

*Посвящается коллегам
Мытищинского машиностроительного
техникума-предприятия*

ПРЕДИСЛОВИЕ

Учебник соответствует программе предмета «Детали машин» для машиностроительных специальностей техникумов всех форм обучения.

Предлагаемое издание охватывает основы расчета и общие вопросы конструирования деталей и узлов общемашиностроительного применения (наиболее распространенных типов соединений, передач, подшипников, валов, муфт и др.).

Выводы расчетных зависимостей даны подробно, без сокращения промежуточных действий. Основные теоретические положения сопровождаются рассмотрением типовых примеров с подробными решениями и методическими указаниями. Расчеты изложены по единой методике, в основу которой положены главные критерии работоспособности.

В книге принята единая система физических величин (СИ) со следующими отклонениями, допущенными в стандартах на расчеты деталей машин: размеры деталей машин выражаются в мм, и соответственно напряжения в Н/мм² (МПа), а моменты сохранены в Н·м. Поэтому в формулах, включающих вращающие T , изгибающие M или крутящие M_k моменты, введены множители 10^3 перевода метров в миллиметры).

Для зрительной фиксации наиболее важных положений и формулировок применены шрифтовые выделения. В конце каждой главы приведены контрольные вопросы, помогающие усвоить ее основные положения.

Содержание учебника является достаточным для подготовки студентов к выполнению курсового проекта по деталям машин. Каждая глава заканчивается рекомендациями по конструированию. Большинство приведенных примеров является составной частью одного комплексного расчета привода ленточного конвейера, включающего редуктор, ременную и цепную передачи.

Авторы выражают большую благодарность Н. В. Рогановой за помощь при подготовке рукописи к печати. Все замечания и пожелания по совершенствованию учебника направлять по адресу:

105187, Москва, Измайловское шоссе, 48-а, издательство «Илекса».

Авторы

Часть первая

ОСНОВЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

Глава 1. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

1.1. Общие сведения

Курс «Детали машин» посвящен рассмотрению основ расчета и конструирования деталей и узлов общего назначения, встречающихся в различных механизмах и машинах.

Механизмом называют систему твердых тел, предназначенную для преобразования движения одного или нескольких тел в требуемые движения других тел (редуктор, коробка передач и др.).

Машиной называют механизм или устройство, выполняющее механические движения, служащие для преобразования энергии, материалов или информации с целью облегчения или замены физического или умственного труда человека и повышения его производительности.

В зависимости от основного назначения различают машины:

1) *энергетические*, преобразующие тот или иной вид энергии в механическую или наоборот (двигатели, генераторы, динамомашины, компрессоры и др.);

2) *рабочие*, в том числе:

технологические, изменяющие свойства, форму или размеры обрабатываемого предмета (станки, прессы и др.);

транспортные, перемещающие тела (конвейеры, краны и др.);
информационные, преобразующие информацию (шифровальные машины, механические интеграторы, корреляторы и др.);

электронные вычислительные машины (ЭВМ, компьютеры), обрабатывающие информацию в соответствии с заданным алгоритмом. В ЭВМ основные функциональные элементы построены на электронных приборах, а механические движения служат для выполнения вспомогательных операций (вращение магнитного диска, протяжка бумаги, перемещение пишущего или печатающего устройства и др.). ЭВМ строго говоря не является машиной, название сохранилось за нею в порядке преемственности от простых счетных машин.

Все машины состоят из деталей, которые объединены в узлы (сборочные единицы).

Деталью называют часть машины, изготовленную без применения сборочных операций (болт, шпонка, зубчатое колесо и др.).

Узлом называют сборочную единицу, состоящую из деталей, имеющих общее функциональное назначение (подшипник качения, вал в сборе с подшипниками и зубчатыми колесами, коробка передач, муфта и др.). Узел является составной частью изделия (редуктора, привода, машины).

В машиностроении различают детали и узлы общего и специального назначения. Деталями и узлами **общего назначения** называют такие, которые встречаются во многих типах машин (болты, валы, подшипники, зубчатые колеса, муфты приводов и др.). Они составляют подавляющее большинство, многие из них являются стандартными (крепежные изделия, приводные ремни и цепи, подшипники качения и др.). Детали и узлы общего назначения изучают в курсе «Детали машин».

К деталям и узлам **специального назначения** относят такие, которые встречаются только в одном или нескольких типах машин (шпиндели станков, поршни, коленчатые валы и др.). Их изучают в специальных курсах («Металлорежущие станки», «Компрессоры» и др.).

Все детали и узлы общего назначения можно разделить на три основные группы:

- 1) *соединительные детали и соединения*, которые могут быть неразъемными (сварные, паяные и др.) и разъемными (резьбовые, шпоночные и др.);
- 2) *передачи вращательного движения* (зубчатые, червячные, ременные, цепные и др.);
- 3) детали и узлы, *обслуживающие передачи* (валы, подшипники, муфты и др.).

Целью курса является изучение *основ расчета и конструирования деталей и узлов общего назначения* с учетом режима работы и требуемого ресурса машины. При этом рассматриваются вопросы выбора материала, способа термической обработки, получения рациональной формы деталей, их технологичности и необходимой точности изготовления.

