленные персоналом, могут привести к аварии или нанести ущерб здоровью персонала.

Алгоритмы поиска дефектов у работающей и внезапно остановившейся машины существенно отличаются друг от друга, особенно при отсутствии внутренней системы диагностирования с регистрацией или запоминанием предварительно измеренных параметров. В этих случаях приходится применять специальные тесты и процедуры поиска неисправностей.

Как правило, время, затрачиваемое на поиск дефектов, в технологическом оборудовании намного превышает длительность восстановления его работоспособности. При определении необходимой глубины поиска учитывают: удобство замены блоков, например, платы системы управления или гидроагрегата, возможность включения резервных блоков, достоверность визуального уточнения диагноза при осмотре тех блоков, неисправность которых была выявлена при диагностировании. Повышению надежности объектов диагностирования способствует комплекс мероприятий, среди которых важное значение имеет обнаружение и регистрация отказов, выявление закономерностей их развития и причин возникновения.

Одним из этапов анализа отказов является сбор и классификация множества наблюдаемых отказов по обнаруженным сходствам проявления и общности причин. Выявление физической сущности является одной из основных и наиболее трудоемких задач разработки методов диагностирования. Для этого используются методы расчета, исследование объектов и моделирование.

Другой, не менее важной задачей методов диагностирования является выбор способа локализации отказа, т. е. определение с достаточной достоверностью места возникновения отказа. Для этого применяются расчетные и визуальные методы и разрабатываются специальные алгоритмы поиска и распознавания. При разработке системы автоматического диагностирования совокупность отказов, алгоритмы их поиска и распознавание по ограниченному числу признаков составляет смысловое ядро всей системы и определяет ее область использования и практическую ценность.

Для достоверного обнаружения и распознавания отказа (дефекта) в автоматическом режиме требуется:

1) установить наличие и вид отказа технологического оборудования;

2) определить неработоспособный узел и физическую сущность отказа;

3) установить форму его проявления;

4) разработать способ локализации (алгоритм поиска);

5) уточнить метод выявления отказа данного вида;

6) определить частоту (вероятность) появления отказов данного вида и трудоемкость восстановления объекта в условиях эксплуатации.

При подготовке комплексных методов диагностирования к автоматизации эффективно используются результаты предварительных исследований, основанных на регистрации аналоговых сигналов. В частности, используются методы эталонных зависимостей, эталонных осциллограмм, метод сопоставления и наложения осциллограмм. На основе этих исследований уточняются требуемые характеристики используемых датчиков и аппаратуры, выясняется форма проявления дефектов, способы их локализации.

Для механизмов прерывистого действия автоматизация поиска дефектов облегчается

тем, что сравнительно просто (с помощью датчиков конечных положений) по электрическим сигналам системы управления обнаружить несрабатывание механизма. В качестве основной характеристики рекомендуется закон движения выходного звена.

Плохая работа механизмов, вызванная ударами из-за появившихся зазоров в передаточном или другом механизме, увеличением сил трения из-за задиров, загрязнений или отсутствия смазочного материала, дефектами в системе управления, изменением скорости из-за проскальзывания муфт или увеличения утечек в гидросистеме, снижением мощности привода, влияет на закон движения выходного звена механизма.

Закон движения сравнительно просто проверяется по записи скорости и по модулям параметров (метод эталонных осциллограмм, временных интервалов, эталонных модулей), что часто позволяет обнаружить ненормальную работу механизмов прерывистого действия при контроле лишь одного параметра. Дополнительно анализируемые зависимости ускорений от времени, сил, крутящих моментов на входных звеньях механизмов, давлений в гидропневмосистемах позволяют путем сопоставления данных и сравнения с эталоном уточнить диагноз (метод сопоставления осциллограмм), локализовать место неисправности.

ТСД содержит необходимые средства сбора, регистрации, обработки, отображения и документирования контрольно-диагностической информации (КДИ) и управления процессом контроля и диагностирования.

Основные типы ТСД отражают, прежде всего, особенности объекта и решаемых задач контроля и диагностирования, а также уровень технологии, культуру, объем производства изделий, развития и использования контрольно-измерительных средств (табл. 4.3.3). При контроле сложных агрегатных модулей и подсистем ТСД могут иметь различную степень автоматизации.

ТСД различного назначения отражают, в первую очередь, уровень и особенности применяемых методов контроля и диагностирования, определяющих в свою очередь специфику сбора и обработки данных.

4.3.3. Уровни применения ТСД

Уровни применения ТСД	Контрольно-диагностические параметры						ТСД						
	Временные	Кинематические	Силовые	Энергетические	Виброакустические	Тепловые	Отношение к объекту		Степень мобильности		Степень автоматизации		
							Встроенные	Внешние	Стационарные	Передвижные	Неавтоматические	Полуавтоматические	Автоматические
Элементы и механизмы		(+)			(+)	+	+	+	+	(+)	(+)	(+)	+
Агрегаты	+	+	+	(+)	+	(+)	+	+	+	(+)	(+)	(+)	+
Стандартизованные узлы	+	+	+	+	+		+	+	+	(+)	(+)	(+)	+
Объект в целом	+	(+)	(+)	+	+	(+)	+	+	+	(+)		(+)	+
Система объектов	(+)			+	+	(+)	+	+	(+)	+		+	(+)

Примечание: Знак + соответствует применению ТСД; знак (+) - предпочтительному применению.

Достоинствами неавтоматизированных ТСД являются: невысокая стоимость, простота в эксплуатации, высокая надежность работы и хорошая мобильность, а основные недостатки: невысокая производительность и точность (глубина и достоверность) операций КД, небольшое число одновременно регистрируемых КДП (как правило, не более 5 - 10), практическая возможность регистрации только низкочастотных КДП (верхняя частота не более 100 Гц).

В *полуавтоматизированных ТСД* сбор данных осуществляется аналогично, однако регистрация реализуется либо измерительными магнитофонами, либо цифровыми регистраторами и накопителями данных.

Полученная контрольно-диагностическая информация (КДИ) вводится в ЭВМ, где проводится ее обработка и сравнение с эталонами.

Сравнение с эталонами осуществляется по программе обработки КДИ, хранящейся в памяти программ. Результаты КД выводятся на устройства оперативного отображения данных и документирования.

Основная область применения полуавтоматизированных ТСД - операции КД элементов, узлов, модулей, агрегатов и объекта в целом по виброакустическим, кинематическим, временным и другим КДП в динамических режимах работы.

Основная область *применения автоматизированных ТСД* - операции КД на всех уровнях и по различным КДП. Достоинства автоматизированных ТСД - высокие производительность, оперативность и точность диагностирования, максимально возможное число каналов, а основные недостатки - повышенные сложность эксплуатации, стоимость, требования к квалификации обслуживающего персонала.

Датчики внутренней информации (табл. 4.3.4) могут быть использованы для контроля технического состояния, технологического оборудования и ПР. Контроль функционирования и определение длительности цикла РТК и ГПС наиболее просто обеспечиваются путем применения датчиков электрических параметров, временных интервалов, параметров движения. Электрические сигналы используются также для контроля источников энергии, параметров технологического процесса (обработки, сварки, сборки, состояния инструмента, привода, работы механизмов зажима заготовок).

Большой информативностью обладают датчики, измеряющие напряжения в конструкциях (тензометры и силомоментные датчики). Для контроля геометрических параметров обработанных деталей, инструмента, зажимных механизмов, периферийных устройств, посторонних предметов применяются датчики системы ЧПУ (аналоговые, фазовые, кодовые, импульсные), электрические и пневматические микрометры, контактные, фотометрические и др.

Достаточно широкое применение имеют также датчики температуры (термопары, терморезисторы, термометры) и вибраций (пьезоэлектрические, вихретоковые, оптоэлектронные). Датчики уровня и расхода, используются чаще всего в гидравлических системах привода и в смазочных системах, а также при контроле наличия материалов и параметров технологического процесса.

Для контроля технического состояния, блокировки и адаптации технологического оборудования и ПР все большее применение получают внешние сенсорные системы технического зрения: лазерные и фотоэлектрические; рентгеновские и ультразвуковые, воспринимающие инфракрасные и радиационные излучения, акустические поля, влажность и другие параметры окружающей среды.

При диагностировании информационно-управляющих систем выявляются отказы или понижение точности работы датчиков положения, скорости и других параметров управления, контролируется температура системы управления, индицируются отказы линий связи и другие неисправности.

В зависимости от назначения **датчики внешней информации** для робототехнических комплексов делят на следующие типы:

1) системы технического зрения - для распознавания объектов, определения их положения и ориентации;

2) датчики расстояния - для определения расстояния до объектов;

3) датчики обнаружения - для определения наличия объектов;

4) тактильные датчики - для определения усилия схвата робота или зажимного устройства, патрона;

5) силомоментные датчики - для определения значений сил и моментов, возникающих в отдельных узлах механизмов при взаимодействии технологического оборудования с внешними средой и объектами в процессе выполнения технологических операций;

6) датчики проскальзывания - для регистрации проскальзывания изделия, зажатого в схвате робота или патроне.

Достаточно хорошо разработаны методы диагностирования токарных автоматов с помощью внешних ДС, что связано с традиционной конструкцией этих автоматов с централизованным управлением от распределительных валов и отсутствием в них сенсорных систем.

В качестве основных применяются методы (табл. 4.3.5), использующие в качестве диагностических параметров временные интервалы (1), силовые (2), электрические и энергетические (3), виброакустические (4) параметры движения выходных звеньев (5) механизмов (рабочих органов автомата), мощность (6). У смазочных систем охлаждения дополнительно контролируются уровни жидкости (8) в резервуарах. У стойки системы электроуправления осуществляется тепловая защита (7).

4.3.4. Применение датчиков внутренней информации для контроля технического состояния технологического оборудования

Номер выполняемой операции	Контроль	Датчики внутренней информации								
		электрических параметров	временных интервалов	уровня расхода	геометрических размеров и расстояний	путевые параметров движения	вибраций	напряжений, силомерные	температуры и перепадов температур	тактильные
1	Длительность цикла	+	+			+		+		
2	Срабатывания узлов, механизмов	+	+	+		+		+		+
3	Состояния источников энергии	+		+		+		+	+	
4	Состояния смазочной системы		+	+		+		+	+	
5	Деформаций станины или ответственных деталей механизмов				+			+		
6	Наличия внешних препятствий					+	+	+	+	+
7	Наличия заготовок или материалов, необходимости их сортировки				+	+		+	+	+
8	Параметров технологического процесса	+	+	+		+	+	+	+	+
9	Состояния инструмента	+	+		+	+	+	+	+	+
10	Состояния целевых механизмов	+	+			+	+	+	+	+
11	Состояния привода	+	+			+	+	+	+	+
12	Зажима заготовок	+	+			+		+		+
13	Наличия рабочих жидкостей и утечек			+		+		+	+	
14	Качества обработки деталей				+	+	+	+	+	+
15	Качества сборки	+	+		+	+	+	+	+	+
16	Параметров окружающей среды						+		+	
17	Устойчивости системы СПИД						+	+		

Примечание. Знак + означает применяемость данного типа датчиков.

4.3.5. Методы диагностирования токарных многошпиндельных горизонтальных автоматов

Узлы	Подузлы	Методы диагностирования (см. с. 422)
Коробка скоростей	Электродвигатель	1, 3, 4
	Зубчатые передачи	4
	Механизмы переключения	1, 2, 3
Распределительный вал	Привод подач	1, 2, 3
	Механизмы переключения	1, 2, 3
Шпиндельный блок	Шпиндели	2, 3, 4, 6, 7
	Механизмы:	
	поворота	1, 2, 5
	фиксации	1, 2, 5, 6
	зажима блока	1, 2, 5
	зажима прутка	1, 2, 5
	подачи прутка	1, 2, 5
Продольный суппорт	Кулачково-рычажные механизмы	1, 2, 5
Поперечные суппорты	Кулачково-рычажные механизмы	1, 2, 5
	Упоры	2, 6
Приспособления	Кулачково-рычажные механизмы	1, 2, 5
	Привод вращения инструмента	1, 4
Системы охлаждения и смазки	Емкости	8
	Насосы	2, 4
Инструмент	-	1, 2, 3, 4
Стойка электроуправления	-	3, 7

Глава 4.4

МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

4.4.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Высокая стоимость газотурбинного двигателя (ГТД) по сравнению с другими элементами летательного аппарата требует обеспечения больших ресурсов, что достигается внедрением оптимальной стратегии эксплуатации двигателя до предотказного состояния его деталей и узлов. Принятие решения о прекращении эксплуатации конкретного экземпляра двигателя осуществляется с использованием всего арсенала средств технической диагностики, включая автоматические, полуавтоматические и ручные методы.

Другой важной отличительной чертой современного авиационного двигателя, определяющей концепцию технического диагностирования, является крайне высокая тепловая и силовая напряженность элементов его конструкции. Тепловые и силовые нагрузки находятся на верхнем допустимом пределе по прочности.

Для предотвращения опасных отказов необходим контроль основных термогазодинамических параметров двигателя с высокой точностью и надежностью. При этом часто обработка данных по контролируемым параметрам и принятие диагностических решений должны осуществляться в реальном масштабе времени, т. е. за малые интервалы, в течение которых не происходит значительных изменений параметров двигателя.

Двигатели летательных аппаратов не имеют резервируемых деталей и узлов. Разрушение любого основного элемента двигателя (лопатки, диска, камеры сгорания и др.) приводит к потере его работоспособности. Эта особенность требует прогнозирования технического состояния деталей и узлов двигателя с целью оценки возможного времени безопасной эксплуатации двигателя с дефектами и неисправностями, выявленными на ранней стадии их развития. Например, при обнаружении микротрещины в диске компрессора или турбины важно оценить время, в течение которого они разовьются до критических размеров, и своевременно осуществить замену дефектного диска до его разрушения.

Концепция эксплуатации авиационных двигателей до предотказного состояния предусматривает широкое внедрение методов и средств, обеспечивающих прогнозирование технического состояния. Это отличает методы диагностирования двигателей по сравнению с другими техническими системами.

Особенностью газотурбинных авиационных двигателей является наличие тесной взаимосвязи между различными физическими процессами, протекающими в них. Такая взаимосвязь приводит к сложным моделям, описывающим диагностические признаки, а также процессы возникновения и развития дефектов.

Для качественного диагностирования технического состояния двигателя необходимо получить обширную информацию о физических параметрах процессов различной природы. Кроме того, должна осуществляться комплексная обработка и анализ измеряемой диагностической информации с использованием математических моделей взаимосвязи различных физических процессов с учетом факторов, влияющих и непосредственно обусловливающих развитие дефектов и неисправностей.

Диагностические модели двигателей летательных аппаратов используют для формирования информативных диагностических признаков, а также для численной имитации функциональных процессов нормально работающего двигателя с целью сравнения вычисленных характерных параметров процессов с действительно измеренными значениями и принятия решения о техническом состоянии двигателя.

4.4.2. СРЕДСТВА И МЕТОДЫ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ

Технические средства диагностирования двигателей пилотируемых летательных аппаратов подразделяются на бортовые, служащие для оперативной оценки состояния двигателя в полете и для регистрации основных параметров двигателя, а также наземные, обеспечивающие обработку и анализ полетной информации и периодический контроль наиболее ответственных деталей.

При всем многообразии технических средств диагностирования двигателей максимальный эффект достигается при комплексном их использовании, когда диагностические решения принимаются на основе разных методов с учетом информации от нескольких средств контроля.

Контролируемые параметры авиационных газотурбинных двигателей подразделяют на четыре группы.

К первой группе относятся функциональные параметры, характеризующие основные термогазодинамические процессы в двигателе и внешние условия его работы: температура и давление воздуха и газа на входе и выходе компрессора, камеры сгорания, турбины, форсажной камеры, реактивного сопла; частоты вращения роторов каскада низкого и высокого давления; полное давление на входе в двигатель или число Маха полета; реальные термогазодинамические характеристики атмосферы на высоте полета.

Вторую группу составляют параметры топливной и маслосистем. К ним относятся: давление и температура топлива и масла в различных точках соответствующих гидролиний; объемный или массовый расход топлива через основную камеру сгорания и форсажную камеру; концентрация металлических частиц в масле вследствие износа деталей, омываемых маслом.

В третью группу входят параметры, определяющие диагностические признаки, которые характеризуют техническое состояние отдельных узлов и деталей. К таким параметрам могут относиться также пульсации потока в камере сгорания или тепловое излучение лопатки турбины.

Четвертую группу составляют параметры, характеризующие режим работы двигателя: положение рычага управления сектора газа, положение регулируемых лопаток спрямляющего аппарата компрессора, положение створок реактивного сопла, а также разовые команды от системы автоматического управления двигателем, по которым устанавливается режим его работы.

Выбор номенклатуры контролируемых параметров для конкретного типа двигателя осуществляется на основе анализа надежности и опыта эксплуатации двигателей-прототипов с учетом требований контроля наиболее информативных параметров, например таких, как температура газа за турбиной, частоты вращения роторов, вибрации двигателя.

Чувствительность применяемого метода зависит от места, в котором осуществляется измерение контролируемого параметра. Выбору места измерения предшествуют специальные экспериментальные исследования, проводимые при стендовых испытаниях двигателя или на модельных установках. В эксперименте осуществляется имитация возможных отключений в работе отдельных узлов и оценивается соответствующее изменение контролируемого параметра по его измерениям в различных точках.

В качестве *штатного места измерения параметра* выбирают то, которое обеспечивает наибольшее увеличение или уменьшение параметра в момент имитации неисправности. Например, установка датчиков температуры газа осуществляется в секторах поперечного сечения турбины, в которых наблюдаются максимумы температуры, обусловленные неравномерностью газодинамического потока в двигателе. Как правило, абсолютные значения температуры имеют наибольшие приращения в точках максимума температурной неравномерности.

Чувствительность контролируемого параметра существенным образом зависит также от правильного выбора физической величины или комплекса физических величин, определяющих данный параметр. Например, вибрация может характеризоваться перемещением, скоростью или ускорением точки, в которой проводится измерение. При диагностике дефектов, обусловленных низкочастотными колебаниями деталей, целесообразно использовать виброперемещение или виброскорость. При высокочастотных колебаниях наиболее подходящим является измерение виброускорения.

Стабильность контролируемых параметров характеризует достоверность получения диагностической информации. Различают временную стабильность, т. е. сохранение значения измеряемого параметра при фиксированном режиме и постоянных внешних условиях

работы двигателя в течение установленного ресурса, а также стабильность параметра при его измерениях на различных экземплярах одного типа двигателя в идентичных условиях и режимах. Критерием, характеризующим стабильность измеряемого параметра, является величина его дисперсии, рассчитанная по различным временным реализациям или выборке различных экземпляров одного типа двигателей. Если изменение контролируемого параметра, вызванное наличием определенной неисправности, с заданной степенью вероятности превышает значение вычисленной дисперсии, то стабильность этого параметра принимается удовлетворительной.

Бортовые средства вибродиагностирования предназначены, прежде всего, для диагностирования двигателя по параметрам роторной вибрации. Ротор представляет собой один из основных и жизненно важных элементов двигателя, и его техническое состояние во многом определяет надежность двигателя.

Бортовая система вибродиагностирования может быть автономной системой или же подсистемой бортовой автоматизированной системы диагностирования двигателя. Она осуществляет непрерывный контроль диагностических параметров вибрации при работе двигателей, сигнализацию уровня вибрации, превышающего допустимый, выдачу вибродиагностических параметров и сигналов для регистрации на бортовом магнитном самописце.

В бортовой системе вибродиагностирования обязательно предусматривается возможность контроля ее работоспособности автоматически на борту, а на земле - с помощью поверочной установки.

К **средствам диагностирования продуктов износа** относятся магнитные пробки, сигнализаторы стружки, атомно-эмиссионные, атомно-абсорбционные и атомно-флуоресцентные установки для спектрального анализа продуктов износа.

