

# ОСНОВЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

**Предметом изучения** дисциплины «ДМ и ОК» являются:

- процессы и явления, происходящие в технических устройствах;
- оценка напряженного состояния элементов;
- критерии работоспособности деталей машин;
- методы расчета и конструирования элементов машин с целью определения размеров и рациональных форм, обеспечивающих заданную надежность, ресурс, массогабариты и высокие технико-экономические показатели машин.

**Целью преподавания** дисциплины «ДМ и ОК» является обучение студентов современным методам конструирования и выполнения инженерных расчетов элементов машины.

**В результате изучения курса** студенты должны

**ЗНАТЬ:**

- 1) основы классификации и типовые конструкции деталей и узлов машин;
- 2) методы проектирования, обеспечивающие разработку рациональных конструкций, исходя из заданных технических требований, условий работы технической системы и производственно-экономических возможностей;
- 3) критерии работоспособности деталей машин;
- 4) основы инженерного расчета деталей машин.

**УМЕТЬ:**

- 1) на основании технических заданий выполнять синтез кинематических и конструктивных схем механизмов;
- 2) выполнять кинематический расчет механических приводов и рациональный выбор двигателей;
- 3) выявлять главные критерии работоспособности для конкретной детали;
- 4) выполнять проектировочные и проверочные расчеты деталей на статическую прочность, выносливость, жесткость и износостойкость;
- 5) проводить тепловые и динамические расчеты;
- 6) рационально выбирать конструктивные материалы и термообработку деталей для выполнения заданных функций;
- 7) формулировать техническое задание на проектирование исходя из конкретных условий работы механизмов;
- 8) выполнять проектные, проверочные и оптимизационные расчеты деталей машин с использованием ЭВМ;
- 9) выполнять (разрабатывать) и читать чертежи и схемы;
- 10) разрабатывать конструкцию простых типовых деталей машин и механизмов.

Изучение дисциплины «ДМ и ОК» базируется

**на знании следующих учебных курсов:**

высшая и прикладная математика; физика; теоретическая механика; теория упругости; сопротивление материалов; теория машин и механизмов, гидромеханика и газовая динамика; теория колебаний; триботехника; материаловедение и технология металлов; основы метрологии и взаимозаменяемости; программирование; электротехника; инженерная графика и машиностроительное черчение; теория надежности; теплопередача.

Полученные при изучении курса «Деталей машины» знания и практические навыки могут быть использованы для выполнения курсовых и дипломных проектов, при изучении специальных курсов учебной программы, а также в производственно-технической деятельности.

### **Основные понятия** (ключевые слова) дисциплины «ДМ и ОК»:

- машины и механизмы, структурный, кинематический, динамический и силовой анализ; синтез механизмов;
- особенности проектирования изделий: виды изделий, требования к ним, стадии разработки; принципы инженерных расчетов;
- расчетные модели типовых деталей машин, допущения и схематизация, материала и предельного состояния, типовые элементы изделий; напряженное состояние детали и элементарного объема материала; механические свойства конструкционных материалов; расчет несущей способности типовых элементов; сопряжения деталей;
- допуски и посадки, размерные цепи;
- механические передачи трением и зацеплением; валы и оси, соединения вал-втулка; опоры скольжения и качения; уплотнительные устройства; упругие элементы; муфты; соединения деталей: резьбовые, заклепочные, сварные, паяные, клеевые; корпусные детали.

**Машина** – устройство для преобразования энергии и (или) движения, накопления и переработки информации. Машины существенно облегчают физический и умственный труд человека. Машин условно подразделяют на три группы:

- *Энергетические* машины преобразуют какой-либо вид энергии в механическую работу и наоборот;
- *Транспортные* (энергия преобразуется в двигательную силу);
- *Технологические* машины предназначены для выполнения производственных процессов по изменению формы, свойств и положения объектов труда;
- *Информационные* машины, преобразующие и обрабатывающие информацию для контроля, регулирования и управления процессами и объектами;
- *Специальные* (вспомогательные, бытовые и пр.)

**Механизм** – часть машины, в которой рабочий процесс реализуется путем выполнения определенных механических движений.

Механизм осуществляет:

1. Передачу энергии (движения), как правило, с преобразованием сил и характеристик закона движения от источника к одному или нескольким рабочим органам;
2. Преобразование и регулирование механического движения;
3. Заданную компоновку машины.

Любая машина (механизм) состоит из деталей.

**Деталь** – такая часть машины, которую изготавливают без сборочных операций.

Детали могут быть простыми: гайка, шпонка и др.

Детали могут быть сложными: коленчатый вал, корпус редуктора, станина станка.

**Детали объединяют в узлы.**

**Узел** представляет собой законченную сборочную единицу, состоящую из ряда деталей, имеющих общее функциональное назначение:

Роторный узел: вал+подшипники+зубчатые колеса

Подшипниковый узел: подшипник + крышка + уплотнение

Детали общего назначения: болты, валы, подшипники, муфты, шпонки и др.