Детали машин зачастую имеют сложную конфигурацию, работают при разнообразных режимах нагружения в различных производственных условиях, и не всегда можно получить точную формулу для их расчета. *При расчетах деталей машин часто применяют различные приближенные и эмпирические формулы, в которые вводят поправочные коэффициенты*, устанавливаемые опытным путем и подтверждаемые практикой конструирования и эксплуатации машин.

Детали и узлы общего назначения изготавливают ежегодно в больших количествах (в одном легковом автомобиле более пяти тысяч типодеталей), поэтому всякое усовершенствование методов, правил и норм проектирования очень важно и дает большой экономический эффект.

1.2. Современные направления в развитии машиностроения

Эффективное развитие всех отраслей народного хозяйства в решающей мере зависит от машиностроения. Именно в нем в первую очередь материализуются передовые научно-технические идеи, создаются новые машины, определяющие прогресс в других отраслях экономики.

Для современного машиностроения характерно повышение требований к техническому уровню, качеству и надежности, сокращение сроков морального старения средств техники. Это приводит к необходимости постоянного сокращения сроков проектирования при одновременном совершенствовании конструкций новых машин и технологии их производства, внедрения новых материалов, более точных методов расчета.

Показателем высокого уровня машиностроения является **гибкое автоматизированное производство** (ГАП) — производство изделий, основанное на комплексной автоматизации собственно технологического процесса и таких операций производственного процесса как контроль качества, диагностика технологического оборудования, складирование и транспортировка, а также процедур и операций проектирования и технологической подготовки производства. В связи с этим технологический процесс реализуется в ГАП с помощью роботизированного технологического оборудования — **гибких производственных модулей** (робот-станок, робот-пресс, робот-сварочный центр). Управление модулями осуществляется с помощью сменяемых программ, при этом широко используются микропроцессоры (устройства для автоматической обработки информации и управления этим процессом). Проектирование объектов в ГАП выполняют с помощью систем автоматизированного проектирования (САПР, см. ниже) и автоматизированных систем технологической подготовки производства.

Характерным является применение материально-трудо- и энергосберегающей технологии, станков с программным управлением, гибких производственных систем, в которых технологическое оборудование и системы его обеспечения функционируют в автоматическом режиме и обладают свойством автоматизированной переналадки в пределах установленного класса изделий и диапазонов их характеристик.

Применение **промышленных роботов** позволяет повысить производительность оборудования, улучшить условия и безопасность труда рабочих, уменьшить влияние субъективного фактора и повысить качество за счет оптимизации и автоматизации технологических процессов.

Дальнейшее повышение технико-экономического уровня и качества машиностроительной продукции связано с тем, насколько успешно будут решены следующие проблемы:

1) расширение областей применения автоматизированного проектирования;

- 2) повышение надежности и ресурса машин;
- 3) уменьшение материоемкости конструкций;
- 4) уменьшение энергозатрат, повышение КПД механизмов.

В основе решения многих из этих проблем лежит совершенствование расчетов и оптимизация конструкции, которые в свою очередь могут быть решены с применением современной вычислительной техники.

1.3. Требования к машинам и деталям

В соответствии с современными тенденциями к большинству проектируемых машин предъявляют следующие общие требования:

- высокая производительность;
- экономичность изготовления и эксплуатации;
- необходимые точность, надежность и долговечность;
- удобство и безопасность обслуживания;
- транспортабельность;
- соответствие внешнего вида требованиям технической эстетики.

При расчетах, конструировании и изготовлении машин должны строго соблюдаться **стандарты**: государственные (ГОСТы), отраслевые (ОСТы), предприятий (СТП). Стандартизация в области деталей машин охватывает материалы, геометрические параметры (предпочтительные ряды размеров, форма и размеры резьб, шлицевых, шпоночных соединений, исходные контуры зацепления и др.), нормы точности, последовательность создания и характер конструкторской документации, правила оформления чертежей и т. д.

Стандарты в максимально возможной степени основывают на стандартах Международной организации по стандартизации (ISO).

Применение в машине стандартных деталей и узлов уменьшает количество типоразмеров, обеспечивает взаимозаменяемость, позволяет быстро и дешево изготавливать новые машины, а в период эксплуатации облегчает ремонт. Изготавливают стандартные детали и узлы машин на специализированных заводах или в специализированных цехах, что повышает их качество и снижает стоимость.

Стандартизация изделий, узлов и деталей предполагает их унификацию. **Унификация** — приведение изделий одинакового функционального назначения к единомуобразию, включающее обеспечение преемственности при изготовлении и эксплуатации. Показателем уровня стандартизации и унификации является *коэффициент применяемости по типоразмерам деталей*, определяемый как отношение разности общего числа типоразмеров деталей и числа типоразмеров впервые разработанных деталей к общему числу типоразмеров деталей в изделии.

Одним из главных требований, предъявляемых к машинам и их деталям, является технологичность конструкции, которая существенно влияет на стоимость машины.

Технологичной называют такую конструкцию, которая характерна наименьшими затратами при производстве, эксплуатации и ремонте.