Магнитные пробки устанавливают в тех местах смазочных систем, где предполагается наиболее вероятное появление продуктов износа или разрушения трущихся деталей. Пробки могут быть магнитными, электромагнитными, электроконтактными. Диагностирование осуществляется визуально путем контроля металлических частиц на поверхности магнита.

Сигнализаторы стружки обнаруживают металлическую стружку в смазочном масле в процессе работы двигателя. Принцип работы сигнализаторов основан на замыкании контактов продуктами износа.

При НК в **визуально-оптической диагностике** ГТД активно используются такие средства, как гибкие и жесткие технические эндоскопы, устройства регистрации изображений и устройства автоматизированной обработки изображений.

Наряду с обычными техническими эндоскопами применяют специализированные эндоскопы.

Мини-эндоскопы (диаметром менее 2 мм) создаются на основе использования сельфока или градана - миниатюрного цилиндрического стержня, коэффициент преломления которого по поперечному сечению меняется по заданному закону. Сельфок передает изображение на расстояние без промежуточных оборачивающих систем линз, но на выходном торце световода изображение рассматривается через линзовый окуляр.

В *измерительных эндоскопах* обеспечивается возможность определения расстояния между дистальным концом эндоскопа и измеряемым объектом, а также размера объекта. Измерение основано на фокусировании объекта и подвижной масштабной сетки в одной плоскости.

Эндоскопы с манипуляторами имеют свободный канал для ввода манипулятора, например захвата, крючка.

В *ультрафиолетовых эндоскопах* в качестве световода используется жидкость с ультрафиолетовой проводимостью. Такие эндоскопы позволяют контролировать труднодоступные детали двигателя капиллярным методом с применением проникающих жидкостей и флуоресцентных красителей.

По данным радиографии можно получить информацию о взаимном положении деталей работающего двигателя, величине зазоров, колебаниях деталей, наличии и положении трещин, износе деталей.

Метод осуществляется с помощью источников проникающего излучения: мощных линейных ускорителей электронов. Рентгеновское излучение от линейного ускорителя направляется на исследуемый участок двигателя, по другую сторону которого устанавливается устройство регистрации изображения, например пакет с фотопленкой. Последующая автоматизированная обработка изображений базируется на алгоритмах статической обработки изображений, масштабирования, усиления контрастности.

Ультразвуковые и вихретоковые методы и средства контроля позволяют обнаруживать трещины во многих труднодоступных для контроля деталях - рабочих лопатках, дисках роторах. Используются обычные дефектоскопы, но со специальными манипуляторами - средствами доставки преобразователей в зону контроля.

Глава 4.5

МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ГАЗОНЕФТЕПРОВОДОВ

С увеличением протяженности трубопроводного транспорта газа и нефти возрастают требования к надежности трубопроводов и их участков, а также оборудования насосных и компрессорных станций и резервуаров для хранения нефти.

Диагностирование технического состояния объектов трубопроводного транспорта предполагает определение их ресурса путем анализа текущих параметров, определенных средствами контроля в предпусковой период и в период эксплуатации, с учетом закономерностей развития процесса старения и разрушения металла труб в конкретных условиях.

Надежность объектов трубопроводного транспорта (ТТ) представляет собой комплексную характеристику, охватывающую конструктивные и функциональные параметры объектов. Для оценки надежности с позиций системного подхода необходимы сведения о надежности: конструкции, характеризующей прочностные свойства объекта ТТ; функционирования, характеризующей процесс функционирования объекта ТТ; технологического процесса, характеризующей процесс функционирования комплексов объектов ТТ.

Для оценки надежности функционирования используют отношение реальной производительности системы к производительности системы, полностью разработанной, с номинальными значениями всех параметров.

Надежность конструкции характеризует *мгновенную надежность* ТТ, а надежность функционирования - *интегральную надежность*.

Для объекта ТТ - трубы, критерием отказа является разрушение, а в качестве предельного состояния при определении надежности принимается деформированность, при которой максимальные суммарные продольные напряжения $\sigma^{н}_{п\,г}$ не превышают $R^{н}_{2}$ минимального предела текучести металла с учетом двухосновного напряженного состояния металла трубы ψ_3:

$$\sigma^{н}_{п\,р} \le \psi_3 R^{н}_{2}.$$

Трубопровод является функциональной системой и единичным технологическим элементом, в качестве предельного состояния которого принимается прочность. При оценке надежности трубопровода на первый план выдвигается надежность технологической системы, далее надежность функционирования и надежность конструкции.

Любые дефекты, связанные с нарушением формы трубы, являются концентраторами напряжений. напряжения в стенке трубы в местах дислокации дефектов повышаются в 2 раза и более по сравнению с бездефектным участком, что является причиной развития трещины и последующего разрушения металла.

Коррозионные повреждения внешних поверхностей трубопроводов из-за нарушения изоляции и эрозионные повреждения внутренних поверхностей трубопроводов вследствие межкристаллитной коррозии и гидродинамических ударов, приводящих к потере металла в стенках трубы, снижают допустимое давление транспортируемого газа.

Образовавшиеся скопления коррозионных и эрозионных повреждений поверхности трубы при определенных условиях могут привести к трещинообразованию и разрыву стенок трубопровода.

Напряженное состояние коррозионно-поврежденного участка трубы может быть представлено мембраной под воздействием кольцевых $\sigma_{\varphi\partial}$ и продольных σ_x напряжений, увеличивающихся в K раз с увеличением площади дефекта:

$$\sigma_{\varphi\partial} = K\sigma_{\varphi н},$$

где K - коэффициент напряжений; $\sigma_{\varphi н}$ - нормальные кольцевые напряжения, обусловленные внутренним давлением в бездефектном трубопроводе.

Начало разрушения трубы обусловлено достижением кольцевыми напряжениями дефектного участка временного сопротивления $\sigma_в$:

$$K\sigma_{\varphi н} = \sigma_в.$$

Допустимый коэффициент концентрации напряжений $K_{доп}$ изменяется в зависимости от характеристик материала труб и меры надежности и линейно зависит от запаса несущей способности по внутреннему рабочему давлению в трубе, который характеризует уменьшение внутреннего давления по сравнению с тем, которое могла бы выдержать бездефектная труба.

Для обеспечения одинакового уровня надежности участка трубопровода или в целом всего трубопровода, имеющего различные дефекты, необходимо выполнить условие

$$\gamma\left(\frac{K_н}{k}\right) \ge \gamma_{доп}\left[P(T)\right],$$

где $P(T)$ - заданный уровень, мера надежности участка; $\gamma_{доп}\left[P(T)\right]$ - соответствующая этому уровню характеристика безопасности.

Тогда главным звеном в диагностировании трубопроводов становится обнаружение дефектов, определение их ориентации и параметров, а также изучение напряженно-деформированного состояния бездефектного трубопровода, являющегося фоном, на котором концентрация напряжений, обусловленная дефектами, может оказаться выше допустимых значений.

Напряженное состояние труб обусловлено действием неучтенных нагрузок: силовым воздействием оползающих грунтов, течений, размывающих подводные трубопроводы.

Существуют различные **методы измерения напряжений в трубопроводах** (магнитный, рентгеновский, ультразвуковой и др.). *Магнитный метод* применим для измерения одноосных напряжений, *рентгеновский* - для качественного описания напряженного состояния; *ультразвуковой метод* может быть использован при измерениях остаточных напряжений. Для действующих трубопроводов используется *метод тензометрирования*, с помощью которого можно получать долговременную объективную информацию о деформациях измеряемого участка трубопровода.

Дефекты трубопроводов (параметры диагностирования) по происхождению могут быть разделены на три группы:

1 - дефекты при производстве труб в заводских условиях;

2 - дефекты при монтажных и строительных работах;

3 - дефекты при эксплуатации трубопроводов.

Своевременное обнаружение дефектов на первых двух стадиях - способствует повышению запаса прочности трубопровода.

Появление дефектов трубопроводов в процессе их эксплуатации вызвано многообразными факторами, как хорошо изученными и прогнозируемыми, так и случайными. Для обеспечения надежности трубопроводов необходим периодический контроль их параметров.

При производстве труб появляются *дефекты металлургического происхождения*, отклонения толщины стенки, дефекты изготовления сварных швов, а также дефекты изоляционных покрытий. При монтажных и строительных работах появляются дефекты поперечного сварного шва, деформации трубы, дефекты изоляционных покрытий. Дефектами появляющимися в процессе эксплуатации, являются потери металла объектов, трещины, деформации труб, нарушения изоляции. Дефекты функционального характера, появляющиеся в процессе эксплуатации - частичные разрушения объектов и утечки транспортируемого продукта.

Сварной шов является концентратором напряжений в стенке трубы и увеличивает напряжения в 1,5 - 1,6 раза.

Дефекты швов, выполненных сваркой плавлением, делятся на наружные и внутренние. Наружные - дефекты формы шва и дефекты сплошности. Внутренние - дефекты структуры и дефекты сплошности.

Дефектами формы являются наплывы и натеки, а наружными дефектами сплошности - прожоги и кратеры. Внутренними дефектами сплошности являются непровары, трещины, шлаковые включения и поры.

Трещины в околошовной зоне, ориентированные перпендикулярно и параллельно оси шва, - холодные трещины, возникающие при сварке закаливающихся легированных сталей, средне- и высоко углеродистых сталей в результате напряжения и наличия водорода в металле. Продольные трещины в металле шва - горячие трещины, образующиеся в углеродистых и легированных сталях в результате воздействия на кристаллизующийся металл шва растягивающих напряжений. Трещины и поры в виде скопления или цепочки пор уменьшают статическую и вибрационную прочность швов и являются недопустимыми дефектами.

Дефекты продольных и спиральных сварных швов выявляются в процессе производства прямошовных и спиральношовных труб.

Дефекты поперечных швов трубопроводов выявляются на этапе монтажа трубопроводов.

К дефектам трубы, как конструктивного элемента трубопровода относятся механические повреждения и деформации труб и изоляционных покрытий, возникающие на разных стадиях (при транспортировании, монтаже и эксплуатации трубопроводов).

Главным фактором, приводящим к снижению надежности прямолинейных участков трубопровода, является *коррозионное повреждение* наружных поверхностей трубопроводов вследствие нарушения изоляции и эрозионное повреждение внутренних поверхностей трубопроводов вследствие наличия межкристаллитной коррозии и гидродинамических ударов транспортируемого продукта, приводящих к потере металла в стенках трубы. Эти два вида повреждения трубопроводов приводят к уменьшению толщины стенок трубопровода; при определенных условиях могут привести к трещинообразованию и разрыву металла.

На скорость коррозии влияют качество металла трубопровода и его поверхности, состояние изоляционного покрытия, климатические условия и внешние агрессивные свойства почвенной среды и компонентов перекачиваемого продукта.

Экспериментально установлены критерии опасности коррозионных повреждений

стенок трубопровода. Все виды *коррозионных повреждений* подразделяются на три группы.

К первой группе относится сплошная коррозия - равномерная или неравномерная, в зависимости от скорости ее протекания на отдельных участках поверхности трубы.

Ко второй группе - местная коррозия, к которой относятся одиночные поражения на расстоянии более 150 мм друг от друга.

К третьей группе относят групповые коррозионные поражения с расстояниями между краями соседних коррозионных пятен 5 - 150 мм и протяженные коррозионные поражения при расстоянии между соседними поражениями менее 5 мм.

Одиночные коррозионные поражения, как правило, не приводят к возникновению отказов участков трубопроводов. Они предшествуют образованию свищей и при своевременно принятых мерах по ремонту или переизоляции (в случае, если глубина не достигла критического значения) опасность образования свищей снижается.

Наиболее опасным видом коррозионных поражений является *межкристаллитная коррозия* (МКК) коррозионно-стойких хромоникелевых сталей, а также сталей аустенитного, аустенитно-ферритного, ферритного, мартенситного, аустенитно-мартенситного классов. МКК обусловлена как структурным состоянием металла, так и влиянием агрессивной среды. Различие физико-химических свойств граничных и внутренних областей кристаллов металла способствует диффузии углерода и хрома и выделению вторичных фаз в пограничных зонах. Электрохимическая коррозия по границам кристаллов вызывает образование трещин, идущих от поверхности в глубь металла.

Одно из направлений, по которому осуществляется защита от МКК - разработка надежных методов обнаружения и определения степени поражения металла межкристаллитной коррозией.

Металл трубопровода находится под ударным воздействием двухфазной среды - потоков газа или жидкости, содержащих инородные включения. В этих условиях наблюдается *эрозия* - унос массы металла трубопровода в виде отдельных частиц или слоев. Для уменьшения скорости потери металла вследствие кавитационной эрозии применяется катодная защита. Катодная защита эффективна при достаточно высоких катодных потенциалах, при которых происходит образование водорода на поверхности металла.

Сочетание химического и механического типов коррозии вызывает различные и сложные формы разрушения материала.

Эрозионная коррозия как параметр диагностирования подлежит изучению физическими методами неразрушающего контроля.

Разрушения трубопроводов для жидких и газообразных продуктов (нефть, нефтепродукты, вода и т.д.) распространяются на участке протяженностью от нескольких десятков сантиметров до нескольких десятков метров. Разрушения протяженностью в десятки метров происходят довольно редко. Разрушения газопроводов обычно имеют большую протяженность, иногда несколько километров.

Эффективность диагностики технического состояния газопроводов зависит от возможности получения достоверной и своевременной информации о ряде параметров.

Основными направлениями диагностики технического состояния трубопроводов являются: определение коррозионной обстановки и мест сквозных повреждений изоляции; контроль качества сварки и изоляции при ремонтно-восстановительных работах; выявление коррозионных повреждений, трещин, эрозионного износа и других дефектов в металле труб, а также оценка их потенциальной опасности; обнаружение мест утечек продукта в трубопроводах.

Специализированные комплексные лаборатории обеспечивают повышение производительности и эффективности контроля качества монтажа ремонтно-восстановительных работ на газопроводах и других объектах газовой промышленности. В зависимости от характера и условий проведения этих работ применяют различные лаборатории.

С помощью стационарной лаборатории проводится неразрушающий контроль сварных швов труб на трассе монтажа трубопровода рентгенографическим, магнитографическим и ультразвуковым методами, а также механические испытания образцов сварных швов.

Лаборатория размещается в вагоне, разделенном на отделения физических методов контроля, фотохимической обработки рентгенограмм, механических испытаний и размещения рентгеновского аппарата и его сменных частей.

Рентгеновским методом осуществляют контроль сварных швов труб диаметром 720 - 1620 мм, ультразвуковым - труб диаметром 168 - 1620 мм и магнитографическим методом - труб диаметром 168 - 1420 мм.

Комплексная передвижная лаборатория осуществляет контроль качества сварки и изоляционных покрытий трубопроводов диаметром 168 - 1420 мм неразрушающими методами при ремонтно-восстановительных и монтажно-строительных работах на газопроводах, промысловых коллекторах и других объектах.

Для контроля качества сварочно-монтажных работ при аварийном ремонте газопроводов в особо сложных полевых условиях в заболоченных районах Западной Сибири и других труднодоступных местах разработана специализированная лаборатория. В ее

составе имеются следующие средства контроля: гамма-дефектоскоп и ультразвуковой толщиномер для толщинометрии основного металла труб и выявления расслоений металла в околошовной зоне.

Питание аппаратуры осуществляется входящей в его состав бензоэлектростанцией. В комплект поставки лаборатории входит также вспомогательные средства для дозиметрического контроля и фотохимической обработки рентгенограмм.

Лаборатория обеспечивает контроль трубопроводов диаметром 168 - 1420 мм с толщиной основного металла сварных соединений 6 - 120 мм (при толщине 6 - 50 мм - гамма-дефектоскопом, при толщине 10 - 120 мм - ультразвуковым толщиномером).

Для автоматизированного ультразвукового контроля сварных швов трубопроводов в полевых условиях предназначена лаборатория "Атлант - 24", смонтированная на автомобильном шасси и укомплектованная электронно-акустической аппаратурой, механизмом сканирования на магнитных колесах с системой подвода контактной жидкости и вспомогательным оборудованием. Аппаратура обработки обеспечивает высокую достоверность обнаружения дефектов и позволяет регистрировать результаты контроля с указанием состояния акустического контакта, типа обнаруженных дефектов, протяженности и расположения их по глубине.

Глава 4.6

МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ДИАГНОСТИРОВАНИЯ АВТОМОБИЛЬНОГО ТРАНСПОРТА

Отсутствие постоянного контроля технического состояния автомобиля непосредственно в процессе эксплуатации приводит к тому, что развивающиеся дефекты обнаруживаются лишь когда они проявляются значительно. Дефекты, связанные с относительно небольшим снижением мощности, увеличением расхода топлива, повышением токсичности выхлопа, деформациями ходовой части, снижением эффективности тормозов, могут быть не замечены даже опытным водителем.

Диагностические параметры сборочных единиц и составных частей автомобиля представляются как механическими, так и электрическими сигналами.

В диагностических параметрах, отображающих рабочие процессы отдельных составных частей автомобилей, может содержаться несколько диагностических признаков (например, сигналы от системы зажигания и виброакустические сигналы). Наличие совокупности признаков предопределяет разные методы использования информации, получаемой в результате диагностирования. Один из методов заключается в сопоставлении реального сигнала с его эталоном. Другой метод состоит в выделении из сигнала признаков, характеризующих составных частей. Принятый метод использования информации определяет построение технических средств диагностирования ТСД автомобилей.

Диагностические параметры автомобиля отличает также наличие малых изменений информативных составляющих сигналов на фоне сигналов достаточно высокого уровня (например, малые относительные изменения частоты вращения коленчатого вала двигателя при отклонении одного цилиндра). Это часто требует ТСД с широкими диапазонами преобразований и измерений.

Оценку технического состояния автомобиля в целом проводят в процессе эксплуатации, в интервалах между техническими обслуживаниями (ТО). Для оценки используют в основном приборы, которыми оснащен автомобиль (спидометр, итоговый счетчик пути, указатели уровня топлива, давления масла и температуры охлаждающей жидкости, амперметр). Экономичность по топливу оценивают средним расходом топлива за определенное число километров пути (с учетом характера перевозимых грузов, дорожных условий и сезона эксплуатации).

Интенсивность разгона (приемистость) определяют путем приблизительной оценки ускорения при резком открытии дроссельной заслонки на автомобиле, движущемся с определенной начальной скоростью. Аналогичным путем определяют выбег (путь автомобиля по инерции) от максимальной скорости до нулевой. По цвету отработавших газов судят о составе рабочей смеси и угаре масла. На ходу автомобиля оценивают работу трансмиссии (сцепления, коробки передач, карданной и главной передач). Проверяют тормозной путь, замедление при торможении и одновременность торможения колес. По показаниям амперметра или вольтметра на приборном щитке судят о состоянии электрооборудования автомобиля. Состояние приборов освещения и сигнализации оценивают путем их осмотра при включении. Кроме того, учитывают такие признаки, как шум, запах, повышение температуры и т.д.

Объективная оценка технического состояния автомобиля в целом может быть получена только по результатам диагностирования сборочных единиц с применением специальных технических средств диагностирования.

В процессе эксплуатации автомобилей постепенно снижается их эффективная мощность и увеличивается удельный расход топлива. Однако часто ухудшение этих показателей происходит из-за разрегулирования систем двигателя и не может служить основанием для

отправки двигателя в капитальный ремонт. В большинстве случаев потери мощности и низкая экономичность по топливу могут быть восстановлены на автотранспортных предприятиях, особенно при наличии средств оценки количественных значений этих показателей.

Предусматривается диагностирование двигателя по следующим параметрам: эффективная мощность двигателя; давление масла в главной магистрали; удельный расход топлива; содержание окиси углерода в отработавших газах.

Эффективную мощность двигателей определяют на специальных стендах (тормозные стенды) или с помощью приборов, основанных на бестормозных методах измерения.