Все другие детали (поршни, лопатки турбин, гребные винты, камеры сгорания и пр.) изучают в специальных курсах: Теория и расчет газотурбинных двигателей, Проектирование летательных аппаратов и др.

Курс **«ДМ и ОК»** посвящен **теории, расчету и конструированию деталей общего назначения**.



*Состав типовой элементной базы механических устройств*

Раздел «Критерии работоспособности ДМ»  
Раздел «Машиностроительные материалы»  
Раздел «Передачи»  
Раздел «Валы и оси»  
Раздел «Подшипники»  
Раздел «Соединения»  
Раздел «Муфты»  
Раздел «Пружины и Рессоры»  
Раздел «Корпусные детали»

## НАДЕЖНОСТЬ

**Надежность** (общая) — свойство объекта (изделия) выполнять в течение заданного времени или заданной наработки свои функции, сохраняя в заданных пределах эксплуатационные показатели. Надежность изделий обуславливается их безотказностью, долговечностью, ремонтпригодностью и сохраняемостью.

**Безотказность** — свойство сохранять работоспособное состояние в течение заданной наработки без вынужденных перерывов. Это свойство особенно важно для машин, отказы которых связаны с опасностью для жизни людей (например, самолеты) или с перерывом в работе большого комплекса машин.

**Долговечность** — свойство изделия сохранять работоспособное состояние до предельного состояния с необходимыми перерывами для технического обслуживания и ремонта.

**Ремонтпригодность** — приспособленность изделия к предупреждению, обнаружению и устранению отказов и неисправностей путем проведения технического обслуживания и ремонтов.

**Сохраняемость** — свойство изделия сохранять безотказность, долговечность и ремонтпригодность после и в течение установленного срока хранения и транспортирования.



**Отказ** – утрата работоспособного состояния изделия (полная или частичная).

По времени проявления отказы бывают: постоянные и случайные.

По виду отказа:

**функциональные** – утрата способности данной машины выполнять свои функции (например, поломка зуба в зубчатой передаче);

**параметрические** – отклонение различных характеристик больше заданной нормы (например, потеря точности вследствие повышенного износа некоторых деталей).

**по своей природе** могут быть *связаны с разрушением* деталей или их поверхностей (поломка, выкрашивание, износ, коррозия) или *не связаны с разрушением* (засорение каналов, ослабление соединений).

**отказы бывают полные и частичные:**

внезапные (например, поломки);

постепенные (изнашивание, коррозия и др.);

постепенные по развитию, но внезапные по проявлению (усталость);

опасные для жизни человека, тяжелые и легкие;

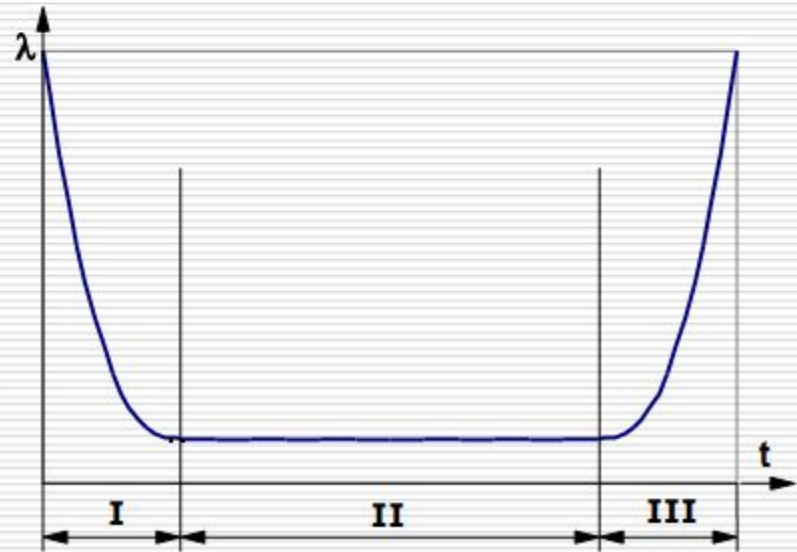
устранимые и неустранимые.

**по времени возникновения** отказы делятся на:

I – приработочные (возникающие в первый период эксплуатации и связанные с отсутствием приработки и с попаданием в сборку дефектных элементов);

II – отказы при нормальной эксплуатации (до проявления постепенных износных отказов);

III – износные отказы.



**График интенсивности отказов**

Основным показателем безотказности является **вероятность  $P(t)$**  безотказной работы в течение заданного времени или наработки

$$P(t) = N_{\text{раб}} / N,$$

где  $N$  – общее число изделий в партии;  $N_{\text{раб}}$  – число работающих изделий.

### **Вероятность отказа**

$$Q(t) = N_{\text{отк}} / N,$$

где  $N_{\text{отк}}$  – число отказавших изделий.

