

М.Ю. Семенов, Л.П. Фомина, С.Ю. Шевченко

Выбор материала и метода упрочнения для валов и осей

Методические указания

Под редакцией Р.С. Фахуртдинова



Москва
ИЗДАТЕЛЬСТВО
МГТУ им. Н. Э. Баумана
2 0 1 8

УДК 621.785
ББК 34.651
С30

Издание доступно в электронном виде на портале *ebooks.bmstu.ru*
по адресу: <http://ebooks.bmstu.ru/catalog/46/book1742.html>

Факультет «Машиностроительные технологии»
Кафедра «Материаловедение»

*Рекомендовано Редакционно-издательским советом
МГТУ им. Н.Э. Баумана в качестве учебно-методического пособия*

Семенов, М. Ю.

С30 Выбор материала и метода упрочнения для валов и осей. Методические указания к лабораторной работе № 21 по курсу «Материаловедение» для машиностроительных специальностей / М. Ю. Семенов, Л. П. Фомина, С. Ю. Шевченко; под. ред. Р. С. Фахуртдинова. — Москва : Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2018. — 36, [4] с. : ил.

ISBN 978-5-7038-4797-8

Рассмотрены основные показатели прочности, надежности и долговечности валов и осей, которые следует учитывать при выборе материала для их изготовления и метода дополнительного упрочнения. Обоснована необходимость рассмотрения критериев конструкционной прочности материалов для обеспечения надежной и долговечной работы валов.

Для студентов машиностроительных специальностей, изучающих дисциплину «Материаловедение».

УДК 621.785
ББК 34.651

ISBN 978-5-7038-4797-8

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2018
© Оформление. Издательство
МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2018

ПРЕДИСЛОВИЕ

Одной из главных целей преподавания дисциплины «Материаловедение» является получение студентами знаний о рациональном применении используемых в технике материалов с учетом их эксплуатационных и технологических свойств.

Дисциплина «Материаловедение» входит в базовую часть профессионального цикла подготовки бакалавров и специалистов. Изучение данной дисциплины базируется на курсах физики, химии, теории механизмов и машин, сопротивления материалов, деталей машин.

Методические указания к лабораторной работе № 21 предназначены для студентов машиностроительных специальностей, изучающих дисциплину «Материаловедение». Целью работы является освоение методики выбора материала и метода упрочнения валов и осей на основе анализа условий их эксплуатации.

После выполнения лабораторной работы студенты смогут:

- обосновывать выбор стали для изготовления валов и осей и вида ее термической и химико-термической обработки на основе амплитудных значений нормальных и касательных напряжений, коэффициента концентрации напряжений, коэффициента запаса по выносливости с учетом данных о длине и диаметре вала и известных сведений о прокаливаемости, виде и отрасли производства, стоимости стали;

- применять на практике полученные навыки выбора материалов для изготовления валов и осей и знания технологии их термической и химико-термической обработки;

- с помощью специальных справочников осуществлять обоснованный выбор материала типовых деталей и метода его обработки по изученному алгоритму действий с использованием доступных программных средств.

Освоение современных подходов к выбору конструкционных материалов на примере валов и осей открывает студенту возможность решать широкий круг профессиональных задач, связанных с одновременным проектированием конструкции разрабатываемого изделия, определением материала для него и, как следствие, с выбором современного метода упрочняющей обработки.

ВВЕДЕНИЕ

Лабораторная работа № 21 посвящена выбору материала и вида термической обработки валов и осей. Установление расчетным путем требований к эксплуатационным свойствам валов и осей и определение на их основе метода упрочнения являются сложной инженерной задачей, требующей глубоких знаний по дисциплине «Материаловедение» и понимания основных закономерностей формирования структуры и свойств материалов в процессе их термической и химико-термической обработки. Материалы для валов и осей должны одновременно соответствовать требованиям по циклической прочности, износостойкости поверхности, прокаливаемости и ударной вязкости. Кроме того, необходимо обеспечить оптимальную технологичность и экономичность при выборе материала и технологического процесса его упрочнения, такого как поверхностное пластическое деформирование, поверхностная закалка токами высокой частоты, цементация, нитроцементация, азотирование, каждый из которых имеет свои преимущества, ограничения и недостатки.

Объектом работы служит виртуальная деталь — вал или ось, — прочностные свойства которой моделируются на компьютере. Средствами управления объектом являются виртуальные технологические процессы упрочнения, результаты которых моделируются.

Задачами проведения работы являются анализ прочностных характеристик материалов, применяемых для изготовления валов и осей, и изучение особенностей технологии их обработки.

ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Выбор конструкционных материалов для изготовления деталей машин, а также способов их формообразования и упрочнения определяется совокупностью свойств, среди которых:

эксплуатационные свойства, обеспечивающие *конструкционную прочность*, т. е. способность детали, обусловленную конструкцией и материалом, выдерживать воздействие совокупности силовых (напряжения) и иных рабочих факторов (скоростные, температурные, химические и др.) без поверхностного или объемного разрушения (рис. 1), комплекс данных свойств также называют *несущей способностью* материала;

технологические свойства, обеспечивающие максимальную техническую простоту изготовления детали:

- технологическая пластичность,
- литейные свойства,
- обрабатываемость резанием,
- свариваемость и шлифуемость;

экономические свойства, обеспечивающие минимизацию затрат на изготовление деталей (стоимости материала заготовки и обработки).

Требуемые эксплуатационные свойства валов и осей зависят от назначения и конструкции этих деталей. Валы и оси представляют собой детали, как правило, цилиндрической формы, длина которых существенно превосходит диаметр (он может быть постоянным или переменным). Валы, в отличие от осей, передают вращательный момент. Коленчатые валы, которые являются элементами конструкции кривошипно-шатунного механизма, представляют собой детали (узлы) характерной сложной конфигурации.

В машинах и механизмах используют валы передач (рис. 2) и коренные валы (рис. 3). Типовые конструкции осей показаны на рис. 4. В валах и осях широко применяют разъемные соединения: шлицевые и шпоночные (рис. 5), которые являются концентраторами напряжений и влияют на конструкционную прочность валов и осей, и, следовательно, их необходимо принимать во внимание при выборе материала и метода упрочнения.

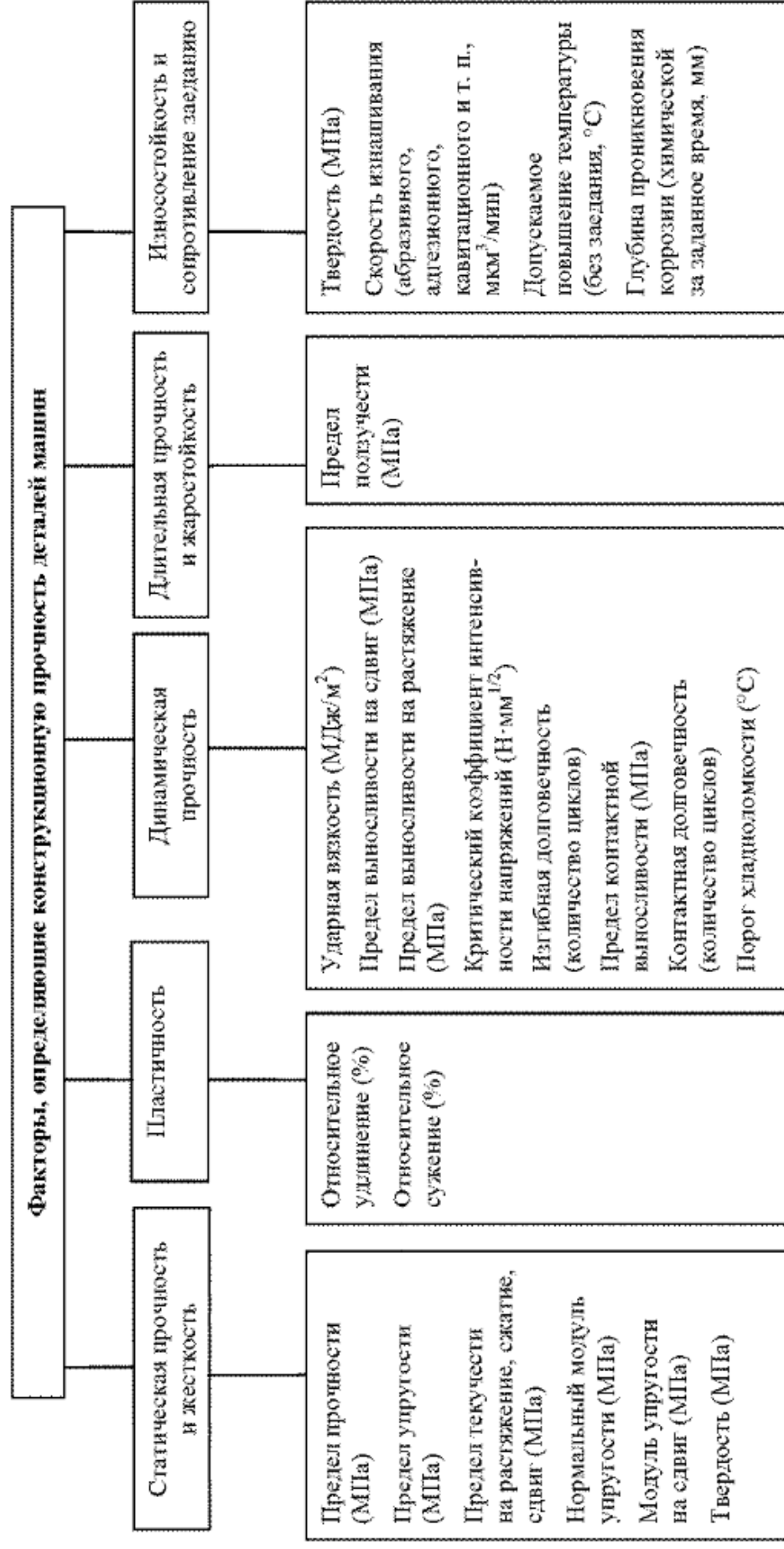


Рис. 1. Эксплуатационные свойства, определяющие несущую способность деталей машин