Стенды для определения мощности (тормозные стенды) - одно из наиболее крупных и дорогостоящих видов стационарного оборудования, вокруг которого на постах диагностирования комплектуют другие передвижные и переносные средства диагностирования.

Наибольшее распространение имеют роликовые тормозные стенды (с беговыми барабанами), имитирующие сопротивление качения при разных скоростях движения автомобиля.

Для создания нагрузки в стендах применяют фрикционные, гидравлические, токовихревые и другие тормозные устройства. Чаще используют токовихревые тормозные устройства, обеспечивающие высокую стабильность тормозных характеристик и широкий диапазон плавного регулирования, что важно для программирования режимов нагружения.

Структурные схемы конкретных стендов и их технические характеристики даны в [2].

При **диагностировании цилиндро-поршневой группы и кривошипно-шатунного механизма** используют следующие структурные и косвенные диагностические параметры: зазор между поршнем и кольцом по высоте канавки; зазор между цилиндром и поршнем в верхнем поясе; зазор в стыках поршневых колец; зазор между шейками коленчатого вала и коренными подшипниками; зазор между шейками коленчатого вала и шатунными подшипниками; зазор между поршневым кольцом и втулкой верхней головки шатуна; осевой зазор в коренных подшипниках коленчатого вала; объем газов, прорывающихся в картер или давление газов в картере; давление газов в надпоршневом пространстве в конце такта сжатия; объемный расход сжатого воздуха, подаваемого в цилиндры, или падение его давления; свободный ход поршня относительно оси коленчатого вала; давление масла в главной масляной магистрали; расход масла на угар; качественный и количественный составы продуктов износа в масле; виброскорости и виброускорения.

Состояние газораспределительного механизма оценивается следующими параметрами: погрешности фазы газораспределения (по углу поворота коленчатого вала); зазор между коромыслом (рычагом) и торцом стержня клапана; зазор между распределительным валом и подшипниками распределительного вала; износ направляющих втулок клапанов; зазор между клапаном и седлом клапана; объемный расход или падение давления сжатого воздуха, подаваемого в цилиндры; скорость изменения разрежения во впускном трубопроводе; виброскорости, виброускорения.

При определении технического состояния с помощью специальных технических средств в основном используют косвенные параметры:

- давление газов в подпоршневом пространстве;
- расход сжатого воздуха, подаваемого в цилиндры;
- свободный ход поршня относительно оси коленчатого вала;
- фазы газораспределения;
- разрежение во впускном трубопроводе.

Наибольшее относительное число отказов в процессе эксплуатации автомобилей с карбюраторными двигателями падает на **систему зажигания**. Для ее диагностирования используют следующие параметры, характеристики и признаки:

для распределителей зажигания и коммутаторов - УЗСК (угол замкнутого состояния контактов) или зазор между контактами прерывателя (в ^{0} или %);

угол опережения зажигания;

изменение УЗСК и угла опережения зажигания на каждом выступе по сравнению со средним значением УЗСК (в %);

характеристика центробежного регулятора распределителя зажигания (зависимость изменения угла опережения зажигания (в %) от частоты вращения валика распределителя);

характеристика вакуумного регулятора распределителя зажигания (зависимость изменения угла опережения зажигания (в ^{0}) от частоты вращения валика распределителя);

переходное сопротивление контактов прерывателя, клеммных зажимов и проводов;

усилие развиваемое пружиной рычажка прерывателя;

сопротивление помехоподавательного резистора;

емкость конденсатора;

сопротивление изоляции конденсатора;

сопротивление и индуктивность обмоток бесконтактных индукционных датчиков;

сопротивление магниторезисторов и других первичных преобразователей в датчиках-распределителях;

напряжения в контрольных точках коммутатора (в статическом режиме);

мгновенные напряжения в контрольных точках коммутатора (осциллограммы при подаче на вход коммутатора тест-сигнала).

Из средств диагностирования автомобилей наибольшее распространение получили *универсальные комбинированные приборы*, позволяющие измерять комплекс параметров главным образом в системах зажигания и системах электрооборудования. Однако в результате анализа параметров системы зажигания и анализа отработавших газов можно сделать заключение и о состоянии цилиндро-поршневой группы, системы газораспределения, системы питания и др. Четыре группы универсальных средств различаются сложностью и соответственно объемом получаемой информации, а также степенью автоматизации обработки информации и допускаемой погрешностью измерения.

Первая группа - автотесторы, содержащие один показывающий прибор с переключателем измеряемых величин и диапазонов измерений. Автотесторы обычно позволяют измерять частоту вращения коленчатого вала двигателя, напряжения, УЗСК. Некоторые автотесторы позволяют измерять большие токи и углы опережения зажигания. Автотесторы в основном предназначены для владельцев автомобилей.

Вторая группа универсальных средств диагностирования - анализаторы двигателя - содержат, как правило, два показывающих прибора и переключатель, что позволяет, например, следить за изменением какого-либо параметра в функции частоты вращения коленчатого вала двигателя. Эта группа средств, как правило, комплектуется стробоскопической лампой и синхронным дистанционным отключателем цилиндров. Анализаторы двигателей предназначены для небольших АТП.

Третья группа - мотор-тестеры - наиболее распространены. Мотор-тестер представляет собой комбинацию ЭЛО для системы зажигания и других приборов, обеспечивающих достаточно полную информацию о состоянии большинства систем двигателя.

Некоторые мотор-тестеры третьей группы имеют дисплей, на экране которого в тестовом, цифровом или графическом виде представляется информация о результатах измерения параметров.

Мотор-тестеры третьей группы предназначены для оборудования крупных АТП и станций технического обслуживания (СТО).

К четвертой группе относят мотор-тестеры, отличающиеся от третьей группы тем, что они содержат программируемые блоки логической обработки измерительной информации. В качестве устройств отображения информации в этих мотор-тесторах применяют дисплеи и печатающие устройства.

Мотор-тестеры четвертой группы также применяют на крупных АТП и СТО. Применение мотор-тестеров этой группы не требует высокой квалификации работающих, поскольку процессы измерения и установки диапазона измерений автоматизированы. Документальная регистрация данных позволяет следить за динамикой изменения состояния объектов диагностирования и прогнозировать изменение состояния. Кроме того, в значительной степени снижаются субъективные ошибки.

Подробное описание выпускаемых отечественной и зарубежной промышленностью автотестеров, анализаторов двигателей, мотор-тестеров, их структурные схемы и технические характеристики даны в [2].

Для диагностирования других составных частей автомобиля используют следующие параметры:

для трансмиссии

постоянство отношений частот вращения коленчатого вала двигателя и составных частей трансмиссии (пробуксовка сцепления)

$$\xi_c = 1 - \frac{\omega_{дв}}{\omega_{тр}},$$

где $\omega_{дв}$, $\omega_{тр}$ - угловые частоты вращения двигателя и трансмиссии;

зазоры в составных частях трансмиссии;

сила, прикладываемая к педали сцепления для его выключения;

ход педали сцепления;

дисбаланс карданного вала (в г·мм);

биение карданного вала;

уровни виброускорений (в дБ);

для передней подвески, амортизаторов и колес

расстояние между боковыми поверхностями покрышек спереди и сзади колес;

углы установки колес в горизонтальной плоскости;

углы установки колес в вертикальной плоскости;

угол между осями заднего и переднего мостов;

параметры зависимости силы от перемещения для хода "сжатия" и "отдачи" (для амортизаторов);

боковые силы на колесе при его качении;

декремент затухания колебаний кузова при единичном скачке нагрузки (для амортизаторов), характеризуемый отношением A_2/A_1 (A_1, A_2 - амплитуды 1-го и 2-го колебаний); параметры АЧХ (добротность) подвески (для амортизаторов) характеризуемые отношением $A_{рез}/0{,}2A_{рез}$ ($A_{рез}$ - амплитуда колебаний на частоте резонанса);

для рулевого управления

угловой зазор рулевого колеса;

момент на рулевом колесе;

для тормозных систем

зазор между накладками и барабанами или тормозными дисками;

свободный ход педали тормоза;

неравномерность износа тормозных барабанов;

тормозной путь;

замедление при торможении (в $м \cdot с^{-1}$);

тормозная сила;

эффективность торможения (сила нажатия на педаль тормоза, отнесенная к тормозной силе) (в относительных единицах);

время срабатывания тормозов.

Для оценки значений перечисленных параметров диагностирования широко используют датчики силы и линейных перемещений, люфтомеры, динамометры-люфтомеры, проекционные оптические средства, деселерометры [3].

Анализ всех параметров диагностирования автомобиля в целом, сборочных единиц и составных частей показывает, что перспектива повышения качества, надежности и долговечности автотранспорта будет определяться в большой степени развитием (интеллектуализацией) его системы диагностирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Надежность** и эффективность в технике: Справочник. В 10 томах. Т. 9. Техническая диагностика / Под ред. В. В. Клюева, М.: Машиностроение, 1987, 352 с.

2. **Пархоменко П. П., Согомонян Е. С.** Основы технической диагностики. М.: Энергия, 1981, 320 с.

3. **Технические** средства диагностирования: Справочник / Под ред. В. В. Клюева, М.: Машиностроение, 1989, 672 с.

РАЗДЕЛ 5

СЕРТИФИКАЦИЯ

Глава 5.1.
ОСНОВНЫЕ ТЕРМИНЫ

В декабре 2000 г. ИСО официально опубликовало международные стандарты на менеджмент качества:

ИСО 9000 "Системы менеджмента качества. Основные положения и словарь";

ИСО 9001 "Системы менеджмента качества. Требования";

ИСО 9004 "Системы менеджмента качества. Рекомендации по улучшению деятельности".

Все три стандарта опубликованы на английском и французском языках, а стандарт ИСО 9000 и на русском – официальных языках ИСО.

Указанные базовые стандарты содержат все важнейшие достижения в области качества и огромный 13-летний опыт применения стандартов, в дальнейшем они повлияют на европейские и отечественные нормы.

Ниже приведены термины и определения, используемые в ИСО 9000: 2000(R).

1. Термины, относящиеся к качеству.

1.1. **Качество** – степень, с которой совокупность собственных **характеристик** (5.1) выполняет **требования** (1.2).

Примечания: *1.* Термин "качество" может применяться к таким прилагательным, как "плохое", "хорошее" и "отличное".

2. Термин "собственный", в противоположность термину "запланированный", означает существование в чем-то, особенно если это касается постоянной характеристики.

1.2. **Требование** – потребность или ожидание, которое установлено, обычно предполагается или является обязательным.

Примечания: *1.* "Обычно предполагается" означает, что это общепринятая практика **организации потребителей** (3.5) и других **заинтересованных сторон** (3.7), когда предполагаются рассматриваемые потребности или ожидания.

2. Для обозначения конкретного вида требования могут применяться определяющие слова, например, требование к продукции, требование к системе качества, требование потребителя.

3. Установленным требованием является такое требование, которое определено, например, в **документе** (7.2).

4. Требования могут выдвигаться различными заинтересованными сторонами.

1.3. **Градация** – класс, сорт, категория или разряд, присвоенные к различным **требованиям** (1.2) к **качеству** (1.1) **продукции** (4.2), **процессов** (4.1) или **систем** (2.1), имеющих то же самое функциональное применение.

Пример. Класс авиабилета или категория гостиницы в справочнике гостиниц.

Примечание. При определении требования к качеству градация обычно устанавливается.

1.4. **Удовлетворенность потребителей** – восприятие потребителями степени выполнения их **требований** (1.2).

Примечания: *1.* Жалобы потребителей являются общим показателем низкой удовлетворенности потребителей, однако их отсутствие не обязательно предполагает высокую удовлетворенность потребителей.

2. Даже если требования потребителей были с ними согласованы и выполнены, это не обязательно обеспечивает высокую удовлетворенность потребителей.

1.5. **Возможности** – способность **организации** (3.1), **системы** (2.1) или **процесса** (4.1) производить **продукцию** (4.2), которая будет отвечать **требованиям** (1.2) к этой продукции.

2. Термины, относящиеся к менеджменту.

2.1. **Система** – совокупность взаимосвязанных и взаимодействующих элементов.

2.2. **Система менеджмента** – **система** (2.1) для разработки политики и целей и достижения этих целей.

Примечание. Система **менеджмента организации** (3.1) может включать различные системы менеджмента, такие как система менеджмента качества (2.3), система менеджмента финансовой деятельности или система менеджмента охраны окружающей среды.

2.3. **Система менеджмента качества** – **система менеджмента** (2.2) для руководства и управления **организацией** (3.1) применительно к **качеству** (1.1).

2.4. **Политика в области качества** – общие намерения и направление деятельности **организации** (3.1) в области **качества** (1.1), официально сформулированные **высшим руководством** (2.7).

Примечания: *1.* Как правило, политика в области качества согласуется с общей политикой организации и обеспечивает основу для постановки целей в **области качества** (2.5).

2. Принципы менеджмента качества, изложенные в настоящем международном

стандарте, могут служить основой для разработки политики в области качества.

2.5. **Цели в области качества** – то, чего добиваются или к чему стремятся в области **качества** (1.1).

Примечания: 1. Цели в области качества обычно базируются на **политике** организации в **области качества** (2.4).

2. Цели в области качества обычно устанавливаются для соответствующих функций и уровней **организации** (3.1).

2.6. **Менеджмент** – скоординированная деятельность по руководству и управлению **организацией** (3.1).

Примечание. В английском языке термин "management" иногда относится к людям, т.е. лицу или группе работников, наделенных полномочиями и ответственностью для руководства и управления организацией. Когда "management" используется в этом смысле, его следует всегда применять с определяющими словами с целью избежания путаницы с понятием "management", определенным выше. Например, не одобряется выражение "руководство должно...", в то время, как "**высшее руководство** (2.7) должно..." – приемлемо.

2.7. **Высшее руководство** – лицо или группа работников, осуществляющих направление деятельности и управление **организацией** (3.1) на высшем уровне.

2.8. **Менеджмент качества** – скоординированная деятельность по руководству и управлению **организацией** (3.1) применительно к качеству (1.1).

Примечание. Руководство и управление применительно к качеству обычно включает разработку **политики** (2.4) и **целей в области качества** (2.5), **планирование качества** (2.9), **управление качеством** (2.10), **обеспечение качества** (2.11) и **улучшение качества** (2.12).

2.9. **Планирование качества** – часть **менеджмента качества** (2.8), направленная на установление **целей в области качества** (2.5) и определяющая необходимые операционные **процессы** (4.1) жизненного цикла продукции и соответствующие ресурсы для достижения целей в области качества.

Примечание. Разработка **планов качества** (7.5) может быть частью планирования качества.

2.10. **Управление качеством** – часть **менеджмента качества** (2.8), направленная на выполнение **требований** (1.2) к качеству.

2.11. **Обеспечение качества** – часть **менеджмента качества** (2.8), направленная на создание уверенности, что **требования** (1.2) к качеству будут выполнены.

2.12. **Улучшение качества** – часть **менеджмента качества** (2.8), направленная на увеличение способности выполнить **требования** (1.2) к качеству.

Примечание. Требования могут относиться к любым аспектам, таким как **результативность** (2.14), **эффективность** (2.15), **прослеживаемость** (5.4).

2.13. **Постоянное улучшение** – повторяющаяся деятельность по увеличению способности выполнить **требования** (1.2).

Примечание. **Процесс** (4.1) установления целей и поиска возможностей улучшения является постоянным процессом, использующим **наблюдения аудита (проверки)** (9.6) и **заключения по результатам аудита (проверки)** (9.7), анализ данных, **анализ** (8.7) со стороны руководства или другие средства, обычно ведущим к **корректирующим действиям** (6.5) или **предупреждающим действиям** (6.4).

2.14. **Результативность** – степень реализации запланированной деятельности и достижения запланированных результатов.

2.15. **Эффективность** – связь между достигнутым результатом и использованными ресурсами.

3. Термины, относящиеся к организации.

3.1. **Организация** – группа работников и необходимых средств с распределением ответственности, полномочий и взаимоотношений.

Примеры. Компания, корпорация, фирма, предприятие, учреждение, благотворительная организация, предприятие розничной торговли, ассоциация, а также их подразделения и комбинация из них.

Примечания: 1. Распределение обычно бывает упорядоченным.

2. Организация может быть государственной или частной.

3. Настоящее определение действительно применительно к стандартам на **системы менеджмента качества** (2.3). Термин "организация" определен иначе в руководстве ИСО/МЭК 2.

3.2. **Организационная структура** – распределение ответственности, полномочий и взаимоотношений между работниками.

Примечания: 1. Распределение обычно бывает упорядоченным.

2. Официально оформленная организационная структура часто содержится в **руководстве по качеству** (7.4) или в **плане качества** (7.5) **проекта** (4.3).

3. Область применения организационной структуры может включать соответствующее взаимодействие с внешними **организациями** (3.1).

3.3. **Инфраструктура** – (организация) совокупность зданий, оборудования и служб обеспечения, необходимых для функционирования **организации** (3.1).

3.4. **Производственная среда** – совокупность условий, в которых выполняется работа.

Примечание. Условия включают физические, социальные, психологические и эколо-

гические факторы (такие, как температура, системы признания и поощрения, эргономика и состав атмосферы).

3.5. **Потребитель – организация** (3.1) или лицо, получающие **продукцию** (4.2).

Примеры. Клиент, заказчик, конечный пользователь, розничный торговец, бенефициар и покупатель.

Примечание. Потребитель может быть внутренним или внешним по отношению к организации.

3.6. **Поставщик – организация** (3.1) или лицо, поставляющие **продукцию** (4.2).

Примеры. Производитель, оптовик, предприятие розничной торговли или продавец продукции, исполнитель услуги, поставщик информации.

Примечания: 1. Поставщик может быть внутренним или внешним по отношению к организации.

2. В контрактной ситуации поставщика иногда называют "подрядчиком".

3.7. **Заинтересованная сторона** – лицо, или группа, заинтересованные в деятельности или успехе **организации** (3.1).

Примеры. **Потребители** (3.5), владельцы, работники организации, поставщики (3.6), банкиры, ассоциации, партнеры или общество.

Примечание. Группа может состоять из организации, ее части или из нескольких организаций.

4. Термины, относящиеся к процессу и продукции.

4.1. **Процесс** – совокупность взаимосвязанных и взаимодействующих видов деятельности, преобразующая входы и выходы.

Примечания: 1. Входами к процессу обычно являются выходы других процессов.

2. Процессы в **организации** (3.1), как правило, планируются и осуществляются в управляемых условиях с целью добавления ценности.

3. Процесс, в котором подтверждение **соответствия** (6.1) конечной **продукции** (4.2) затруднено или экономически нецелесообразно, часто относят к "специальному процессу".

4.2. **Продукция** – результат **процесса** (4.1).

Примечания: 1. Имеются четыре общие категории продукции:

– услуги (например, перевозки);

– программные средства (например, компьютерная программа, словарь);

– технические средства (например, узел двигателя);

– перерабатываемые материалы (например, смазка).

Многие виды продукции содержат элементы, относящиеся к различным общим категориям продукции. Отнесение продукции к услугам, программным средствам, техническим средствам или перерабатываемым материалам зависит от преобладающего элемента. Например, поставляемая продукция "автомобиль" состоит из технических средств (например, шин), перерабатываемых материалов (горючее, охлаждающая жидкость), программных средств (программное управление двигателем, инструкция водителю) и услуги (разъяснения по эксплуатации, даваемые продавцом).

2. Услуга является результатом по меньшей мере одного действия, обязательно осуществленного при взаимодействии **поставщика** (3.6) и **потребителя** (3.5), она, как правило, нематериальна. Предоставление услуги может включать, к примеру, следующее:

– деятельность, осуществленную на поставленной потребителем материальной продукции (например, автомобиль, нуждающийся в ремонте);

– деятельность, осуществленную на поставленной потребителем нематериальной продукции (например, заявление о доходах, необходимое для определения размера налога);

– предоставление нематериальной продукции (например, информации в смысле передачи знаний);

– создание благоприятных условий для потребителей (например, в гостиницах и ресторанах).