Технологичность конструкции характеризуется:

1) применением в машине деталей с минимальной механической обработкой. С этой целью широко используют штамповку, точное литье, фасонный прокат, сварку;

2) унификацией деталей, т. е. применением одинаковых деталей в различных узлах машины;

3) максимальным применением стандартных конструктивных элементов деталей (резьб, канавок, пазов, фасок и др.), а также стандартных допусков и посадок;

4) применением деталей и узлов ранее освоенных в производстве;

5) учетом количества выпускаемых изделий (серийности), условий изготовления и технологической целесообразности;

6) снижением трудоемкости сборочных операций, удобной компоновкой с легко доступными местами крепления, возможностью применения сборочных автоматов, роботов;

7) возможностью «сращивания» систем автоматизированного проектирования и производства.

Показателями технологичности конструкции являются: трудоемкость, материалоемкость, энергоемкость в изготовлении, обслуживании, эксплуатации и ремонте.

Показатели стандартизации и технологичности характеризуют качество изделия.

1.4. Надежность машин

Надежность — *свойство изделия сохранять во времени способность к выполнению требуемых функций в заданных режимах применения, технического обслуживания, хранения и транспортирования.*

Надежность характеризуется работоспособностью и отказом.

Работоспособность — состояние изделия, при котором оно способно нормально выполнять заданные функции.

Отказ — событие, заключающееся в полной или частичной утрате работоспособности.

Показателями качества изделия по надежности являются безотказность, долговечность и ремонтопригодность.

Безотказность — *свойство изделия непрерывно сохранять работоспособность в течение заданного времени.*

Долговечность — свойство изделия длительно сохранять работоспособность до наступления предельного состояния при соблюдении норм эксплуатации. Под *пределным* понимают такое состояние изделия, при котором его дальнейшая эксплуатация недопустима или нецелесообразна.

Ремонтопригодность — свойство изделия, заключающееся в приспособленности к поддержанию и восстановлению работоспособности путем технического обслуживания и ремонта.

Временными понятиями надежности являются ресурс и срок службы.

Ресурс — суммарная наработка изделия от начала эксплуатации до перехода в предельное состояние. Ресурс выражают в единицах времени работы (в часах) или длины пути (в километрах).

Срок службы — календарная продолжительность эксплуатации изделия от начала до перехода в предельное состояние. Выражается обычно в годах. *Срок службы включает наработку изделия и время простоев.*

Основными показателями надежности являются:

по безотказности — вероятность безотказной работы и интенсивность отказов;

по долговечности — средний и гамма-процентный ресурс;

по ремонтопригодности — вероятность восстановления.

Под **вероятностью безотказной работы** $P(t)$ понимают вероятность того, что в заданном интервале времени или в пределах заданной наработки не возникает отказ изделия.

Если за время наработки t из числа N одинаковых изделий были изъяты из-за отказов n изделий, то вероятность безотказной работы изделия

$$P(t) = (N - n)/N = 1 - n/N.$$

Пример 1.1. Если по результатам испытания в одинаковых условиях партии изделий, состоящих из $N = 1000$ шт., после наработки 5000 ч вышли из строя $n = 100$ изделий, то вероятность безотказной работы этих изделий

$$P(5000) = 1 - n/N = 1 - 100/1000 = 0,9.$$

Вероятность безотказной работы **сложного изделия** равна произведению вероятностей безотказной работы отдельных его элементов

$$P(t) = P_1(t) P_2(t) \dots P_n(t).$$

Если $P_1(t) = P_2(t) = \dots = P_n(t)$, то $P(t) = P_1^n(t)$. Отсюда следует, что *чем большие элементов имеет изделие, тем ниже его надежность.*

Пример 1.2. Если изделие состоит из 10 элементов с вероятностью безотказной работы каждого элемента 0,9 (как в подшипниках качения), то общая вероятность безотказной работы $P(t) = 0,9^{10} = 0,35$. Эксплуатация изделия с таким низким показателем $P(t)$ нецелесообразна.

Интенсивность отказов $\lambda(t)$. В разные периоды эксплуатации или испытаний изделий число отказов в единицу времени различно. Интенсивность отказов — отношение числа n отказавших в единицу времени t изделий к числу изделий ($N - n$), исправно работающих в данный отрезок времени при условии, что отказавшие изделия не восстанавливают и не заменяют новыми:

$$\lambda(t) = n/[(N - n) \cdot t].$$

Пример 1.3. В примере 1.1 при испытании 1000 изделий в интервале времени от 0 до 5000 ч из строя вышли 100 изделий. Это значит, что число исправно работающих изделий равно $(1000 - 100)$. Согласно определению интенсивность отказов $\lambda(5000) = 100/[(1000 - 100) \cdot 5000] = 0,000022 = 22 \cdot 10^{-6}$ 1/ч.

Средние значения интенсивностей отказов составляют: для подшипников качения — $\lambda(t) = 1,5 \cdot 10^{-6}$ 1/ч; для ременных передач — $\lambda(t) = 15 \cdot 10^{-6}$ 1/ч.