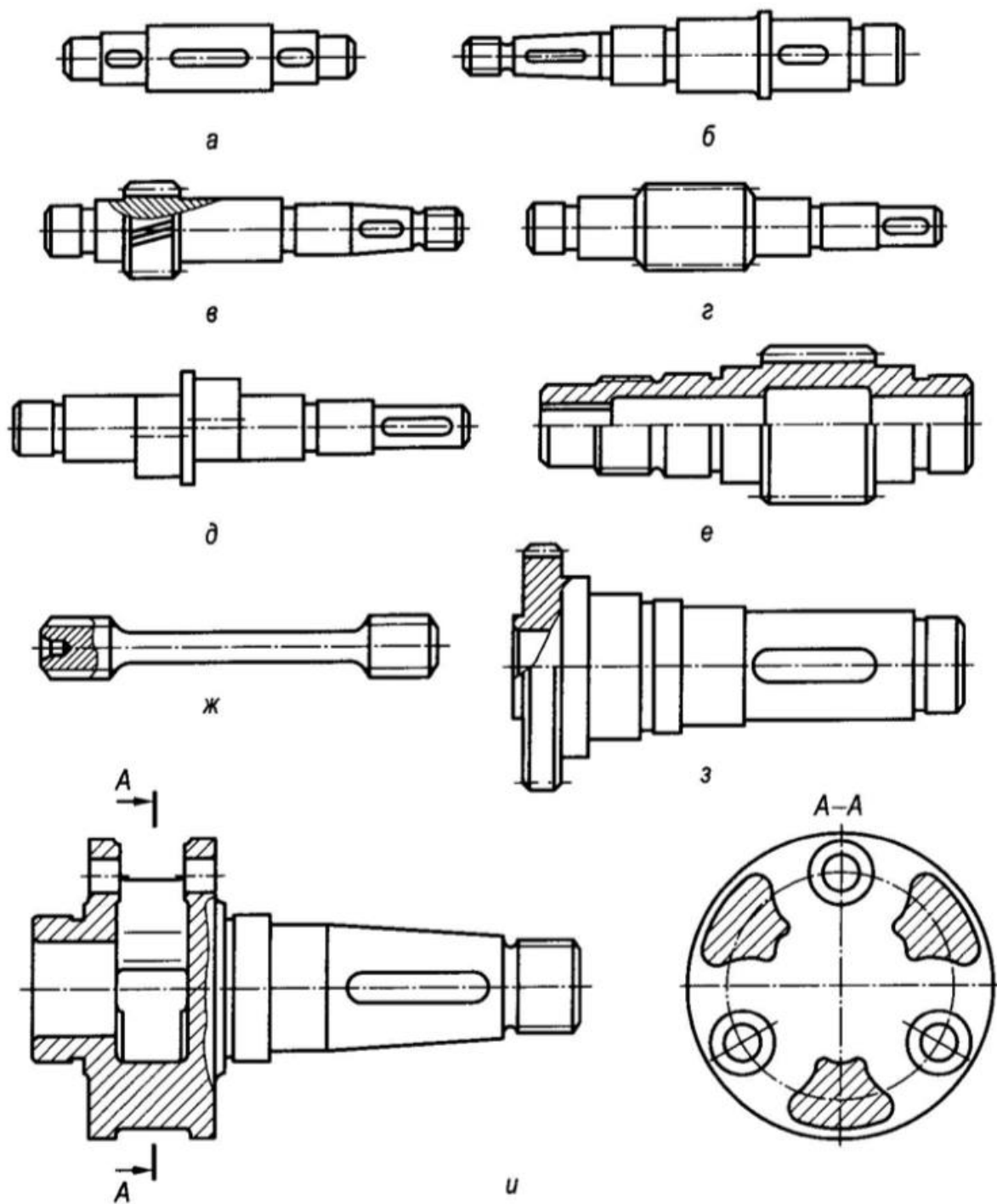


Рис. 2. Валы передач:

a, б — ступенчатые; *в* — вал-шестерня; *г* — вал-червяк; *д* — эксцентриковый вал; *е* — полый вал; *ж* — торсионный вал; *з* — вал с зубчатой полумуфтой; *и* — вал планетарной передачи

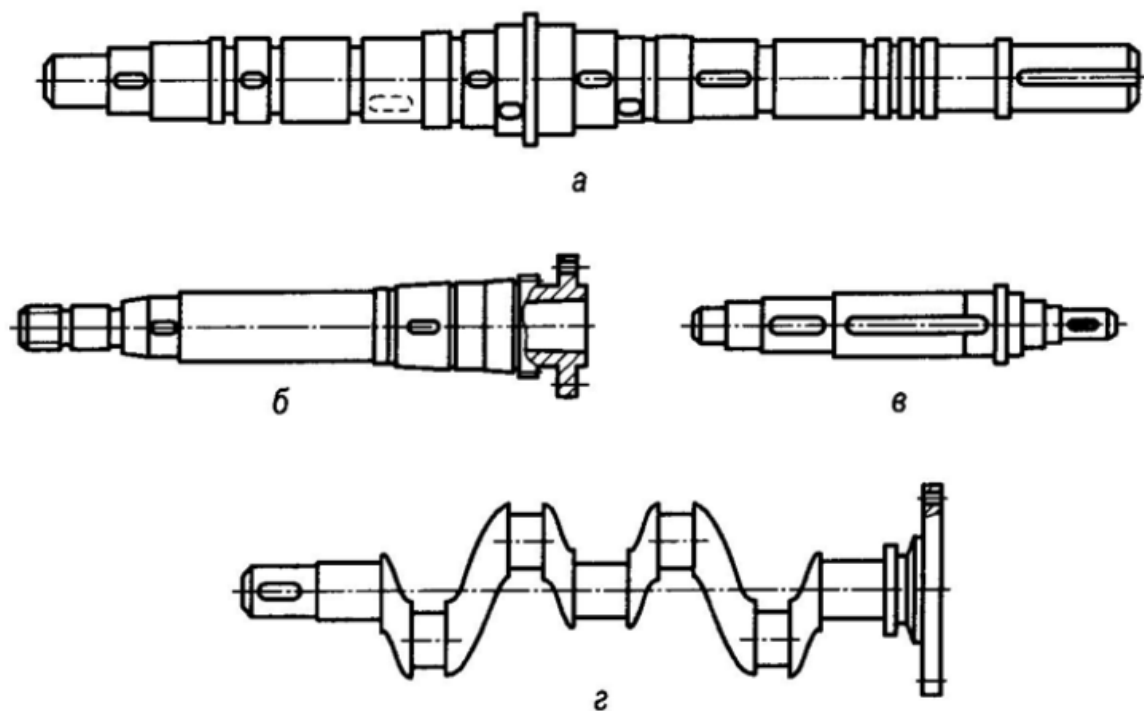


Рис. 3. Коренные валы:

a — вал турбины; *б* — шпиндель станка; *в* — вал электрического двигателя;
г — коленчатый вал двигателя внутреннего сгорания

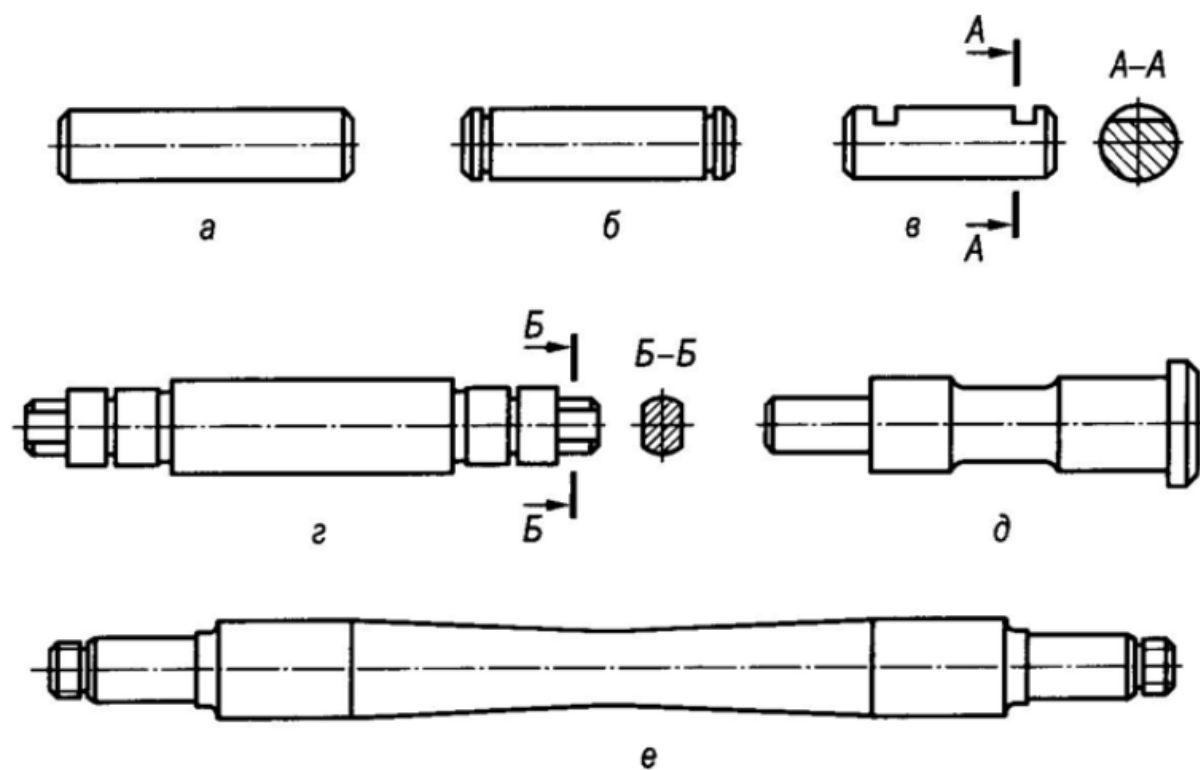


Рис. 4. Оси:

a, б, в — гладкие; *г, д* — ступенчатые; *е* — вращающаяся ось колесной пары

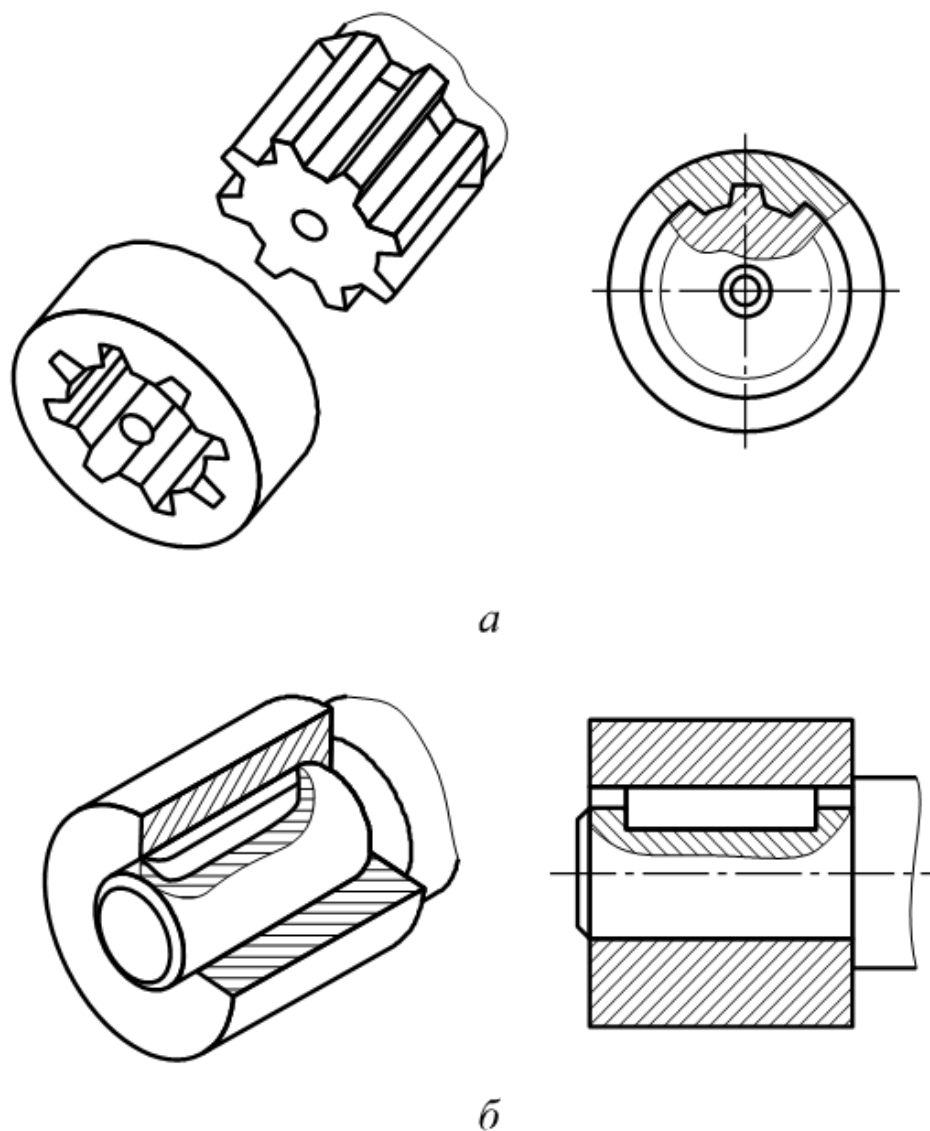


Рис. 5. Разъемные соединения:

a — шлицевое; *б* — шпоночное

Валы испытывают изгибные и сдвиговые напряжения, как правило, переменные по знаку и модулю, оси — только изгибные. Основными эксплуатационными характеристиками валов и осей являются статическая и усталостная прочность, а также жесткость.

Шейки коленчатых валов, штоки амортизаторов, ролики конвейеров и ряд других деталей подвергаются трению, которое вызывает изнашивание. Кроме того, на отдельные валы воздействуют абразивные частицы (например, детали буровой техники, шпиндели металлорежущих станков и т. п.). Долговечность таких деталей зависит также от износостойкости поверхности.

Некоторые валы эксплуатируются в условиях низких температур, агрессивных сред, ударных нагрузок (например, валы бу-

ровых, горно-металлургических и отдельных транспортных машин), сказывающихся на их надежности и долговечности.

Совокупность указанных факторов, определяющих работоспособность валов и осей, необходимо учитывать при выборе материала и способа упрочнения. Одновременно следует принимать во внимание требования технологичности и экономические показатели (оптимизацию расходов на материал и обработку, соотношение цены и качества).

При проверке выполнения требований, вытекающих из условий эксплуатации валов и осей, используют следующие характеристики материалов:

E — модуль нормальной упругости, МПа;

G — модуль сдвига, МПа;

σ_B (τ_B) — предел прочности при растяжении (сдвиге), МПа;

σ_T (τ_T) — предел текучести при растяжении (сдвиге), МПа;

σ_R (τ_R) — предел выносливости при растяжении (сдвиге), МПа, где R — коэффициент асимметрии цикла;

σ_{-1} (τ_{-1}) — предел выносливости при симметричном растяжении (сдвиге), МПа;

K_{1c} — предельный коэффициент интенсивности напряжений, или критерий трещиностойкости Ирвина, МПа·мм^{1/2};

KC — ударная вязкость, МДж/м² (обозначается также KCU , KCV , KCT в зависимости от метода определения);

HRC , HB , HV — твердость, определенная по Роквеллу, Бринеллю и Виккерсу соответственно (при этом следует учитывать, что шкала HRC — для высокопрочных материалов, кроме тонких слоев, например, азотированных, когда следует применять шкалу HV ; шкала HB предназначена для относительно мягких материалов; шкала HV является универсальной);

H — микротвердость, МПа: $10 \text{ МПа} = 1 \text{ HV}$;

I_V — скорость изнашивания, мкм³/мин;

t_{50} — порог хладноломкости, °С.

Совокупность свойств конкретного материала определяется его химическим составом и структурой и, следовательно, может существенно изменяться в зависимости от выбранного способа упрочнения: термической и химико-термической обработки, а также пластической деформации. При проведении поверхностного упрочнения свойства на поверхности и в сердцевине детали могут существенно различаться.

Для оценки *изгибной жесткости* используют модуль нормальной упругости (модуль Юнга), который определяет деформацию детали ε в зависимости от приложенного нормального напряжения σ : $\varepsilon = \sigma/E$. Значение модуля Юнга материала должно быть достаточно большим, чтобы при рассчитанных рабочих напряжениях в детали исключать деформации, превышающие допустимые. Проверку соблюдения требования жесткости проводят только в отношении длинномерных валов и осей узлов повышенной точности (особенно при консольном приложении нагрузки). Применение углеродистых и легированных сталей различного состава, как правило, гарантирует требуемый уровень жесткости валов. Нормальный модуль упругости структурных составляющих стали примерно одинаков (кроме тугоплавких карбонитридов), при легировании карбидообразующими элементами (хромом, молибденом и т. д.) заметно повышается при температурах свыше 500 °С. Модуль Юнга чугуна существенно меньше: для серого чугуна, по разным данным, составляет от 0,9 до $1,3 \cdot 10^5$ МПа.

Крутильная жесткость определяется модулем сдвига G и является критерием работоспособности только наиболее высокооборотных валов.

Статическую прочность оценивают с помощью предела текучести (для вязких материалов) и предела прочности (для хрупких материалов, в частности чугунов): $\sigma_t > nK\sigma_{\text{пр}}$ и $\sigma_b > nK\sigma_{\text{пр}}$ соответственно, где n — коэффициент безопасности, принимаемый с учетом комплекса факторов; K — коэффициент концентрации напряжений, определяемый в наиболее слабом сечении вала или оси (в области галтели, выточки, отверстия, шлицев и т. п.); $\sigma_{\text{пр}}$ — приведенное (или эквивалентное) напряжение, определяемое для вязких материалов по теории касательных напряжений (по Треску) или энергетической теории (по Мизесу), для хрупких — по Морю. При этом для вязких материалов касательные напряжения τ связаны с нормальными σ согласно приближенной формуле эквивалентности $\tau \approx 0,6\sigma$; в частности, предел текучести на сдвиг соотносится с пределом текучести на растяжение как $\tau_t \approx 0,6\sigma_t$. Расчет валов и осей на статическую прочность проводят только в случае вероятности возникновения пиковых напряжений $\sigma_{\text{пр}}$, существенно превосходящих циклические.

Выполнение требования по *усталостной прочности* (выносливости) определяется критериями $\sigma_R > n_B K_\sigma \sigma_a$ и $\tau_R > n_B K_\tau \tau_a$, для симметричного цикла $\sigma_{-1} > n_B K_\sigma \sigma_a$ и $\tau_{-1} > n_B K_\tau \tau_a$, где K_σ и K_τ — коэффициенты концентрации нормальных и касательных напряжений соответственно; σ_a и τ_a — амплитудные значения нормального и касательного напряжения в цикле нагружения; n_B — обобщенный коэффициент безопасности по выносливости, учитывающий рост вероятности зарождения усталостной трещины с увеличением геометрических размеров детали.

Коэффициенты концентрации напряжений K_σ и K_τ определены для галтельного перехода, выточки, поперечного отверстия, шлицов, шпоночного разреза, резьбы при различной статической прочности материалов. Они учитывают также состояние поверхности (шероховатость). Методики расчета коэффициентов концентрации напряжений и исходные табличные данные, учитывающие геометрические параметры валов (осей), а также концентраторов напряжений, представлены в справочниках по расчетам и конструированию деталей машин.

Амплитудные значения нормального и касательного напряжения определяют как

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2}; \quad \tau_a = \frac{\tau_{\max} - \tau_{\min}}{2},$$

где $\sigma_{\max}$, $\sigma_{\min}$, $\tau_{\max}$, $\tau_{\min}$ — соответственно нормальные и касательные максимальные и минимальные напряжения в цикле нагружения.

Обобщенный коэффициент безопасности по выносливости можно рассчитать по формуле

$$n_B = \frac{n_\sigma n_\tau}{\sqrt{n_\sigma^2 + n_\tau^2}},$$

где n_σ и n_τ — коэффициенты безопасности по выносливости, учитывающие рост вероятности зарождения усталостной трещины с увеличением геометрических размеров детали при изгибе и кручении соответственно.

Значения σ_{-1} и τ_{-1} определяют как амплитудные значения соответствующих напряжений, при которых обеспечивается работа детали в течение 10^7 циклов нагружения без разрушения.

Для наиболее ответственных (например, авиационных), а также крупногабаритных (в частности, в энергетике и судостроении) деталей из хрупких высокопрочных материалов (закаленная сталь с высоким содержанием углерода, $\sigma_b \geq 1200$ МПа) дополнительно проводят оценку по коэффициенту интенсивности напряжений K_{1c} :

$$K_{1c} = \alpha \sigma_a \sqrt{\pi l_c},$$

где α — коэффициент формы, возрастающий с увеличением размеров детали; l_c — критический размер трещины. При использовании коэффициента интенсивности напряжений разработчику необходимо устанавливать значение l_c (как правило, порядка 0,1...1,0 мм в зависимости от габаритов детали), а эксплуатанту — в течение всего срока службы изделия периодически измерять размер максимальных усталостных трещин в детали методами неразрушающего контроля.