Программное средство содержит информацию и обычно является материальным, может быть также в форме подходов, операций или **процедуры** (4.5).

Техническое средство, как правило, является материальным, и его количество выражается исчисляемой **характеристикой** (5.1). Перерабатываемые материалы обычно являются материальными, и их количество выражается непрерывной характеристикой. Технические средства и перерабатываемые материалы часто называются товарами.

3. Обеспечение **качества** (2.11) направлено главным образом на предполагаемую продукцию.

4.3. **Проект** – уникальный **процесс** (4.1), состоящий из совокупности скоординированной и управляемой деятельности с начальной и конечной датами, предпринятый для достижения цели, соответствующей конкретным **требованиям** (1.2), включающий в себя ограничения по срокам, стоимости и ресурсам.

Примечания: 1. Отдельный проект может быть частью структуры более крупного проекта.

2. В некоторых проектах цели совершенствуются, а **характеристики** (5.1) продукции определяются соответственно по мере развития проекта.

3. Выходом проекта может быть одно изделие или несколько единиц **продукции** (4.2).

4. Адаптировано из ИСО 10006: 1997.

4.4. **Проектирование и разработка** – совокупность **процессов** (4.1), переводящих **требова-**

ния (1.2) в установленные **характеристики** (5.1) или **нормативно-техническую документацию** (7.3) на **продукцию** (4.2), **процесс** (4.1) или **систему** (2.1).

Примечания: *1.* Термины "проектирование" и "разработка" иногда используются как синонимы, а иногда – для определения различных стадий процесса проектирования и разработки в целом.

2. Для обозначения объекта проектирования и разработки могут применяться определяющие слова (например, проектирование и разработка продукции или проектирование и разработка процесса).

4.5. **Процедура** – установленный способ осуществления деятельности или **процесса** (4.1).

Примечания: *1.* Процедуры могут быть документированными и недокументированными.

2. Если процедура документирована, часто используется термин "письменная процедура" или "документированная процедура". **Документ** (7.2), содержащий процедуру, может называться "документированная процедура".

5. Термины, относящиеся к характеристикам.

5.1. **Характеристика** – отличительное свойство.

Примечания: *1.* Характеристика может быть собственной или присвоенной.

2. Характеристика может быть качественной или количественной.

3. Существуют различные классы характеристик:

– физические (например, механические, электрические; химические или биологические);

– органолептические (например, связанные с запахом, осязанием, вкусом, зрением, слухом);

– этические (например, вежливость, честность, правдивость);

– временные (например, пунктуальность, безотказность, доступность);

– эргономические (например, физиологические характеристики, или связанные с безопасностью человека);

– функциональные (например, максимальная скорость самолета).

5.2. **Характеристика качества** – собственная **характеристика** (5.1) **продукции** (4.2), **процесса** (4.1) или **системы** (2.1), вытекающая **из требования** (1.2).

Примечания: *1.* "Собственная" означает существование в чем-то, особенно если это касается постоянной характеристики.

2. Присвоение характеристики продукции, процесса или системы (например, цена продукции) не являются характеристиками качества этой продукции, процесса или системы.

5.3. **Надежность** – собирательный термин, применяемый для описания свойства готовности и влияющих на него свойств безотказности, ремонтопригодности и обеспеченности технического обслуживания и ремонта.

Примечание. Надежность применяется только для общего неколичественного описания свойства. [МЭК 60050-191:1990].

5.4. **Прослеживаемость** – возможность проследить историю, применение или местонахождение того, что рассматривается.

Примечания: *1.* При рассмотрении **продукции** (4.2) прослеживаемость может относиться:

– к происхождению материалов или комплектующих;

– к истории обработки;

– к распределению и местонахождению продукции после поставки.

2. В области метрологии определение, приведенное в VIM: 1993, 6.10, является принятым определением.

6. Термины, относящиеся к соответствию.

6.1. **Соответствие** – выполнение **требования** (1.2).

Примечания: *1.* Настоящее определение согласуется с приведенным в Руководстве ИСО/МЭК 2, но отличается от него формулировкой, чтобы соответствовать концепции ИСО 9000.

2. В английском языке термин "conformance" является синонимом, но он вызывает возражения.

6.2. **Несоответствие** – невыполнение **требования** (1.2).

6.3. **Дефект** – невыполнение **требования** (1.2), связанного с предполагаемым или установленным использованием.

Примечания: *1.* Различие между понятиями **дефект** и **несоответствие** (6.2) является важным, так как имеет подтекст юридического характера, особенно связанный с вопросами ответственности за качество продукции. Следовательно, термин "дефект" надо использовать чрезвычайно осторожно.

2. Предполагаемое использование, как его предполагает **потребитель** (3.5), может зависеть от характера информации, такой как инструкции по пользованию и техническому обслуживанию, предоставляемые поставщиком.

6.4. **Предупреждающее действие** – действие, предпринятое для устранения причины потенциального **несоответствия** (6.2) или другой потенциально нежелательной ситуации.

Примечания: *1.* У потенциального несоответствия может быть несколько причин.

2. Предупреждающее действие предпринимается для предотвращения возникновения события, тогда как **корректирующее действие** (6.5) – для предотвращения повторного возникновения события.

6.5. **Корректирующее действие** – действие, предпринятое для устранения причины обнаруженного **несоответствия** (6.2) или другой нежелательной ситуации.
Примечания: *1.* У потенциального несоответствия может быть несколько причин.
2. Предупреждающее действие предпринимается для предотвращения повторного возникновения события, тогда как **предупреждающее действие** (6.4) – для предотвращения возникновения события.
3. Существует различие между **коррекцией** (6.6) и корректирующим действием.

6.6. **Коррекция** – действие, предпринятое для устранения обнаруженного **несоответствия** (6.2).
Примечания: *1.* Коррекция может осуществляться в сочетании с **корректирующим действием** (6.5).
2. Коррекция может включать, например, **переделку** (6.7) или **снижение градации** (6.8).

6.7. **Переделка** – действие, предпринятое в отношении несоответствующей **продукции** (4.2) с тем, чтобы она соответствовала **требованиям** (1.2).
Примечание. В отличие от переделки, **ремонт** (6.9) может воздействовать на части несоответствующей продукции или изменять их.

6.8. **Снижение градации** – изменение **градации** (1.3) несоответствующей **продукции** (4.2) с тем, чтобы она соответствовала требованиям, отличным от исходных.

6.9. **Ремонт** – действие, предпринятое в отношении несоответствующей **продукции** (4.2) с тем, чтобы сделать ее приемлемой для предполагаемого использования.
Примечания: *1.* Ремонт включает действие по исправлению, предпринятое в отношении ранее соответствовавшей продукции для ее восстановления с целью использования, например, как часть технического обслуживания.
2. В отличие от **переделки** (6.7), ремонт может воздействовать на части несоответствующей продукции или изменять их.

6.10. **Утилизация несоответствующей продукции** – действие в отношении несоответствующей **продукции** (4.2), предпринятое для предотвращения ее первоначального предполагаемого использования.
Примеры. Переработка, уничтожение.
Примечание. В ситуации с несоответствующей услугой применение предотвращается посредством прекращения услуги.

6.11. **Разрешение на отклонение** – разрешение на использование или **выпуск** (6.13) **продукции** (4.2), которая не соответствует установленным **требованиям** (1.2).
Примечание. Разрешение на отклонение обычно распространяется на поставку продукции с несоответствующими **характеристиками** (5.1) для установленных согласованных ограничений по времени или количеству данной продукции.

6.12. **Разрешение на отступление** – разрешение на отступление от исходных установленных **требований** (1.2) к **продукции** (4.2) до ее производства.
Примечание. Разрешение на отступление, как правило, дается на ограниченное количество продукции или период времени, а также для конкретного использования.

6.13. **Выпуск** – разрешение на переход к следующей стадии **процесса** (4.1).
Примечание. В английском языке, в контакте компьютерных программных средств, термином "release" часто называют версию самих программных средств.

7. Термины, относящиеся к документации.

7.1. **Информация** – значимые данные.

7.2. **Документ – информация** (7.1) и соответствующий носитель.
Примеры. **Записи** (7.6), **нормативно-техническая документация** (7.3), процедурный документ, чертеж, отчет, стандарт.
Примечания: *1.* Носитель может быть бумажным, магнитным электронным или оптическим компьютерным диском, фотографией или эталонным образцом, или комбинацией из них.
2. Комплект документов, например, технических условий и записей, часто называют "документацией".
3. Некоторые **требования** (1.2) (например, требование к разборчивости) относятся ко всем видам документов, однако могут быть иные требования к техническим условиям (например, требование к управлению пересмотрами) и записям (например, требование к восстановлению).

7.3. **Нормативно-техническая документация – документы** (7.2), устанавливающие **требования** (1.2).
Примечание. Нормативные документы могут относиться к деятельности (например, документированная процедура, технологическая документация на процесс или методику испытаний) или **продукции** (4.2) (например, технологические условия на продукцию, эксплуатационная документация и чертежи).

7.4. **Руководство по качеству – документ** (7.2), определяющий системы **менеджмента качества** (2.3) организации.
Примечание. Руководства по качеству могут различаться по форме и детальности изложения, исходя из соответствия размеру и сложности организации.

7.5. **План качества – документ** (7.2), определяющий, какие **процедуры** (4.5) и соответствующие ресурсы кем и когда должны применяться к конкретному **проекту** (4.3), **продукции** (4.2), **процессу** (4.1) или контракту.

Примечания: *1.* Эти процедуры обычно включают те процедуры, которые имеют ссылки на процессы менеджмента качества и процессы производства продукции.

2. План качества часто содержит ссылки на разделы **руководства по качеству** (7.4) или документированные процедуры.

3. План качества, как правило, является одним из результатов **планирования качества** (2.9).

7.6. **Запись – документ** (7.2), содержащий достигнутые результаты или свидетельства осуществленной деятельности.

Примечания: *1.* Записи могут использоваться, например, для документирования **прослеживаемости** (5.4) и свидетельства проведения **верификации** (8.4) и **корректирующих действий** (6.5).

2. Обычно пересмотры записей не нуждаются в управлении.

8. Термины, относящиеся к оценке.

8.1. **Объективное свидетельство** – данные, подтверждающие наличие или правдивость чего-либо.

Примечание. Объективное свидетельство может быть получено путем наблюдения, измерения, **испытания** (8.3) или другими способами.

8.2. **Контроль** – процедура оценивания соответствия путем наблюдений и суждений, сопровождаемых соответствующими измерениями, испытаниями или калибровкой. [Руководство ИСО/МЭК 2].

8.3. **Испытание** – определение одной или нескольких **характеристик** (5.1) согласно установленной **процедуре** (4.5).

8.4. **Верификация** – подтверждение посредством представления **объективных свидетельств** (8.1) того, что установленные **требования** (1.2) были выполнены.

Примечания: *1.* Термин "верифицировано" используется для обозначения соответствующего статуса.

2. Деятельность по подтверждениям может включать такую деятельность, как:

– осуществление альтернативных расчетов,

– сравнение **научно-технической документации** (7.3) по новому проекту с аналогичной документацией по апробированному проекту,

– проведение **испытаний** (8.3) и демонстраций,

– анализ документов до их выпуска.

8.5. **Валидация** – подтверждение посредством представления **объективных свидетельств** (8.1) того, что **требования** (1.2), предназначенные для конкретного предполагаемого использования или применения, выполнены.

Примечания: *1.* Термин "подтверждено" используется для обозначения соответствующего статуса.

2. Условия применения могут быть реальными или смоделированными.

8.6. **Процесс квалификации – процесс** (4.1) демонстрации способности выполнить установленные **требования** (1.2).

Примечания: *1.* Термин "квалифицирован" используется для обозначения соответствующего статуса.

2. Квалификация может распространяться на работников, **продукцию** (4.2), процессы или **системы** (2.1).

Пример. Квалификация аудиторов (экспертов по сертификации систем качества), квалификация материалов.

8.7. **Анализ** – деятельность, предпринимаемая для установления пригодности, адекватности, **результативности** (2.14) рассматриваемого объекта для достижения установленных целей.

Примечание. Анализ может также включать определение **эффективности** (2.15).

Пример. Анализ со стороны руководства, анализ проектирования и разработки, анализ требований потребителей и анализ несоответствий.

9. Термины, относящиеся к аудиту (проверке).

Примечание. Термины и определения, данные в подразделе 9 были разработаны в ожидании публикации ИСО 19011. Возможно, они будут модифицированы в настоящем стандарте.

9.1. **Аудит (проверка)** – систематический, независимый и документированный **процесс** (4.1) получения **свидетельств аудита (проверки)** (9.4) и объективного их оценивания с целью установления степени выполнения согласованных **критериев аудита (проверки)** (9.3).

Примечание. Внутренние аудиты (проверки), иногда называемые аудиты (проверки) первой стороной, проводятся обычно самой **организацией** (3.1), или от ее имени, для внутренних целей и могут служить основанием для декларации о **соответствии** (6.1). Внешние аудиты (проверки) включают аудиты, обычно называемые "аудиты (проверки) второй стороной" или "аудиты (проверки) третьей стороной".

Аудиты (проверки) второй стороной проводятся сторонами, заинтересованными в деятельности организации, например, потребителями или от их имени.

Аудиты (проверки) третьей стороной проводятся внешними независимыми организациями. Эти организации осуществляют сертификацию или регистрацию на соответствия требованиям, например, требованиям ИСО 9001 и ИСО 14001.

Если системы **менеджмента** (2.2) качества и охраны окружающей среды подвергаются вместе аудиту (проверке), это называется "комплексным аудитом". Если две или несколько организаций проводят совместно аудит (проверку) **проверяемой**

организации (9.8), это называется "совместным аудитом".

9.2. **Программа аудита (проверки)** – совокупность одного или нескольких **аудитов (проверок)** (9.1), запланированных на конкретный период времени и направленных на достижение конкретной цели.

9.3. **Критерии аудита (проверки)** – совокупность политики, **процедур** (4.5) или **требований** (1.2), которые применяются в виде ссылок.

9.4. **Свидетельство аудита (проверки)** – **записи** (7.6), изложение фактов или другая **информация** (7.1), связанная с **критериями аудита (проверки)** (9.3) и которая может быть проверена.

Примечание. Свидетельство аудита (проверки) может быть качественным или количественным.

9.5. **Наблюдения аудита (проверки)** – результат оценки **свидетельства аудита (проверки)** (9.4) в зависимости от **критериев аудита (проверки)** (9.3).

Примечание. Наблюдения аудита (проверки) могут указывать на соответствие или несоответствие критериям аудита (проверки) или на возможности улучшения.

9.6. **Заключение по результатам аудита (проверки)** – выходные данные **аудита** (9.1), предоставленные **группой по аудиту (проверке)** (9.10) после рассмотрения целей аудита и всех **наблюдений аудита** (9.5).

9.7. **Заказчик аудита (проверки)** – **организация** (3.1) или лицо, заказавшие **аудит (проверку)** (9.10).

9.8. **Проверяемая организация** – **организация** (3.1), подвергающаяся **аудиту (проверке)** (9.1).

9.9. **Аудитор (эксперт по сертификации систем качества)** – лицо, обладающее **компетентностью** (9.12) для проведения **аудита (проверки)** (9.1).

9.10. **Группа по аудиту (проверке)** – один или несколько **аудиторов (экспертов по сертификации систем качества)** (9.9), проводящих **аудит (проверку)** (9.1).

Примечания: *1.* Один из аудиторов в группе по аудиту (проверке), как правило, назначается руководителем группы по аудиту.

2. Группа по аудиту может включать стажеров и, в случае необходимости, **технических экспертов** (9.11).

3. В работе группы могут принимать участие наблюдатели без полномочий членов группы по аудиту.

9.11. **Технический эксперт** – <аудит> – лицо, обладающее специальными знаниями или опытом применительно к объекту, подвергаемому аудиту.

Примечания: *1.* Специальные знания или опыт включают знания или опыт применительно к **организации** (3.1), **процессу** (4.1) или деятельности, подвергаемым аудиту, а также знание языка и культуры страны, где проводится аудит.

2. Технический эксперт не имеет полномочий **аудитора (эксперта по сертификации систем качества)** (9.9) в **группе по аудиту (проверке)** (9.10).

9.12. **Компетентность** – выраженная способность применять свои знания и умение.

10. Термины, относящиеся к обеспечению качества процессов измерения.

Примечание. Термины и определения, данные в подразделе 9, были разработаны в ожидании публикации ИСО 19012. Возможно, они будут модифицированы в настоящем стандарте.

10.1. **Система управления измерениями** – совокупность взаимосвязанных или взаимодействующих элементов, необходимых для достижения **метрологического подтверждения пригодности** (10.3) и постоянного управления **процессами измерения** (10.2).

10.2. **Процесс измерения** – совокупность операций для установления значения величины.

10.3. **Метрологическое подтверждение пригодности** – совокупность операций, необходимая для того, чтобы обеспечить соответствие **измерительного оборудования** (10.4) **требованиям** (1.2), отвечающим его назначению.

Примечания: *1.* Метрологическое подтверждение пригодности обычно включает калибровку или **верификацию** (8.4), любую необходимую юстировку или **ремонт** (6.9) и последующую перекалибровку, сравнение с метрологическими требованиями для предполагаемого использования оборудования, а также любое требуемое пломбирование и маркировку.

2. Метрологическое подтверждение пригодности не выполнено до тех пор, пока пригодность измерительного оборудования для использования по назначению не будет продемонстрирована и задокументирована.

3. Требования к использованию по назначению включают такие характеристики, как диапазон, разрешающая способность, максимально допустимые погрешности и др.

4. Требования к метрологическому подтверждению пригодности обычно отличаются от требований на продукцию и в них не регламентируются.

10.4. **Измерительное оборудование** – средства измерения, программные средства, эталоны, стандартные образцы или вспомогательная аппаратура или комбинация из них, необходимые для выполнения **процесса измерения** (10.2).

10.5. **Метрологическая характеристика** – отличительная способность, которая может повлиять на результаты измерения.

Примечания: *1.* **Измерительное оборудование** (10.4) обычно имеет несколько метрологических характеристик.

2. Метрологические характеристики могут быть предметом калибровки.

10.6. **Метрологическая служба** – организационная служба, несущая ответственность за определение и внедрение **системы управления измерениями** (10.1).

Развитие рыночных отношений в мире и, в частности, между США, странами ЕС и Российской Федерацией требуют гармонизации сертификационных критериев компетентности по отношению к квалификации специалистов различных профессий. Это, в первую очередь, относится к специалистам по неразрушающему контролю (НК), сварщикам и др. Ниже в качестве примера приведены термины, принятые в стандартах ИСО 9712 и EN 47, относящиеся к определению уровня квалификации и сертификации персонала в области НК.

Квалификация – наличие подготовки, профессиональных знаний, мастерства и опыта, а также соответствующего состояния здоровья, дающие возможность персоналу надлежащим образом выполнять задачи по неразрушающему контролю.

Независимый орган по сертификации – орган, отвечающий требованиям стандарта EN 45013 и осуществляющий сертификацию персонала по неразрушающему контролю.

Уполномоченный орган – орган, независимый в какой-либо отдельной преобладающей деятельности, уполномоченный независимым органом по сертификации проводить подготовку экзаменов и осуществлять их, определяя уровень квалификации персонала в области неразрушающего контроля.

Уполномоченный орган может относиться к производственному сектору.

Экзаменационный центр – центр, утвержденный независимым органом по сертификации непосредственно или через уполномоченный орган, проводящий квалификационные экзамены.

Экзаменационный центр может размещаться на производственных площадях работодателя.

Экзаменатор – специалист, сертифицированный на III уровень квалификации и уполномоченный независимым органом по сертификации непосредственно или через уполномоченный орган проводить экзамены, наблюдать за ними и определять уровень квалификации в области неразрушающего контроля.