Вероятность безотказной работы можно оценить по интенсивности отказов

$$P(t) \approx 1 - \lambda(t) \cdot t.$$

Пример 1.4. Если назначенный ресурс ременной передачи составляет 2000 ч, а интенсивность отказов $\lambda(2000) = 15 \cdot 10^{-6}$ 1/ч, то вероятность безотказной работы ременной передачи:

$$P(2000) = 1 - 15 \cdot 10^{-6} \cdot 2000 = 0,97.$$

Для деталей машин в качестве показателя долговечности используют или **средний ресурс** (математическое ожидание ресурса, выраженное в часах работы, километрах пробега, миллионах оборотов), или **гамма-процентный ресурс** (суммарная наработка, в течение которой изделие не достигает предельного состояния с вероятностью γ , выраженной в процентах). Для изделий серийного и массового производства наиболее часто используют гамма-процентный ресурс: для подшипников качения, например, — 90%-ный ресурс.

Под **вероятностью восстановления** понимают вероятность того, что время восстановления работоспособного состояния изделия не превысит заданное значение.

Основы надежности закладывает конструктор при *проектировании изделия* (в частности точностью составления расчетной схемы). Определение показателей надежности выполняют методами теории вероятностей, их используют при выборе оптимальных вариантов конструкции. *Надежность зависит также от качества изготовления* (неточности влияют на распределение нагрузок в зоне силового взаимодействия) и *от соблюдения норм эксплуатации*.

В технике имеются высоконадежные устройства, например, в железнодорожном транспорте, авиации, космонавтике и др.

1.5. Критерии работоспособности и расчета деталей машин

Работоспособность деталей оценивают по одному или нескольким критериям, выбор которых обусловлен условиями работы и характером возможного разрушения. Такими критериями являются: прочность, жесткость, износостойкость, теплостойкость, вибrouстойчивость.

Прочность. Важнейшим критерием работоспособности всех деталей является прочность, т. е. способность детали сопротивляться разрушению или возникновению недопустимых пластических деформаций под действием приложенных к ней нагрузок. Методы расчетов на прочность изучают в курсе сопротивления материалов. В расчетах на прочность большое значение имеет правильное определение расчетных нагрузок и допускаемых напряжений.

Повысить прочность можно путем выбора рациональной формы поперечного сечения детали, устранением концентраторов напряжений, введением поверхностного упрочнения, обеспечением нагружения детали только напряжениями сжатия или растяжения (устранением напряжений изгиба).

Жесткость. Жесткостью называют способность детали сопротивляться изменению формы и размеров под нагрузкой. Для некоторых деталей жесткость является основным критерием при определении их размеров. Например, жесткость валов определяет удовлетворительную работу подшипников, зубчатых, червячных передач. Нормы жесткости устанавливают на основе обобщения опыта эксплуатации машин. Рациональное расположение опор, применение рационального профиля (например, двутавр вместо сплошного круглого) повышает жесткость конструкции. В уточненных расчетах прочности и жесткости деталей используют различные методы решения задач теории упругости.

Износостойкость. Износостойкостью называют свойство материала оказывать сопротивление изнашиванию. Под изнашиванием понимают процесс разрушения и отделения материала с поверхности твердого тела при трении, проявляющийся в постепенном изменении размеров или формы.

Износостойкость зависит от физико-механических свойств материала, термообработки и шероховатости поверхностей, от величины давлений или контактных напряжений, скорости скольжения, смазки, режима работы и т. д. **Износ** (результат изнашивания) снижает прочность деталей, изменяет характер сопряжения, увеличивает зазоры в подвижных соединениях, вызывает шум.

Расчеты деталей на износостойкость ведут по допускаемым давлениям $[p]$, установленным практикой (расчеты шлицевых соединений, подшипников скольжения). Применение в конструкциях уплотняющих устройств, защищающих детали от попадания абразивных частиц, повышение

твердости и равномерное распределение давлений по поверхности контакта, разделение трущихся поверхностей смазочным материалом увеличивает их износостойкость.

Исследованиями контактного взаимодействия твердых тел при их относительном смещении занимается новая наука **триботехника**.

Теплостойкость. Термостойкостью называют способность конструкции работать в пределах заданных температур в течение заданного срока службы. Перегрев деталей во время работы — явление вредное и опасное, так как при этом снижается их прочность, ухудшаются свойства смазочного материала, а уменьшение зазоров в подвижных соединениях приводит к заклиниванию и поломке. Для обеспечения нормального теплового режима работы проводят тепловые расчеты (расчеты червячных и волновых передач, подшипников скольжения).

Виброустойчивость. Виброустойчивостью называют способность конструкции работать в диапазоне режимов, достаточно далеких от области резонансов. Вибрации снижают качество работы машин, увеличивают шум, вызывают дополнительные напряжения в деталях. Особенno опасны резонансные колебания. Расчеты на виброустойчивость выполняют для машины в целом. Они подробно рассмотрены в курсе «Теория колебаний.»

1.6. Основы триботехники деталей машин

Сопряженными или контактирующими называют соприкасающиеся непосредственно или через слой смазочного материала поверхности взаимодействующих деталей.