Усталостное разрушение и разрушение при ударе имеют схожую природу, связанную с закономерностями распространения трещины в материале. Сопротивление материала *динамическим (ударным) нагрузкам* характеризуется вязкостью разрушения

$$K_C = A/S_0,$$

где A — работа удара, МДж, затраченная на разрушение образца с начальным сечением, равным S_0 , м². Если деталь подвергается существенным ударным нагрузкам, то следует применять материалы, вязкость разрушения которых составляет не менее 0,50 МДж/м².

Износостойкость детали оценивается по значению скорости изнашивания I_V , которая равна объему износа (продуктов изнашивания), отделяемому от поверхности детали за одну минуту эксплуатации. Определение I_V осуществляют экспериментально с использованием специального оборудования, поэтому в производственной практике скорость изнашивания, как правило, не контролируется. Вместе с тем известно, что для большинства поверхностно-упрочненных слоев (цементованных, азотированных и других) скорость изнашивания прямо пропорциональна твердости поверхности.

Требования по износостойкости устанавливаются в случаях, когда конструкция узлов, в которые входят валы и оси, предусматривает трение поверхностей (применяются подшипники скольжения, кулачковые механизмы, вводятся другие пары трения типа

щека — шейка и т. п.). Наиболее высокие требования по износостойкости устанавливаются в случаях, когда на пары трения валов и осей оказывают влияние абразивные частицы, особенно кварцевые (например, в строительной, горной, горно-обрабатывающей и другой подобной технике), а также другие неметаллические — оксиды, сульфиды и т. д.

Для деталей, эксплуатирующихся в условиях воздействия частиц абразива, необходимо обеспечивать твердость поверхности на уровне не менее HRC 58...60. Умеренной износостойкости (например, шейки коленчатых валов; шейки валов, вращающихся в подшипниках скольжения и др.) соответствует твердость не менее HRC 48...50. Между твердостью и статической прочностью существует прямая зависимость, которая наиболее четко проявляется при использовании шкал твердости Бринелля и Виккерса.

Хладноломкость оценивают порогом хладноломкости, т. е. температурой, при которой 50 % волокон в сечении излома разрушилось по хрупкому механизму. Порог хладноломкости также ориентировочно соответствует $KCU \approx 0,3 \text{ МДж/мм}^2$. Существует прямая зависимость между порогом хладноломкости, вязкостью разрушения и критическим коэффициентом интенсивности напряжений. Вместе с тем оценка хладноломкости по значению коэффициента K_{Ic} на практике затруднительна.

Отметим, что при изгибе и кручении валов и осей наибольшие напряжения возникают на поверхности. Требуется добиться максимальных прочностных свойств поверхностного слоя детали, сердцевина которой, напротив, должна оставаться вязкой, чтобы обеспечить максимальные значения критического коэффициента интенсивности напряжений и ударной вязкости, что гарантирует высокий уровень усталостной прочности и сопротивления ударным нагрузкам. Упрочнение поверхности служит также целям повышения твердости и, как следствие, износостойкости.

Материалы валов и осей

Основными материалами валов и осей в настоящее время являются углеродистые и легированные стали.

В некоторых случаях, когда жесткость детали обеспечивается ее конструкцией, а сама заготовка имеет сложную форму и целесообразно применять технологию литья (например, некоторые

коленчатые валы), используют высокопрочные чугуны, в том числе легированные, усталостная прочность которых находится на приемлемом уровне. Отметим, что чугун характеризуется высокой износостойкостью, а коэффициент трения стали по чугуну заметно ниже коэффициента трения стали по стали. Чугун, как и другие литые материалы с неоднородной структурой, имеет пониженную чувствительность к концентраторам напряжений.

Также в целях снижения массы конструкции и повышения коррозионной стойкости иногда применяют композиционные материалы на основе алюминия (например, при изготовлении карданных валов некоторых легковых автомобилей), однако использование композитов данного класса лимитируется их высокой стоимостью. Другие материалы (в частности, латуни) для изготовления валов и осей применяют крайне редко.

При выборе стали и способа упрочнения необходимо иметь в виду, что несущая способность осей и валов определяется комплексом свойств, при этом некоторые из них могут являться взаимоисключающими. Так, вязкость, как правило, снижается с увеличением статической прочности (табл. 1). Предел выносливости определяется, как правило, экспериментально (для расчетов используют справочные данные, см. табл. 1).

Статическая прочность материалов находится в тесной связи с твердостью. Для пластичных материалов, к которым относятся стали практически во всех состояниях, с достаточной адекватностью справедлива формула Тайбора

$$\sigma_T = H/3.$$

Зависимость усталостной прочности (выносливости) от статической прочности не однозначна. При $\sigma_B < 1200$ МПа с увеличением значений пределов прочности и текучести предел выносливости стали возрастает. В этом случае с достаточной для практических целей точностью предел выносливости можно оценить по эмпирической формуле Худремонта — Майлендера

$$\sigma_{-1} = 0,25(\sigma_T + \sigma_B) + 50.$$

С увеличением σ_B свыше 1200 МПа предел выносливости может как возрастать, так и снижаться. Для высокопрочных материалов предел выносливости можно оценить методами теории прочности, учитывающими механические свойства, структурные факторы и т. п.

Таблица 1

Характеристики материалов для валов и осей

Марка стали или чугуна	Критический диаметр (охлаждаю- щая среда)	Обработка	σ_b , МПа	σ_{-1} , МПа	τ_{-1} , МПа	δ , %	KCU, МДж/м ²	HV (HRC)	Примечание
Ст5	—	Горячий прокат	540	220	130	13	—	170	—
45	20 (вода)	Нормализация	610	300	170	16	0,5	220	—
45	20 (вода)	Закалка + вы- сокий отпуск	700	350	220	20	1,2	220	—
45Г	30 (вода)	То же	900	350	240	12	0,7	320	—
40Х	30 (масло)	»	1000	360	230	10	0,6	295	—
40ХН	50 (масло)	»	1100	450	250	13	0,7	320	—
40ХМФА	80 (масло)	»	1050	440	250	13	0,9	320	—
36Х2Н2МФА	100 (масло)	»	1200	550	300	12	0,8	350	—
45Х2Н2МФА	120 (масло)	»	1450	650	350	7	0,4	370	—
<i>Стали регламентируемой прокаливаемости</i>									
55П	—	Закалка по- верхностного слоя	2200	660	330	5	0,2	660 (58)	Свойства зака- ленного слоя
47ГТ	—	То же	2300	690	350	6	0,2	660 (58)	—
<i>Стали с высокой обрабатываемостью резанием</i>									
A40Г	—	Нормализация + высокий от- пуск	600	260	150	17	0,9	210	—

A40XE	30 (масло)	Закалка + вы- сокий отпуск	1000	390	240	12	0,6	265	—
AC20XГНМ	50 (масло)	Цементация + закалка + низ- кий отпуск	1000	400	250	10	0,5	740 (62)	Твердость дана для поверхно- сти детали
<i>Стали для изготовления азотируемых деталей</i>									
38X2MЮА	60 (масло)	Закалка + высо- кий отпуск	1000	540	320	14	0,5	1100	Твердость дана для азотиру- ванной поверх- ности детали
30X3МФА	50 (масло)	То же	950	500	310	15	0,6	900	То же
40XMФА	80 (масло)	»	1050	440	250	13	0,9	850	»
30XГТ	35 (масло)	»	900	400	240	16	0,8	800	»
20X	15 (масло)	То же	800	300	160	11	0,6	720 (61)	То же
20XH	25 (масло)	»	850	390	220	14	10	780 (63)	»
18XГТ	30 (масло)	»	1100	520	280	9	0,8	780 (63)	»
30XГТ	35 (масло)	»	1500	600	340	8	0,6	780 (63)	»
20XH3A	60 (масло)	»	1500	420	230	15	0,7	780 (63)	»
12X2H4A	90 (масло)	»	1150	530	300	12	1,0	780 (63)	»
18X2H4MA	100 (масло)	»	1150	560	320	12	1,0	720 (61)	»

Окончание табл. 1

Марка стали или чугуна	Критический диаметр (охлаждаю- щая среда)	Обработка	$\sigma_{в}$, МПа	σ_{-1} , МПа	τ_{-1} , МПа	δ , %	KCU, МДж/м ²	HV (HRC)	Примечание
<i>Стали для изготовления цементуемых деталей</i>									
20	10 (вода)	Цементация + закалка + низкий от- пуск	700	270	150	20	0,8	700 (60)	Твердость дана для цементован- ной поверхности детали
<i>Стали для изготовления литых деталей</i>									
20Л	—	Нормализа- ция	420	210	120	25	0,5	170	—
45Л	—	То же	550	280	160	12	0,3	220	—
50Л	—	«	580	300	170	11	0,25	240	—
50Л	25 (вода)	Закалка + высокий от- пуск	750	350	200	14	0,3	265	—
40ХЛ	30 (масло)	То же	650	330	210	12	0,4	250	—
35НГМ	45 (масло)	Закалка + высокий от- пуск	750	360	260	12	0,4	295	—
<i>Чугуны</i>									
СЧ50	—	Модифици- рование	500	260	120	—	—	265	—
ВЧ80-2	—	То же	800	330	160	2	0,2	295	—

При поверхностном упрочнении σ_{-1} и τ_{-1} для расчетов определяются как

$$\sigma_{-1} = \beta_{\text{упр}} \sigma_{-1}^0; \quad \tau_{-1} = \beta_{\text{упр}} \tau_{-1}^0,$$

где $\beta_{\text{упр}}$ — коэффициент упрочнения; σ_{-1}^0 и τ_{-1}^0 — значения пределов выносливости по изгибу и сдвигу без поверхностного упрочнения соответственно (табл. 2).