Основное уравнение теории надежности

$$P(t) + Q(t) = 1.$$

**Средняя наработка до отказа** –  $\bar{t} = \frac{\sum t_i}{N}$

**Интенсивность отказов** – отношение числа отказов  $N_{\text{отк}}$  за промежуток времени  $t$  к числу работоспособных объектов  $N_{\text{раб}}$

$$\lambda = N_{\text{отк}} / t \cdot N_{\text{раб}}$$

Вероятность безотказной работы по закону нормального распределения

$$P(t) = e^{-\int_0^t \lambda(t) dt}$$

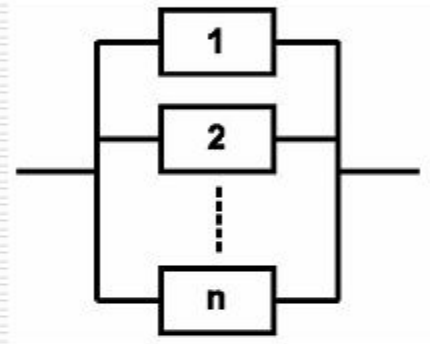
Для постепенных отказов справедлив закон распределения, который дает вначале низкую плотность вероятности отказов, затем максимум и далее падение, связанное с уменьшением числа элементов, оставшихся работоспособными.

Надежность системы из  $n$  последовательно расположенных элементов.



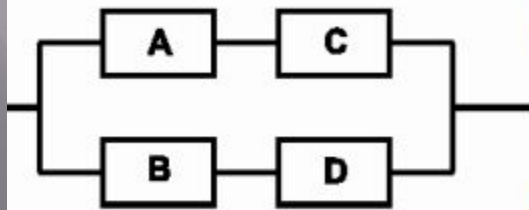
$$P_c = \prod_{i=1}^n P_i(t)$$

Надежность системы из  $n$  параллельно расположенных элементов.



$$P_c = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - P_i)$$

Система из совокупности параллельно и последовательно расположенных элементов.



Дано: вероятность безотказной работы элементов А и В по отдельности составляет 0,9; вероятность безотказной работы элемента С равняется 0,9, вероятность отказа элемента D равняется 0,2.

Вероятность безотказной совместной работы элементов А и С

$$P_{AC} = P_A \cdot P_C = 0,9 \cdot 0,95 = 0,855$$

Также определяется вероятность совместной работы элементов В и D. Для элемента D вероятность безотказной работы  $P_D = 1 - Q_D = 1 - 0,2 = 0,8$ .

$$P_{BD} = P_B \cdot P_D = 0,9 \cdot 0,8 = 0,72$$

Сложная система приводится к параллельному соединению двух элементов AC и BD

$$P_c = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - P_i) = 1 - (1 - 0,855) \cdot (1 - 0,72) = 0,96$$

При **последовательном** соединении

- Надежность сложной системы всегда меньше надежности элемента с наименьшей вероятностью безотказной работы.
- Чем больше элементов в системе, тем меньше ее надежность.

При **параллельном** соединении надежность всей системы может быть больше, чем надежность элемента с наименьшей вероятностью безотказной работы.

### **Способы повышения надежности.**

1. Уменьшение числа элементов всей системы.
2. Повышение коэффициентов запаса.
3. Эксплуатация (соответствие условий эксплуатации заложенным при проектировании; технический ремонт, обслуживание и пр.)

### **Стадии обеспечения надежности**

1. Проектирование (в расчетах инженер закладывает определенные коэффициенты запаса, при конструировании использует опыт предыдущих разработок, обосновывает технологичность изделия и материалов и др.)
2. Производство (соблюдение параметров, заложенных конструктором при производстве, контроль за выходом продукции и т.д.)
3. Эксплуатация (соответствие условий эксплуатации заложенным при проектировании; технический ремонт, обслуживание и пр.)

Выполнение указанных требований обеспечивается в ходе **проектирования, изготовления и эксплуатации** машин и механизмов.

**Проектирование** является одним из ключевых этапов разработки машин, в ходе которой **закладываются** их будущие **параметры качества**.

Чаще всего под словом "**проектирование**" подразумевают *практическую* деятельность, направленную на удовлетворение потребностей людей.

Конечным итогом **проектной деятельности** является **проект**, т.е. **комплект документации**, предназначенной для **создания, эксплуатации, ремонта и ликвидации** (технического) объекта, а также для **проверки** или **воспроизведения** промежуточных и конечных технических решений, на основе которых был разработан данный объект.