Изучением процессов взаимодействия контактирующих поверхностей при их относительном перемещении занимается наука, получившая название **триботехника** (от греческого слова *tribos* — тереть). Основная цель этого изучения — нахождение путей снижения трения и изнашивания.

Одним из основных понятий триботехники является **внешнее трение** — явление сопротивления относительному перемещению, возникающего между двумя телами в зонах соприкосновения поверхностей и сопровождающегося рассеиванием энергии.

Взаимодействие контактирующих тел характеризуется механическими, теплофизическими, физико-химическими и электромеханическими процессами, сопровождающимися изнашиванием деталей.

По наличию относительного движения различают: **трение покоя** — трение двух тел при микросмещениях (например, за счет их деформаций) до перехода к относительному движению; **трение движения** — трение тел, находящихся в относительном движении.

Трению покоя присущи фреттинг-коррозия и окислительное изнашивание, которые характерны для деталей соединений машин (соединения с натягом, резьбовые, шлицевые, шпоночные).

При **фреттинг-коррозии** (от английского to fret — разъедать) на небольших площадках постоянно контактирующих поверхностей образуются мелкие углубления и продукты коррозии в виде пятен и порошка от светло- до темно-коричневого цвета. Продукты износа из зоны контакта не удаляются и превращаются в абразивные частицы.

При **окислительном изнашивании** контактирующие детали вступают в химическое взаимодействие с окружающей средой (например, воздухом), что приводит к развитию коррозии и механическому изнашиванию.

По *характеру относительного движения* различают **трение скольжения** и **трение качения**. Трение движения, при котором скорости тел в точке касания различны по величине или направлению, называют трением скольжения. При равенстве скоростей в точках касания по величине и направлению трение движения называют трением качения.

Такие детали, как диски фрикционных муфт, резьбовая пара скольжения винт-гайка, тормозные колодки и др., которые работают в условиях трения скольжения, подвержены контактному схватыванию, водородному и абразивному изнашиванию.

Водородное изнашивание связано с выделением водорода при трении контактирующих тел и разложении воды, нефтепродуктов или конструкции пластмасс. Присутствие водорода приводит к хрупкости материалов, появлению мелких трещин и образованию мелкодисперсного порошка материала.

Внешнее трение характеризуется **силой трения** — силой сопротивления при относительном перемещении одного тела по поверхности другого под действием внешней силы. Сила трения направлена по касательной к общей границе между телами.

Параметром нагруженности сопряженных поверхностей является **давление p** , приходящееся на единицу площади, а при отсутствии взаимных перемещений — **напряжение смятия $\sigma_{\text{см}}$** .

Основным *кинематическим параметром* является **скорость скольжения**, т. е. скорость движения точки одной из сопряженных поверхностей относительно совпадающей с ней точки другой поверхности.

Практически безызносные трущиеся пары с малым коэффициентом трения можно получить реализуя в узле жидкостную смазку или используя явление избирательного переноса.

При **жидкостной смазке** поверхности деталей полностью разделены жидким смазочным материалом (слоем масла). Детали непосредственно не соприкасаются и не изнашиваются. Коэффициент трения при этом определяется вязким трением жидкости и мал по величине ($f = 0,005$). Режим жидкостной смазки реализуют в подшипниках скольжения.

Избирательный перенос — физико-химический процесс образования и автоматического поддержания на поверхности трения защитной металлической пленки, значительно снижающей коэффициент трения и износ. Пленкообразующим материалом является, например, медь и ее сплавы (бронза, латунь). Из этих материалов может быть изготовлена одна из деталей пары трения или пленкообразующая присадка смазочного материала, например, медный порошок.

После первоначального образования на поверхностях деталей защитной пленки устанавливается режим избирательного переноса, т. е. в случае изнашивания или нарушения сплошности пленки происходит автоматическое ее восстановление.

Явление избирательного переноса успешно используют в узлах трения, работающих в экстремальных условиях: в вакууме, в агрессивных средах химической промышленности.

Контрольные вопросы

1. Какое различие между механизмом и машиной?
2. Что следует понимать под деталью машины? Какие детали называют деталями общего назначения?
3. Какие основные требования предъявляют к машинам и их деталям?
4. Что следует понимать под надежностью машин и их деталей? Какими свойствами характеризуется надежность? Какое различие между ресурсом и сроком службы? По каким показателям оценивают надежность?
5. Каковы основные критерии работоспособности и расчета деталей машин?
6. Дайте определение таким понятиям триботехники как внешнее трение, трение покоя и трение движения. Какие виды изнашивания характерны для них?

Глава 2. ПРОЧНОСТЬ ПРИ ПЕРЕМЕННЫХ НАПРЯЖЕНИЯХ

2.1. Циклы напряжений в деталях машин

Многие детали машин или их элементы, такие, как валы, зубья зубча-тых колес и другие, работают в условиях, когда возникающие в них *напряжения периодически изменяют свое значение или значение и знак*.

По характеру изменения во времени нагрузки в машинах делят на **постоянные и переменные**.