Рабочая характеристика – письменный документ, выдаваемый работодателем и содержащий оценку компетентности специалиста, указанную в сертификате. Дополнительно для сертификации могут быть оценены знания в специальной области, мастерство и состояние здоровья, необходимые для выполнения определенных видов работ.

Метод – дисциплина, использующая физический принцип неразрушающего контроля (ультразвуковой метод).

Предприятие (работодатель) – общество, частные или общественные организации, представляющие персоналу зарплату, пособие, содержание, гонорар или осуществляющие другие виды социальных услуг за проделанную работу.

Производственный сектор – определенная отрасль производства или технологии, использующая специализированные технические приемы неразрушающего контроля, требующие специальных знаний, мастерства, оборудования или подготовки, ориентированных на контролируемую продукцию. Термин "производственный сектор" может относиться как к продукции (сварные швы, отливки), так и к целой отрасли производства (авиационная, нефтехимическая ...).

Квалификационный экзамен – экзамен, демонстрирующий общие, специальные и практические знания и мастерство кандидата.

Экзамен проводится независимым органом по сертификации или уполномоченным органом.

Общий экзамен – экзамен, касающийся принципов метода неразрушающего контроля.

Специальный экзамен – экзамен, касающийся технических приемов контроля, применяемых в определенном производственном секторе, знаний подвергаемых контролю продукции, а также стандартов, норм, технических условий и критериев приемки.

Практический экзамен – экзамен на мастерство, демонстрирующий знания необходимого контрольного оборудования и умение работать с ним для осуществления контроля определенных образцов, регистрации и анализа итоговой информации кандидата на I-й и II-й уровни, а также умение составлять проект методик проведения неразрушающего контроля по одному или нескольким методам для кандидата на III-й уровень.

Базовый экзамен – экзамен, демонстрирующий знания материаловедения и технологии применительно к области деятельности кандидата на III-й уровень настоящей системы квалификации и сертификации, а также основных принципов методов неразрушающего контроля для кандидата на II-й уровень.

Экзамен по основному методу – экзамен, демонстрирующий общие и специальные знания кандидата на III-й уровень по основному методу неразрушающего контроля, умение письменного изложения методики неразрушающего контроля.

Производственный стаж – опыт в применении метода неразрушающего контроля, ведущий к требуемому мастерству и знаниям.

Глава 5.2
ОСОБЕННОСТИ СЕРТИФИКАЦИИ СИСТЕМ МЕНЕДЖМЕНТА КАЧЕСТВА ПО ТРЕБОВАНИЯМ СТАНДАРТА ИСО 9001 ВЕРСИИ 2000 г.

В стандартах ИСО 9000 версии 2000 г. предлагается единая модель системы менеджмента качества, она изложена в стандарте ИСО 9001:2000. Требования к системам менеджмента качества содержатся в разделах 1–8. Они являются общими и запланированы для применения во всех организациях, независимо от их вида, размера и выпускаемой продукции или оказываемой услуги. Там же, где какие-либо требования

ИСО 9001:2000 ввиду особенностей организации и ее продукции не могут быть применены, их можно исключить. Но следует иметь в виду, что исключать можно только те требования, которые изложены в разделе 7 "Процессы жизненного цикла продукции", и только в случае, если они не влияют на способность организации выпускать продукцию, отвечающую требованиям потребителей и соответствующим регламентам.

Особенности стандарта ИСО 9001:2000 определяют и особенности сертификации по его требованиям.

Исходным условием проверки на соответствие этому стандарту является **определение правомерности области его применения.** Для этого необходимо провести:

– первичный анализ заявки организации на соответствие области применения (при сомнении обязательны дополнительные запросы);

– анализ области применения на последующих стадиях;

– анализ обоснования области применения в Руководстве по качеству.

Следующий этап – **проверка системы менеджмента качества,** которую целесообразно начинать с оценки фундаментальных требований ИСО 9001:2000:

– постоянное улучшение системы;

– ориентация организации на удовлетворенность потребителей и фактическая удовлетворенность потребителей;

– процессный подход к менеджменту качества.

I. Требования постоянного улучшения системы менеджмента качества содержатся в следующих подразделах и пунктах ИСО 9001:2000:

4.1f. Организация должна ... принимать меры, необходимые для достижения запланированных результатов и постоянного улучшения процессов, необходимых для системы менеджмента качества;

5.3b. Высшее руководство должно обеспечивать, чтобы политика в области качества ... включала обязательство соответствовать требованиям и постоянно улучшать систему менеджмента качества;

5.5.2b. Представитель руководства должен иметь ответственность и полномочия, включающие ... представление отчетов высшему руководству о функционировании системы менеджмента качества и необходимости ее улучшения;

5.6.2d. Входные данные для анализ со стороны руководства должны включать информацию по ... статусу предупреждающих и корректирующих действий;

5.6.3. Выходные данные анализа со стороны руководства должны включать любые решения и действия, относящиеся к улучшению: а) системы менеджмента качества и ее процессов; б) продукции согласно требованиям потребителей;

6.1a. Организация должна определить и обеспечить ресурсами, необходимыми для внедрения и поддержания в рабочем состоянии системы менеджмента качества, а также постоянного повышения его эффективности;

8.1c. Организация должна спланировать, внедрять процессы контролирования, измерения, анализа и улучшения, необходимые, чтобы ... постоянно повышать эффективность системы менеджмента качества;

8.4. Организация должна установить, собрать и проанализировать соответствующие данные, чтобы продемонстрировать пригодность и эффективность системы менеджмента качества и оценить, где можно осуществить постоянное ее улучшение. Они должны включать данные, полученные в результате мониторинга и измерения и из других соответствующих источников;

8.5. Весь подраздел "Улучшение".

II. Фундаментальным требованием при проверке системы менеджмента качества является оценка **ориентации организации на удовлетворенность потребителей.** Требования к удовлетворенности потребителей и их "оттенки" содержатся в следующих подразделах и пунктах ИСО 9001:2000:

5.1a. Высшее руководство должно обеспечить ... доведение до сведения организации важность выполнения требований потребителей ...;

5.2. Высшее руководство должно обеспечить, чтобы требования потребителей были установлены и выполнены ...;

5.5.2c. Представитель руководства должен иметь ответственность и полномочия, включающие ... обеспечение осознания требований потребителей во всей организации;

5.6.2b. Входные данные для анализа со стороны руководства должны включать информацию по ... обратной связи от потребителей;

5.6.3b. Выходные данные для анализа со стороны руководства должны включать любые решения и действия по ... улучшению продукции согласно требованиям потребителей;

6.1b. Организация должна определить и обеспечить ресурсами, необходимыми для ... повышения удовлетворенности потребителей посредством выполнения их требований;

7.2. Весь раздел "Процессы, связанные с потребителями";

8.2.1. Организация должна держать под контролем информацию, касающуюся восприятия потребителями соответствия организации требованиям потребителей как одного из измерений показателя функционирования системы менеджмента качества ...;

8.4. Анализ данных должен обеспечить информацию, касающуюся: а) удовлетворенности потребителей, b) соответствия требованиям к продукции, с) характеристик и тенденций процессов и продукции ..., d) поставщиков;

8.5.2a. Должна быть разработана документированная процедура для определения требований к ... анализу несоответствий (включая жалобы потребителей).

III. Следующее фундаментальное требование при проверке системы менеджмента системы качества – оценка **процессорного подхода к менеджменту качества.** После проверки выполнения фундаментальных требований целесообразно приступить к анализу документации и управления ею.

Согласно пункту 4.2.1 стандарта ИСО 9001:2000, документация системы менеджмента качества должна включать:

a) документально оформленные заявления о политике и целях в области качества;

b) руководство по качеству;

c) документирование процедуры (термин "документированная процедура" означает разработанную, документально оформленную, внедренную и поддерживаемую в рабочем состоянии процедуру);

d) документы, необходимые организации для обеспечения эффективного планирования, работы и управления ее процессами;

e) записи о качестве.

В ИСО 9001:2000 предусмотрены следующие **обязательные документированные процедуры:**

управление документацией;

управление записями о качестве;

внутренние аудиты (проверки);

управление несоответствующей продукцией;

корректирующие действия;

предупреждающие действия.

В пункте 4.2.1d упомянуты документы, необходимые организации для обеспечения эффективной деятельности. Это могут быть технологические регламенты, схемы процессов, организационные структуры, утвержденные перечни поставщиков, планы по качеству и т.д.

Далее необходимо проверить выполнение требований по управлению документацией и записями о качестве.

Ниже перечислены **элементы системы менеджмента качества,** по которым, согласно требованиям ИСО 9001:2000, **следует вести записи о качестве:**

анализ со стороны руководства;

компетентность, осведомленность и подготовка;

планирование процессов жизненного цикла продукции;

анализ требований, относящихся к продукции;

входные данные для проектирования и разработки;

анализ проекта и разработки;

верификация (см. с. 439) проекта и разработки;

валидация (см. с. 439) проекта и разработки;

управление изменениями проекта и разработки;

процесс закупок;

валидация процессов производства и обслуживания;

идентификация и прослеживаемость;

собственность потребителей;

управление контрольными и измерительными приборами;

внутренние аудиты (проверки);

контролирование и измерение продукции;

управление несоответствующей продукцией;

корректирующие действия;

предупреждающие действия.

Далее следует проверить полноту выполнения всего комплекса требований, содержащихся в разделах 5, 6, 7 и 8, а также в документах системы менеджмента качества организации.

Заключительным этапом является анализ и классификация наблюдений (несоответствия по категориям, уведомления). Здесь возникает проблема, связанная с присвоением категории несоответствию, относящемуся целиком к макропроцессу.

Глава 5.3
ОБЩИЕ ТРЕБОВАНИЯ К КОМПЕТЕНТНОСТИ ИСПЫТАТЕЛЬНЫХ И КАЛИБРОВОЧНЫХ ЛАБОРАТОРИЙ

Первичным звеном системы сертификации продукции являются независимые испытательные лаборатории. Наиболее полно требования, предъявляемые к лабораториям, сформулированы в стандарте ГОСТ Р ИСО/МЭК 17025–2000.

Требования к управлению

Организация

1. Лаборатория или организация, в состав которой она входит, должна являться самостоятельной правовой единицей с юридической* ответственностью.
2. В обязанности лаборатории входит проведение испытаний и калибровок таким образом, чтобы выполнялись требования настоящего стандарта и удовлетворялись потребности клиента, органов законодательной власти или организаций, осуществляющих официальное признание.
3. Лаборатория должна:

a) располагать руководящим и техническим персоналом, имеющим полномочия и ресурсы, необходимые для выполнения своих обязанностей и выявления случаев отступлений от системы качества или процедур проведения испытаний и/или калибровок, а также для возбуждения действий по предупреждению или сокращению таких отступлений;

b) принимать меры, обеспечивающие свободу руководства и сотрудников от любого неподобающего внутреннего и внешнего коммерческого, финансового или другого давления и влияния, которое может оказывать отрицательное воздействие на качество их работы;

c) определять политику и процедуры, позволяющие обеспечить защиту конфиденциальности информации и прав собственности ее клиентов, включая процедуры защиты электронного хранения и передачи результатов;

d) определять политику и процедуры, позволяющие избежать вовлечения в деятельность, которая снизила бы доверие к ее компетентности, беспристрастности суждений или честности в ее деятельности;

---

* В Российской Федерации испытательные и калибровочные лаборатории должны быть стабильными в финансовом отношении и иметь ресурсы, необходимые для деятельности в системе сертификации.

e) определять организационную и управленческую структуру лаборатории, ее место в вышестоящей организации и взаимосвязи между управлением качеством, технической деятельностью и вспомогательными службами;

f) устанавливать ответственность, полномочия и взаимоотношения всех сотрудников, занятых в управлении, выполнении или проверке работ, влияющих на качество испытаний и/или калибровок;

g) обеспечивать контроль сотрудников, проводящих испытания и калибровки, включая стажеров, со стороны лиц, знакомых с методами и процедурами, целью каждого испытания и/или калибровки, а также с оценкой результатов испытания или калибровки;

h) иметь техническую администрацию, несущую ответственность за техническую деятельность и предоставление необходимых ресурсов для обеспечения требуемого качества работы лаборатории.

Система качества

1. Лаборатория должна установить, внедрить и поддерживать систему качества в соответствии с областью ее деятельности. Лаборатория должна документально оформить свою политику, системы, программы, процедуры и инструкции в объеме, необходимом для обеспечения качества результатов испытаний и/или калибровок. Документация системы должна быть доведена до сведения соответствующего персонала, им понята, доступна и выполняться.

2. Политика и задачи системы качества лаборатории должны быть установлены в руководстве по качеству (как бы оно ни называлось). Общие задачи должны быть установлены в *заявлении о политике в области качества*. Заявление о политике в области качества должно быть подготовлено под руководством главного исполнительного лица. Оно должно включать, как минимум, следующее:

a) обязательство руководства лаборатории соблюдать установившуюся профессиональную практику и сохранять высокое качество испытаний и калибровок при обслуживании клиентов;

b) заявление руководства об уровне обслуживания, осуществляемого лабораторией;

c) задачи, стоящие перед системой качества;

d) требование ко всем сотрудникам лаборатории, участвующим в проведении испытаний и калибровок, ознакомиться с документацией системы качества и следовать в своей деятельности установленной политике и процедурам;

e) обязательство руководства лаборатории действовать в соответствии с настоящим стандартом.

3. Руководство по качеству должно включать или иметь ссылки на вспомогательные процедуры, включая технические процедуры. В нем должно быть дано описание структуры документации, используемой в системе качества.

4. Функции и ответственность технического руководящего персонала и управляющего по качеству, включая их ответственность по обеспечению соответствия настоящему стандарту, должны быть определены в руководстве по качеству.

Управление документацией

Лаборатория должна установить и поддерживать процедуры управления всеми документами, являющимися частью системы качества (разработанными в рамках лаборатории или поступившие извне) такими, как регламенты, стандарты, другие нормативные документы, методы испытаний и/или калибровок, а также чертежи, программное обеспечение, технические условия, инструкции и руководства.

Анализ запросов, заявок на подряд и контрактов

Лаборатория должна установить и поддерживать процедуры анализа запросов, заявок на подряд и контрактов. Политика и процедуры анализа, ведущего к заключению контракта на испытания и/или калибровки, должны гарантировать, что:

a) требования, включая используемые методы, адекватно определены и задокументированы;

b) лаборатория имеет возможности и ресурсы, позволяющие выполнять требования;

c) выбран соответствующий метод испытаний и/или калибровки, способный удовлетворять требования клиентов. Любые различия между запросом или заявкой на подряд и контрактом должны быть устранены до начала работ.

Претензии

В лаборатории должна быть предусмотрена политика и процедуры по разрешению претензий со стороны клиентов или других сторон. Необходимо хранить регистрационные данные по всем рекламациям, расследованиям, а также корректирующим действиям, предпринятым лабораторией.

Технические требования

Персонал

1. Руководство лабораторией гарантирует компетентность всех, кто работает со специальным оборудованием, проводит испытания и/или калибровки, оценивает результаты и подписывает отчеты об испытаниях и сертификаты калибровок. За стажерами должен быть обеспечен соответствующий надзор. Специфические задачи должны поручаться персоналу с учетом соответствующего образования, подготовки, опыта и/или проявляемого мастерства.

2. Руководство лаборатории должно сформулировать цели образования, подготовки и мастерства персонала лаборатории. У лаборатории должна быть политика и процедуры выявления потребностей в подготовке и осуществлении подготовки персонала. Программа подготовки должна соответствовать имеющимся и предстоящим задачам лаборатории.

Помещения и условия окружающей среды

Условия проведения испытаний и/или калибровок, включая (но не ограничиваясь этим) источники энергии, освещение и окружающую среду, должны содействовать правильному проведению испытаний и/или калибровок.

Методы испытаний и калибровок, а также оценки пригодности методов

Лаборатория должна использовать методы и процедуры, соответствующие области ее деятельности. Они включают отбор образцов, обращение с ними, транспортирование, хранение и подготовку изделий, подлежащих испытаниям, и, если уместно, оценку неопределенностей измерений, а также статистические методы анализа данных испытаний.

В лаборатории должны быть инструкции по использованию и управлению всем соответствующим оборудованием и обращению и подготовке изделий, подлежащих испытаниям и/или калибровке, или по тому и другому в тех случаях, когда отсутствие таких инструкций может подвергнуть сомнению результаты испытаний и/или калибровок. Все инструкции, стандарты, руководства и ссылочные данные, относящиеся к работе лаборатории, должны актуализироваться и быть доступными для персонала. Отклонение от методов испытаний допускается только при условии их документального оформления, технического обоснования, разрешения и согласия клиента.

Оборудование

1. Лаборатория должна располагать оборудованием всех видов для отбора образцов, измерений и испытаний, требуемым для правильного проведения испытаний и/или калибровок (включая отбор проб, подготовку изделий, подлежащих испытаниям и/или калибровке, обработку и анализ данных испытаний и/или калибровок). В случаях, когда лаборатория нуждается в использовании оборудования, находящегося вне ее постоянного контроля, она должна удостовериться, что требования настоящего стандарта выполняются.

2. Оборудование и его программное обеспечение, используемые для проведения испытаний, калибровок и отбора образцов, должны быть способны достигнуть требуемой точности и соответствовать техническим требованиям, относящимся к проводимым испытаниям и/или калибровкам. Программы калибровок должны быть разработаны для основных параметров или характеристик инструментов, если эти характеристики оказывают значительное влияние на результаты. До его ввода в эксплуатацию оборудование (включая оборудование, используемое для отбора образцов) должно быть калибровано или проверено на предмет установления его соответствия техническим требованиям, действующим в лаборатории, и соответствующим стандартам. Оно должно быть проверено и/или калибровано до его использования.

Обеспечение качества результатов испытаний и калибровок

Лаборатория должна располагать процедурами управления качеством с тем, чтобы контролировать достоверность проведенных испытаний и калибровок. Результаты должны регистрироваться с целью выявления тенденции и там, где это возможно, применяться статистические методы для анализа результатов. Этот контроль должен планироваться, анализироваться и может включать, но не ограничивать этим, следующее:

a) регулярное использование сертифицированных эталонных материалов и/или внутреннее управление качеством с использованием вторичных эталонных материалов;

b) участие в межлабораторных сравнениях или программах проверки квалификации;

c) дублирование испытаний или калибровок с использованием тех же или других методов;

d) повторное испытание или повторная калибровка сохраняемых объектов;

e) корреляция результатов на разные характеристики изделия.

Отчетность о результатах

1. Общие положения.

Результаты каждого испытания, калибровки или серии испытаний или калибровок, проведенных лабораторией, должны быть обобщены точно, четко, недвусмысленно и объективно и в соответствии со всеми специальными инструкциями, содержащимися в методах проведения испытания или калибровки.

В случае если испытания или калибровки проводятся для внутренних клиентов или при наличии письменного соглашения с клиентом, то необходима защита целостности испытуемого и/или поверяемого изделия и защита интересов лаборатории и клиента.

2. Отчеты об испытании и сертификаты о калибровке.

Каждый отчет об испытании или свидетельство о калибровке должны содержать, по крайней мере, следующую информацию:

a) наименование документа: "Отчет об испытании" или "Сертификат о калибровке";

b) наименование и адрес лаборатории, а также место проведения испытаний и/или калибровок, если оно не находится по адресу лаборатории;

c) уникальную идентификацию отчета об испытании или сертификата о калибровке (например, серийный номер), а также идентификацию на каждой странице с тем, чтобы обеспечить признание страницы как части отчета об испытании или сертификата о калибровке и, кроме того, четкую идентификацию конца отчета об испытании или сертификата о калибровке;

d) наименование и адрес клиента;

e) идентификацию используемого метода;

f) описание, состояние и недвусмысленную идентификацию изделия(й), прошедшего(их) испытания или калибровку;

g) дату получения изделия(й), подлежащего(их) испытаниям или калибровке, если это существенно для достоверности и применения результатов, а также дату(ы) проведения испытаний или калибровок;

h) ссылку на план и методы отбора образцов, используемые лабораторией или другими органами, если они имеют отношение к достоверности и применению результатов;

i) результаты испытаний или калибровок с указанием (при необходимости) единиц измерений;

j) имя, должность и подпись или эквивалентную идентификацию лица (лиц), утвердившего(их) отчет об испытаниях или сертификат о калибровке;

k) при необходимости, указание на то, что результаты относятся только к изделиям, прошедшим испытания или калибровку.

