

ВЫБОР МАТЕРИАЛА И ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

*Методические указания к лабораторным работам № 22, 23
по курсу «Материаловедение»*

Под редакцией *А.В. Велищанского*

Москва
Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана
2009

УДК 621.78
ББК 34.651
В27

Рецензент *И.В. Кириллов*

В27 Выбор материала и термической обработки деталей машин: метод. указания к лабораторным работам № 22, 23 по курсу «Материаловедение» / Н.М. Рыжов, Р.С. Фахуртдинов, В.М. Полянский, А.Ю. Ампилогов ; под ред. А.В. Велищанского. – М. : Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009. – 27 [1] с.: ил.

Рассмотрена методика оценки свойств и структуры материалов для типовых деталей машин – зубчатых колес и болтов. Раскрыт алгоритм выбора марки сталей и технологии термической и химико-термической обработки с учетом критериев работоспособности зубчатых колес и болтов.

Для студентов машиностроительных специальностей, изучающих дисциплину «Материаловедение».

УДК 621.78
ББК 34.651

Учебное издание

Рыжов Николай Михайлович
Фахуртдинов Равел Садртдинович
Полянский Владислав Михайлович
Ампилогов Алексей Юрьевич

Выбор материала и термической обработки деталей машин

Редактор *С.Ю. Шевченко*
Корректор *М.А. Василевская*
Компьютерная верстка *А.Ю. Ураловой*

Подписано в печать 30.09.2009. Формат 60×84/8.
Усл. печ. л. 3,25. Тираж 200 экз.
Изд. № 96. Заказ

Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана.
Типография МГТУ им. Н.Э. Баумана.
105005, Москва, 2-я Бауманская ул., 5.

РАБОТА № 22. ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА МАТЕРИАЛА ДЛЯ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС

Цель работы – приобретение навыков выбора материалов для зубчатых колес и технологии их термической и химико-термической обработки.

Краткие теоретические сведения

Критерии работоспособности зубчатых колес

Зубчатые колеса относятся к одним из наиболее распространенных и сложных в конструктивном и технологическом отношении деталей машин. Их функциональное назначение – передача крутящего момента.

При передаче крутящего момента в зацеплении действуют нормальная сила F_n , а также сила трения $F_{тр} = f F_n$, обусловленная скольжением профилей зубьев (рис. 1). Под действием этих сил каждый зуб находится в сложном напряженном состоянии (рис. 2). На работоспособность зубчатых колес решающее влияние оказывают контактные напряжения σ_H и напряжения изгиба σ_F у основания зубьев, которые изменяются во времени по пульсирующему циклу.

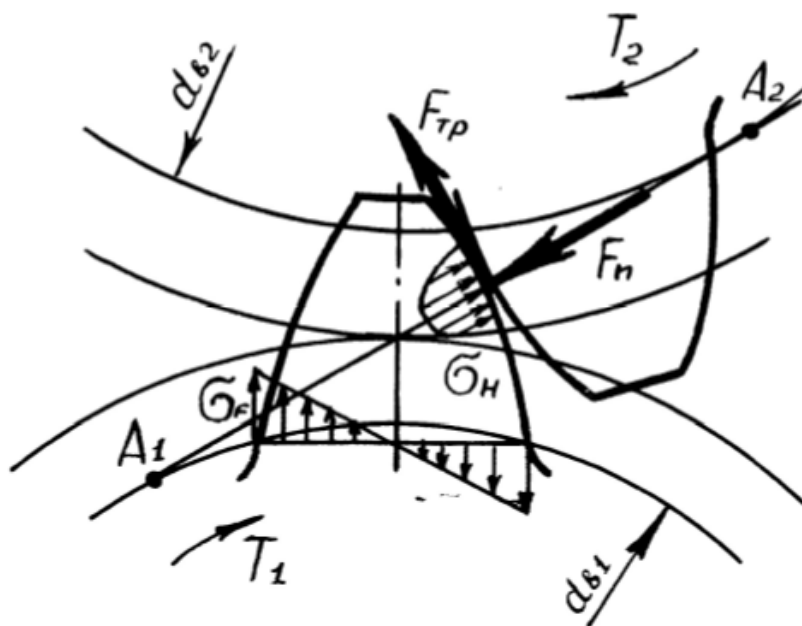


Рис. 1. Силы и напряжения, действующие на поверхности у основания зуба:

T_1 и T_2 – вращающие моменты на шестерне и колесе; F_n и $F_{тр}$ – нормальная сила и сила трения; σ_H и σ_F – контактное напряжение и напряжение изгиба; A_1A_2 – линия зацепления; d_{a1} и d_{a2} – диаметры основных окружностей

Важный компонент силового режима зубчатых колес, увеличивающий напряжения σ_H и σ_F – дополнительная динамическая нагрузка. Она возникает из-за погрешности изготовления и сборки зубчатой передачи, а также в результате изнашивания профилей зубьев. Динамическая нагрузка тем выше, чем ниже точность изготовления зубчатых колес и больше скорость их вращения.



Рис. 2. Изолинии равных напряжений в сечении зуба

Контактные напряжения и сила трения являются причиной повреждения рабочих поверхностей зубьев: усталостного выкрашивания (питтинга), изнашивания и заедания, а напряжения изгиба – причиной усталостного разрушения (поломки) зубьев. Основными критериями работоспособности являются: контактная выносливость, выносливость при изгибе, стойкость к изнашиванию и заеданию.

Контактная выносливость – способность материала противостоять развитию усталостного выкрашивания, которое является основным видом поверхностного разрушения зубьев. Оно характерно для большинства закрытых, хорошо смазываемых передач.

Выкрашивание возникает и развивается ниже полюсной линии зубьев (рис. 3). Образуются раковины, которые искажают профиль зубьев, нарушают нормальную работу зацепления. Усиливается динамическая нагрузка, возникает опасность поломки зубьев.

Контактную выносливость оценивают пределом контактной выносливости $\sigma_{H\ limb}$, который определяют экспериментально.

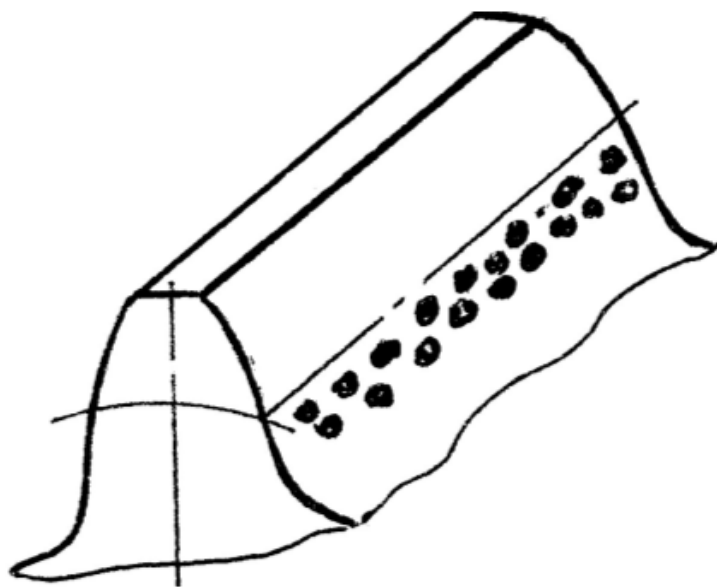


Рис. 3. Выкрашивание материала на поверхности зуба

Повышение контактной выносливости основано на увеличении сопротивления поверхностного слоя зубьев развитию пластической деформации, росте его твердости.

Выносливость зубьев при изгибе – свойство материала противостоять усталостной поломке зуба. Это свойство оценивают пределом выносливости $\sigma_{F\ limb}$. Трещина усталости, как правило, возникает у основания зуба со стороны действия растягивающих напряжений и постепенно распространяется в тело зуба.

К снижению прочности зубьев при изгибе приводят остаточные напряжения растяжения, образующиеся при шлифовании впадины. Отрицательное влияние оказывают шлифовочные прижоги, а также риски, царапины и другие концентраторы напряжений.

Сопротивление изнашиванию зубьев.

Изнашивание возникает, главным образом, при отсутствии или недостаточности смазки. Если толщина масляного слоя меньше высоты микронеровностей, то происходит непосредственное соприкосновение отдельных участков поверхностей зубьев и их изнашивание под воздействием силы трения. Скорость изнашивания растет с увеличением давления, скорости скольжения, шероховатости поверхности и снижения ее твердости. Особенно значительна скорость изнашивания в открытых передачах, а также закрытых, но недостаточно защищенных от попадания абразивных частиц. Интенсивное изнашивание вызывает искажение профиля зуба (рис. 4), ослабление его ножки, увеличение вероятности усталостного излома зубьев.