Постоянные нагрузки могут вызывать переменные напряжения. Так, при вращении вала, нагруженного изгибающим моментом, одни и те же

волокна его оказываются попеременно то в растянутой, то в сжатой зоне. Так же поочередный вход в зацепление зубьев колес вызывает в них изменение напряжений.

Причиной изменения напряжений может быть и переменный характер действия внешней нагрузки. Переменность нагрузки, например, автомобиля может быть связана: с загрузкой (автомобиль может ехать с полной загрузкой, с частичной или без груза), с рельефом местности (езды под гору, по ровной местности, в гору), с видом и качеством дорожного покрытия или грунта (грavelовая дорога, асфальт, бульварная мостовая), с остановом и разгоном у светофора, с квалификацией водителя и т. д. Каждый из этих факторов может изменять нагрузку в несколько раз.

Характеристикой напряженности детали является **цикл напряжений** — совокупность последовательных значений напряжений σ за один период при регулярном нагружении. В случае действия касательных напряжений τ остаются в силе все приведенные ниже термины и соотношения с заменой σ на τ .

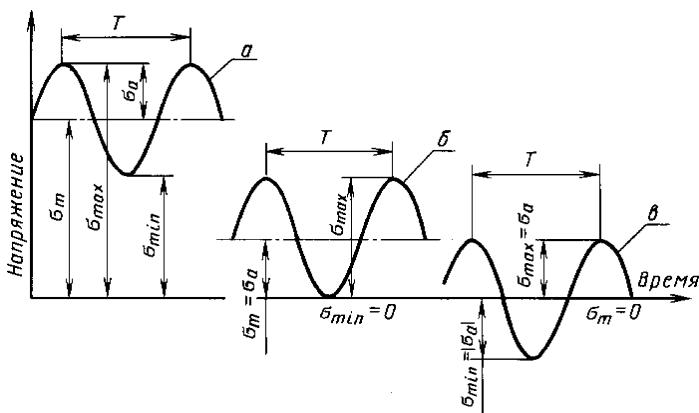


Рис 2.1. Циклы напряжений
а — асимметричный; б — отнулевой; в — симметричный

Продолжительность одного цикла нагружения называют периодом и обозначают T (рис. 2.1). Нагружение с одним максимумом и одним минимумом в течение одного периода при постоянстве параметров цикла называют **регулярным** нагружением.

Цикл переменных напряжений характеризуют (рис. 2.1):

максимальным напряжением σ_{max} ;

минимальным напряжением σ_{min} ;

средним напряжением $\sigma_m = 0,5(\sigma_{max} + \sigma_{min})$;

амплитудой цикла $\sigma_a = 0,5(\sigma_{max} - \sigma_{min})$;

коэффициентом асимметрии цикла $R = \sigma_{min} / \sigma_{max}$.

Если $R = 0$ ($\sigma_{min} = 0$; $\sigma_m = \sigma_a = 0,5\sigma_{max}$), то имеем **отнулевой цикл напряжений** (рис. 2.1, б).

Если $R = -1$ ($\sigma_m = 0$; $\sigma_a = \sigma_{max}$), то цикл напряжений называется **симметричным** (рис. 2.1, в). Этот цикл является наиболее неблагоприятным для работы детали, так как характеризуется изменением не только значения, но и знака действующих напряжений (знакопеременный цикл).

Если $R = 1$ ($\sigma_a = 0$; $\sigma_{max} = \sigma_{min} = \sigma_m = \sigma$) действуют **постоянные статические напряжения**.

Во всех других случаях — циклы напряжений **асимметричные** (рис. 2.1, а).

Рассмотрим определение числа циклов нагружения на примере вала, подверженного действию изгибающего момента и вращающегося с частотой вращения n , мин^{-1} (угловой скоростью ω , с^{-1}).

Продолжительность одного цикла изменения напряжения, т.е. **период T** , с:

$$T = 2 \cdot \pi / \omega = 60/n$$

Общее число циклов за промежуток времени L_h , ч:

$$N = 3600 \cdot L_h / T = 573 \cdot \omega \cdot L_h = 60 \cdot n \cdot L_h \quad (2.1)$$

2.2. Усталость материалов деталей машин

Опыты показывают, что детали машин, длительное время подвергавшиеся действию переменных напряжений, разрушаются при напряжениях, значительно меньших, чем временное сопротивление σ_e (иначе предел прочности).

Разрушение при циклическом нагружении происходит вследствие возникновения микротрещин в зоне концентрации напряжений. Трешины постепенно развиваются, проникая вглубь, поперечное сечение детали ослабляется и в некоторый момент происходит мгновенное разрушение.

Под **усталостью** понимают *процесс постепенного накопления повреждений материала под действием переменных напряжений*, приводящих к изменению свойств, образованию трещин, их развитию и разрушению. Свойство материала противостоять усталости называют **сопротивлением усталости**.

Типичный усталостный излом вала, нагруженного изгибающим и вращающим моментами (рис. 2.2), имеет две ярко выраженные зоны: зону *усталостного разрушения 1* с гладкой притертой поверхностью там, где усталостная трещина постепенно проникала вглубь сечения, и зону *статического разрушения 2* крупнокристаллического строения, по которому

произошло хрупкое разрушение (долом) вследствие большого ослабления сечения.