Таблица 2

Значения коэффициента упрочнения $\beta_{\text{упр}}$

Вид поверхностного упрочнения	$\sigma_{\text{в сердцевины, МПа}}$	Коэффициент упрочнения $\beta_{\text{упр}}$			
		$K_{\sigma} = 1$	$K_{\sigma} = 1,0-1,5$	$K_{\sigma} = 1,5-2,0$	$K_{\sigma} > 2$
Закалка ТВЧ	600–800	1,5–1,7	1,6–1,7	1,7–2,4	2,4–2,8
	800–1100	1,3–1,5	1,4–1,6	1,6–2,0	2,0–2,3
Цементация	400–600	1,8–2,0	3,0	3,0	3,0
	700–800	1,4–1,5	2,5	2,5	2,5
	1000–1200	1,2–1,3	2,0	2,0	2,0
Азотирование	900–1200	1,1–1,25	1,5–1,7	1,7	1,7–2,1
	1200–1500	1,1–1,25	1,5–1,6	1,6	1,7–2,1
Дробеструйный наклеп	600–1600	1,1–1,25	1,5–1,6	1,6–1,7	1,7–2,1
Накатка роликом	—	1,2–1,3	1,5–1,6	1,6–1,8	1,8–2,0

Согласно общепринятым научным представлениям, зарождение усталостных трещин происходит как в местах концентрации напряжений, обусловленных конструкцией детали, так и на таких объектах микроструктуры, как хрупкие и относительно крупные частицы карбидов и нитридов типа Fe_3C (цементита), Fe_4N и т. п., а также неметаллические включения. С увеличением содержания примесей серы и фосфора усталостная прочность снижается, поэтому в настоящее время углеродистые стали обыкновенного качества для валов и осей, как правило, не применяют.

Валы и оси часто подвергают поверхностному упрочнению различными способами — закалкой токами высокой частоты (ТВЧ), химико-термической обработкой (ХТО), а также поверхностной пластической деформацией (ППД): дробеструйной обработкой, обкаткой роликом и др. Наиболее эффективно сочетание

ХТО и ППД с образованием на поверхности остаточных сжимающих напряжений, которые существенно уменьшают амплитуду растягивающих напряжений.

Альтернативой поверхностному упрочнению являются методы объемного упрочнения, которые должны обеспечивать требуемый для данной детали уровень статической прочности и вязкости. Оптимальным способом упрочнения без снижения вязкости является максимальное измельчение зерна как в результате соответствующей термообработки (термоциклирование), так и путем применения наследственно мелкозернистых сталей (микролегированных титаном, ниобием, ванадием, бором).

Среди углеродистых сталей для валов применяют такие качественные стали, как 40, 45, 50, упрочняемые термическим улучшением (объемной закалкой и высоким отпуском) либо поверхностной закалкой ТВЧ на глубину 1,0...5,0 мм в зависимости от назначения и размеров детали, и стали 15, 20, 25, подвергаемые цементации, закалке и низкому отпуску.

Для валов и осей необходимо обеспечить прокаливаемость на глубину не менее 50 % радиуса от поверхности (для торсионных валов необходима полная прокаливаемость). В этой связи применение углеродистых сталей ограничивается валами и осями небольшого диаметра. Кроме того, закалка углеродистых сталей, которая проводится в воде, вызывает значительные коробления, которые устраняются финишным шлифованием. Наиболее значительны искажения размеров длиномерных деталей. По изложенным выше причинам применение углеродистых сталей для изготовления валов и осей ограничено.

Бóльшие возможности предоставляет применение легированных сталей, которые допускают закалку в масле, ступенчатую закалку, закалку в штампах, что сопровождается меньшими короблениями.

Объемной закалкой и высоким отпуском упрочняют стали 35Х, 40Х, 45Х, 50Х, 40ХН, 40ХФА, 40ХГТР, 40ХН2, 40ХН2МА и др. Для валов и осей большого диаметра рекомендуются такие стали, как 38ХН3МФА, 36Х2Н2МФА, 34ХН3М.

Применять закалку ТВЧ с низким отпуском целесообразно для сталей типа 40Х, 50Г, 50ХФА.

Цементации подвергают стали 20Х, 18ХГТ, 25ХГТ, 12ХН3А, 18ХНВА, 20Х2Н4А и другие низкоуглеродистые стали.

Наряду с повышением выносливости (усталостной прочности) цементация эффективна для увеличения износостойкости. После цементации сталей типа 18ХГТ и 20Х2Н4А обеспечивается твердость HRC 55...64 (HV 600...800).

Как указано выше, усталостная прочность зависит от наличия карбидов цементитного типа, поэтому концентрация углерода на поверхности после цементации не должна превышать 0,8 % по массе. Кроме того, при цементации необходимо исключить обезуглероживание поверхности. Оптимальным образом это достигается благодаря применению цементации в атмосферах низкого давления (вакуумной цементации), при которой одновременно исключается образование оксидов, также неблагоприятно влияющих на выносливость стали. Вакуумную цементацию применяют в серийном производстве. Для массового производства рекомендуется проводить цементацию в высокопроизводительных агрегатах газовой цементации в контролируемых по углероду атмосферах. В массовом производстве цементацию часто заменяют нитроцементацией, при которой температура процесса снижается с 920...960 °С до 850...880 °С, что приводит к уменьшению коробления. После цементации и нитроцементации проводят финишное шлифование для устранения искажения размеров. Свойства цементованных и нитроцементованных деталей в основном аналогичны.

В случае необходимости обеспечения большей износостойкости применяются азотированные хромомолибденоалюминиевые стали типа 38Х2МЮА, обеспечивающие твердость на уровне HRC 62...71 (HV 750...1200). Твердость азотированных сталей типа 40ХН2МА и 38ХН3МФА находится примерно на уровне цементованных и нитроцементованных (не более HV 900 или HRC 67 для азотированных).

Преимуществом азотирования являются более низкие температуры процесса, чем при цементации и нитроцементации — 450...600 °С, при которых коробление сводится к минимуму. Также азотированные слои сохраняют прочность при нагреве до 400...500 °С.

Недостатком азотирования является малая протяженность упрочненных слоев (не более 0,5 мм), что может приводить к образованию усталостных трещин под азотированным слоем в случае развития ультравысокой усталости (при $10^9...10^{10}$ циклах нагружения).

Также азотирование — дорогостоящий, длительный процесс (30...50 ч при газовом, 10...30 ч при ионном азотировании), применяемый в основном в серийном производстве.

В последнее время в аэрокосмической отрасли для высоконагруженных валов применяют высокопрочные мартенситно-старяющие стали типа 03Н18К9М5Т-Ш, которые сочетают высокие значения прочности и вязкости. Однако данные стали, легированные большим количеством дефицитного никеля и остродефицитного кобальта, очень дороги.

Хладноломкость снижается с увеличением содержания углерода и примесей серы и фосфора. Наиболее распространенные качественные углеродистые стали характеризуются порогом хладноломкости, равным $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$, низколегированные стали — равным $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$. Порог хладноломкости этих сталей может быть понижен до $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ путем проведения термической обработки, направленной на измельчение зерна (термоциклирование). Порог хладноломкости может быть понижен также легированием никелем. Наиболее низкий порог хладноломкости присущ мартенситно-старяющим сталям ($t_{50} = -200\text{ }^{\circ}\text{C}$ без специальной термообработки) и особенно хромоникелевым сталям аустенитного класса типа 12Х18Н10Т ($t_{50} = -250\text{ }^{\circ}\text{C}$ без специальной термообработки).

Технологичность материалов валов и осей

При выборе материалов для валов и осей и методов их упрочнения большое значение имеют технологические свойства.

Формообразование валов и осей осуществляют из литых и катаных заготовок, а также поковок. Как правило, заготовки подвергают механической обработке резанием, а при особо высоких требованиях к чистоте поверхности — дополнительно шлифованию, которое также применяют, как указано выше, для устранения последствий коробления в результате термической обработки и ХТО.

Валы сложной формы (коленчатые) изготавливают из литых заготовок и поковок. Валы (оси) цилиндрической формы переменного диаметра не рационально изготавливать из прутков (вид проката) вследствие больших припусков на механическую обработку.

Для валов и осей можно применять материалы с особыми технологическими свойствами.

Наилучшие литейные свойства имеют чугуны (вследствие малого интервала кристаллизации). Для полых валов большого диаметра, изготавливаемых методом центробежного литья, используют стали типа 20Л, 45Л с повышенным содержанием кремния и марганца.

Для улучшения обрабатываемости резанием (увеличение скоростей резания, повышение стойкости инструмента и качества обрабатываемой поверхности) применяются специальные автоматные стали.

При резании автоматных сталей А12, А20, А40Г, содержащих повышенные концентрации серы, фосфора и марганца, образуется ломкая стружка, а также уменьшается трение между инструментом и стружкой. Для повышения обрабатываемости стали с повышенным содержанием серы дополнительно вводят селен (сталь А40ХЕ, содержащую хром). Отметим, что полезные технологические свойства достигаются отчасти в ущерб усталостной прочности и особенно ударной вязкости по сравнению с соответствующими углеродистыми (стали 12, 20) и легированными сталями (40Г).

Применяют также стали, легированные 0,15...0,30 % свинца, который присутствует в стали в виде дисперсных частиц и также способствует повышению стойкости инструмента в 2–7 раз (например, АС20ХГНМ). Дополнительно применяют стали повышенной обрабатываемости резанием, легированные кальцием (например, АЦ20ХГНМ).

Автоматные стали используют для валов и осей вместо аналогичных по содержанию углерода и легирующих элементов сталей. В частности, А40Г применяют для изготовления ходовых винтов станков, АС20ХГНМ, АЦ20ХГНМ и АС40ХГНМ — валов редукторов различного назначения, высокопрочные автоматные стали АЦ30Х3НМАФБ и АЦ40Х2НМАФ — коленчатых валов и т. д.

ВАРИАНТЫ ЗАДАНИЯ

Вариант 1. Подобрать материал для изготовления вала привода рабочего органа землеройной машины ($d = 30$ мм, $l/d = 8$). Вал вращается в подшипниках качения. Шестерни посажены на вал на шлицы. Опасное сечение — шлицевое соединение. Вал рассчитан на длительный срок службы. Амплитудные значения нормальных и касательных напряжений $\sigma_a = 85$ МПа; $\tau_a = 50$ МПа; коэффициенты концентрации нормальных и касательных напряжений $K_\sigma = 4$; $K_\tau = 3,5$; коэффициент запаса по выносливости $n_B = 1,25$. Производство серийное.

Вариант 2. Подобрать материал для коленчатого вала теплового двигателя ($d = 90$ мм; $l = 2,6$ м). Цикл нагружения шеек вала условно считать симметричным. Вал вращается в подшипниках скольжения. Опасное сечение — место сопряжения щеки с шейкой. Амплитудные значения нормальных и касательных напряжений $\sigma_a = 100$ МПа; $\tau_a = 60$ МПа; коэффициенты концентрации нормальных и касательных напряжений $K_\sigma = 4$; $K_\tau = 3,3$; коэффициент запаса по выносливости $n_b = 1,3$. Концентраторы напряжения указаны для стали с $\sigma_b = 1000 \dots 1200$ МПа с учетом масштабного фактора. Высокая износостойкость шеек вала обязательна. Производство мелкосерийное.