**Проектирование** включает в себя

**выполнение расчётов**, подтверждающих эффективность предлагаемых конструктивных решений;

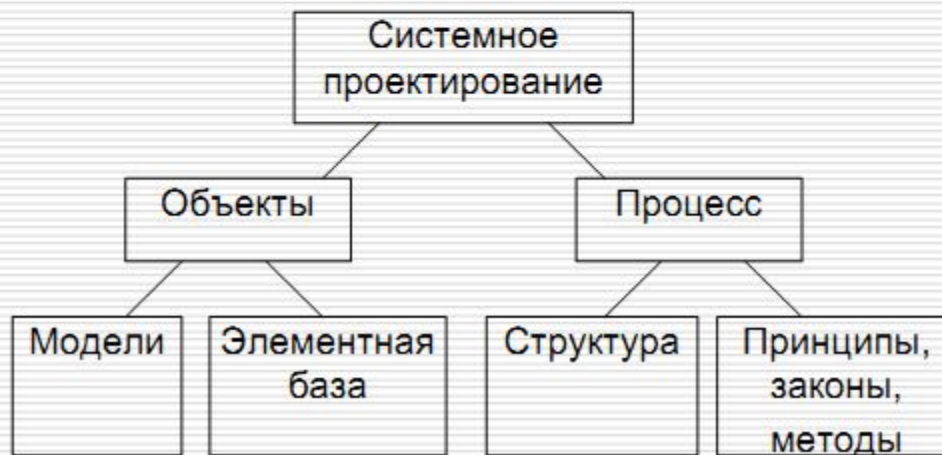
**экспериментальные исследования;**

**конструирование** (определение пространственных структур).

**Конструирование** – деятельность по созданию материального образа разрабатываемого объекта, при котором инженер работает с физическими моделями и их графическими изображениями. Эти модели и изображения, а также и реальные механические объекты называют конструкциями.

Безудержный рост потребностей общества, начавшийся в 20 веке, стимулировал поиск все новых и новых технических решений. Все ярче начали проявляться ограниченность материальных и временных ресурсов, опасность экологических последствий. Современному уровню развития техники стали присущи не только сложность проектируемых объектов, но и их интенсивное воздействие на общество и окружающую среду, тяжесть последствий аварий из-за ошибок разработки и эксплуатации, высокие требования к качеству и цене, сокращению сроков выпуска новой продукции. При создании подобных объектов их уже необходимо рассматривать в виде **систем**, т.е. комплекса взаимосвязанных внутренних элементов с определенной структурой, широким набором свойств и разнообразными внутренними и внешними связями.

**Системное проектирование** комплексно решает поставленные задачи, принимает во внимание взаимодействие и взаимосвязь отдельных объектов-систем и их частей как между собой, так и с внешней средой, учитывает социально-экономические и экологические последствия их функционирования.

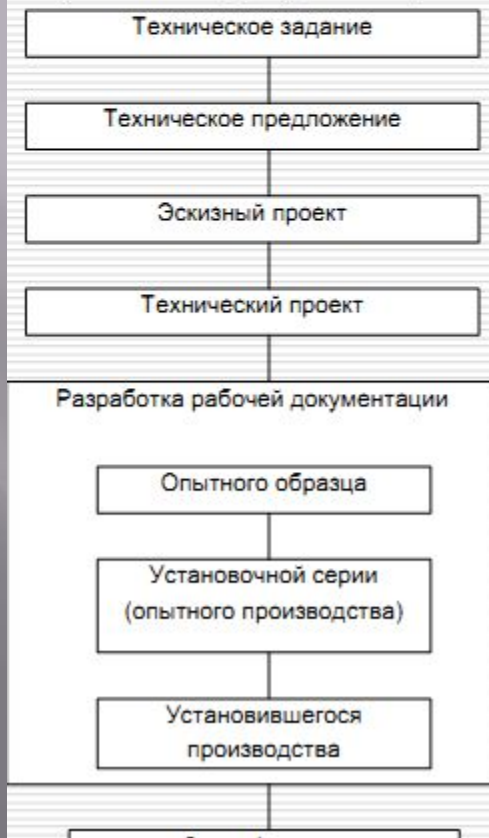


В настоящее время существуют два представления структуры проектирования, подобных по форме, но различных по целям и подходам к деятельности. Это – структура оформления этапов проектных работ и структура проектной деятельности.

### Стадии проектирования, регламентированные стандартом

Соответствующая структура стадий проектирования регламентирована стандартом (ГОСТ 2.103) и обязательна при официальных взаимоотношениях между заказчиком и исполнителем или между соисполнителями работ.