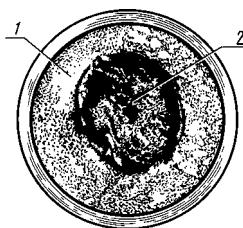


Рис 2.2. Усталостное разрушение вала

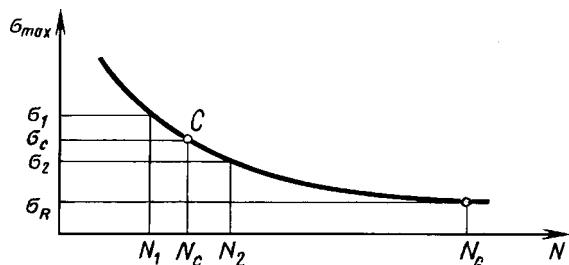


Рис 2.3. Кривая усталости

2.3. Предел выносливости материалов

Для расчетов на прочность при повторно-переменных напряжениях требуется знание механических характеристик материала. Их определяют испытанием на сопротивление усталости серии стандартных тщательно отполированных образцов на специальных машинах. Наиболее простым является испытание на изгиб при симметричном цикле напряжений.

Задавая образцам различные значения напряжений σ_{max} , определяют число циклов N , при котором произошло их разрушение. По полученным данным строят кривую в координатах $\sigma_{max} - N$, называемую **кривой усталости** (рис. 2.3). Как видно из рис. 2.3, при малых напряжениях образец, не разрушаясь, может выдержать очень большое число циклов нагружения.

Базой испытаний называют предварительно задаваемое наибольшее число циклов N_g нагружения при испытании на усталость (см. рис. 2.3). При испытаниях на изгиб, например, $N_g = 4 \cdot 10^6$ циклов. После прохождения N_g циклов опыт прекращают. Напряжение, соответствующее N_g , принимают за предел выносливости.

Пределом выносливости называют *наибольшее напряжение цикла, при котором не происходит усталостное разрушение при достижении базы испытания*. Предел выносливости обозначают σ_R для образца и $(\sigma_R)_D$ для детали.

Для образцов и деталей при коэффициенте асимметрии цикла ($R = -1$) пределы выносливости при нормальных напряжениях обозначают σ_{-1} и $(\sigma_{-1})_D$, а при отнулевом цикле ($R = 0$) соответственно σ_0 и $(\sigma_0)_D$.

При отсутствии в таблицах экспериментальных данных для пределов выносливости принимают эмпирические соотношения.

Так, для углеродистой стали:

$$\begin{aligned}\sigma_{-1} &\approx 0,45 \sigma_e; & \tau_{-1} &\approx 0,6 \sigma_{-1}; \\ \sigma_0 &\approx 1,6 \sigma_{-1}; & \tau_0 &\approx 1,9 \tau_{-1};\end{aligned}\quad (2.2)$$

где σ_e — временное сопротивление.

Уравнением кривой усталости является степенная зависимость $\sigma^q N = \text{const}$. При заданном значении N_c по кривой усталости (см. рис. 2.3) определяют предельные напряжения σ_c , а при заданном уровне напряжения σ_c — определяют предельное значение числа циклов N_c .

2.4. Местные напряжения в деталях машин

Опытным путем установлено, что на значение предела выносливости влияют размеры, форма и состояние поверхности деталей.

Влияние размеров. Чем большие абсолютные размеры поперечного сечения детали, тем меньше предел выносливости, так как в большей степени проявляются неоднородность механических свойств и внутренние структурные дефекты металла (раковины, шлаковые включения на границах зерен и др.). Это учитывают коэффициентом влияния абсолютных размеров поперечного сечения K_d (табл. 2.1).

Т а б л и ц а 2. 1. Значения коэффициента K_d (выборка)

Деформация и материал	K_d при диаметре вала d , мм					
	20	30	40	50	70	100
Изгиб для углеродистых сталей	0,92	0,88	0,85	0,81	0,76	0,71
Изгиб для легированных сталей и кручение для всех сталей	0,83	0,77	0,73	0,70	0,67	0,62

Влияние формы. В местах резкого изменения формы поперечного сечения или нарушения сплошности материала (в переходных сечениях, в резьбе, у канавок, выточек, отверстий и др.) напряжения больше номинальных σ или τ , определяемых по формулам сопротивления материалов (рис. 2.4).

Явление увеличения напряжений в местах изменения формы или нарушения целостности материала называют **концентрацией напряжений**.

Местные напряжения быстро убывают по мере удаления от **концентратора**, их вызвавшего (отверстия, канавки, паза и др.). Многократные изменения напряжений в зоне концентратора напряжений приводят к более раннему образованию трещины с последующим усталостным разрушением.