Вариант 3. Подобрать материал для коленчатого вала автомобильного двигателя ($d = 40$ мм; $l = 800$ мм). Цикл нагружения условно считать симметричным. Вал вращается в подшипниках скольжения. Опасное сечение — отверстие для подачи масла в шейке вала. Амплитудные значения нормальных и касательных напряжений $\sigma_a = 90$ МПа; $\tau_a = 50$ МПа; коэффициенты концентрации нормальных и касательных напряжений $K_\sigma = 3,5$; $K_\tau = 4$; коэффициент запаса по выносливости $n_b = 1,5$. Производство серийное.

Вариант 4. Подобрать материал для вала редуктора ($d = 50$ мм; $l = 300$ мм), вращающегося в подшипниках качения, на который на шлицевом соединении посажены шестерни. Опасное сечение — галтель. Амплитудные значения нормальных и касательных напряжений $\sigma_a = 95$ МПа; $\tau_a = 65$ МПа; коэффициенты концентрации нормальных и касательных напряжений $K_\sigma = 3$; $K_\tau = 2,5$; коэффициент запаса по выносливости $n_b = 1,5$. Производство массовое.

Вариант 5. Подобрать материал для шпинделя координатно-расточного станка, вращающегося в подшипниках скольжения ($d = 40$ мм; $l = 1,0$ м). Опасное сечение — галтель. Амплитудные значения нормальных и касательных напряжений $\sigma_a = 80$ МПа; $\tau_a = 50$ МПа; коэффициенты концентрации нормальных и касательных напряжений $K_\sigma = 3,5$; $K_\tau = 4$; коэффициент запаса по выносливости $n_b = 1,5$. Производство серийное.

Вариант 6. Подобрать материал для полуоси автомобиля, вращающейся в подшипниках качения ($d = 20$ мм; $l = 1,0$ м). Опасное сечение — выход шлица для посадки шестерни. Амплитудные значения нормальных и касательных напряжений $\sigma_a = 80$ МПа; $\tau_a = 60$ МПа; коэффициенты концентрации нормальных и касательных напряжений $K_\sigma = 4$; $K_\tau = 3,5$; коэффициент запаса по выносливости $n_b = 1,25$. Производство крупносерийное.

Вариант 7. Подобрать материал для шпинделя координатно-расточного станка, работающего в условиях повышенного износа в подшипниках скольжения ($d = 75$ мм; $l = 1,5$ м). Опасное сечение — галтель. Амплитудные значения нормальных и касательных напряжений $\sigma_a = 120$ МПа; $\tau_a = 80$ МПа; коэффициенты концентрации нормальных и касательных напряжений $K_\sigma = 2,5$; $K_\tau = 2,5$; коэффициент запаса по выносливости $n_b = 1,25$. Производство массовое.

Вариант 8. Подобрать материал для вала привода конусных дробилок руды металлургических заводов ($d = 60$ мм; $l = 1,5$ м). Привод работает в условиях ударного приложения нагрузки. Шестерни посажены на шлицы. От вала требуется повышенная жесткость. Опасное сечение — галтель. Амплитудные значения нормальных и касательных напряжений $\sigma_a = 130$ МПа; $\tau_a = 70$ МПа; коэффициенты концентрации нормальных и касательных напряжений $K_\sigma = 3$; $K_\tau = 2$; коэффициент запаса по выносливости $n_b = 1,2$. Производство серийное.

Вариант 9. Подобрать материал для целикового кулачкового распределительного валика ($d = 15$ мм; $l = 800$ мм), обеспечивающего высокую жесткость и износостойкость кулачков. Вал работает в подшипниках скольжения. Амплитудные значения нормальных и касательных напряжений $\sigma_a = 130$ МПа; $\tau_a = 70$ МПа; коэффициенты концентрации нормальных и касательных напряжений $K_\sigma = 2,5$; $K_\tau = 3$; коэффициент запаса по выносливости $n_b = 1,4$. Производство крупносерийное.

Вариант 10. Подобрать материал для вала редуктора мостового крана, вращающегося в подшипниках качения ($d = 30$ мм; $l = 300$ мм). Опасное сечение — галтель. Амплитудные значения нормальных и касательных напряжений $\sigma_a = 100$ МПа; $\tau_a = 60$ МПа; коэффициенты концентрации нормальных и касательных напряжений $K_\sigma = 3$; $K_\tau = 2,5$; коэффициент запаса по выносливости $n_b = 1,5$. Производство серийное.

Вариант 11. Подобрать материал для вала вибрационного грохота ($d = 20$ мм; $l = 500$ мм). Опасное сечение проходит по шлицу. Амплитудные значения нормальных и касательных напряжений $\sigma_a = 140$ МПа; $\tau_a = 90$ МПа; коэффициенты концентрации нормальных и касательных напряжений $K_\sigma = 3$; $K_\tau = 1,25$; коэффициент запаса по выносливости $n_b = 1,25$. Производство мелкосерийное.

Вариант 12. Подобрать материал для вала редуктора, рассчитанного на длительный срок службы ($d = 10$ мм; $l = 80$ мм). Вал вращается в подшипниках качения. Опасное сечение — галтель.

Амплитудные значения нормальных и касательных напряжений $\sigma_a = 75$ МПа; $\tau_a = 40$ МПа; коэффициенты концентрации нормальных и касательных напряжений $K_\sigma = 5$; $K_\tau = 3$; коэффициент запаса по выносливости $n_b = 1,35$. Производство массовое.

ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Определить, какие из перечисленных ниже критериев конструкционной прочности должен обеспечивать выбираемый материал:

а) требуемую циклическую прочность.

Значения пределов выносливости σ_{-1} и τ_{-1} материала рассчитать, используя приближенные соотношения:

$$\sigma_{-1} = n_b K_\sigma \sigma_a; \quad \tau_{-1} = n_b K_\tau \tau_a;$$

б) необходимую износостойкость материала вала, определяемую твердостью: высокая износостойкость $HRC \geq 55$; средняя $HRC = 40 \dots 55$; не влияет на выбор материала;

в) надежность, определяемую ударной вязкостью: высокая $KCU > 0,5$ МДж/м²; средняя $KCU = 0,3 \dots 0,5$ МДж/м²; не лимитирует выбора.

2. Определить возможный вид заготовки вала: литая, ковкая, штампованная, составная, сварная, выточенная из сортового проката. Наметить возможные группы материалов для изготовления вала: чугун, стальное литье, стали обыкновенного качества, сталь углеродистая качественная нормализованная, стали углеродистые улучшенные, стали легированные улучшенные, стали с регламентированной прокаливаемостью, стали, закаленные ТВЧ (поверхностная закалка), стали цементованные, нитроцементованные, азотированные, стали автоматные.

3. Для каждого вида заготовки и предполагаемой упрочняющей обработки определить технологические характеристики, которым должен отвечать материал:

а) прокаливаемость (больше диаметра вала);

б) малая деформация при упрочняющей термической или химико-термической обработке (для нежестких валов с отношением $l/d > 7$ должна быть исключена цементация);

в) необходимая обрабатываемость резанием (особенно для валов с большим объемом этой обработки, например валов со

шлицевым соединением. Для ступенчатых валов требование обрабатываемости резанием может исключить пруток как возможный вид заготовки, особенно для массового производства);

г) литейные свойства (для отливок).

4. Из табл. 1 выбрать два-три варианта материалов, обеспечивающих определенные в п. 1 значения пределов выносливости σ_{-1} и τ_{-1} , с учетом характеристик, определенных в пп. 2, 3.

5. Рассмотреть варианты применения материалов с использованием поверхностного упрочнения: накатки роликом, цементации, азотирования поверхностной закалки с нагревом ТВЧ. Значения коэффициентов $\beta_{\text{упр}}$ можно определить по средним значениям, приведенным в табл. 2.

6. Для выбранных видов поверхностного упрочнения рассчитать пределы выносливости с учетом поверхностного упрочнения:

$$\sigma_{-1} = \frac{n_{\text{в}}}{\beta_{\text{упр}}} K_{\sigma} \sigma_a; \quad \tau_{-1} = \frac{n_{\text{в}}}{\beta_{\text{упр}}} K_{\tau} \tau_a.$$

Выбрать из табл. 1 материалы, удовлетворяющие требованиям по пределам выносливости с учетом вида поверхностного упрочнения (азотируемые стали, цементуемые стали и т. п.).

7. Для выбранных материалов и методов упрочнения (не менее двух) провести расчет коэффициента запаса прочности по выносливости $n_{\text{в}}$, используя соотношения

$$(\sigma_{-1})_D = \frac{\sigma_{-1}}{K_{\sigma}} \beta_{\text{упр}}; \quad n_{\sigma} = \frac{(\sigma_{-1})_D}{\sigma_a};$$

$$(\tau_{-1})_D = \frac{\tau_{-1}}{K_{\tau}} \beta_{\text{упр}}; \quad n_{\tau} = \frac{(\tau_{-1})_D}{\tau_a};$$

$$n_{\text{в}} = \frac{n_{\tau} n_{\sigma}}{\sqrt{n_{\sigma}^2 + n_{\tau}^2}},$$

где $(\sigma_{-1})_D$ и $(\tau_{-1})_D$ — пределы текучести в наиболее нагруженном сечении (по растяжению и сдвигу соответственно).

Для всех задач приведены значения коэффициентов концентрации нормальных K_{σ} и касательных K_{τ} напряжений, справедливые для сталей с $\sigma_{\text{в}} = 800$ МПа. В случае необходимости исполь-

зования более прочной стали значения K_σ и K_τ необходимо увеличить на 0,1 на каждые 100 МПа (т. е. для стали с $\sigma_b = 900$ МПа принять $K_\sigma = 2,6$, а не 2,5, как указано в задании). При использовании чугуна значение K_σ следует уменьшить в 1,5 раза.

Сравнить рассчитанные коэффициенты запаса по выносливости с заданными и, если необходимо, уточнить марку сплава из выбранной группы или рассмотреть возможность изменения размеров вала.

8. Пункты 1–7 можно выполнить с помощью прикладной программы MaterialChoice, разработанной на кафедре МТ8 МГТУ им. Н.Э. Баумана. Для выбора материала вала требуется указать вид детали «Вал» в окне «Выбор конструкционных материалов деталей машин» и нажать кнопку «Пуск» (рис. 6).