Глава 5.4
АККРЕДИТАЦИЯ И АТТЕСТАЦИЯ В СИСТЕМЕ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ГОСГОРТЕХНАДЗОРА РОССИИ

В последние годы возрастает значение неразрушающего контроля при изготовлении, монтаже и ремонте опасных производственных объектов, особенно при проведении технического диагностирования объектов, отработавших срок службы.

Управление Системой НК основано на аттестации:

– персонала в области неразрушающего контроля по квалификации, полноте и качеству выполнения контрольных работ;

– лабораторий неразрушающего контроля;

– методической документации по неразрушающему контролю, экспертизе полноты и достаточности методик неразрушающего контроля;

– средств неразрушающего контроля.

Принципиальная и организационная **схема управления Системой НК**, включает:

– Госгортехнадзор России и его территориальные органы;

– Систему экспертизы промышленной безопасности Госгортехнадзора России;

– Управляющий совет по неразрушающему контролю;

– Совет экспертов;

– Подсистему аттестации персонала в области неразрушающего контроля;

– Подсистему аттестации лабораторий неразрушающего контроля;

– Подсистему аттестации методических документов по неразрушающему контролю;

– Подсистему аттестации средств неразрушающего контроля;

– Независимые органы по аттестации персонала в области неразрушающего контроля;

– Независимые органы по аттестации лабораторий неразрушающего контроля;

– Независимые органы по аттестации методических документов по неразрушающему контролю;

– Независимые органы по аттестации средств неразрушающего контроля.

Исходя из своих полномочий, Госгортехнадзор России в рамках управления Системой НК осуществляет следующие функции:

– организует программные исследования в области развития неразрушающих методов контроля;

– разрабатывает и реализует организационные и технические мероприятия, направленные на повышение промышленной безопасности подконтрольных Госгортехнадзору России объектов, с широким использованием методов неразрушающего контроля;

– выдает разрешения и лицензии на отдельные виды деятельности, в том числе на деятельность, связанную с использованием неразрушающего контроля;

– осуществляет гармонизацию правил и норм, требований и процедур, применяемых при проведении аттестации в области неразрушающего контроля;

– оценивает эффективность управления Системой НК.

Основными функциями Управляющего совета по неразрушающему контролю являются:

– разработка основных принципов развития и управления Системы НК;

– принятие совместно с Комиссией по аккредитации решения о возможности приостановки, отмены или отказа в добровольной аккредитации по результатам проверки Независимых органов по аттестации в области неразрушающего контроля (далее Органов по аттестации) Координирующим органом Системы экспертизы промышленной безопасности:

– внесение в Госгортехнадзор России предложений о принятии или переработке документов по неразрушающему контролю;

– формирование Совета экспертов;

– рассмотрение единых требований по организации и условиям функционирования Органов по аттестации;

– оказание консультативной помощи по общим вопросам аттестации в Системе НК;

– выработка предложений по совершенствованию деятельности в Системе НК для рассмотрения на Наблюдательном совете Системы экспертизы промышленной безопасности.

Члены Управляющего совета принимают участие в проведении проверок для целей аккредитации и инспекционных проверок аккредитованных Органов по аттестации.

Состав Управляющего совета по неразрушающему контролю формируется из:

– представителей Госгортехнадзора России;

– представителей Координирующего органа Системы экспертизы промышленной безопасности;

– представителей высшей школы, промышленных организаций, научно-исследовательских институтов, научно-технических обществ, осуществляющих деятельность в области обеспечения промышленной безопасности;

– специалистов II–III уровней квалификации по различным методам неразрушающего контроля;

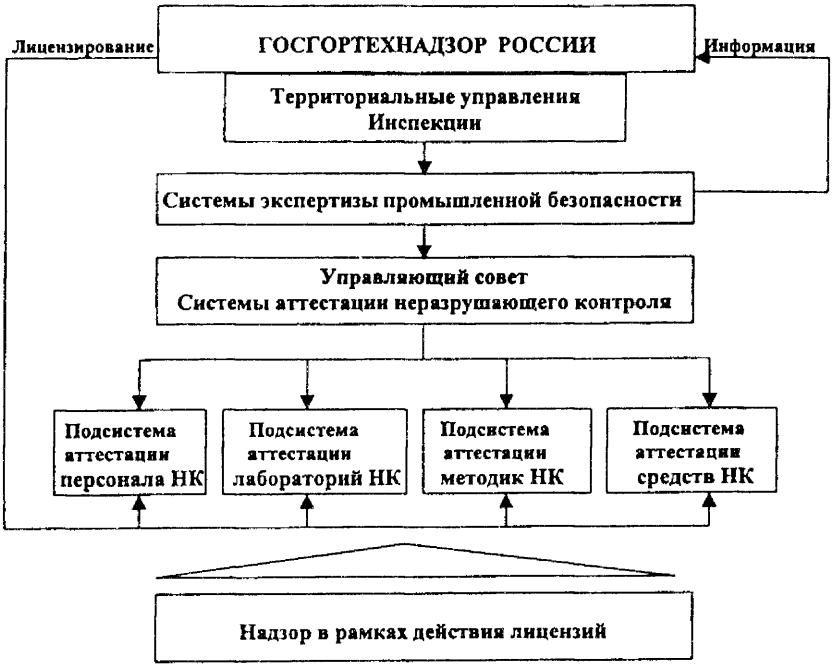
– представителей Органов по аттестации.

Состав и председатель Управляющего совета по неразрушающему контролю утверждается Наблюдательным советом Системы экспертизы промышленной безопасности.

Деятельность Управляющего совета по неразрушающему контролю определяется Положением о нем, утверждаемым Наблюдательным советом.

Совет экспертов состоит из высококвалифицированных специалистов в области неразрушающего контроля.

Организационная схема управления Системой неразрушающего контроля



Состав Совета экспертов формируется Управляющим советом по неразрушающему контролю по представлению Органов по аттестации.

Совет экспертов состоит из подкомиссий по различным методам неразрушающего контроля.

Основные функции Совета экспертов:

– анализ достаточности действующей нормативной и нормативно-технической документации и оборудования по неразрушающему контролю;

– разработка рекомендаций по готовности к представлению на утверждение организационно-методических, нормативных, технических, руководящих документов по неразрушающему контролю;

– разработка рекомендаций по развитию Системы НК;

– составление заключений по методическим, нормативным, техническим и руководящим документам по неразрушающему контролю и направление их в Управляющий совет по неразрушающему контролю;

– обсуждение и выработка рекомендаций по вопросам организации и проведения работ по неразрушающему контролю;

– участие в работе по аттестации.

Органы по аттестации в области неразрушающего контроля в своей деятельности руководствуются следующими основными целями:

– создание условий для обеспечения достоверности, воспроизводимости и сопоставимости результатов неразрушающего контроля;

– взаимное признание результатов контроля и аттестации;

– гармонизация правил и процедур аттестации с рекомендациями международных организаций.

Аттестация доступна любым организациям, признающим ее правила, процедуры и осуществляющим деятельность в области неразрушающего контроля.

Глава 5.5
СЕРТИФИКАЦИЯ ПЕРСОНАЛА

Центральным звеном Системы сертификации персонала являются независимые органы по сертификации. Требования, предъявляемые к таким органам, наиболее полно сформулированы в европейском стандарте EN 45013.

Общие требования. Все лица, интересующиеся вопросами сертификации, должны иметь доступ к услугам органа по сертификации. При этом исключаются необоснованные финансовые или другие неправомерные ограничения. Однако орган по сертификации персонала может поставить условие, обязывающее служащих регулярно заниматься деятельностью, для которой они были сертифицированы, и постоянно повышать свою квалификацию.

Процедуры, согласно которым действует орган, не должны быть дискриминирующими.

Административная структура. Орган по сертификации должен быть объективным и действовать

а) структурой, позволяющей выбирать членов Управляющего совета с учетом равноправного включения в него представителей всех заинтересованных сторон. Эта структура должна обеспечивать объективность и возможность участия всех заинтересованных сторон в функционировании системы сертификации;

б) постоянным персоналом, за который несет ответственность руководитель перед Управляющим советом, отвечающим за выполнение текущей работы, причем должно быть исключено воздействие за персонал со стороны лиц, имеющих непосредственный коммерческий интерес к деятельности органа.

Область деятельности Управляющего совета. Управляющий совет несет ответственность за проведение сертификации.

Его задачи среди прочих включают:

а) формирование политики, определяющей деятельность органа по сертификации;

б) контроль за реализацией политики;

в) контроль за финансами органа по ее сертификации;

г) в случае необходимости, создание комитетов для выполнения определенных задач.

Организационная структура. Орган по сертификации должен иметь и представлять по требованию:

а) организационную схему, четко показывающую распределение ответственности и иерархическую структуру органа, в частности, – четкую связь между функциями по оценке и сертификации;

б) сведения об источниках финансирования органа;

в) документацию своей внутренней системы качества, включая правила и процедуры по сертификации;

г) документацию, определяющую его юридический статус.

Персонал органа по сертификации должен иметь необходимую компетентность для выполнения своих функций. Орган по сертификации должен располагать информацией в письменном виде о квалификации, подготовке и профессиональном опыте каждого сотрудника.

Информация об уровне подготовки и профессиональном опыте сотрудников должна постоянно актуализироваться.

Персонал должен располагать четкими инструкциями в письменном виде, касающимися их обязанностей и ответственности. Эти инструкции должны постоянно актуализироваться.

Если работы выполняются субподрядчиком, орган по сертификации должен обеспечить, чтобы персонал, ответственный за выполнение работ по субподряду, отвечал требованиям, приведенным выше.

Документация и внесение изменений в нее. Орган по сертификации должен иметь в своем распоряжении систему управления всей документации, а также должен обеспечивать:

а) изучение соответствующей документации по всем необходимым вопросам;

б) правильность внесения изменений и дополнений в документы;

в) своевременное изъятие из органа и его филиалов устаревших документов;

г) оповещение сертификационных лиц и других пользователей, участвующих в программе по сертификации, об изменениях в документах через почтовые отправления или путем периодических публикаций.

Регистрация. Орган по сертификации должен иметь систему регистрации, отвечающую установленным требованиям в рамках его деятельности. Регистрационные записи должны содержать данные о том, как осуществлялась каждая процедура сертификации. Все зарегистрированные записи должны храниться в течение установленного срока при соблюдении конфиденциальности по отношению к интересам заявителя и с учетом требований законодательства.

Примечание. Вопрос о продолжительности хранения зарегистрированных данных требует особого внимания, при этом необходимо соблюдение законодательных положений и соглашений о признании.

Процедуры сертификации и контроля. Орган по сертификации должен располагать необходимыми средствами и документированными процедурами, позволяющими проводить сертификацию персонала на соответствие критериям, установленным для данной деятельности.

Орган по сертификации должен постоянно осуществлять контроль за сертификационным персоналом.

Средства, необходимые для проведения сертификации и контроля. Орган по сертификации должен располагать квалифицированными специалистами и соответствующей организацией дела для желающих пройти сертификацию и постоянного подтверждения соответствия уже сертифицированных лиц опубликованным правилам и методам деятельности органа по сертификации. Это не исключает, в случае необходимости, использование возможностей других организаций.

Если оценка или контроль осуществляется по поручению органа по сертификации другой организацией, орган по сертификации должен удостоверяться в том, что упомянутая организация соответствует требованиям предыдущего раздела, о чем необходимо оформить надлежащее соглашение, включая вопрос о конфиденциальности.

Руководство по качеству. Орган по сертификации должен иметь Руководство по качеству и документированные процедуры, определяющие, какими способами обеспечивается выполнение критериев соответствия.

Информация, по меньшей мере, должна включать:

а) изложение политики в области качества;

б) краткое описание юридического статуса органа по сертификации;

в) информацию об организации органа по сертификации, включая подробные данные об Управляющем совете, его составе, полномочиях, правилах выполнения процедур;

г) фамилию, данные о квалификации, опыте, полномочиях руководителя и сотрудников, занимаю-

щихся сертификацией персонала в рамках органа по сертификации и привлекаемых извне;

д) описание системы обучения и повышения квалификации персонала, занимающегося сертификацией;

е) организационную структуру, отражающую иерархическое строение, распределение ответственности и обязанностей сотрудников, начиная с руководителя высшего звена;

ж) подробное изложение документированных процедур, применяемых для оценки заявителей;

з) подробное изложение документированных процедур, применяемых для контроля соответствия сертификационного персонала, установленным требованиям;

и) перечень субподрядчика и подробное изложение документированных процедур, применяемых для проверки и оценки их компетентности;

к) подробное изложение процедур апелляции.

Конфиденциальность. Орган по сертификации должен принять соответствующие меры, обеспечивающие конфиденциальность информации, собранной в ходе сертификации на всех уровнях его деятельности, включая комитеты.

Публикации. Орган по сертификации должен вести перечень сертифицированных сотрудников, который должен быть доступен общественности, с указанием области сертификации для каждого сотрудника.

Перечисленные выше общие требования к органам, проводящим сертификацию соответствия персонала, могут быть дополнены при использовании их в разных конкретных сферах. При этом сертификация персонала всегда соответствует конкретному стандарту или другому специальному нормативному документу, а требования по использованию сертифицированного персонала должны быть установлены в стандартах на продукцию, инструкциях, правилах или технических условиях.

Так, **вопросы подготовки и сертификации специалистов в области НК отражены в нормативной документации многих стран.** Ниже дана краткая характеристика некоторых из этих норм.

Важнейшие национальные и международные нормы по сертификации персонала в области НК, например американские (согласно инструкции SNT-TC-1A), европейские (по евростандарту EN 473); российские (по правилам сертификации специалистов НК, утвержденным Госгортехнадзором России – ГР, действующие только в рамках этого органа), северных стран (Швеция, Норвегия, Дания, Финляндия) по системе NORDTEST, определяют квалификацию специалистов с помощью пяти признаков: профессиональное обучение, практический опыт работы в области НК, физическая пригодность, прохождение курса обучения и сдача экзамена и квалифицируют персонал по трем уровням, из которых третий является высшим.

Для каждого из признаков устанавливаются минимальные требования, например, по продолжительности практической работы в конкретном виде НК (табл. 5.1) и сроку обучения (табл. 5.2), минимальному числу вопросов на квалификационном экзамене (табл. 5.3–5.5) и минимальному результату, который необходимо достичь на экзамене.

Если специалист сдал все экзамены, то он может рассчитывать на подтверждение достигнутой квалификации. Подтверждение квалификации называют сертификацией, соответствующее свидетельство – сертификатором, а орган, осуществляющий сертификацию – сертифицирующим органом (инстанцией).

Все важнейшие нормы разных стран по квалификации персонала почти совпадают по признакам сертификации, но расходятся в определении сертифицирующей инстанции.

Американские нормы, согласно инструкции SNT-TC-1A, определяют для лица (кандидата), подлежащего сертификации, предприятие (работодателя) в качестве сертифицирующей инстанции. Европейские нормы EN 473, NORDTEST, ГР и международный стандарт ИСО 9712 в качестве

5.1. Минимальные требования к продолжительности практической работы (в месяцах) в конкретном виде НК

Вид контроля	Международное обозначение	SNT-TC-1A	EN 473	ГР
Вихретоковый	ET	1/9	3/9	3/9
Капиллярный	PT	1/2	1/3	3/6
Магнитопорошковый	MT	1/3	1/3	3/6
Радиационный	RT	3/9	3/9	6/12
Ультразвуковой	UT	3/9	3/9	6/12
Течеискание	LT	1/2	2/6	3/9
Акустико-эмиссионный	AE	3/9	6/12	–
Визуальный	VT	1/2	1/3	–

Примечание. Числитель дроби – уровень I, знаменатель – уровень II.

5.2. Минимальные требования к специалистам по срокам обучения (в часах)

Вид контроля	SNT-TC-1A	EN 473
ET	24/40	40/40
PT	12/16	16/24
MT	24/16	16/24
RT	88/16	40/80
UT	40/80	40/80
LT	40/24	40/80
AE	32/40	40/64
VT	8/16	16/24

Примечания: 1. Числитель дроби – уровень I, знаменатель – уровень II.

2. Программа обучения должна соответствовать требованиям работодателя и независимого сертификационного органа.

сертифицирующей инстанции определяют внепроизводственный сертифицирующий орган. Сертификация предприятием имеет наибольшее распространение в мире, она осуществляется по контрактам между изготовителем и заказчиком в таких отраслях промышленности, как авиационная, машиностроительная и т.п. Это обусловлено следующими причинами:

1. Американские нормы по инструкциям SNT-TC-1A и MIL-Standart были сформулированы в конце 60-х годов, в то время как нормы внепроизводственной сертификации были разработаны лишь в начале 80-х годов.

2. Предприятиям, у которых заказчик требует сертификат на персонал, проще и дешевле осуществить сертификацию непосредственно на своем предприятии.

3. Сертификация на предприятии тесно связана с практической работой специалиста на конкретном рабочем месте. Например, если просвечивание объектов контроля осуществляется на предприятии только с использованием рентгеновской техники, нет необходимости обучать персонал работе с гамма-дефектоскопами.

5.3. Минимальное число вопросов на экзаменах

Вид контроля	SNT-TC-1A	EN 473	ГР
Общий экзамен			
ET	40/40	40/40	20/20
PT	30/30	30/30	20/20
MT	30/30	30/30	20/20
RT	40/40	40/40	20/20
UT	40/40	40/40	20/20
LT	30/30	30/30	20/20
AE	40/40	40/40	–
VT	30/30	30/30	–
Специальный экзамен			
ET	20/20	20/20	10/10
PT	20/15	20/20	10/10
MT	20/15	20/15	10/10
RT	20/20	20/20	10/10
UT	20/20	20/20	10/10
LT	20/20	20/20	10/10
AE	20/20	20/20	–
VT	20/20	20/20	–

Примечание. Числитель дроби – уровень I, знаменатель – уровень II.

5.4. Требуемое минимальное число вопросов по базовым знаниям

Часть	Тема	Число вопросов
A_1	Технические знания по материаловедению и технологии	25
A_2	Знания Системы квалификации и сертификации сертифицирующего органа, основанной на данном стандарте. На этом экзамене допустимо пользоваться вспомогательными материалами	10
B	Общие знания по меньшей мере четырех методов, как это требуется для уровня II, по выбору претендента из перечисленных в табл. 5.1. Среди этих четырех методов должен иметься основной метод, по которому претендент стремится быть сертифицируемым, а три остальных должны включать по меньшей мере один из методов – ультразвуковой или радиографический	15 для каждого метода (в сумме 60)

5.5. Требуемое минимальное число вопросов по основному методу

Часть	Тема	Число вопросов
C_1	Знания по уровню III по выбранному методу контроля	30
C_2	Применение метода неразрушающего контроля по соответствующему промышленному сектору, включая используемые стандарты, нормы и технические условия. На этом экзамене допустимо использовать такие вспомогательные материалы, как стандарты, нормы и технические условия	20
C_3	Проект описания одного или нескольких методов неразрушающего контроля по соответствующему промышленному сектору. Применяемые нормы, стандарты и технические условия должны быть в распоряжении претендента	–

К предприятию (работодателю) как к сертифицирующей инстанции по инструкции SNT-TC-1A предъявляются два важных требования. Оно должно письменно изложить свою программу сертификации (written practice), располагать персоналом для проведения сертификации, т.е. иметь по крайней мере одного экзаменатора с уровнем квалификации III.