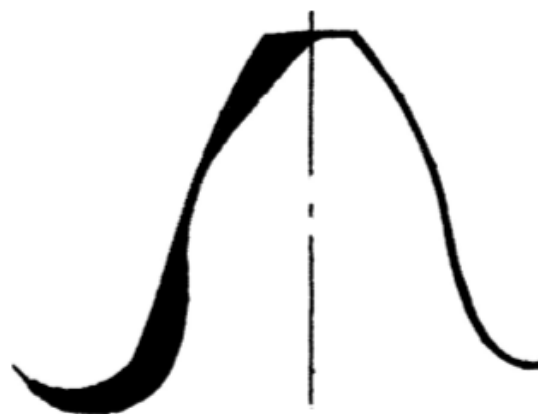


Рис. 4. Вид износа поверхности зуба

Основные меры предупреждения изнашивания – повышение твердости и снижение шероховатости поверхности.

Сопротивление заеданию. Заедание (адгезионное изнашивание) заключается в интенсивном схватывании чистых от масляных и оксидных пленок отдельных участков контактирующих поверхностей. Разрушение адгезионных мостиков сварки сопровождается вырыванием частиц металла и их переносом на поверхность сопряженного зуба. Вырванные частицы повторно схватываются, бороздят трущиеся поверхности, вызывая их интенсивное разрушение.

Заеданию наиболее подвержены незакаленные поверхности. Из-за низкой твердости подложки защитные оксидные пленки под влиянием высоких давлений легко разрушаются, обнажая чистые (ювенильные) участки металла. Закаленные поверхности под влиянием нагрева способны отпускаться и разупрочняться. Поэтому для высоконагруженных и высокоскоростных передач требуются теплостойкие стали.

Основные меры предупреждения заедания – применение теплостойких сталей с высокой твердостью поверхности.

Материалы, применяемые для зубчатых колес, их термическая и химико-термическая обработка (ХТО)

Наиболее высокую работоспособность зубчатых колес обеспечивают стали, которые являются основным материалом для их изготовления. Реже применяют чугуны и пластмассы.

При выборе марки стали необходимо учитывать, что работоспособность зубчатых колес (особенно контактная выносливость) растет с увеличением твердости поверхности. Возрастание твердости сопровождается повышением допустимых напряжений, снижением габаритов и массы зубчатой передачи.

В зависимости от твердости поверхности применяемые стали делят на две группы:

- без упрочненного поверхностного слоя с одинаковой твердостью ($HB \leq 350$) по сечению зуба;
- с упрочненным поверхностным слоем (HRC 50...63) и вязкой сердцевиной при твердости (HRC 30...42).

Первую группу образуют среднеуглеродистые улучшаемые и нормализуемые стали (см. табл. 1). Они значительно уступают сталям второй группы по нагрузочной способности, но превосходят их по технологичности, допускают чистовое нарезание зубьев после термической обработки, что существенно облегчает изготовление колес. Кроме того, они не подвержены хрупкому разрушению при динамических нагрузках.

Улучшаемые стали применяют для мало- и средненагруженных зубчатых передач при отсутствии жестких требований к их габаритам. Стали, используемые в нормализованном состоянии, преимущественно применяют для зубчатых колес во вспомогательных механизмах, например в механизмах ручного управления.

Вторую группу образуют низкоуглеродистые стали, подвергаемые цементации или нитроцементации; среднеуглеродистые стали, упрочняемые азотированием или поверхностной закалкой.

Обладая высокой нагрузочной способностью, эти стали имеют преимущественное применение. Однако они более сложны в технологическом отношении, поскольку требуют нарезания зубьев до термической обработки. Термическая обработка вызывает значительное коробление зубчатых колес, для устранения которого необходимы дополнительные операции (шлифование, притирка, обкатка) и специальное оборудование. Стали этой группы преимущественно используют в условиях крупносерийного и массового производства для более быстрой окупаемости затрат на специальное оборудование. Наибольшее применение имеют следующие стали.

Цементуемые и нитроцементуемые. Эти стали обеспечивают наиболее высокую контактную выносливость, а также прочность зубьев при изгибе и сопротивление заеданию. Их применяют для изделий, в которых масса и габариты передач имеют решающее значение.

Работоспособность таких зубчатых колес зависит от свойств диффузионного слоя и сердцевины. Свойства слоя определяются содержанием в нем углерода. Легирующие элементы оказывают косвенное влияние, изменяя в слое концентрацию углерода. Карбидообразующие элементы (Cr, W, Mo, V, Ti и др.) увеличивают степень науглероживания, некарбидообразующие (Ni, Si) снижают ее, уменьшая охрупчивание слоя.

Твердость поверхности сталей этой группы составляет HRC 58...63. Она обеспечивается при концентрации углерода 0,8...1,4 % и структуре, состоящей из высокоуглеродистого мартенсита или его смеси с карбидами. При постоянной твердости поверхности контактная выносливость растет с увеличением толщины упрочненного слоя и твердости сердцевины. Толщину цементованного слоя назначают с учетом модуля колеса m , пользуясь соотношением $\sim 0,28 m \pm 0,2$ мм, где m – модуль зубчатого колеса. Твердость сердцевины составляет HRC 30...42. Если

твёрдость сердцевины недостаточна, возможно продавливание упрочнённого слоя при перегрузках. Излишне высокая твёрдость (свыше 42 HRC) увеличивает опасность хрупкого разрушения зубьев от напряжений изгиба.

Выносливость зубьев при изгибе растёт по мере увеличения прочности сердцевины (достигает максимума при $\sigma_b = 1200 \dots 1300$ МПа) и снижения шероховатости поверхности у основания зуба, а также формирования остаточных напряжений сжатия.

Прочность сердцевины повышается с увеличением в стали содержания углерода и легирующих элементов. При высоких динамических нагрузках важное значение приобретает сохранение высокой вязкости сердцевины. Это свойство в наибольшей степени присуще низкоуглеродистым сталям, содержащим 3...4 % Ni.

Цементация (нитроцементация) способствует формированию у основания зуба невысоких (400...500 МПа) остаточных напряжений сжатия. Для их увеличения (до 800...1200 МПа) окончательно обработанные зубчатые колеса обдувают дробью или обкатывают роликами.

Цементуемые (нитроцементуемые) стали подразделяют на несколько подгрупп (табл. 1).

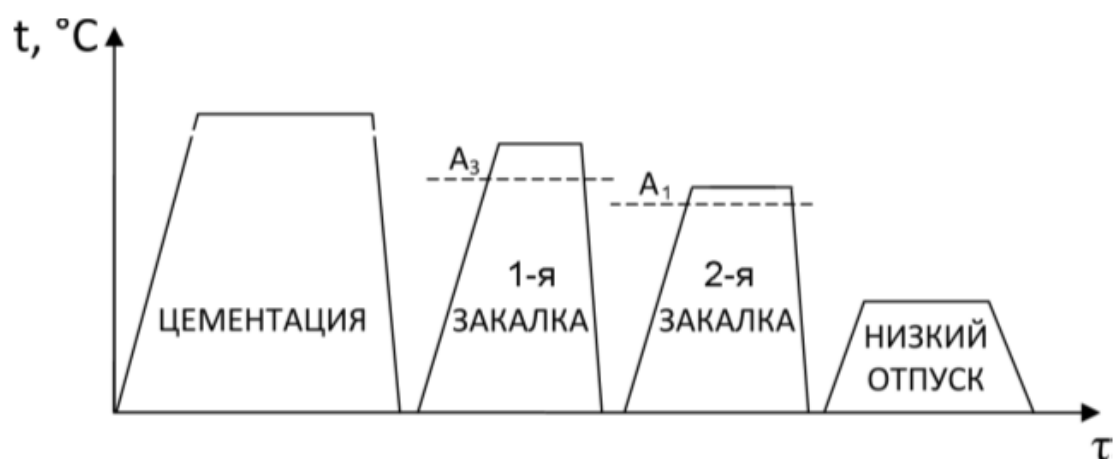
Таблица 1

Стали для зубчатых колес

Группа сталей. Схема обработки	Марки сталей	Свойства		Недостатки, применение
		эксплуатационные	технологические и экономические	
БЕЗ УПРОЧНЕННОГО ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ($HВ \leq 350$)				
Улучшаемые: углеродистые легированные	40, 45, 50, 50Г, 40Х, 45Х, 40ХН, 45ХН, 35ХГСА, 35ХМА, 40ХФА, 30ХНЗА, 40, 45, 50, 50Г, Ст5, Ст6	Низкие контактная выносливость, выносливость при изгибе, износостойкость, стойкость к заеданию; возможно пластическое смятие поверхности зуба; хорошо противостоят ударным нагрузкам	Технологичны; допускают нарезание зубьев после термической обработки; низкая стоимость изготовления. Точность 5–6-й степени	Большие габариты и масса. Применяют для мало- и средненагруженных передач общего редукторостроения
Нормализуемые углеродистые				