#### Стадии разработки проектной документации

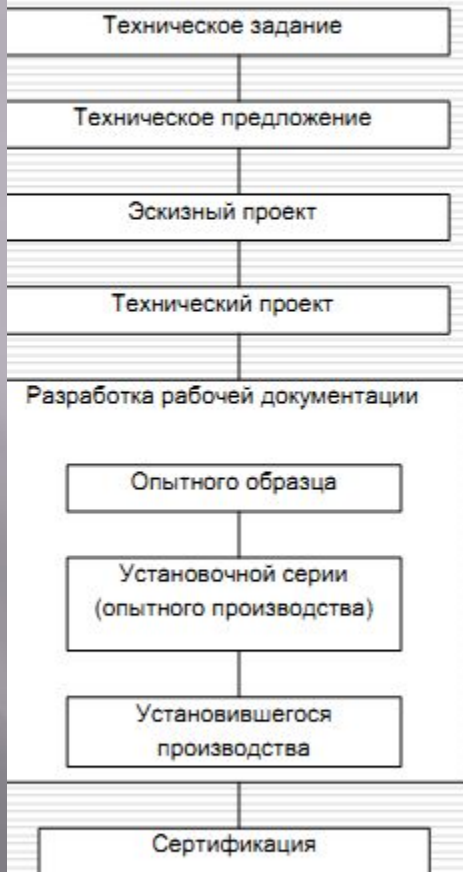


1. **Техническое задание (ТЗ)** устанавливает основное назначение, технические и тактико-технические характеристики, показатели качества и технико-экономические требования к разрабатываемой технической системе, предписание по выполнению необходимых стадий создания документации и ее состав, а также специальные требования к изделию.

2. **Техническое предложение (ПТ)** – совокупность документов, содержащих техническое и технико-экономическое обоснование (ТЭО) целесообразности разработки проекта. Такое заключение дается на основании анализа ТЗ заказчика и различных вариантов возможных решений, их сравнительной оценки с учетом особенностей разрабатываемого и существующих изделий, а также патентных материалов. Согласованное и утвержденное в установленном (на предприятии, в министерстве и т.п.) порядке ПТ является основанием для разработки эскизного проекта.

3. **Эскизный проект (ЭП)** – совокупность документов, содержащих принципиальные решения и дающих общее представление об устройстве и принципе работы разрабатываемой технической системы, а также данные, определяющие ее назначение, основные параметры и габаритные размеры. В случае большой сложности системы этому этапу может предшествовать **аван-проект** (предпроектное исследование), обычно содержащий теоретические исследования, предназначенные для обоснования принципиальной возможности и целесообразности создания данной системы. При необходимости на стадии ЭП проводят изготовление и испытание макетов разрабатываемой системы.

Стадии разработки  
проектной документации



**Технический проект (ТП)** – совокупность документов, которые должны содержать окончательные технические решения, дающие полное представление об устройстве проектируемой системы, исходные данные для разработки рабочей документации.

На стадии **рабочего проекта (РП)** сначала разрабатывают подробную документацию для изготовления опытного образца и последующего его испытания. Испытания проводят в ряд этапов (от заводских до приемосдаточных), по результатам которых корректируют проектные документы. Далее разрабатывают рабочую документацию для изготовления установочной серии, ее испытания, оснащения производственного процесса основных составных частей изделия. По результатам этого этапа снова корректируют проектные документы и разрабатывают рабочую документацию для изготовления и испытания головной (контрольной) серии. На основе документов окончательно отработанных и проверенных в производстве изделий, изготовленных по зафиксированному и полностью оснащеному технологическому процессу, затем разрабатывается завершающая рабочая документация установившегося производства. В процессе разработки проектной документации (рис. 2.1) в зависимости от сложности решаемой задачи допускается объединять между собой ряд этапов.

Этапы постановки ТЗ и технического проектирования могут входить в цикл научно-исследовательских работ (**НИР**), а этапы технического предложения и эскизного проектирования – образовывать цикл опытно-конструкторских работ (**ОКР**).

Завершает структуру этап, подводящий итог проектной деятельности – **сертификация**. Его назначение – определение уровня качества созданного изделия и подтверждение его соответствия требованиям тех стран, где предполагается его последующая реализация. Необходимость выделения этого этапа в виде самостоятельного вызвана тем, что в настоящее время экспорт продукции или ее реализация внутри страны во многих случаях недопустимы без наличия у нее сертификата качества.



Работоспособность и надежность деталей машин характеризуется определенными критериями.

Важнейшие критерии:

**Прочность**

**Жесткость**

**Износостойкость**

**Теплостойкость**

**Виброустойчивость**



**Надежность**

Расчет по данным критериям должен обеспечивать такие параметры деталей машин (размеры и материалы) чтобы они могли сохранять свои эксплуатационные показатели, выполнять заданные функции в течении заданного срока службы и при это иметь минимальную стоимость изготовления и эксплуатации.

**ВАЖНО:** Не все критерии равнозначны для различных деталей. При расчетах выделяют 1-2 наиболее важных критерия, а остальные являются второстепенными.

Для практического выполнения указанных требований необходимо перейти от конкретной детали к ее **модели**. При этом **точность** определения характеристик детали существенно зависит от того, насколько адекватно построенная модель описывает реальную деталь.