Сертификация работодателем представляет ему большие свободы при сертификации, что, естественно, приводит к злоупотреблениям, которые с трудом можно установить лишь при внешних проверках. Исследования Американского общества по НК показали, что фальсификация времени работы специалиста в НК и времени его обучения происходит в основном на небольших предприятиях. При этом очень часто контрольные вопросы известны экзаменующимся до проведения квалификационного экзамена.

В конце 70-х годов в США стали считать целесообразным проводить сертификацию специалистов III уровня вне предприятий. Комбинация централизованно сертифицированного уровня III с производственно сертифицируемыми уровнями I и II была зафиксирована в 1989 г. в национальном американском стандарте ANSI CP-189.

С середины 80-х годов разрабатывался международный стандарт, в котором сертификация всех степеней квалификации делегировалась внепроизводственной инстанции. Стандарт ИСО 9712, принятый в 1991 г., давал определение национальной сертифицирующей инстанции, не разъясненяя, как можно гарантировать ее объективность при сертификации специалистов. Поэтому он не был принят в качестве Евростандарта. Хотя новый Евростандарт EN 473 и включал большую часть ИСО 9712, он вместо определения "Национальная сертифицирующая инстанция" содержит определение "Независимая сертифицирующая инстанция" (независимый сертифицирующий орган).

Независимые сертифицирующие инстанции должны быть аккредитованы Национальным Советом (в Германии – это Германский Совет по Аккредитации – DAR) и им должны быть выданы свидетельства по аккредитации. Основой аккредитации является Евростандарт EN 45013. Независимость сертифицирующей инстанции проверяется Управленческим Советом, который на паритетных началах должен состоять из пользователей системы сертификации.

Только Управленческий Совет отвечает за политику сертифицирующей инстанции и контролирует ее финансы, что приводит в конечном итоге к независимости сертификационной инстанции при сертификации промышленного персонала.

Сертифицирующая инстанция, согласно Евростандарту, должна иметь руководителя и компетентный персонал для выполнения своих задач. Она должна описать собственную систему сертификации в своем стандарте (вместо written practice) и располагать документированной системой обеспечения качества, которая излагается в соответствующем руководстве.

Каждая инстанция, которая выполняет эти условия, может быть аккредитована, т.е. не существует национальной монополии на выдачу свидетельств по сертификации. В Германии, кроме Германского Общества Неразрушающего Контроля (DGZtP), существует еще и другая сертифицирующая инстанция – SECTOR Cert.

Хотя, согласно нормам EN 473, выдача сертификата осуществляется вне предприятия, работодатель не исключается из процесса сертификации. Чтобы выдать компетентное заключение, сертифицирующей инстанции приходится сотрудничать с работодателем, который должен дать подтверждение о профессиональной подготовке, опыте и физической пригодности кандидата. Сертификат, полученный вне предприятия, не дает права использовать специалиста на предприятии по соответствующему профилю, что имеет место при сертификации работодателем. Предприятие должно "специализировать" контролера для проведения им конкретного вида деятельности по НК. Для подобной специализации могут потребоваться последующие квалификационные мероприятия, если подтверждение сертифицирующей инстанции недостаточно для работодателя (специфичные виды продукции, техника проверки, аппаратура, требования клиента). Тем самым для европейского стандарта EN 473 характерно тесное сотрудничество между сертифицирующей инстанцией и работодателем.

По Евростандарту самой сертифицирующей инстанции в принципе нужно провести только завершающий процесс сертификации. Все остальные виды деятельности она может поручать другим инстанциям. Прямо или косвенно многие сертификационные мероприятия могут, таким образом, проводиться работодателем. Но если даже работодатель впоследствии оставляет в своих руках значительную долю деятельности по сертификации, сертифицирующая инстанция ответственна за все сертификационные мероприятия. Так, она должна убедиться в надлежащем выполнении делегированных предприятий, видов деятельности, вести всю документацию, выдавать сертификаты и разрешать деятельность этих инстанций (делегирование полномочий). Делегированные полномочия даются экзаменационным центрам и уполномоченным по приему экзаменов (экзаменаторам).

Сертифицирующая инстанция может учреждать экзаменационные центры на предприятиях, где имеются необходимые условия.

Путем аудита проверяется, существуют ли для проведения квалификационных экзаменов (и при необходимости обучения) следующие условия:

– квалифицированный персонал;

– соответствующие помещения и приборы;

– методика экзамена, экзаменационные вопросы и задания, которые признаны сертифицирующей инстанцией или исходят от нее;

– документация по сданным экзаменам.

При децентрализованной сертификации по инструкции SNT-TC-1A при наличии на предприятии специалиста III уровня квалификации он вправе принимать квалификационные экзамены по всем уровням и видам контроля, по которым он сам сертифицирован. Если работодатель имеет специалиста III уровня, то ему нет необходимости пользоваться сторонними услугами.

В рамках норм EN 473 это возможно только тогда, когда на предприятии создан экзаменационный центр и внешней сертифицирующей инстанцией делегировано право приема экзаменов с уровнем III. Последний имеет право принимать квалификационный экзамен только у тех лиц, которых он не готовил к экзамену, таким образом, обучение и экзамен должны быть строго разграничены. Кроме того, он вправе использовать только такие экзаменационные вопросы и задания, которые одобрены или составлены сертифицирующей инстанцией. При приеме экзаменов по уровням I и II требуется только один уполномоченный по приему экзаменов, при сдаче экзаменов по уровню III – по крайней мере два.

Нормы EN 473 практически не дают никакой информации о содержании обучения и экзаменов, а определяют в основном только такие факторы, как минимальные продолжительность обучения и количество экзаменационных вопросов и заданий. Эти минимальные требования соответствуют примерно требованиям квалификации специалистов по SNT-TC-1A (см. табл. 5.3).

Указанная в табл. 5.2 продолжительность обучения значительно ниже той, которая до недавнего времени предлагалась в европейских школах по НК. Это означает, что затраты на обучение могут быть значительно снижены и тем самым значительно снижены затраты промышленности на сертификацию, если этот новый стандарт ей подходит.

Второе преимущество стандарта EN 473 заключается в том, что он сохраняет существующие правила относительно производства и рабочего места сертифицируемого со стороны работодателя согласно SNT-TC-1A, относя сертификацию к определенным промышленным секторам. В соответствии с этим сертификаты по EN 473, как правило, действительны только для секторов промышленности, в рамках которых проводилось обучение и сдавался экзамен.

При введении промышленного сектора рекомендуется, чтобы сертифицирующие органы учитывали перечень секторов с обозначениями:

Секторы по продукции:

Отливки (c).

Поковки (f).

Сварные изделия (w).

Трубы, включая плоскую продукцию, из которой изготавливают трубы (t).

Прокат (wp).

Промышленные секторы:

Промышленные секторы содержат несколько секторов по продукции для всех или нескольких видов продукций или для особых материалов (например, железо и материал, не содержащий железа, неметаллический материал типа технической керамики, пластмассы и связующие материалы).

Производство металла и изготовление из него (содержит продукцию c, f, t, w и wp).

Вспомогательные устройства в оборудовании, сооружениях и строительстве (содержит продукцию c, f, t, w и wp).

Эксплуатация железных дорог (содержит продукцию f, t, wp и другие секторы по продукции).

Авиация и космические корабли (содержит продукцию c, f, w, t, wp и другие секторы по продукции).

При введении множественного сектора сертифицирующий орган должен точно описать в опубликованной документации, какая комбинация секторов из вышеприведенного перечня выбрана.

Лицо, сертифицированное по множественному сектору, должно рассматриваться как сертифицированное по отдельным секторам, из которых собран мультисектор.

Сертифицирование по множественному сектору должно происходить по всем трем уровням, и оно может быть ограничено особым методом контроля или уровнем.

В каждом случае в сертификате должна быть указана область, на которую распространяется сертификат.

Отнесенные к конкретным секторам промышленности национальные системы сертификации работают очень рационально, так как они позволяют:

– уменьшить срок обучения,

– сократить объем экзаменов,

– привязать сертификацию к нуждам предприятия,

– сочетаться с SNT-TC-1A.

Все международные сборники регламентирующих актов по квалификации персонала в области НК разделяют квалификационные экзамены на три вида: общие, специальные и практические. Поэтому обучение, и специальный, и практический экзамены можно проводить ограничено в рамках данного сектора промышленности.

Стандарт EN 473 содержит ряд усовершенствований для пользователей системы, т.е. для предприятий и лиц, которые должны пройти сертификацию.

Для экзаменов I-го и II-го уровней установлены *факторы важности,* благодаря которым практическая часть экзамена имеет *больший вес* в общем результате. Практическая часть (табл. 5.6) в соответствии с этим входит в общий результат с долей 50 %, т.е. имеет такое же значение, как и письменные части экзамена. Это дает значительное преимущество дефектоскопистам-практикам.

Если не выдержан квалификационный экзамен, то нет необходимости в его полной повторной сдаче. Специалист экзаменуется только по вопросам, где первоначально не был достигнут положительный результат.

Для специалистов I и II уровней не обязательно обновлять сертификат каждые три года, так как для специалистов всех уровней действителен пятилетний срок действия сертификата, по истечении которого следует пересертификация. Ниже даны сроки действия сертификатов (годы):

5.6. Темы и весовые коэффициенты для оценки. (Практический экзамен)

Часть	Тема	Весовой коэффициент, %	
		Уровень I	Уровень II
1	Знание оборудования, включая его работу и проверку калибровки оборудования	20	10
2	Применение метода неразрушающего контроля на экзаменационном образце. Он состоит из следующих шагов: a) для уровня II – выбор способа контроля и определения условий контроля; b) подготовка (состояние поверхности) и визуальный контроль экзаменационного образца; c) калибровка образца; d) выполнение контроля; e) завершение контроля	35	20
3	Обнаружение и протоколирование несплошностей, а также их характеристик; для уровня II (положения, ориентации, размера и типа) и оценка	45	56
4	Для уровня II составление инструкции по контролю для контролеров уровня I	–	15

Сроки действия сертификатов

Нормы	Уровень I или II	Уровень III
SNT-TC-1A	3	5
EN 473	5	5
ГР	3	5

Для повторной полной сертификации спустя 10 лет после сертификации необходима новая сдача экзамена, который может быть значительно сокращен по объему. Так, для специалистов I и II уровней достаточна сдача практического экзамена.

Ниже показаны нормы обновления сертификатов:

Нормы	1 период	2 период
SNT-TC-1A	E или R	E или R
EN 473	E	R
ГР	E	R

Примечания: 1. Под периодом подразумевается интервал времени в 3 или 5 лет.

2. Символом E обозначена пересертификация специалиста, т.е. обновление сертификата на основании только подтверждения деятельности в данном виде НК.

3. Символом R – повторная пересертификация, т.е. обновление сертификата на основании нового экзамена.

Сертификат в значительной степени защищен от подделки, так как он изготавливается в виде удостоверения с фотографией.

Сфера действия сертификата распространяется не только на вид НК и уровень квалификации, но и на сектор промышленности. При смене рабочего места в пределах сектора промышленности сертификат сохраняет свое действие. Если новое рабочее место находится в секторе промышленности вне сферы системы сертификата, необходима повторная сдача только специального и практического, но не общего экзамена.

При введении стандарта EN 473 определяется переходный период в 5 лет, в котором действуют следующие правила:

1) если до выхода стандарта персонал уже был сертифицирован независимой инстанцией, то эта сертификация действительна до срока своего истечения, но максимально не более 5 лет. Затем может последовать обновление (E или R);

2) если до ввода EN 473 персонал был сертифицирован на производстве, то производственная система сертификации должна быть подвергнута аудиту со стороны сертифицирующей инстанции. Если отчет по аудиту положителен, то может последовать пересертификация по истечении срока действия существующего сертификата на основе квалификационного экзамена.

Централизованная сертификация, согласно EN 473 или ИСО 9712, скорее всего завоюет более прочные позиции в мире в 90-е годы по сравнению с децентрализованной. Но этот процесс не сможет полностью вытеснить сертификацию на производстве, так как международные контакты и такие сборники регламентирующих документов как, например, ACME-Code (правила проведения контроля Американского Общества инженеров-механиков) или военные стандарты многих стран, требуют сертификации специалистов на производстве.

Список литературы

1. **ISO 9000:2000 (R).** Системы менеджмента качества. Основные положения и словарь.

2. **ISO 9001:2000 (R).** Системы менеджмента качества. Требования.

3. **ГОСТ ИСО/МЭК 17025–2000.** Общие требования к компетентности испытательных и калибровочных лабораторий.

4. **DIN EN 473.** Неразрушающий контроль. Квалификация и сертификация персонала неразрушающего контроля. Основные принципы.

5. **Неразрушающий контроль и диагностика:** Справочник / В.В. Клюев, Ф.Р. Соснин, В.Н. Филинов и др.: под ред. В.В. Клюева. М.: Машиностроение, 1995. 448 с.

ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

А

Аббе принцип 20
Автогенератора метод 88
Автоматы многошпиндельные токарные – Методы диагностирования 424
Автоматизация производства 414
Автомобиль – Оценка технического состояния 430, 431
Автотестеры 432
Аккредитация 446, 447
– организационная схема управления Системой НК 446
Актинометр 233
Алгоритм диагностирования 404
– поиска дефекта 420
– реконструкции томографического изображения 358 – Выбор 358–362
Ампер-витки 336
Анализаторы двигателя 432
Анализ изображений – Методы 387–389
– лазерный 385, 386
– рентгеноструктурный 387
– рентгенофлуоресцентный 386, 387
– химический 385
Апертура приемная 378
– пучка 291
Аппаратура виброизмерительная 411–413
– фотометрическая 60–62
Артефакты 311
Асимметрии показатель 115
Атмосфера стандартная 205 – Плотность 205
Атомы, внедрившиеся в междоузлия 283
– примесные 284
Аттестация метрологическая средств и методов измерения 134
Аэродинамика циркуляции воздуха 208
Аэрозоли – Методы исследования 228, 229

Б

Барботирование газа 102
Барометры 96, 236
Белизна проявителей 351
Бугера закон 58

В

Вакансия 283
Вакуумметры 236
– термокондуктометрические 97
Вдавливание 141
Веберметр – Принцип действия 48
Величина физическая 128 – Размер, значение истинное и действительное 128
Величины физические основные и производные 128, 129 – Единицы 129 – Размерность 129
Вероятности распределения Колмогорова 120
Весы 74 – Классификация 75, 76 – Метрологические характеристики 76, 77
– механические рычажные 75
– радиоизотопные и электромеханические 76
Вещества пробные 201
– терморадиационные – Характеристики 59, 60
Взвешивания предел 76 – Погрешности 77
Вибраторы многокомпонентные 187
Вибрация 174 – Виды 174, 175 – Испытания 174–187 – Метод качающейся частоты 176 – Метод фиксированных частот 175 – С компенсацией влияния импеданса 176 – Требования 174
Вибрация акустическая 194
– многокомпонентная 186 – Системы для испытаний 186, 187
– случайная 413
– смешанная 185 – Система для испытаний 185, 186
– узкополосная – Методы испытаний 179
– широкополосная – Методы испытаний 178, 179
Вибродиагностика 339, 406–413 – Аппаратура 411 – Методы 406–411 – Объекты контроля 411 – Параметры 407, 408 – Преобразователи измерительные 408–410
Виброчастотный метод измерения давления 98
Визуально-оптический метод контроля 381
Виккерса пирамида 190
Вихретоковый неразрушающий контроль 382, 392
Включения металлические 262
– неметаллические 263
– шлаковые 263, 265
– шлаковые в сварном шве 273, 274
Влагосодержание 204
Влажность 203 – Методы и условия испытаний 219–224 – Оборудование 224
– абсолютная 203
– относительная 204
Влажность воздуха – Методы измерения 222–224 – Методы испытания 224–227
Вода морская 204
Воздействия внешние – Виды 138–142
– рабочие 404
– тестовые 404
Волны – Типы 314
– **Лэмба 312**
– стержневые 312
– упругие 312
Волосовины 263, 264
Вольтмана счетчика 107
Восприимчивость магнитная 331
Время 77 – Методы и приборы измерения 79–84 – Общие сведения 77, 78 – Системы хранения и передачи 78, 79
Вскип, вскиповая раковина 265
Выключатели вибрационные концевые 104

Выносливость 139, 149
Выравниватели АЧХ с фильтрами
– гребенчатыми 183
– перестраиваемыми 183
Выявляемость дефектов 350

Г

Газонефтепроводы –Методы и средства диагностирования 427–430
Газосорбционный метод контроля 389
Газы индустриальные 205
Гамма-дефектоскопы 295
Гаситель пенетранта 344
Генераторы акустические 196, 197
Герметичность 200
Гибкость системы 414
Гигрометры 222, 223
Гири 72 – Характеристики 73, 74
Гистерезис 331
Голография многочастотная 378
Государственная система обеспечения единства измерений 128
Градуировка средств измерения 134
Градус Цельсия 84, 85
Грибостойкость изделия – Оценка 241
Грибы плесневые – Виды 239, 240

Д

Давление 96 – Общие сведения 96 – Приборы измерения 96
Давление атмосферное 205
– пониженное – Испытания 235–239 – Методы 236–239 – Режим 237, 238 – Средства измерения 239
Давление барометрическое – Числовые значения 206
Давление звуковое 195, 196 – Акустическое свободное поле 195 – Уровни 200
Датчики давления световодные 99, 100
– температуры 86, 97
Датчики информации внешней 422 – внутренней 422 – Применение 423
Двигатели газотурбинные ЛА – Методы и средства диагностирования 424–426
Дельта – метод 321
Денситометр 311
Детекторы 367
– ионизационные 248, 249
– полупроводниковые 248
– сцинтилляционные 248
Дефекты 255, 404
– в металлах 257
– металлургические 257–267
– паяных соединений 274
– сварка 271–274
– технологического происхождения 267–280
– трубопроводов 428
– эксплуатационные 280–283
Дефектоскопия радиометрическая 288
Дефектоскопы магнитопорошковые 336–338, 342
Диагностика в условиях автоматизации производства 414–424 – Средства и методы 419–424
– ГТД визуальнооптическая 426
– предэксплуатационная 416, 418
– эксплуатационная 416
Диагностирование 404 – Задачи 406 – Система 404, 405 – Средства 404, 405
– кривошипно-шатунного механизма и цилиндропоршневой группы 431
– модулей ГПС – Последовательность и содержание работ 417, 418
– технологического оборудования – Функции системы 415 – Цель 416
Диаграмма ионизирующего излучения 303
– "нагрузка – смещение" 160
– предельных напряжений цикла 152
– Смита 151
Динамометры 104
Дисперсия 59, 112
– скорости волн 312
Доверительный интервал 118
Доза излучения 246
– экспозиционная 246
Дозиметры 246
Допплера закон 111
Дым 205

Е

Единицы измерения 129
– производные 130
Единство измерений 128

З

Заворот корки 259
Зажигания система 431
Закат 268, 269
Заков 269
Закон обратных радиусов 195
Заряды электростатического поля 244
Звуковое давление 312
Звуковое поле диффузное 196
Знаки маркировочные для пленок 300, 301
Зонд емкостной 101

И

Изгиб 140
– ударный 154
Измерения – Метрологическое обеспечение 128
– дискретные 20
– литейных размеров 18 – Виды и методы 19, 20 – Нормальные области значения 19 – Нормальные условия 19
– непрерывные по линиям 20
– уровня и расхода 100 – Методы 100–112
Излучатели ксеноновые 232
– радиоактивные 103
– электролюминесцентные 232
Излучение ионизирующее 246 – Источники 246