Группа сталей. Схема обработки	Марки сталей	Свойства		Недостатки, применение
		эксплуатационные	технологические и экономические	
С УПРОЧНЕННЫМ ПОВЕРХНОСТНЫМ СЛОЕМ (HRC 40...63) И ВЯЗКОЙ СЕРДЦЕВИНОЙ (HRC30...42) (наибольшая контактная выносливость и выносливость при изгибе)				
Низкоуглеродистые цементуемые теплостойкие сложнолегированные хромоникелевые	12Х2НВФА 20Х3МВФА 16Х3НВФМБ-Ш 20ХН3А, 12Х2Н4А 18Х2Н4МА	$t_{\text{раб}} \leq 300\text{ }^{\circ}\text{C}$; высокая стойкость к заеданию и изнашиванию $t_{\text{раб}} \leq 150\text{ }^{\circ}\text{C}$; высокие износостойкость, ударная вязкость и прочность сердцевин; хорошо противостоят ударным нагрузкам	Высокая прокаливаемость (до 100 мм) Особо высокая прокаливаемость (> 100 мм) Точность 4–6-й степени	Высокая стоимость материала и изготовления; необходимость зубошлифования. Применяют для высокоскоростных и напряженных передач (авиация, судостроение)
экономнолегированные нитроцементуемые	18ХГТ, 25ХГМ, 30ХГТ, 20ХНМ, 20ХНР	$t_{\text{раб}} \leq 150\text{ }^{\circ}\text{C}$; высокая износостойкость	Упрощенная технология обработки. Точность 7–8-й степени	Применяют для нешлифуемых зубчатых колес (массовое производство)

Группа сталей. Схема обработки	Марки сталей	Свойства		Недостатки, применение
		эксплуатационные	технологические и экономические	
хромистые	15X, 20X, 15XФ, 20XP, 20XФ	$t_{\text{раб}} \leq 100^\circ\text{C}$; высокая износостойкость, невысокая прочность сердцевины	Ограниченная прокаливаемость (до 30 мм); невысокая стоимость материала. Точность 7–8-й степени	Ограниченные допустимые нагрузки и размеры колес. Применяют для колес средних и малых размеров (с/х машиностроение)



автоматные	AC12XH, AC14XHГН, AC19XHГН, AC20XHГНМ	$t_{\text{раб}} \leq 100^\circ\text{C}$; высокие износостойкость, ударная вязкость и прочность сердцевины; хорошо противостоят ударным нагрузкам	Хорошая обрабатываемость резанием. Точность 7–8-й степени	Применяются на автомобильных заводах (ВАЗ)
среднеуглеродистые азотируемые	38X2MЮА, 35XЮА, 40X, 40XФА	$t_{\text{раб}} \leq 500^\circ\text{C}$; наиболее высокие теплостойкость, стойкость к заеданию и изнашиванию	Минимальное коробление при ХТО без зубошлифования. Точность 7–8-й степени	Малая толщина слоя, возможность его продавливания; ограниченные нагрузки



Группа сталей. Схема обработки	Марки сталей	Свойства		Недостатки, применение
		эксплуатационные	технологические и экономические	
Поверхностно за- каленные при на- греве ТВЧ при глубинном нагреве	40, 45, 40Х, 40ХН, 35ХМА 55ПШ	$t_{\text{раб}} \leq 150^\circ\text{C}$;	Сокращенный цикл обработки без зу- бошлифования; небольшие дефор- мации; ограничен- ные размеры колес (сечение ≤ 30 мм). Точность 7–8-й сте- пени	Невысокая степень точности. Применяют в средненагруженных зубчатых колесах станков и автомоби- лей

Тепловой цикл обработки сталей. График температуры $t, ^\circ\text{C}$ в зависимости от времени τ . Цикл состоит из трех этапов: 1. ЗАКАЛКА (нагрев до температуры и выдержка), 2. ВЫСОКИЙ ОТПУСК (нагрев до более низкой температуры и выдержка), 3. ЗАКАЛКА ЗУБЬЕВ (нагрев до температуры и выдержка).

1. Теплостойкие сложнолегированные стали, сохраняющие высокую твердость поверхности при нагреве до 300°C .

2. Хромоникелевые стали, обладающие высокой прочностью и вязкостью сердцевины, хорошо противостоят ударным нагрузкам.

Стали первой и второй подгруппы имеют высокую прокаливаемость. Их применяют для крупных (диаметром 150...600 мм) деталей ответственного назначения – зубчатых колес и валов-шестерен авиадвигателей, редукторов вертолетов, судовых трансмиссий и т. п. К недостаткам этих сталей относятся высокая стоимость и сложный цикл химико-термической обработки, который включает цементацию, высокий отпуск, закалку, обработку холодом, низкий отпуск.

Химико-термическая обработка вызывает значительную деформацию колес. Для восстановления точности (5–6-й степени) необходимо зубошлифование, что усложняет технологию.

3. Экономнолегированные стали 18ХГТ, 25ХГМ, 30ХГТ и др. применяют в условиях массового производства, в частности в автомобилестроении. Они дешевле хромоникелевых и обрабатываются по упрощенной технологии. Зубчатые колеса из этих сталей подвергают нитроцементации. При этом процессе диффузионные слои кроме 0,6...0,8 % С содержат 0,2–0,3 % N, который создает дополнительное упрочнение. В отличие от цементации этот процесс дает возможность получать слои с высокой несущей способностью, но меньшей толщиной (0,6...1,0 мм), что позволяет уменьшить продолжительность обработки. Кроме того, нитроцементацию проводят при более низкой температуре, сочетают с подстуживанием и непосредственной закалкой. Зубчатые колеса меньше деформируются, имеют 7–8-ю степень точности и их обычно не шлифуют.

4. Хромистые стали образуют подгруппу дешевых цементируемых сталей, уступающих по прочности сталям остальных групп. Из-за невысокой прокаливаемости эти стали применяют для мелких и средних зубчатых колес сельскохозяйственных машин и приборов.

5. Автоматные стали содержат 0,15...0,35 % Pb, благодаря чему хорошо обрабатываются резанием. Это позволяет изготавливать из них зубчатые колеса на станках-автоматах. Такие стали подвергают нитроцементации. Их применяют на автозаводах (в частности, на ВАЗе) для изготовления зубчатых колес коробок передач.

6. Азотируемые легированные стали обладают наиболее высокой твердостью поверхности и износостойкостью. Кроме того, азотированный слой имеет высокую теплостойкость (до 500 °С), поэтому наиболее устойчив к заеданию. Недостаток этих сталей – малая толщина упрочненного слоя (0,3...0,5 мм), что не позволяет их применять при высоких контактных нагрузках из-за опасности его продавливания. По этой же причине азотированные стали чувствительны к ударным нагрузкам.

Важное технологическое преимущество азотирования – минимальное коробление, поэтому зубчатые колеса после азотирования можно не шлифовать. Это обуславливает применение азотируемых сталей для точных (6–7-я степень точности) зубчатых колес, шлифование которых затруднено.

Зубчатые колеса изготавливают по схеме: улучшение (закалка + высокий отпуск) для упрочнения сердцевины, нарезание зубьев, азотирование. В отдельных случаях проводят неглубокое шлифование для удаления хрупкого слоя (~ 0,05 мм) ε-фазы.

Стали для поверхностной закалки с индукционного нагрева. Закалку по контуру зубьев на твердость поверхности 50...55 HRC проводят для двух подгрупп сталей.