## **ИНЖЕНЕРНЫЙ РАСЧЕТ – ПРИБЛИЖЕННЫЙ РАСЧЕТ**

**Проектировочный расчет** – предварительный, упрощенный расчет, выполняемый в процессе разработки конструкции детали (машины) в целях определения ее размеров и материала при заданных условиях нагружения, кинематических и динамических параметрах всей системы.

**Проверочный расчет** – уточненный расчет известной конструкции, выполняемый в целях проверки удовлетворения ее заданным нормам критериев работоспособности (прочность, жесткость, виброустойчивость и др.).

**Модель** – совокупность представлений, условий и зависимостей, описывающих объект (явление).

При построении модели учитывают только наиболее значимые факторы с точки зрения изучения той или иной характеристики объекта. Учет всех факторов принципиально невозможен. Для одного и того же объекта может быть предложено несколько расчетных схем. С другой стороны, одной расчетной схеме может соответствовать несколько реальных объектов.

## ПРОЧНОСТЬ–

**способность тела сопротивляться разрушению под действием внешних нагрузок.**

Разрушение деталей происходит вследствие потери

• **статической прочности**

или

• **сопротивления усталости.**

Усталость – процесс постепенного накопления повреждений материала под действием переменных напряжений, приводящий к изменению свойств, образованию трещин, их развитию и разрушению.

Потеря **статической прочности** происходит тогда, когда значение **максимальных рабочих напряжений** превышает **предел статической прочности** материала (случайные перегрузки, скрытые дефекты материала).

Потеря **сопротивления усталости** происходит в результате **длительного действия переменных напряжений**, превышающих **предел выносливости материала**.

Расчеты на **ПРОЧНОСТЬ** ведут по **номинальным допускаемым напряжениям**, коэффициентам запаса прочности (КЗП) или по **вероятности безотказной работы**.

Обозначения напряжений при расчете на прочность:

$[\sigma]$ ,  $[\tau]$  – допускаемые контактные, касательные напряжения (т.е. те, которые может выдержать данный материал при каком-либо виде нагружения);

$\sigma$ ,  $\tau$  или  $\sigma_{\max}$ ,  $\tau_{\max}$  – максимальные рабочие или максимальные напряжения при перегрузках, возникающие в детали при ее работе в конкретной машине (т.е. те, которые испытывает конкретная деталь в конкретной машине при определенных рабочих условиях).

[таким образом для одной и той же детали, работающей в разных условиях максимальные напряжения также будут разными, а допускаемые определяются только свойствами материала и соответственно не меняются].

$\sigma_T$ ,  $\tau_T$  – предел текучести материала

$\sigma_B$ ,  $\sigma_{B\text{сж}}$  – временное сопротивление растяжению и сжатию

$\sigma_{-1}$ ,  $\tau_{-1}$  – предел выносливости: такие наибольшие циклические напряжения, которые с наибольшей заданной вероятностью нагружения может выдержать деталь неограниченное время.

Расчет по **номинальным допускаемым напряжениям** (проектировочный)  
в общем виде

$$\sigma_{\max} \leq [\sigma]; \quad \tau_{\max} \leq [\tau].$$

(т.е. максимальные рабочие напряжения, определяемые условиями работы детали, не должны превышать предел прочности, зависящего от физических свойств материала).

Расчет по **коэффициентам запаса прочности (КЗП)**

Более точный, т.к. учитываются в явной форме отдельные факторы, влияющие на прочность: концентраторы напряжений, размеры деталей, упрочнение.

$$[\sigma] = \sigma_{\lim} / [S], \text{ где } [S] - \text{ допустимый КЗП}$$

$$S = \sigma_{\lim} / \sigma_{\max} \geq [S];$$

(т.е. КЗП показывает во сколько раз максимальные рабочие напряжения меньше предельных напряжений, которые может выдержать материал при заданном нагружении [растяжение, сжатие, кручение, изгиб]).

Расчет на прочность при постоянных напряжениях деталей из **пластичных материалов** обычно производят согласно условию отсутствия общих пластических деформаций, т.е. в этом случае

$$\sigma_{\text{lim}} = \sigma_T: S_T = \sigma_T / \sigma_{\text{max}} = 1.3 \div 1.5;$$

Расчет на прочность при постоянных напряжениях, равномерном напряженном состоянии и **хрупком состоянии** материала ведут относительно предела прочности **временного сопротивления материала растяжению или сжатию**

$$\sigma_{\text{lim}} = \sigma_B: S_B = \sigma_B / \sigma_{\text{max}} = 1.5 \div 2.5;$$

Расчет на прочность при действии переменных напряжений должен обеспечивать необходимый КЗП относительно предела выносливости

$$\sigma_{\text{lim}} = \sigma_R: S_R = \sigma_R / \sigma_{\text{max}} = 1.5 \div 5;$$

### Методы определения КЗП

- 1) Опытнo-статистический на основании накопленного опыта формируют таблицы КЗП для определенных материалов и условий работы.
- 2) Дифференциальный метод: КЗП определяется как произведение частных коэффициентов, отражающих: 1) достоверность определения расчетных нагрузок и напряжений  $S_1=1\div 1.5$ ; 2) однородность механических свойств материалов  $S_2$ , для стальных деталей из поковки и проката  $S_2=1.2\div 1.5$ ; для чугунных деталей  $S_2=1.5\div 2.5$ ; 3) специфические требования безопасности  $S_3=1\div 1.5$ . **Тогда общий КЗП  $S=S_1S_2S_3$ .**
- 3) Вероятностный метод.