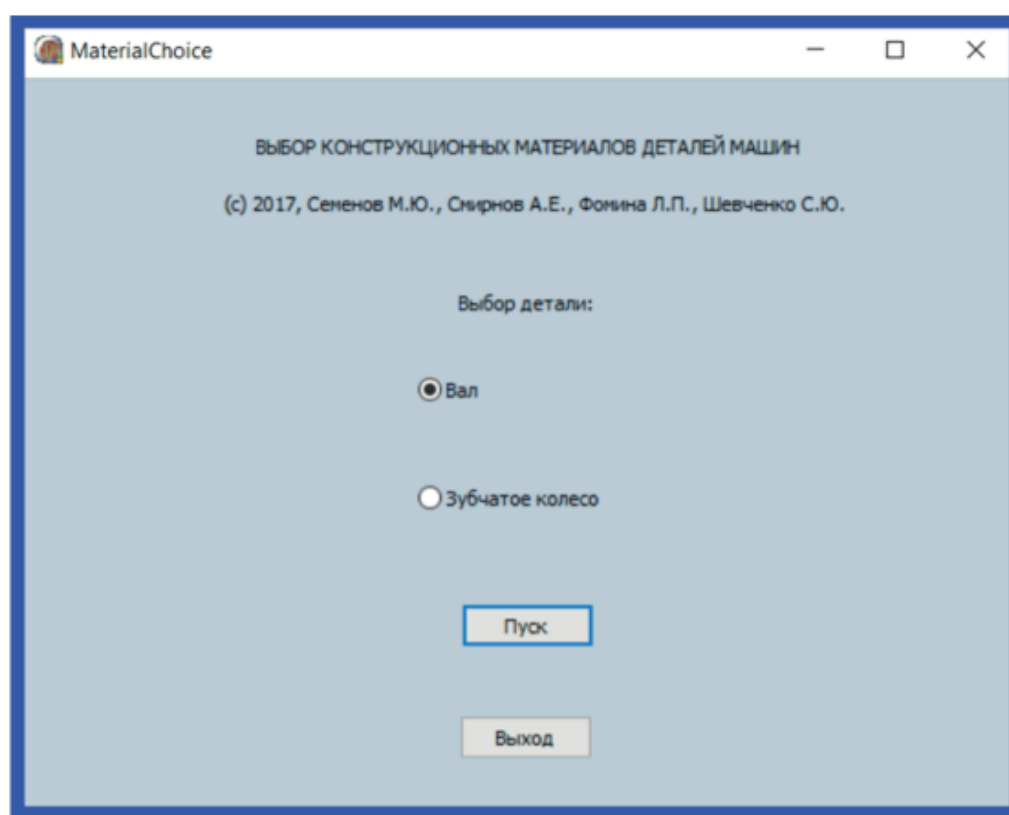


Рис. 6. Окно «Выбор конструкционных материалов деталей машин» программы MaterialChoice

После открытия окна «Выбор материала вала» требуется ввести исходные данные: нормальный предел выносливости выбранного по табл. 1 материала, МПа; касательный предел выносливости выбранного материала, МПа; нормальное амплитудное напряжение, МПа; касательное амплитудное напряжение, МПа; коэффициент концентрации напряжений нормальный; коэффициент концентрации напряжений касательный; табличное значение коэффициента упрочнения; твердость выбранного материала после

упрочнения в соответствии с табличными данными. После нажатия кнопки «Произвести расчет» получают расчетные значения коэффициента запаса нормальной прочности по выносливости n_{σ} ; коэффициента запаса касательной прочности по выносливости n_{τ} ; коэффициента запаса прочности по выносливости n_v в соответствии с ранее изложенной методикой; эквивалентного напряжения $S_{\text{экв}}$ по Мизесу; коэффициента запаса прочности по выносливости $n_{\text{инт}}$ в соответствии с оценкой по теории Тайбора (рис. 7).

Выбор материала вала

Ввод исходных данных:

Нормальный предел выносливости, МПа
350

Касательный предел выносливости, МПа
220

Нормальное амплитудное напряжение, МПа
90

Касательное амплитудное напряжение, МПа
50

Коэффициент концентрации напряжений нормальный
4

Коэффициент концентрации напряжений касательный
3

Результаты расчета:

Параметр	Значение
n_{σ}	1,56
n_{τ}	2,35
n_v	1,3
$S_{\text{экв}}$, МПа	727
$n_{\text{инт}}$	1,26

Коэффициент упрочнения
1,6

Твердость поверхности материала после упрочнения, НВ
550

Произвести расчет

Заккрыть

Рис. 7. Окно «Выбор материала вала» программы MaterialChoice

Необходимо, чтобы коэффициенты запаса прочности по выносливости n_v , $n_{\text{инт}}$ превышали заданное в условии задачи значение коэффициента запаса по выносливости. Как правило, рассчитанное на основании теории упругости значение $n_{\text{инт}}$ будет меньше, чем n_v , рассчитанное по стандартной методике. Вместе с тем при применении различных независимых друг от друга расчетных методик следует принимать во внимание меньшее значе-

ние коэффициента запаса из соображений безопасности. Применение более точных методик расчета, во-первых, исключает случаи разрушения конструкций, которые, согласно типовой методике, обладают необходимым запасом прочности, что, к сожалению, редко, но встречается в инженерной практике. Во-вторых, более точные методики, основанные на теории упругости и учитывающие свойства материала, дают возможность обоснованно снижать значения коэффициента безопасности, реализовывать все потенциальные возможности материала и тем самым снижать металлоемкость и массу конструкции без риска ее разрушения.

При выполнении лабораторной работы студенты должны рассмотреть различные варианты материалов и соответствующих им методов упрочнения и отобрать материалы и методы, которые соответствуют предъявляемым к детали эксплуатационным требованиям. После выбора нескольких приемлемых с точки зрения безопасности вариантов (как правило, не менее двух-трех) они могут перейти к следующему шагу.

9. Дать сравнительную оценку выбранным вариантам материалов по характеристикам конструкционной прочности (табл. 3), технологичности (табл. 4), стоимости материала (табл. 5) и обработки (табл. 6). Результаты сравнительной оценки оформить в виде табл. 7.

Таблица 3

**Сравнение групп материалов
по критериям конструкционной прочности**

Группа материалов	Характеристики конструкционной прочности, баллы		
	Усталостная прочность	Износостойкость	Надежность
Горячекатаные стали обыкновенного качества	1	1	4
Углеродистые и легированные стали в улучшенном состоянии	2	2	5
Среднеуглеродистые стали, закаленные ТВЧ	3	3	3
Цементованные стали	4	4	3
Азотированные стали	5	5	2

Сравнение групп материалов по технологическим характеристикам

Группа материалов	Технологические характеристики, баллы			
	Упрочняющая обработка	Обработка резанием	Шлифуемость	Коробление при термообработке
Автоматные стали, не подвергающиеся закалке	5	5	1	5
Нормализованные и улучшенные углеродистые и легированные стали	5	3–4	2	5
Стали, подверженные поверхностной закалке ТВЧ	4	3–4	5	4
Цементованные стали	2	3–4	5	1
Азотированные стали	1	3–4	4	3
Чугуны	4	4	—	—

Таблица 5

Сравнение групп материалов по стоимости

Группа материалов	Стоимость материала, баллы
Углеродистые стали и чугуны	5
Низколегированные стали без Ni, W, Mo	4
Низколегированные стали, содержащие Ni, W, Mo	3
Среднелегированные стали	2
Высоколегированные стали, цветные металлы	1

Таблица 6

Сравнение видов обработки вала по стоимости

Вид обработки вала	Стоимость обработки, баллы
Без упрочняющей обработки (нормализованные и улучшенные стали, чугуны)	5
Поверхностный наклеп	4
Упрочнение поверхности ТВЧ и низким отпуском	4
Цементация + низкий отпуск + шлифование	2
Азотирование	1

Таблица 7

Пример сравнительной оценки выбранных вариантов материалов и их обработки

Материал	Стоимость материала, баллы	Вид заготовки вала	Последовательность обработки	Потребность в специоборудовании	Стоимость изготовления, баллы	Характеристики конструкционной прочности, баллы				Технологические характеристики, баллы		
						Усталостная прочность	Износостойкость	Надежность	Упрочняющая обработка	Обработка резанием	Коробление при термообработке	
45	5	Пруток	Улучшение, обработка резанием, накатка роликом, шлифование	Есть	4	2	2	5	5	4		5
40X	4	Пруток	Улучшение, обработка резанием, накатка роликом, шлифование	Есть	4	2	2	5	5	4		5
20X	4	Пруток	Обработка резанием, химико-термическая обработка	Есть	2	4	4	3	2	4		1

10. Выбрать материал для изготовления вала с учетом баллов по табл. 7 и рассчитанного коэффициента n_b . Окончательный выбор материала и технологии дополнительно обосновать с учетом условий задания.

ПРИМЕР ОБОСНОВАНИЯ ВЫБОРА МАТЕРИАЛА

Задача. Подобрать материал для вала редуктора ($l/d = 6$, $d = 10$ мм) с нарезанной на нем шестерней, рассчитанного на длительный срок службы. При работе редуктора возможны резкие включения и остановки. Вал вращается в подшипниках качения. Опасное сечение — галтель в месте посадки подшипника. Амплитудные значения напряжений $\sigma_a = 90$ МПа, $\tau_a = 50$ МПа, коэффициенты концентрации нормальных и касательных напряжений $K_\sigma = 4$, $K_\tau = 3$, коэффициент запаса по выносливости $n_b = 1,25$. Производство мелкосерийное.

Решение

1. Критерии конструкционной прочности для вала: пределы выносливости σ_{-1} и τ_{-1} ; износостойкость зубьев шестерни; высокая ударная вязкость.

Технологические требования: хорошая обрабатываемость резанием; возможность упрочнения шеек вала для улучшения шлифуемости посадочных мест под подшипниками качения, возможность повышения износостойкости зубьев шестерни. Прокаливаемость должна быть не менее 10 мм. Ударная вязкость — высокая, не менее 0,6 МДж/м².