Первую подгруппу образуют среднеуглеродистые стали 40, 45, 40Х, 40ХН и др. В индукторе нагревают только поверхностный слой зубьев из этих сталей. При интенсивном охлаждении водой закалку воспринимают только те поверхностные слои, которые нагреваются выше критических точек стали. Сердцевина из-за недогрева остается незакаленной (30...35 HRC). Толщину закаленного слоя регулируют частотой тока и временем нагрева. Высокая скорость нагрева обеспечивает получение мелкого зерна, что снижает хрупкость.

Вторую подгруппу составляет сталь с пониженной прокаливаемостью 55ПП. Зубья колес из этой стали подвергают сквозному (глубинному) индукционному нагреву до температуры выше критических точек. Однако закалку воспринимают только поверхностные слои толщиной 1...3 мм. Это обусловлено низкой прокаливаемостью стали из-за ограничения содержания примесей Cr, Mn, Si. Сталь 55ПП дешева, ее применяют взамен цементируемых.

Основная область ее применения – средненагруженные зубчатые колеса малых и средних размеров, используемых в автомобиле- и станкостроении. Вследствие небольшой деформации при закалке такие зубчатые колеса не шлифуют. Они имеют 7–8-ю степень точности.

Чугуны по прочности (особенно при ударной нагрузке) заметно уступают сталям, что компенсируется увеличением размеров колес. Для изготовления колес ис-

пользуют серые чугуны СЧ25, СЧ20, модифицированные СЧ30, СЧ35, высокопрочные ВЧ40, ВЧ60 и др.

Пластмассы (текстолит, капрон) применяют для колес, работающих при малых скоростях и нагрузках. Их используют для привода спидометров в автомобилях, а также в киноаппаратах, текстильных машинах. Достоинства таких колес – отсутствие вибрации и шума, высокая коррозионная стойкость.

Задания

1. Ознакомиться с основными группами сталей для зубчатых колес, их термической и химико-термической обработкой, особенностями, преимуществами и недостатками.

2. Выполнить предложенное задание по обоснованию марки стали для конкретной зубчатой передачи. Номер задания указывает преподаватель.

Технологию термической или химико-термической обработки выбранной стали изобразить в виде графика в координатах t – τ и объяснить назначение операций.

В заданиях использованы следующие обозначения: m – модуль, мм; d_a – диаметр вершин зубьев колеса, мм.

Задание 1. Обосновать выбор стали и ее термической и химико-термической обработки для косозубого цилиндрического колеса $m = 4$ мм, $d_a = 240$ мм. Колесо предназначено для закрытой, длительно работающей, неревверсивной передачи коробки скоростей авиадвигателя.

Условия выбора:

- рабочие напряжения $\sigma_H = 520$ МПа, $\sigma_F = 380$ МПа;
- окружная скорость 100 м/с;
- температура масла 250 °С.

Задание 2. Обосновать выбор стали и ее термической и химико-термической обработки для прямозубого цилиндрического зубчатого колеса $m = 4$ мм, $d_a = 280$ мм. Колесо предназначено для закрытой длительно работающей неревверсивной передачи редуктора вертолета.

Условия выбора:

- рабочие напряжения $\sigma_H = 500$ МПа, $\sigma_F = 370$ МПа;
- окружная скорость 50 м/с;
- при работе возможна ударная нагрузка;
- температура масла 200 °С.

Задание 3. Обосновать выбор стали и ее термической и химико-термической обработки для прямозубого цилиндрического зубчатого колеса $m = 2,5$ мм, $d_a = 125$ мм, предназначенного для коробки передачи автомобиля. Производство массовое.

Условия выбора:

- рабочие напряжения $\sigma_H = 480$ МПа, $\sigma_F = 320$ МПа;
- окружная скорость 8 м/с;
- температура масла 110 °С.

Задание 4. Обосновать выбор стали и ее химико-термической обработки для прямозубого цилиндрического зубчатого колеса $m = 3$ мм, $d_a = 210$ мм. Колесо предназначено для закрытой длительно работающей неревверсивной передачи коробки скоростей авиадвигателя.

Условия выбора:

- рабочие напряжения $\sigma_H = 460$ МПа, $\sigma_F = 300$ МПа;
- окружная скорость 100 м/с;
- температура на локальных участках контакта до 500 °С.

Задание 5. Обосновать выбор стали и ее термической и химико-термической обработки для прямозубого цилиндрического зубчатого колеса $m = 4$ мм, $d_a = 220$ мм. Колесо предназначено для закрытой длительно работающей реверсивной передачи редуктора тепловоза. Производство крупносерийное.

Условия выбора:

- рабочие напряжения $\sigma_H = 460$ МПа, $\sigma_F = 250$ МПа;
- окружная скорость 5 м/с;
- температура масла до 100 °С.

Задание 6. Обосновать выбор стали и ее термической и химико-термической обработки для прямозубого цилиндрического зубчатого колеса $m = 2$ мм, $d_a = 50$ мм, предназначенного для закрытой длительно работающей реверсивной передачи коробки скоростей станка.

Условия выбора:

- рабочие напряжения $\sigma_H = 460$ МПа, $\sigma_F = 350$ МПа;
- окружная скорость 7 м/с;
- температура масла до 50 °С.

Задание 7. Обосновать выбор стали и ее термической или химико-термической обработки для прямозубого цилиндрического колеса $m = 2,5$ мм, $d_a = 308$ мм, предназначенного для закрытой длительно работающей реверсивной передачи редуктора общего назначения. Производство массовое.

Условия выбора:

- рабочие напряжения $\sigma_H = 400$ МПа, $\sigma_F = 380$ МПа;
- окружная скорость 10 м/с;
- температура масла до 100 °С.

Задание 8. Обосновать выбор стали и ее термической или химико-термической обработки для прямозубого цилиндрического колеса $m = 4$ мм, $d_a = 120$ мм, предназначенного для длительно работающего шестеренчатого насоса авиадвигателя.

Условия выбора:

- рабочие напряжения $\sigma_H = 500$ МПа, $\sigma_F = 300$ МПа;
- окружная скорость 60 м/с;
- температура жидкого топлива 20 °С;
- скорость скольжения профилей зубьев 30 м/с, увеличивающая опасность заедания и интенсивного изнашивания поверхностей зубьев.

Задание 9. Обосновать выбор стали и ее термической или химико-термической обработки для прямозубого цилиндрического зубчатого колеса $m = 3$ мм, $d_a = 90$ мм, предназначенного для коробки передач автомобиля. Производство массовое.

Условия выбора:

- рабочие напряжения $\sigma_H = 460$ МПа, $\sigma_F = 280$ МПа;
- окружная скорость 10 м/с;
- температура масла до 100 °С;

Задание 10. Обосновать выбор стали и ее термической и химико-термической обработки для прямозубого цилиндрического колеса $m = 4$ мм, $d_a = 380$ мм, предназначенного для закрытой длительно работающей реверсивной передачи редуктора транспортера. Производство крупносерийное.

Условия выбора:

- рабочие напряжения $\sigma_H = 470$ МПа, $\sigma_F = 280$ МПа;
- окружная скорость 3 м/с;
- температура масла до 100 °С.

Порядок выполнения работы

Проектирование передачи при заданных условиях ее работы начинают с выбора материала и определения допустимых контактных напряжений σ_{HP} . После этого выполняют два вида расчета: проектировочный и проверочный.

Проектировочный расчет проводят с целью определения размеров передачи. Для его проведения отдельные неизвестные параметры принимают приблизительно, поэтому такой расчет носит ориентировочный характер. Затем следует проверочный расчет, при котором для известных размеров и нагрузок определяют фактическую нагрузочную способность передачи по контактной выносливости, а затем и по выносливости при изгибе.

Поскольку выбор материала предшествует проектированию зубчатой передачи, то важно знать прочностные возможности применяемых материалов и особенности технологии их обработки. На изучение этих вопросов и направлено предлагаемое задание. Будем исходить из того, что предварительный расчет передачи выполнен и геометрические размеры зубчатого колеса определены. Необходимо установить, какая сталь может быть использована для его изготовления.

1. Определить требуемый предел контактной выносливости:

$$\sigma_{H \lim b} = \sigma_{HP} S_H K_\Sigma,$$

где σ_{HP} – допустимые контактные напряжения, которые следует принимать равными рабочим напряжениям σ_H ; S_H – коэффициент безопасности; $K_\Sigma = 1,5$ – суммарный коэффициент, учитывающий влияние шероховатости поверхности, смазки, скорости вращения, размеров колес.