Влияние формы детали на предел выносливости учитывают **эффективным коэффициентом концентрации напряжений** $K_g(K_t)$, равным отношению пределов выносливости при одинаковых видах нагружения

двух образцов одинаковых размеров — гладкого — $\sigma_{-1}(\tau_{-1})$ и с концентратором напряжений — $\sigma_{-1K}(\tau_{-1K})$:

$$K_\sigma = \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_{-1K}}; \quad K_\tau = \frac{\tau_{-1}}{\tau_{-1K}}.$$

Для наиболее характерных концентраторов напряжений значения K_σ и K_τ приведены в табл. 2. 2.

Концентратором напряжений является и давление в месте установки деталей с натягом (зубчатых колес, подшипников качения). В этом случае влияние абсолютных размеров поперечного сечения вала на предел выносливости оказывается более резким. Для оценки концентрации напряжений учитывают отношения K_σ/K_d и K_τ/K_d (табл. 2.3).

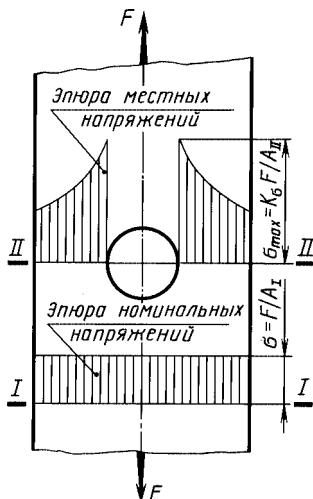


Рис 2.4. Эпюры напряжений.
A — площадь поперечного сечения

Т а б л и ц а 2.2. Значения коэффициентов K_σ и K_τ (выборка)

Концентратор напряжений	K_σ		K_τ	
	σ_n стали, Н/мм ²			
	≤ 700	> 700	≤ 700	> 700
Галтель (см. рис. 27.4, б): при $t/r = 2$ и $r/d = 0,02$	1,85	2,0	1,55	1,65
при $t/r = 2$ и $r/d = 0,05$	1,8	2,1	1,6	1,7
Шпоночный паз, выполненный концевой фрезой	1,9	2,5	1,7	2,3
Шлицы: прямобочные	1,55	1,72	2,4	2,7
эвольвентные	1,55	1,72	1,5	1,6
Резьба	2,1	2,7	1,6	2,2

Примечание. Если в расчетном сечении вала несколько концентраторов напряжений, то в расчет принимают тот, для которого больше K_σ/K_d или K_τ/K_d .

Т а б л и ц а 2.3. Значения K_σ/K_d и K_τ/K_d для валов в местах посадки деталей с натягом (выборка)

Диаметр вала d , мм	K_σ/K_d при σ_n , Н/мм ²				K_τ/K_d при σ_n , Н/мм ²			
	700	800	900	1000	700	800	900	1000
30	3,0	3,25	3,5	3,75	2,2	2,35	2,5	2,65
50	3,65	3,96	4,3	4,6	2,6	2,78	3,07	3,26
≥ 100	3,95	4,25	4,6	4,9	2,8	2,95	3,2	3,34

Примечание. Наибольшая концентрация напряжений возникает у края напрессованной детали.

Влияние качества обработки поверхности. С увеличением шероховатости поверхности детали предел выносливости понижается.

При переменных напряжениях первичные усталостные микротрешинны возникают обычно в поверхностном слое. Этому способствует наличие следов инструмента (резца, шлифовального круга) после механической обработки, являющихся концентраторами напряжений. Влияние состояния поверхности на предел выносливости учитывают **коэффициентом влияния качества обработки поверхности** K_F (табл. 2.4). Значительно снижает предел выносливости развитие коррозии в процессе работы.

Т а б л и ц а 2. 4. Значения коэффициента K_F (выборка)

Вид механической обработки	Параметр шероховатости R_a , мкм	Значения K_F при σ_b , Н/мм ²	
		≤ 700	> 700
Шлифование тонкое	до 0,2	1	1
Обтачивание тонкое	0,2..0,8	0,93	0,9
Шлифование чистовое	0,8..1,6	0,87	0,83
Обтачивание чистовое и фрезерование тонкое	0,8..3,2	0,8	0,75

Влияние упрочнения поверхности. Для повышения несущей способности деталей используют разные способы поверхностного упрочнения: цементацию, поверхностную закалку токами высокой частоты (ТВЧ), деформационное упрочнение (наклеп) накаткой роликами или дробеструйной обработкой. Упрочнение поверхности детали значительно повышает предел выносливости, что и учитывают **коэффициентом влияния поверхностного упрочнения** K_v (табл. 2.5).

Т а б л и ц а 2. 5. Значения коэффициента K_v (выборка)

Вид упрочнения поверхности вала	Значение K_v при K_σ	
	$\approx 1,0$	$> 1,0$
Закалка ТВЧ	1,3 ... 1,6	1,6...2,8
Азотирование	1,15...1,25	1,9...3,0
Накатка роликом	1,2 ... 1,4	1,5...2,2
Дробеструйный наклеп	1,1 ... 1,3	1,4...2,5

Коэффициенты снижения предела выносливости определяют с учетом приведенных выше коэффициентов:

$$(K_\sigma)_D = \left(\frac{K_\sigma}{K_d} + \frac{1}{K_F} - 1 \right) \frac{1}{K_v}; \quad (2.3)$$