2. Ориентировочные требования по пределам выносливости:

$$\sigma_{-1} = n_b K_\sigma \sigma_a = 1,25 \cdot 4 \cdot 90 = 450 \text{ МПа};$$

$$\tau_{-1} = n_b K_\tau \tau_a = 1,25 \cdot 3 \cdot 50 = 188 \text{ МПа}.$$

3. Без упрочняющей поверхностной обработки такие свойства обеспечиваются лишь улучшаемыми легированными сталями типа 40ХН или еще более легированными и дорогими (см. табл. 5, 6). Применение комплексно легированных сталей, особенно содержащих никель, для изготовления мелких валов нерационально, поскольку преимущества легированных сталей проявляются главным образом при производстве крупных деталей.

Однако возможность обеспечения конструкционной прочности без упрочняющей дополнительной поверхностной обработки является большим технологическим преимуществом, поскольку поверхностное упрочнение требует специального оборудования, которым не всегда располагают заводы.

Рассмотрим различные способы поверхностного упрочнения вала:

а) упрочнение галтели вала, изготовленного из стали, накаткой роликом; $\beta_{\text{упр}} = 1,6$. Требования к пределам выносливости сталей:

$$\sigma_{-1} = \sigma_a K_{\sigma} \frac{n_b}{\beta_{\text{упр}}} = 90 \cdot 4 \cdot 1,25 / 1,6 = 181 \text{ МПа};$$

$$\tau_{-1} = \tau_a K_{\tau} \frac{n_b}{\beta_{\text{упр}}} = 50 \cdot 3 \cdot 1,25 / 1,6 = 117 \text{ МПа};$$

б) цементация вала, изготовленного из стали; $\beta_{\text{упр}} = 2$ (с учетом большого значения K_{σ}). Требования к пределам выносливости:

$$\sigma_{-1} = \sigma_a K_{\sigma} \frac{n_b}{\beta_{\text{упр}}} = 90 \cdot 4 \cdot 1,25 / 2 = 225 \text{ МПа};$$

$$\tau_{-1} = \tau_a K_{\tau} \frac{n_b}{\beta_{\text{упр}}} = 50 \cdot 3 \cdot 1,25 / 2 = 94 \text{ МПа};$$

в) закалка вала ТВЧ. Использование ТВЧ характерно для массового и крупносерийного производства. Кроме того, возникают дополнительные трудности точного базирования индуктора при закалке зубьев с мелким модулем.

Стали регламентированной прокаливаемости не могут быть применены, поскольку мелкие зубья шестерни прокалятся насквозь и не будет обеспечена необходимая ударная вязкость.

Выбор *азотируемых сталей* для условий данного примера не оправдан, так как высокой износостойкости шеек вала не требуется (вал вращается в подшипниках качения), а контактная выносливость азотированных шестерен ниже цементованных.

Чугун не обеспечивает необходимых пределов выносливости и не обеспечивает надежности при ударных нагрузках.

Для мелкосерийного производства наиболее часто используют кованные или точенные из сортового проката заготовки. В обоих случаях имеет место большой объем обработки резанием. Зубья шестерен могут шлифоваться лишь на специальном оборудовании. Чтобы избежать шлифования, следует отказаться от цементации и применять нитроцементацию наследственно мелкозернистых сталей (легированных), что позволяет проводить непосредственную закалку с температуры нитроцементации.

4. Рассчитаем и сравним с заданным коэффициент запаса по выносливости n_b следующие стали и методы их упрочнения:

а) улучшаемая сталь 45; упрочнение — накатка роликом галтели:

$$n_{\sigma} = \frac{\sigma_{-1}\beta_{\text{упр}}}{K_{\sigma}\sigma_a} = \frac{350 \cdot 1,6}{4 \cdot 90} = 1,55; \quad n_{\tau} = \frac{\tau_{-1}\beta_{\text{упр}}}{K_{\tau}\tau_a} = \frac{220 \cdot 1,6}{3 \cdot 50} = 2,34;$$

$$n_b = \frac{n_{\sigma}n_{\tau}}{\sqrt{n_{\sigma}^2 + n_{\tau}^2}} = 1,30;$$

б) хромистая сталь 20Х; нитроцементация, закалка и низкий отпуск:

$$n_{\sigma} = \frac{300 \cdot 2}{4 \cdot 90} = 1,67; \quad n_{\tau} = \frac{160 \cdot 2}{3 \cdot 50} = 2,13, \quad n_b = 1,31;$$

в) улучшаемая сталь 40Х; накатка роликом галтели:

$$n_{\sigma} = \frac{360 \cdot 1,6}{4 \cdot 90} = 1,60; \quad n_{\tau} = \frac{230 \cdot 1,6}{3 \cdot 50} = 2,45; \quad n_b = 1,34.$$

5. Сравнительная характеристика выбранных сталей и методов упрочнения вала может быть сделана лишь качественно, поскольку для точной оценки требуется наличие многих дополнительных сведений: стоимости и трудозатрат всех видов обработки, износостойкости и пределов контактной выносливости зубьев шестерни, требований к точности зацепления и т. д. Качественную характеристику удобно выполнять по пятибалльной шкале, а результаты свести в табл. 7.

Выводы

Технологический процесс изготовления детали по варианту (а) из стали 45 комплексно оценивается в 32 балла; по варианту (б) из стали 20Х — 24 балла; по варианту (в) из стали 40Х — 31 балл. При этом вариант решения (в) обеспечивает заметно больший коэффициент безопасности при прочих почти равных результатах, поэтому к применению рекомендуется сталь 40Х, подвергаемая обработке по варианту технологического процесса (в) с учетом неравномерного режима работы редуктора, рассчитанного на длительный срок службы.

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Какие факторы являются определяющими при выборе конструкционного материала?
2. Как рассчитать рабочие напряжения в материале детали?
3. Охарактеризуйте свойство надежности материала. Какими параметрами оно определяется?
4. Какие факторы снижают надежность конструкционных материалов?
5. Чем определяется долговечность конструкционных материалов? Назовите основные критерии долговечности материалов.
6. Какова зависимость между твердостью и износостойкостью конструкционного материала?
7. Какие методы повышения износостойкости материалов вы знаете?
8. В чем заключается связь предела прочности и предела выносливости конструкционных материалов?
9. Как структурное состояние материала влияет на показатели прочности, надежности и долговечности?
10. Какие способы обработки деталей способствуют затруднению накопления повреждений на поверхности?

ТРЕБОВАНИЯ К СОДЕРЖАНИЮ ОТЧЕТА

В начале лабораторного практикума студенты получают журнал, содержащий бланки с формами отчетов. Отчет о лабораторной работе № 21 включает в себя следующие разделы:

- 1) выполняемый вариант задания;
- 2) выбранные варианты заготовки вала;
- 3) критерии прочности, надежности и долговечности, которые должны обеспечить выбираемый материал и способ его упрочнения;
- 4) технологические свойства, которым должны отвечать выбираемые материалы с учетом вида заготовки и предполагаемых способов упрочнения;
- 5) расчеты запаса прочности по выносливости выбранных материалов и способов их упрочнения;
- 6) сравнительную характеристику выбранных материалов и способов их упрочнения (заполненную табл. 7).

ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ВЫПОЛНЕНИЯ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

В соответствии с рабочей программой дисциплины «Материаловедение» каждая лабораторная работа оценивается в 5 рейтинговых баллов. Итоговая оценка учитывает уровень подготовки студента к работе, качество ее выполнения и защиту.

Перед началом лабораторных работ студент должен ознакомиться с содержанием теоретической части работы.

Готовность студента к выполнению лабораторных работ оценивается в 1 балл; качество оформления отчета оценивается максимум в 2 балла; защита работы в форме тестирования дает максимальную оценку 2 балла.

ЛИТЕРАТУРА

Высокопрочные стали для автомобилестроения / В.И. Астащенко, С.С. Соловейчик, А.П. Сосновский, Т.В. Астащенко // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. Международный сборник научных трудов. Донецк: ДонНТУ, 2009. Вып. 38. С. 17–22.

Лахтин Ю.М., Леонтьева В.П. Материаловедение: учебник для вузов. М.: Машиностроение, 1990. 528 с.

Марочник сталей и сплавов / А.С. Зубченко, М.М. Колосков, Ю.В. Каширский [и др.]; под ред. А.С. Зубченко. М.: Машиностроение, 2003. 784 с.

Мартенситностареющие стали — новые перспективные материалы для валов / Е.С. Маркова, Н.Г. Покровская, А.Б. Шалькевич, В.И. Громов // Авиационные материалы и технологии. 2012. № 5. С. 81–84.

Материаловедение: учебник для вузов / Б.Н. Арзамасов, В.И. Макарова, Г.Г. Мухин [и др.]; под общ. ред. Б.Н. Арзамасова, Г.Г. Мухина. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. 648 с.

Стали и сплавы. Марочник: справ. изд. / В.Г. Сорокин, М.А. Гервасев, В.С. Палеев [и др.]. М.: Интермет Инжиниринг, 2001. 608 с.

Терентьев В.Ф., Кораблева С.А. Усталость металлов. М.: Наука, 2015. 484 с.

Херцберг Р.В. Деформация и механика разрушения конструкционных материалов. М.: Металлургия, 1989. 576 с.

Феодосьев В.И. Сопротивление материалов. 16-е изд. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016. 544 с.

Das S. Development of aluminium alloy composites for engineering applications // Trans. Indian Inst. Met. 2004. Vol. 57. No. 4. P. 325–334.

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие	3
Введение	4
Основные теоретические сведения	5
Материалы валов и осей	14
Технологичность материалов валов и осей	22
Варианты задания	23
Последовательность выполнения работы	26
Пример обоснования выбора материала	33
Вопросы для самопроверки	36
Требования к содержанию отчета	36
Оценка качества выполнения лабораторных работ	37
Литература	38

Учебное издание

**Семенов Михаил Юрьевич
Фомина Людмила Петровна
Шевченко Светлана Юрьевна**

**Выбор материала и метода
упрочнения для валов и осей**

Редактор *С.А. Серебрякова*
Художник *Я.М. Асинкритова*
Корректор *Ю.Н. Морозова*
Компьютерная графика *Т.Ю. Кутузовой*
Компьютерная верстка *А.Ю. Ураловой*

Оригинал-макет подготовлен
в Издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана.

В оформлении использованы шрифты
Студии Артемия Лебедева.

Подписано в печать 08.12.2017. Формат 60×90/16.
Усл. печ. л. 2,5. Тираж 100 экз. Изд. № 216-2016. Заказ

Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана.
105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.
press@bmstu.ru
www.baumanpress.ru

Отпечатано в типографии МГТУ им. Н.Э. Баумана.
105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.
baumanprint@gmail.com