Для материалов с однородной по поперечному сечению структурой (после нормализации, улучшения) принять $S_H = 1,1$; а для материалов с упрочненным слоем (после цементации, азотирования, поверхностной закалки) – $S_H = 1,2$. Для передач, выход из строя которых связан с тяжелыми последствиями (авиация, транспорт), значение коэффициента безопасности принять равным $S_H = 1,25$ и $S_H = 1,35$ соответственно.

2. По табл. 2 установить, каким группам сталей отвечает расчетное значение $\sigma_{H \lim b}$.

**Предел контактной выносливости $\sigma_{H\limb}$ поверхностей зубьев
прямозубых передач (ГОСТ 21354-85)**

Стали	Термическая и химико-термическая обработка	Твердость поверхности зубьев	Формула для расчета предела контактной выносливости	МПа $\sigma_{H\limb}$
Легированные	Цементация и нитроцементация	HRC 56...63	$23 \cdot \text{HRC}$	1290...1450
	Азотирование	HV 550...750	—	не более 1050
Углеродистые и легированные	Поверхностная закалка	HRC 40...50	$17 \cdot \text{HRC} + 200$	800...1050
	Объемная закалка	HRC 38...50	$18 \cdot \text{HRC} + 150$	834...1050
	Нормализация или улучшение	HB 250...350	$0,2 \cdot \text{HB} + 70$	≤ 770

3. По табл. 3 в зависимости от величины окружной скорости установить требуемую степень точности колеса и в соответствии с ней способ его чистовой обработки.

4. По данным о температуре смазочного материала уточнить требование к теплостойкости стали или ее диффузионному слою. Температура эксплуатации должна быть не менее чем на 50 °С ниже температуры низкого отпуска.

Таблица 3

**Степень точности и способ чистовой обработки зубьев колес
в зависимости от окружной скорости**

Степень точности	Окружная скорость, м/с		Способ чистовой обработки зубьев
	Прямые зубья	Непрямые зубья	
4–5	≥ 15	≥ 30	Зубошлифование
6	< 15	≤ 30	
7	≤ 10	≤ 15	Приработка зубьев
8	≤ 6	≤ 10	
9	≤ 2	≤ 4	Не проводится

5. Для конкретизации группы и затем марки стали необходимо использовать данные о размерах колеса и известные сведения о прокаливаемости, виде и отрасли производства, стоимости стали.

6. Провести проверочный расчет по напряжениям изгиба с целью предотвращения излома зубьев. Требуемый предел выносливости при изгибе вычислить по формуле

$$\sigma_{F\limb} = \sigma_{FP} S_F / (K_{Fq} K_{Fd} K_{Fc}),$$

где σ_{FP} – допустимые напряжения изгиба (принять равными рабочим напряжениям σ_F); S_F – коэффициент безопасности, равный 1,6 для зубчатых колес общего назначения и 2,0...2,2 для зубчатых колес высокой ответственности (авиация, транспорт); K_{Fq} – коэффициент, учитывающий влияние шлифования переходной поверхности зуба; K_{Fd} – коэффициент, учитывающий влияние деформационного упрочне-

ния (обдужки дробью, обкатки роликами); K_{Fc} – коэффициент реверсивности (для реверсивной передачи $K_{Fc} = 0,7 \dots 0,8$, для неревверсивной $K_{Fc} = 1$).

Значения $\sigma_{F\lim b}$ и коэффициентов K_{Fq} и K_{Fd} по ГОСТ 21354–75 для различных сталей приведены в табл. 4–8.

Принять, что марка стали, ее термическая или химико-термическая обработка выбраны обоснованно, если они отвечают условию работы по контактной выносливости и выносливости по изгибу, а также отвечают требованиям теплостойкости, необходимой прокаливаемости и наименьшей стоимости, учитываемой по степени легированности.

7. Схему термической или химико-термической обработки стали выбрать из табл. 1.

Содержание отчета

Отчет по лабораторной работе должен содержать:

1. Текст задания с условиями работы зубчатого колеса, для которого производится выбор материала.

2. Результаты определения предела контактной выносливости и предела выносливости при изгибе.

3 Обоснование выбора группы и марки стали по критериям теплостойкости, прокаливаемости, степени легирования.

4. Схему технологического процесса термической или химико-термической обработки в координатах t – τ и объяснение назначения операций.

Таблица 4

Данные к определению $\sigma_{F\lim b}$, K_{Fq} и K_{Fd} (ГОСТ 21354–75) для цементованных зубчатых колес

Стали	Концентрация Ni, Cr, %	Концентрация С на поверхности, %	Твердость зубьев на поверхности, HRC	$\sigma_{F\lim b}$, МПа	K_{Fq}	K_{Fd} (дробь, ролики)
20ХН, 12ХН2	не более 1 % Ni	0,75...1,1	57...63	950	$\frac{0,75}{0,60}$	$\frac{1,0 \dots 1,05}{1,1 \dots 1,3}$
20ХН2М	не более 1 % Cr					
20ХН3А 15ХГНТА 12Х2НВФА						
18ХГТ 30ХГТ	менее 1 % Ni			820	$\frac{0,75}{0,65}$	$\frac{1,0 \dots 1,1}{1,1 \dots 1,3}$
20Х, 20ХГР 25ХГНМА						
12Х2НМА 20Х2Н4А 18Х2Н4МА	более 1 % Ni и 1 % Cr					
14ХГСН2МА 20Х3МВФА						

Примечание. Данные в знаменателе принимают, если не гарантировано отсутствие шлифовочных прижогов.

Данные к определению $\sigma_{F\text{ limb}}$, K_{Fq} и K_{Fd} для нитроцементованных зубчатых колес

Стали	Концентрация углерода на поверхности, %	Концентрация азота на поверхности, %	Твердость зубьев на поверхности HRC	$\sigma_{F\text{ limb}}$, МПа	K_{Fq}	K_{Fd} (дробь, ролики)
Содержащие молибден, например 25ХГМ	0,7...1,0	0,15...0,3	57...63	1000	0,7	1,0
не содержащие молибден, 25ХГТ, 30ХГТ, 30Х и др.	0,7...1,0	0,15...0,5	57...63	750	0,75	1,05...1,1

Таблица 6

Данные к определению $\sigma_{F\text{ limb}}$, K_{Fq} и K_{Fd} для азотированных зубчатых колес

Стали	Твердость зубьев		$\sigma_{F\text{ limb}}$, МПа	K_{Fq}	K_{Fd}
	на поверхности	в сердцевине			
38Х2МЮА	HV 700...950	HRC 24...40	$300 + 1,2 \cdot \text{HRC}_{\text{серд}}$ (600...780)	1,0	1,0
40Х, 40ХФ и др.	HV 500...750				

Таблица 7

Данные к определению $\sigma_{F\text{ limb}}$, K_{Fq} и K_{Fd} для зубчатых колес из нормализованной и улучшенной стали, а также зубчатых колес, закаленных при сквозном нагреве

Стали	Способ термообработки или ХТО	Твердость зубьев	$\sigma_{F\text{ limb}}$, МПа	K_{Fq}	K_{Fd} (дробь, ролики)
40,45,40ХН, 40ХФА, 40ХН2МА, 18Х2Н4МА	нормализация, улучшение	HB 180...350	1,8 HB (324...630)	1,1	1,1...1,3
40Х, 40ХН, 40ХФА, 40ХН2М	объемная закалка	HRC 45...55	600	0,9	1,05...1,1

Таблица 8

Данные к определению $\sigma_{F\text{ limb}}$, K_{Fq} и K_{Fd} для зубчатых колес, закаленных при нагреве ТВЧ

Стали	Форма закаленного слоя	Твердость зубьев		$\sigma_{F\text{ limb}}$, МПа	K_{Fq}	K_{Fd}
		на поверхности	в сердцевине			
Сталь пониженной прокаливаемости 55ПП		HRC 58...62	HRC 28...35	900	$\frac{0,75}{0,55}$	$\frac{1,0}{1,1...1,2}$

Стали	Форма закаленного слоя	Твердость зубьев		σ_{Flimb} , МПа	K_{Fq}	K_{Fd}
		на поверхности	в сердцевине			
Стали, содержащие $\geq 1\%$ Ni (40X, 40XH2MA и др.)	Закаленный слой повторяет очертания впадины	HRC 48...58	HRC 25...35	700	$\frac{1,0}{0,8}$	$\frac{1,05}{1,1}$
Прочие легированные стали (40X,35XM)				600		
Стали, содержащие $\geq 1\%$ Ni (40X, 40XH2MA и др.)	Закаленный слой распространяется на все сечение зуба и часть тела под основанием зуба и впадины	HRC 48...55		600	$\frac{1,0}{0,8}$	$\frac{1,15...1,35}{1,1...1,2}$
Прочие легированные стали (40X,35XM)				500		
Стали углеродистые и легированные	Закаленный слой обрывается на переходной поверхности или вблизи нее	Незакаленной части зуба HB 200...300		400	$\frac{1,0}{0,8}$	$\frac{1,2...1,4}{1,1...1,3}$

Примечание. Данные в знаменателе принимают, если не гарантировано отсутствие шлифовочных прижогов.