**Расчет на выносливость**

При одноосном растяжении-сжатии или изгибе

$$S_{\sigma} = \frac{\sigma_{-1}}{\frac{k_{\sigma}}{k_f k_d} \sigma_a + \psi_m \sigma_m}$$

При кручении

$$S_{\tau} = \frac{\tau_{-1}}{\frac{k_{\tau}}{k_f k_d} \tau_a + \psi_m \tau_m}$$

При совместном действии изгиба и кручения  
или растяжения-сжатия и кручения

$$S = \frac{S_{\sigma} S_{\tau}}{\sqrt{S_{\sigma}^2 + S_{\tau}^2}}$$

где  $\sigma_{-1}, \tau_{-1}$  – пределы выносливости материала при знакопеременном симметричном цикле;

$\sigma_m, \tau_m$  – постоянные составляющие напряжений;

$\sigma_a, \tau_a$  – амплитуды напряжений;

$k_{\sigma}, k_{\tau}$  – эффективные коэффициенты концентрации напряжений;

$k_f$  – коэффициент влияния шероховатости поверхности;

$k_d$  – масштабный коэффициент;

$\psi_{\sigma}, \psi_{\tau}$  – коэффициенты, характеризующие чувствительность



**Расчет на прочность при нерегулярных циклических напряжениях**

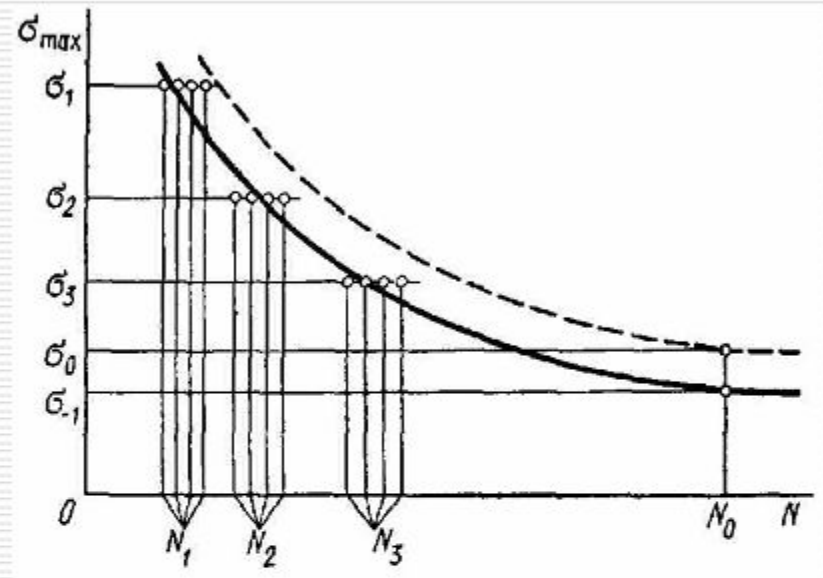
Кривая усталости (Велера).

Уравнение кривой

$$\sigma_{Ri}^m N_i = \sigma_{R0}^m N_0$$

**Тогда условие прочности**

$$\sigma_{Ri} \leq \sigma_{R0} \sqrt[m]{\frac{N_0}{N_i}}$$



где  $N_i$  - число циклов до разрушения при действии некоторого напряжения  $\sigma_{Ri}$ ;

$N_0$  - число циклов напряжений до перелома кривой усталости, т.е. до достижения длительного предела выносливости  $\sigma_{R0}$ .

**Условие равнопрочности.** Очевидно, что нет необходимости конструировать отдельные элементы машины с излишними запасами несущей способности, которые все равно не могут быть реализованы в связи с выходом конструкции из строя из-за разрушения или повреждения других элементов.

**ЖЕСТКОСТЬ –  
способность деталей сопротивляться изменению формы под  
действием внешних сил**

**Расчет на жесткость** предусматривает **ограничение упругих перемещений** деталей **в пределах, допустимых для конкретных условий работы.**

**Жесткость** – один из важнейших критериев работоспособности наряду с **прочностью**. Во многих деталях машин напряжения значительно ниже предельных, например в станинах металлорежущих станков они составляют всего несколько МПа, и размеры таких деталей диктуются именно условиями жесткости. Нормы жесткости деталей устанавливают на основе практики эксплуатации и расчетов.