– Методика испытания на воздействие 251–253 – Параметры 246, 247
– оптическое 55
– рентгеновское – Режимы просвечивания 305–308
– солнечное 205
Излучения электромагнитные 244
Изотопы радиоактивные 103
Инверсии принцип 20
Импеданс акустический 312
– механический 312
Иней – Испытание на воздействие 219
Индукция магнитная 331
Интенсивность волны 312
– звука 195, 196
Интроскопия радиационная 288
Исполнители 255
Испытания 136, 255 – Основные термины 136, 137
– климатические 202–252 – Камеры испытательные 206–208
– механические 142–194 – Автоматизация 142
– при охлаждении 145
– ускоренные на изнашивание 192 – Способы 193
Испытания механические на
– изгиб 159, 160
– кручение 160–163
– растяжение 139, 142–146
– сжатие 139, 146–149
– твердость 163–175
– удар 154–158
– усталость 149–154
Испытания на акустический шум 194–200 – Параметры установок 196, 197
Испытания на воздействие
– изменения температуры 211 – Методы 214–216 – Параметры 212 – Условия 211, 212 – Установки 211, 212
– плесневых грибов 239–241 – Методы 240 – Оборудование 240
– пыли 227–230 – Методы 229 –Параметры 230 – Средства измерения 228 – Условия 227 – солнечного излучения 230–234 – Интенсивность 231 – Методы 233 – Параметры 230–233 – Средства измерения 233
Испытания на герметичность 200 – Методы 200–202
– изнашивание 189–194 – Виды 191 – Классификация 189 – Машины и стенды 194 – Образцы 189
– теплоустойчивость 206
– трение – Методы 188
– холодоустойчивость 216–218 – Методы 218, 219
Источник излучения 90, 366, 367

К

Кавитация 283
Калибровка прибора 311
Камеры инжекционные 221
– испытательные безэховой звуковой волны 198
– пыли 227, 228
– холода 216–218
Кандела 131
Кармана вихревая дорожка 111
Карты распознавания дефектов 412
Кассеты для зарядки пленок 300, 301
Катушка измерительная 48, 49
Качество 126 – Этапы измерения 126
Квадрат ликвационный 262
Квалификация 435
Кванили $t_{a,n}$ 119
Кельвин 85, 131
Ковариация эмпирическая 125
Колебания упругие 318
Коллиматор 303
К-метод 321
Компенсаторы 304, 305
Комплекс вычислительный 368, 369
Контролепригодность 255, 406
Контроль 255–405 – Виды 255 – Методы 288–402 – Направления развития 400–402 – Термины 255
– акустический 312 – Классификация 319–325 – Методы 312–319
– износа 194
– капиллярный 343 – Дефектоскопические материалы 344–352 – Методы 343, 344 – Операции 352, 353 – Оценка результатов 354 – Рекомендации 349–352
– неметаллических материалов 328–330 – Керамики и фарфора 328 – Листов из полимерных композитов 328 – Резиновых шин 328 – шлифовальных кругов 328
– неразрушающий – Классификация методов 284–288
– радиационный – Чувствительность 309
Координатно-измерительные машины (КИМ) 25
– Измерения 34, 35
Коробление 266
Королек 266
Корочки светлые, темные 258
Коррозия 351
– межкристаллитная 280, 429
– точечная 280
– эрозионная 429
Коэффициент асимметрии цикла напряжений 150
– вариации 112
– излучения – Методы измерения 70, 71
– корреляции 121
– отражения – Методы измерения 264
– поглощения – Измерение 64, 65
– пропускания – Измерение 66, 67
– размагничивания 332
– рассеяния света (КРС) – Измерение 65, 66
– трения 188
– экспозиции 308
Кривая намагничивания 44
– упрочнения – Построение 148
Кривые ползучести 146
– усталости 151
Кристаллы жидкие 89
Критерии разрушения 152
Критерий согласия Пирсона 119
– Колмогорова 119
Кручение 140

Л

Лаборатории аккредитованные 433 – Требования к персоналу 444
– испытательные 443

– передвижные 397
Лампы вольфрамовые 231
– дуговые 232
Лапласа нормированная функция 113, 114
Легирование радиационное 284
Ликвация – Виды 265
– газовая 261, 262
– дендритная 261
– зональная 261
– V-образная 265

М

Магнетизм 41
Магнитный неразрушающий контроль 393
Магнитометры – 51
Магниторезисторы 53
Манометры 235 – Классификация 236
– грузовые и поршневые 96, 97
– жидкостные 96
– пружинные 97
Масса 71–74 – Приборы и способы измерения 74–77
Материалы дефектоскопические 344 – Наборы 346–348
– магнитные – Классификация 41–44 – Характеристики 43–47
– люминесцентные 348, 349
Меры концевые – Классы точности 19
Меры времени 79 – Классификация 80–82
Место штатное измерения 425
Метод вытеснения 104
– временных интервалов 419
– магнитной компенсации 98
– наименьших квадратов 123
– программный 419
– простого аддитивного взвешивания 128
– солевых растворов 109
– точки росы 223
– эталонных модулей 419
– SAFT 376
Методы контроля акустические активные 319–321
– импедансные 323
– отражения 319–321
– пассивные 324
– собственных частот 321–323
Методы контроля магнитные 330–332
Методы контроля металлов
– отливок 325
– поковок и штамповок 326
– проката и проволоки 326, 327
– сварных соединений 327, 328
Механизм газораспределительный 431
Микрофон 413
Микрофоны измерительные 198 – Классификация 199
– Параметры 199
Микротомография рентгеновская 371, 372
Мини-эндоскопы 426
Мобильные системы 415
Модели динамические 124 – Восстановление 124, 125
Модель формализованная объекта: неявная, явная 405
Модуль сдвига 160 – Определение 164
– упругости 145

Н

Наблюдения – Обработка результатов 112–128
Нагрузки вибрационные 141
– от линейных ускорений 141
– ударные 141
Надрыв по неметаллическим включениям 264
Наклеп местный 343
Наконечник алмазный 167
Намагниченность 330
Намагничивание 46
Намагничивание и размагничивание деталей – Методы и средства 333–336
Наплыв 274
Напряжения термические 283
Натяжение поверхностное 349
Непровары 272
Неоднородность точечно-пятнистая 262
Нефелометры (измерители мутности) 66
Номограммы гамма – экспозиций 308
– рентгеновских экспозиций 305–307
Нормы EN 45013 447–451

О

Образцы – Формы и размеры 153, 155
Объект технического контроля 255
Окисление поверхностное 265
Оптический тепловой контроль 396
Орган по сертификации 441
– уполномоченный 441
Осадки атмосферные конденсированные 204
Отвес 101
Отклонение микроструктуры 266
– от круглости – Технология измерения 25, 30–33
– от плоскостности – Технология измерения 20–23
– от прямолинейности – Технология измерения 25–29
– среднее квадратическое 112
Отношение соответствия 127
Отражение света (ОС) 56, 57
Очиститель от пенетранта 344

П

Параметр первичный информативный 284
Параметры выходные машины 418
– магнитные 41–54 – Методы измерения 47
– оптические 55–60 – Методы измерения 62–71
– электрические – Методы измерения 36 – Средства измерения 36–41 – Средства метрологического обеспечения 40, 41
Пенетрант индикаторный 344, 345
Пенетранты – Цветовые качества 350, 351
Персонал – Сертификация 447–454
Петли магнитного гистерезиса 45, 331
Пики термические 284
Пиранометр 233
Пиргелиометр 233
Пироконы 93
Пирометры 91, 92
Пироскопы (конусы Зеггера) 86
Плены 261

– прокатные 267
Пленки рентгеновские – Классификация 296, 297 – Рекомендации 299 – Техника безопасности 298 – Химико-фотографическая обработка 296–298
Пленки слиточные 259
Плотность 343
– среды 312
Повреждение коррозионное 428, 429
– радиационное 283, 284
Поглощение света (ПС) 57
Погрешности измерений 132 – Классификация 132, 133
Позистор 110
Позитронный метод контроля 388
Показатели комплексные преломления 55
– преломления – Методы измерения 61–70
– точности измерений 133
Полосчатость 261
Поля магнитные рассеяния дефектов 336
– радиационные – Методы испытаний 249, 250 – Приборы для измерения 247–249 – Характеристики 246, 247
Поражение металлов коррозионное 279
Пористость газоусадочная 266
– радиационная 284
Порог чувствительности 201, 202, 354
Порог слышимости болевой 195
– стандартный 195
Порошки магнитные 332, 333, 338
Поры 272–274
Поставщик 434
Потенциалметр магнитный 49
Потоки лучистые – Классификация 55
Поток нейтронов – Испытания на воздействие 251
Предел выносливости 151
– ограниченной 151
Предел индикации 201
Предел ползучести 146
Предел пропорциональности 143, 144, 147
– при кручении 160, 161
– физический и условный 138
Предел прочности 139
– при кручении 161, 162 – Истинный 162
Предел текучести 144, 147, 148
– при кручении 161, 162
– условный 145, 148, 149
– физический 138 – условный 139
Предел упругости 144, 147, 148
– физический и условный 138
Предельно допустимая концентрация (ПДК) 243
Преобразователи гальваномагнитные 52, 53
– измерительные давления 99
– индукционные 47
– квантовые 53, 54
– магнитные 47–54, 332–336
– магнито-механические 54
– пьезоэлектрические 409
– терморезистивные 87, 88
– электродинамические 409, 410
Приборы для измерения времени 80,82
– комбинированные универсальные 432
– спектрорадиометрические 233
– течеискания 397
– электромеханические – Предельные параметры 37
– Технические характеристики 40
Пригар 266
Прижоги 275, 276
Примеси в воздухе 204, 205
Пробки магнитные 426
Проверка средства измерения 134
Промышленная радиационная вычислительная томография (ПРВТ) 355–358
Проницаемость магнитная 331, 332
– дифференциальная 45
Просвечивание – Схемы 288, 290–294
Протокол испытаний 434
Процессы быстропротекающие 418
– медленные 419
– средней скорости 419
Прочность 138
– при изгибе – Характеристики 138
Проявители – Характеристики 346
Психрометр аспирационный 223
Пузыри газовые 257, 258
– внутренние, подкорковые, поверхностные 258
Пучки заряженных частиц – Требования 253
Пьезопреобразователи – Конструкции 318
Пыленепроницаемость 229
Пыль 204
– неорганическая 204
– органическая 205
Пятно фокусное излучателя 302, 303

Р

Работа удара 157
Радиан 131
Радиоволновой метод контроля 382, 383
Радиография 288–312 – Выбор энергии источников излучения 294–296 – Выбор фокусного расстояния 301–303 – Методика и техника 289, 290 – Применение 295 – Оформление результатов 311–312
– нейтронная 383, 384
Размах выборки 115
Разрушение – Виды 139
Раковины газовые 266
– усадочные 257
Рассеяние света (РС) 57, 58
Растрескивание кавитационное 283
– коррозионное 280
– под действием термических напряжений 283
Растяжение ударное 105
Расходомер Аннубсера 108
Расходомеры 106, 110, 111
– Поттера 107
– пружинно-дисковые 108
Рванины 267
Реакторы ядерные 251
Реверберация 196 – Время 196
Режим радиационный 203
Рентгенотехника промышленная 390
Реперные точки 85
Рефрактометры 64, 69

Решетка матричная антенная 377
Рисунок индикаторный – Геометрический и оптический параметры 354
Рыхлоты 274
Рэлея область 44

С

Свет – Закономерности отражения 69 – Преломление 58, 59 – Пропускание 58
Светостойкость 351
Светофильтры 232
СВЧ-радиовидение 378
Сдвиг остаточный при кручении 161
Секунда 129
Сертификат – Сроки действия 453, 454
Сертификация 434 – Термины 434–441
– персонала 447–454
– продукции – Испытательные и калибровочные лаборатории 443–446
– систем менеджмента качества 441–443
Сертифицирующие инстанции 451, 452
Сетка карбидная 274
Сила коэрцитивная 45, 331
– трения 188
СИ – международная система единиц 129
Сирена одноротерная 197
Система единиц физических величин 129
Система менеджмента качества – Проверка 442, 443
Система неразрушающего контроля Госгортехнадзора 446, 447
Системы – Живучесть 415
– виброиспытательные 179–187
– технического зрения 395
Сканеры 364–366
Слиток листовой, сортовой 263
Смачиваемость 349
След индикаторный – Способы обнаружения 353, 354
Снимки радиографические – Расшифровка 308–311
Сопротивление временное 145
– разрушению 139
– удельное волновое 312
Состояние техническое объекта 404
Спай оксидный 265
Спектры вращательные, колебательные 94
Способность проникающая 349
Средство контроля 255
Средства бортовые – Вибродиагностирование 426
– технические диагностирования – Уровни применения 420–422
Среды – Акустические свойства 315
– заполнения 244
– специальные 241 – Виды 242–244
Срез 140
Стали конструкционные – Магнитные характеристики 339–341
Станция технического обслуживания (СТО) 432
Стекла водомерные 104
Стенды тормозные 431
Степень жесткости 223–226
– негерметичности 200
Структура кристаллическая 255
– радиозернистая 275, 276
– слитка 257
Струхаля число 111
Стьюдента распределение 115
Сужение относительное 139
Сульфиды 264
Схема поверочная 134
Счетчик газоразрядный 248
– Гейгера – Мюллера 248
Счетчики барабанные 105
– бескамерные 105
– мокрые газовые 107
– объемные 105
– роторные газовые 106
– с кольцевым поршнем 106
– с овальными шестернями 106
– струйные 107

Т

Твердость 139, 163 – Методы измерения 164, 173, 174
– по Бринеллю 165 – Испытания 165, 166
– по Виккерсу 171 – Испытания 171, 172 – Обозначение 171
– по Роквеллу 167 – испытания 167–170
Температура 84, 85, 202 – Методы измерения 84, 85–94, 209, 210 – Метрологическое обеспечение 95
– точки росы 204 – Средства измерения 209
Тензорезисторы 98
Термобарокамеры 239
Тепловые методы контроля 384, 385
Тепловизоры 93 – Схема 92 – Характеристики 93
– матричные
Термодатчики световодные 89
Термозонды 109
Термоиндикаторы 90
Термометрия активная оптическая – Методы 93, 94
– лазерная – Методы 94
– лазерно-акустическая 94
– манометрическая 88
Термометры акустические 95
– деформационные 86
– дилатометрические 85, 86
– жидкостные 85
– кварцевые 88
– манометрические 86
– расширения 85
Термоносители 208
Термопреобразователи 88, 209 – Классификация 209
Техническая диагностика 404 – Направления развития 400–403
Течеискание 381, 382
Томограф ультразвуковой 374
Томография 355

– вычислительная 394
– комптоновская 372
– на основе ядерного магнитного резонанса 379–381
– радиационная 355–358 – Выбор алгоритма изображения 358–364 – Системы томографов 364–371
– СВЧ 377–379
– ультразвуковая вычислительная (УВТ) 373 – трансмиссионная 373–375
– отражательная 375–377
Томографы высокоэнергетические радиационные 370, 371
– универсальные компьютерные 369, 370
Точки контрольные 404
Транспорт автомобильный – Методы и средства диагностирования 430–433
– трубопроводный – Надежность объектов 427 – Методы измерения напряжений 428
Трение – Испытания 187–194
Трещины горячие 259
– закалочные 269
– замедленного разрушения 277, 278
– ковочные 267
– межкристаллитные 259
– напряжения 260, 269
– ползучести 279
– раскатанные продольные 260
– сварных соединений 270, 271
– термоударные 283
– шлифовочные 270, 271
– штамповочные 268
Трещины усталости 281
– контактной 282
– коррозионной 282
– паукообразные 281
– разгара 281
Трубки Вентури 108, 109
– напорные 108
Туман морской 204

У

Удар 414
– тепловой 212 – Испытания 213–215
Ударная вязкость 139, 157
Удельная рефракция 59
Удлинение относительное 139
Ужимины 266
Ультразвук 102
Ультразвуковой неразрушающий контроль 391
Управление 404
Уровнемеры поплавковый с магнитной связью 101
– ультразвуковые 102
– электромеханические 101
Усиление видеоизображений 387, 388
Ускорители электронов 295
Усталость 149, 280
– малоцикловая 153, 280 – многоцикловая 280
Установки тормозного излучения 250
Устойчивость 138

Ф

Фазотрон (синхроциклотрон) 252
Факторы климатические 202–206
Фарадея цилиндр 248
Феррозонды 51, 52
Фильтр ионизирующего излучения 303
Флокены 264, 265
Фон поверхности 354
Фотолаборатория 300
Фотометры 60, 61
Функционирование объекта 404
Функция автокорреляционная 126
– взаимной корреляции 126
– корреляционная 125
– нормированная 126
Фурье – алгоритм 361

Х

Характеристики метрологические нормируемые 133
Химико-аналитические методы контроля 385–387
Хладагент жидкий 217
– твердый 216
Холла датчик 52
– эффект 52
Хронометрия 82–84 – Системы хронометрические – Классификация 83
Хрупкость водородная 278, 279

Ц

Центр экзаменационный – Понятие 441
Цикл напряжений 150
Циклотрон 252
Центральное звено – Системы сертификации персонала 447

Ч

Частота вихрей 11
Число степеней свободы 119
Число твердости 166, 169, 173
Чувствительность контроля капиллярного – Классы 354
– радиационного 309 – Уровни 309, 310

Ш

Шайба напорная 108
Шкала классов износостойкости 190
– твердости 168, 169
– температурная 131
– термодинамическая 84, 85
– физической величины 129

Штеблейна метод 50
Шум акустический 141, 142, 194–200, 413 – Измерение 198–200
– белый, розовый 196
Шумомеры 413

Э

Экзамен
– квалификационный 450, 451
– практический 453
Экзоэлектронный метод контроля 383
Эксперты 126, 127
– по сертификации 435
Электрический метод контроля 384
Электротермометрия – Методы 87, 88
Электронный парамагнитный резонанс (ЭПР) 53
Электротехника – Величины, единицы измерения 35
Элементы тепловыделяющие (ТВЭЛ) 370
Эллипсометр – Схема 70
Эндоскопы 426
ЭПР – электронный парамагнитный резонанс 379
Эрозия 429
Эталоны единиц физических величин 129–132
– массы 72
– температуры 85
– чувствительности 310 – Типы 309
Эффект Допплера 409
Эффекты ионизационные 284
Эхо-зеркальный метод 319
Эхо-метод 319
Эхолота метод 102

Я

Ядерный магнитный резонанс (ЯМР) 53, 379
ЯМР – томография 379–381

СПРАВОЧНОЕ ИЗДАНИЕ

**Ключев Владимир Владимирович, Соснин Феликс Рубенович,
Филинов Владимир Николаевич и др.**

МАШИНОСТРОЕНИЕ. ЭНЦИКЛОПЕДИЯ

Том III-7

Измерения, контроль, испытания и диагностика

Заведующая редакцией *И.Н. Жесткова*
Оформление художника *Т.Н. Погореловой*
Художественный редактор *Т.Н. Погорелова*
Корректоры: *Л.Г. Изосимова, Л.Н. Любина*
Операторы: *М.А. Евсейчева, С.И. Крючков, М.Н. Рыжкова*

Лицензия ИД № 05672 от 22.08.01.

Сдано в набор 15.05.01. Подписано в печать 13.07.01.
Формат 70×100 1/16. Бумага офсетная. Гарнитура Таймс. Печать офсетная.
Усл. печ. л. 37,7. Усл. кр.-отт. 37,7. Уч.-изд. л. 52,63.
Доп. тираж 1000 экз. Заказ 6555

Издательство "Машиностроение",
107076, Москва, Стромынский пер., 4

Оригинал-макет изготовлен в издательско-полиграфическом центре
Тамбовского Государственного технического университета,
392032, г. Тамбов, Мичуринская, 112

Отпечатано в полном соответствии с качеством предоставленных диапозитивов
в ППП «Типография «Наука». 121099, Москва, Шубинский пер., д. 6.

МАШИНОСТРОЕНИЕ

ЭНЦИКЛОПЕДИЯ