РАБОТА № 23. ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА МАТЕРИАЛА ДЛЯ БОЛТОВ

Цель работы – обосновать выбор материала и термической обработки для болтов.

Краткие теоретические сведения

Болты и шпильки резьбовых соединений, применяемых в машино- и приборостроении, различаются по условиям работы.

Болты, выполняющие функцию соединения и испытывающие небольшие усилия, на прочность не рассчитывают. Болты изготовляют из сталей обыкновенного качества (Ст1, Ст2, Ст3), качественных сталей (10, 15, 20), латуней, деформируемых алюминиевых сплавов, термопластичных пластмасс. Предпочтение тому или другому материалу отдают исходя из технологичности, экономичности изготовления болта, коррозионной стойкости, массы и внешнего оформления изделия. Хорошая пластичность этих материалов позволяет изготавливать резьбу накаткой. При использовании материалов с невысокой пластичностью ($\delta < 20 \%$) резьбу нарезают резцом. Из применяемых в этом случае материалов можно выделить: автоматные стали, стали обыкновенного качества (Ст4, Ст5, Ст6), качественные стали (30, 35, 40), алюминиевые и медные сплавы.

Расчет болтов зависит от характера нагружения и технологических особенностей сборки резьбовых соединений (затянутые, незатянутые, с зазором и без зазора между болтом и отверстием соединяемых деталей). Болты могут воспринимать статическую и циклическую нагрузку как в осевом, так и в поперечном направлении.

Широко применяют болты, обеспечивающие плотность или герметичность соединения, что достигается затяжкой болта гайкой. При отсутствии внешней нагрузки такие болты рассчитывают на статическую прочность по растягивающим и крутящим усилиям от затяжки. Материал болта выбирают по заданному коэффициенту запаса прочности с учетом надежности, долговечности, технологичности и экономичности.

Долговечность болтового соединения зависит от коррозионной активности среды, кратковременных или длительных нагревов. В зависимости от условий работы для таких болтов применяют углеродистые и легированные конструкционные стали нормальной и повышенной прочности и надежности, коррозионно-стойкие, жаростойкие, жаропрочные стали и сплавы.

В особо тяжелых условиях работы находятся болты, которые подвергаются не только статическим нагрузкам от затяжки, но и внешним циклическим нагрузкам, возникающим от давления рабочей среды или инерционных усилий движущихся масс. Такие нагрузки испытывают, в частности, болтовые соединения крышки цилиндра двигателя внутреннего сгорания, замка шатуна коленчатого вала. В этих случаях материал болта выбирают с учетом заданных коэффициентов запаса на основе статических и циклических расчетов. Применяют стали и сплавы с более высокой конструкционной прочностью.

Нагруженные болты для повышения конструкционной прочности подвергают термической и химико-термической обработке. Для углеродистых и легированных сталей используют нормализацию и термическое улучшение. Часто отвинчиваемые и завинчиваемые болты подвергают нитроцементации или цианированию. Применяют также механические способы упрочнения болтов – обкатку резьбы и переходного участка от головки к стержню. Для повышения коррозионной стойкости резьбовые изделия подвергают оксидированию, цинкованию, кадмированию, хромированию, никелированию.

Чтобы уменьшить износ болта, гайку изготавливают из того же материала, но с меньшей твердостью. Твердость резьбы болта повышают за счет наклепа при накатке резьбы. Для повышения твердости резьбы, выполненной резцом, проводят нитроцементацию с упрочненным слоем толщиной до 0,2 мм.

При расчетах на статическую прочность используют зависимости для нормальных и касательных напряжений, возникающих в болте:

$$\sigma = \frac{Q}{F}, \quad \tau = \frac{M}{0,2 \cdot d_1^3}.$$

Здесь Q – осевое усилие от затяжки и возможной внешней нагрузки; M – крутящий момент при завинчивании; d_1 и F – наименьший диаметр и площадь поперечного сечения болта.

Эквивалентные напряжения, действующие в болте, с учетом нормальных и касательных напряжений, рассчитывают по формуле

$$\sigma_{\text{болт}} = \sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2}. \quad (1)$$

При статических нагрузках выбор материала, с учетом коэффициента запаса (n_e), проводится по пределу текучести материала болта σ_T ($\sigma_{0,2}$), если рабочая температура меньше 300 °С:

$$\sigma_T = n_e \sigma_{\text{болт}}. \quad (2)$$

Если рабочая температура больше 300 °С, выбор осуществляют по пределу длительной прочности или пределу ползучести.

При расчетах на циклическую прочность определяют амплитудные значения напряжений от внешней нагрузки:

$$\sigma_a = \frac{\chi P_{\text{вн}}}{F},$$

где $P_{\text{вн}}$ – внешняя нагрузка; χ – коэффициент внешней нагрузки, который определяется формой, размером болта и модулями упругости материалов болтового соединения; при правильной конструкции болтового соединения $\chi = 0,2 \dots 0,3$.

Предел циклической прочности материала (при растяжении – сжатии)

$$\sigma_{-1p} = n_a \sigma_a (K_\sigma)_{\text{болт}}, \quad (3)$$

где n_a – коэффициент запаса при циклическом нагружении; $(K_\sigma)_{\text{болт}}$ – эффективный коэффициент концентрации напряжений болта. Этот коэффициент рассчитывают по формуле

$$(K_\sigma)_{\text{болт}} = \frac{K_\sigma}{\varepsilon_\sigma \beta \beta_{\text{кор}}}, \quad (4)$$

где K_σ – коэффициент концентрации напряжений, определяемый геометрией резьбы; ε_σ – коэффициент масштабного фактора; β – коэффициент чистоты поверхности и упрочнения; $\beta_{\text{кор}}$ – коэффициент влияния коррозионной среды.

Значения этих коэффициентов представлены в табл. 1–4.

Таблица 1

σ_B , МПа	400	600	800	1200
K_σ	3,0	3,9	4,8	5,2

Таблица 2

d , мм	12	16	24	32	40
ε_σ	1,0	1,0	0,75	0,7	0,65

Таблица 3

Способ изготовления и упрочнения резьбы	β		
	Накатка	Резец	Нитроцементация
$\sigma_B < 900$ МПа	1,20	1,0	1,40
$\sigma_B > 900$ МПа	1,25	1,0	1,65

Таблица 4

Материал	$\beta_{\text{кор}}$	
	Сухой воздух/влажный воздух	Морская вода и воздух
Стали, дуралюмины	1,0/0,8	0,25
Нержавеющие стали, алюминиевые и магниевые сплавы	1,0/1,0	0,50
Медные, титановые сплавы, нержавеющие стали с Мо	1,0/1,0	1,00

Задания

Задание 1.

1. Обосновать выбор материала и термической обработки болта муфты.

2. Технические условия для выбора:

нагрузки статические от затяжки $\sigma = 60$ МПа, $\tau = 60$ МПа; резьба выполняется накаткой; диаметр болта 16 мм; рабочая температура ± 20 °С; среда – сухой воздух; коэффициент запаса $n_e \geq 2,5$; производство массовое.

3. Механические свойства сталей приведены в табл. 5.

4. В отчете обосновать выбор материала болта, указать химический состав материала, его термическую обработку, свойства и расчетное значение n_e . Объяснить значение пластичности и ударной вязкости для способа изготовления и надежности болта.

Задание 2.

1. Обосновать выбор материала и термической обработки болта для крепления изделия к фундаменту.

2. Технические условия для выбора:

нагрузки статические от затяжки $\sigma = 40$ МПа, $\tau = 40$ МПа; резьба выполняется накаткой; диаметр болта 24 мм; рабочая температура ± 20 °С; среда – сухой воздух; коэффициент запаса $n_e \geq 2,5$.

3. Механические свойства сталей приведены в табл. 5.

4. В отчете обосновать выбор материала болта, указать химический состав материала, его термическую обработку, свойства и расчетное значение n_e . Объяснить значение пластичности и ударной вязкости для способа изготовления и надежности болта.

Задание 3.

1. Обосновать выбор материала и термической обработки болта замка шатуна двигателя.

2. Технические условия для выбора:

нагрузки статические от затяжки и циклические от внешней нагрузки $\sigma = 80$ МПа, $\tau = 80$ МПа, $n_e \geq 2,5$, $\sigma_a = 20$ МПа, $n_a \geq 3$; резьба выполняется накаткой; диаметр болта 16 мм; рабочая температура ± 20 °С; среда – сухой воздух; производство массовое.

3. Механические свойства сталей приведены в табл. 5. Значения K_σ , ϵ_σ , β , $\beta_{кор}$ – в табл. 1–4.

4. В отчете обосновать выбор материала болта, указать химический состав материала, его термическую обработку, свойства и расчетное значение n_e и n_a . Объяснить влияние прокаливаемости.

Задание 4.

1. Обосновать выбор материала и термической обработки болта замка шатуна автомобильного двигателя.

2. Технические условия для выбора:

нагрузки статические от затяжки и циклические от внешней нагрузки $\sigma = 160$ МПа, $\tau = 160$ МПа, $n_e \geq 2,5$, $\sigma_a = 20$ МПа, $n_a \geq 3$; диаметр болта 12 мм; резьба выполняется резцом; рабочая температура $(+20 \dots -40)$ °С; среда – минеральное масло; производство серийное.

3. Механические свойства сталей приведены в табл. 5, значения K_σ , ϵ_σ , β , $\beta_{кор}$ – в табл. 1–4.

4. В отчете обосновать выбор материала болта, указать химический состав материала, его термическую обработку, свойства и расчетное значение n_e и n_a . Объяснить влияние прокаливаемости.

Задание 5.

1. Обосновать выбор материала и термической обработки болта замка шатуна автомобильного двигателя.

2. Технические условия для выбора:

нагрузки статические от затяжки и циклические от внешней нагрузки $\sigma = 100$ МПа, $\tau = 100$ МПа, $n_e \geq 2,5$, $\sigma_a = 20$ МПа, $n_a \geq 2,5$; диаметр болта 24 мм; резьба выполняется накаткой; рабочая температура $(+20 \dots -40)$ °С; среда – минеральное масло; производство серийное.

3. Механические свойства сталей приведены в табл. 5, значения K_{σ} , ε_{σ} , β , $\beta_{\text{кор}}$ – в табл. 1–4.

4. В отчете обосновать выбор материала болта, указать химический состав материала, его термическую обработку, свойства и расчетные значения n_e и n_d . Объяснить влияние прокаливаемости.

Задание 6.

1. Обосновать выбор материала и термической обработки болта корпуса авиационного прибора.

2. Условия выбора:

нагрузки статические от затяжки $\sigma = 60$ МПа, $\tau = 60$ МПа; резьба выполняется накаткой; рабочая температура $+20$ °С; среда – влажная атмосфера; материал болта работает в условиях контактной коррозии с корпусом прибора из силумина марки АК12; коэффициент запаса $n_e \geq 2,5$; производство серийное.

3. Механические свойства материалов, а также электродные потенциалы в воде приведены в табл. 6.

4. В отчете обосновать выбор материала болта, указать химический состав материала, его термическую обработку, свойства и расчетное значение n_e . Объяснить значение электродного потенциала для контактной коррозии.

Задание 7.

1. Обосновать выбор материала и термической обработки болта корпуса авиационного прибора.

2. Технические условия для выбора:

нагрузки статические от затяжки $\sigma = 30$ МПа, $\tau = 30$ МПа; резьба выполняется резцом; рабочая температура $+20$ °С; среда – влажная атмосфера; материал болта работает в условиях контактной коррозии с корпусом прибора из силумина марки АК12; коэффициент запаса $n_e \geq 2,5$; производство серийное.

3. Механические свойства материалов, а также электродные потенциалы в воде приведены в табл. 6.

4. В отчете обосновать выбор материала болта, указать химический состав материала, его термическую обработку, свойства и расчетное значение n_e . Объяснить значение электродного потенциала для контактной коррозии.

Задание 8.

1. Обосновать выбор материала и термической обработки болта контейнера.

2. Технические условия для выбора:

нагрузки статические от затяжки $\sigma = 85$ МПа, $\tau = 85$ МПа; резьба выполняется накаткой; рабочая температура $+20$ °С; среда – морская вода; возможно возникновение местных видов коррозии: точечной коррозии (ТК) и коррозионного растрескивания (КР); коэффициент запаса $n_e \geq 2,5$; производство мелкосерийное.

3. Механические свойства материалов и их коррозионная стойкость приведены в табл. 7.

4. В отчете обосновать выбор материала болта, указать химический состав материала, его термическую обработку, свойства и расчетное значение n_e . Объяснить влияние ионов хлора в морской воде на общую и местную коррозию.

Задание 9.

1. Обосновать выбор материала и термической обработки болта контейнера.

2. Технические условия для выбора:

нагрузки статические от затяжки $\sigma = 40$ МПа, $\tau = 40$ МПа; резьба выполняется накаткой; рабочая температура $+20$ °С; среда – морская вода; возможно возникновение местных видов коррозии: точечной коррозии (ТК) и коррозионного растрескивания (КР); коэффициент запаса $n_e \geq 2,5$; производство мелкосерийное.

3. Механические свойства материалов и их коррозионная стойкость приведены в табл. 7.

4. В отчете обосновать выбор материала болта, указать химический состав материала, его термическую обработку, свойства и расчетное значение n_e . Объяснить влияние ионов хлора в морской воде на общую и местную коррозию.

Задание 10.

1. Обосновать выбор материала и термической обработки болта головки блока цилиндров в судовом двигателе.

2. Технические условия для выбора:

нагрузки статические от затяжки и циклические от внешней нагрузки $\sigma = 85$ МПа, $\tau = 85$ МПа, $n_e \geq 2,5$, $\sigma_a = 15$ МПа, $n_a \geq 2,5$; диаметр болта 24 мм; резьба выполняется накаткой; рабочая температура $+(20...40)$ °С; среда – морской воздух; коэффициент запаса $n_e \geq 2,5$; производство серийное.

3. Механические свойства материалов и их коррозионная стойкость приведены в табл. 7. Значения K_σ , ε_σ , β , $\beta_{кор}$ – в табл. 1–4.

4. В отчете обосновать выбор материала болта, указать химический состав материала, его термическую обработку, свойства и расчетное значение n_e . Объяснить влияние ионов хлора на коррозионные свойства.

Задание 11.

1. Обосновать выбор материала и термической обработки болта фланца вакуумной камеры.

2. Технические условия для выбора:

нагрузки статические от затяжки $\sigma = 60$ МПа, $\tau = 60$ МПа; резьба выполняется резцом; среда – сухой воздух; рабочая температура $+20$ °С, но с кратковременными нагревами до 400 °С; материал подвергается химической коррозии; коэффициент запаса $n_e \geq 2,5$; производство серийное.

3. Механические свойства материалов, скорость окисления на воздухе при 400 °С приведены в табл. 8.

4. В отчете обосновать выбор материала болта, указать химический состав материала, его термическую обработку, свойства и расчетное значение n_e . Объяснить влияние химического состава сплава на жаростойкость.

Задание 12.

1. Обосновать выбор материала и термической обработки болта фланца вакуумной камеры.

2. Технические условия для выбора:

нагрузки статические от затяжки $\sigma = 42$ МПа, $\tau = 42$ МПа; резьба выполняется накаткой; среда – сухой воздух; рабочая температура $+20$ °С, но с кратковременными нагревами до 400 °С; материал подвергается химической коррозии; коэффициент запаса $n_e \geq 2,5$; производство массовое.

3. Механические свойства материалов, скорость окисления на воздухе при 400 °С приведены в табл. 8.

4. В отчете обосновать выбор материала болта, указать химический состав материала, его термическую обработку, свойства и расчетное значение n_e . Объяснить влияние химического состава сплава на жаростойкость.

Задание 13.

1. Обосновать выбор материала и термической обработки болта фланца паропроводной магистрали.

2. Технические условия для выбора:

нагрузки статические от затяжки $\sigma = 15$ МПа, $\tau = 15$ МПа; резьба выполняется накаткой; среда – сухой воздух; рабочая температура эксплуатации 550 °С; допускается деформация болта на 1 % за 10 000 ч работы; коэффициент запаса $n_e \geq 2,5$; производство массовое.

3. Предел ползучести, допустимые рабочие температуры по жаропрочности и жаростойкости для легированных сталей и никелевых сплавов приведены в табл. 9.

4. В отчете обосновать выбор материала болта, указать химический состав материала, его термическую обработку, свойства и расчетное значение n_e . Объяснить влияние легирующих элементов на жаропрочность и жаростойкость.

Задание 14.

1. Обосновать выбор материала и термической обработки болта двигателя внутреннего сгорания.

2. Технические условия для выбора:

нагрузки статические от затяжки $\sigma = 20$ МПа, $\tau = 20$ МПа; резьба выполняется накаткой; среда – сухой воздух; рабочая температура эксплуатации 650 °С; ресурс работы болта 10 000 ч; коэффициент запаса $n_e \geq 2,5$; производство массовое.

3. Длительная прочность, допустимые рабочие температуры по жаропрочности и жаростойкости для легированных сталей и никелевых сплавов приведены в табл. 9.

4. В отчете обосновать выбор материала болта, указать химический состав материала, его термическую обработку, свойства и расчетное значение n_e . Объяснить влияние легирующих элементов на жаропрочность и жаростойкость.

Задание 15.

1. Обосновать выбор материала и термической обработки болта турбореактивного двигателя.

2. Технические условия для выбора:

нагрузки статические от затяжки $\sigma = 20$ МПа, $\tau = 20$ МПа; резьба выполняется накаткой; среда – сухой воздух; рабочая температура эксплуатации 700 °С; ресурс работы болта 10 000 ч; коэффициент запаса $n_e \geq 2,5$; производство мелкосерийное.

3. Длительная прочность, допустимые рабочие температуры по жаропрочности и жаростойкости для легированных сталей и никелевых сплавов приведены в табл. 9.

4. Обосновать выбор материала болта, указать химический состав материала, его термическую обработку, свойства и расчетное значение n_e . Объяснить влияние легирующих элементов на жаропрочность и жаростойкость.

Порядок выполнения работы

1. Провести расчет пределов текучести и циклической прочности материала болта, пользуясь заданными значениями статической нагрузки от затяжки и циклической внешней нагрузки, а так же коэффициентами запаса (n_e и n_a).

2. Выбрать материал болта и его термическую обработку с учетом:

- пределов текучести и циклической прочности болта;
- прокаливаемости материала болта (если предусмотрена термическая обработка);
- стойкости к электрохимической коррозии;
- жаростойкости и жаропрочности;
- технологии изготовления резьбы (накаткой или нарезание резцом);

3. Провести поверочный расчет коэффициентов запаса n_e и n_a для выбранного материала болта и его термической обработки.

Материал и термическая обработка болта выбраны обоснованно, если они удовлетворяют условиям работы, а коэффициенты запаса составляют: $n_e = 1,5 \dots 3,0$; $n_a = 2,5 \dots 4,0$.

Содержание отчета

1. Текст задания.
2. Выбор вариантов болтового соединения (не менее двух).
3. Расчеты на прочность болтовых соединений.
4. Вывод обоснования выбора болтового соединения в соответствии с заданием.

Таблица 5

Механические свойства конструкционных сталей

Марка	Термическая обработка; $d_{кр}$, мм	σ_b , МПа	σ_t , МПа	σ_{-1p} , МПа	δ , %	KCU , МДж/м ²	
						+20 °C	-20 °C
A12	Нормализация	420	240	170	22	0,3	0,3
	Нормализация + нитроцементация	750	500	250	22	0,3	0,3
Ст1	Нормализация	320	180	120	28	1,2	0,4
Ст3	Нормализация	380	210	140	23	1,0	0,4
25	Нормализация	460	280	150	23	1,0	0,9
35	Нормализация	590	220	220	21	0,6	0,5
	Нормализация + нитроцементация	750	500	250	21	0,6	0,5
35Г	Нормализация	645	340	215	29	1,5	1,4
45Г2	Нормализация	800	430	270	21	1,0	1,0
40Х	Нормализация	765	435	255	28	1,1	1,0
	Улучшение; 20 мм	1000	800	330	10	0,6	0,5
40ХН	Улучшение; 40 мм	1000	800	330	11	0,7	0,7

Таблица 6

Механические свойства материалов и их электродные потенциалы в воде

Материал	Марка	Термическая обработка	σ_b , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	V , В
Алюминиевые сплавы	AK12	Отжиг	130	20	2	-0,57
	AMг6	Отжиг	340	170	20	-0,57
Магнийевый сплав	MA5	Закалка + старение	320	220	14	-1,40
Сталь 35	Без покрытия	Нормализация	590	330	21	-0,40
	Покрытие Cd					-0,53
Титановый сплав	BT5	Отжиг	700	660	15	+0,18
Нержавеющая сталь	12X18H10T	Закалка	520	500	40	+0,20

Механические свойства и коррозионная стойкость материалов

Материал	Марка	Термическая обработка	$\sigma_{в}$, МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_{-1p} , МПа	δ , %	Коррозия	
							Общая $V_{кор}$, мм/год	Местная
Латунь	ЛО70-1	Отжиг	350	100	115	60	$\leq 0,001$	—
Бронза	БРАЖО-4	Отжиг	500	220	200	40	$< 0,001$	—
Титановый сплав	ОТ4	Отжиг	800	600	270	20	$< 0,001$	—
Коррозионно-стойкие стали	12Х13	Закалка + отпуск	600	400	200	20	0,01...0,05	ТК
	12Х18Н10Т	Закалка	520	500	170	40	0,005...0,01	ТК
	10Х17Н13М2Т	Закалка	520	500	170	40	$< 0,001$	—
Алюминиевый сплав	АМг6	Отжиг	340	170	115	20	5...10	КР
Магниевый сплав	МА5	Закалка + старение	320	220	107	14	5...10	КР
Сталь	25	Нормализация	460	280	155	23	1...5	—

Примечание. ТК – точечная коррозия, КР – коррозионное растрескивание.

Механические свойства материалов при 20 °С и скорость их окисления на воздухе при 400 °С

Материал	Основной легирующий элемент и его содержание по массе	Марка	Термическая обработка	$\sigma_{в}$, МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	$V_{окисл}$ при 400 °С, г/(м ² ·ч)
Стали	—	25	Нормализация	460	280	23	10^{-3}
	17 % Cr	08Х17Т	Отжиг	400	210	20	10^{-6}
	25 % Cr	15Х25Т	Отжиг	450	260	20	10^{-6}
Магниевый сплав	8 % Al	МА5	Закалка + старение	320	220	14	10^{-1}
Латунь	21 % Zn 2 % Al	ЛА77-2	Отжиг	400	140	55	10^{-4}
Титановый сплав	4,5 % Al	ОТ4	Отжиг	800	600	20	10^{-1}
Алюминиевые сплавы	2,5 % Cu	Д16	Закалка + старение	430	300	11	10^{-6}
	4,5 % Cu	Д1	Закалка + старение	480	320	14	10^{-6}
	1,5 % Mn	АМц	Отжиг	130	50	23	10^{-6}

**Предел ползучести, длительная прочность, допустимые рабочие температуры
по жаропрочности и жаростойкости для легированных сталей и никелевых сплавов**

Материал	Марка	Термическая обработка	δ , %	$\sigma_{1/10\,000}$, МПа	$\sigma_{10\,000}$, МПа	Допустимая рабочая температура, °С	
						по жаропрочности	по жаростойкости
Перлитные стали	12ХМФ	Нормализация	30	84	140	570	600
	25Х2МФ		16	70	160	520	600
Мартенситные стали	15Х5М	Нормализация	15	40	200	600	650
	15Х11МФ	Нормализация	15	90	100	550	750
	45Х10С2М	Улучшение	15	40	100	650	850
Аустенитные стали	10Х11Н20Т3Р	Закалка	40	—	150	700	850
	45Х14Н14В2М	Закалка + старение	40	40	130	650	850
Никелевые сплавы	ХН77ТЮР	Закалка + старение	40	200	110	750	1050
	ЖС6К	Закалка + старение	40	130	150	1050	1050

СОДЕРЖАНИЕ

Работа № 22. Обоснование выбора материала для зубчатых колес	3
Работа № 23. Обоснование выбора материала для болтов	19