Значение **критерия жесткости** возрастает в связи с тем, что **совершенствование материалов** происходит главным образом в направлении **повышения их прочностных характеристик** ( $\sigma_B, \sigma_{-1}$ ), а модуль упругости  $E$  (**характеристика жесткости**) изменяется незначительно или остается постоянным.

При этом чаще встречаются случаи, когда размеры детали, полученные из расчета на прочность, оказываются недостаточными по жесткости.

Жесткостные характеристики материала:

$E$  – модуль упругости I рода (модуль Юнга);

$E = (2...2.2) \cdot 10^5$  МПа – сталь;  $E = 1.1 \cdot 10^5$  МПа – титановые сплавы;

$E = 0.7 \cdot 10^5$  МПа – алюминиевые сплавы.

$G$  – модуль упругости II рода (модуль упругости при сдвиге)

для стали  $G = 8.35 \cdot 10^4$  МПа

Количественные характеристики жесткости:

Коэффициент жесткости  $C$  – сила, вызывающая единичную деформацию [Н/м].

Коэффициент податливости  $\lambda$  – деформация, вызываемая единичной силой [м/Н].

$$C = \frac{1}{\lambda}$$

Требования к жесткости деталей машин определяются:

- 1) Условиями прочности детали – при неустойчивом равновесии, а также при ударных нагрузках;
- 2) Условиями работоспособности сопряженных деталей (жесткость валов определяет удовлетворительную работу подшипников, а также зубчатых передач и др.);
- 3) Условиями динамической устойчивости;
- 4) Технологическими условиями (качество обработки на станках).

## ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ

**Изнашивание – процесс разрушения и отделения материала с поверхности твердого тела и/или накопление его остаточной деформации при трении.**

**Износ** проявляется в постепенном **изменении размеров детали.**

**Т.о. ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ –** способность детали сопротивляться изменению размеров и/или формы под действием сил трения на ее поверхности.

Износ ограничивает работоспособность машин по следующим параметрам:

- а) **по потере точности** – приборы, измерительный инструмент, прецизионные станки;
- б) **по снижению КПД**, увеличению утечек – цилиндр и поршень в двигателях, насосах и т.д.;
- в) **по снижению прочности** вследствие уменьшения сечений, неравномерного износа опор, увеличения динамических нагрузок – зубья зубчатых и червячных колес и т.д.;
- г) **по возрастанию шума** – передачи быстроходных машин (транспортных);
- д) **по полному истиранию**, которое делает деталь непригодной – тормозные колодки, рабочие органы землеройных машин.

## Виды изнашивания

**1. Механическое изнашивание**, которое в основном определяется **абразивным изнашиванием**, т.е. изнашивание посторонними твердыми частицами. **Абразивное изнашивание** проявляется в виде:

- а) усталостного разрушения при многократном повторном деформировании микровыступов с малой глубиной взаимного внедрения;
- б) малоцикловой усталости при повторном пластическом деформировании микровыступов со средней глубиной внедрения;
- в) микрорезания при глубоком внедрении.

**2. Молекулярно-механическое изнашивание** (изнашивание при схватывании).

Схватывание происходит вследствие молекулярных сил при трении.

Схватывание в начальной форме проявляется в намазывании материала одной сопряженной детали на другую, а в наиболее опасной форме – в местном сваривании трущихся поверхностей с последующим вырыванием частиц одного тела, приварившихся к другому, при дальнейшем их относительном движении.

**3. Коррозионно-механическое изнашивание**, при котором механическое изнашивание сопровождается химическим или электрическим взаимодействием материала со средой (продукты коррозии стираются механическим путем).

Коррозия – процесс постоянного разрушения поверхностных слоев металла в результате окисления.

Фреттинг-коррозия (to fret – разъедать) – разрушение постоянно контактирующих поверхностей в условиях тангенциальных микросмещений без удаления продуктов износа (проявляется на посадочных поверхностях колец подшипников качения, зубчатых колес, шлицевых соединений).

Водородный износ, связанный с выделением водорода при разложении воды, нефти и нефтепродуктов, деструкцией пластмасс при трении, применении водородного топлива.

### **Важность критерия износостойкости**

Изнашивание увеличивает стоимость эксплуатации, вызывая необходимость проведения дорогих ремонтных работ. Для многих типов машин за период их эксплуатации затраты на ремонты и техническое обслуживание в связи с изнашиванием в несколько раз превышают стоимость новой машины. Несвоевременный ремонт приводит к поломке машины, а в некоторых случаях и к аварии.

**Триботехника** – наука о трении, смазке и изнашивании механизмов.

### **Методы борьбы с износом деталей.**

1. Применение смазочных материалов.
2. Применение антикоррозионных покрытий или материалов устойчивых к процессу коррозии (нерж. стали, пластмассы и др.)
3. Избирательный перенос – физико-химический процесс, происходящий в среде поверхностей трения и смазки, в результате которого на поверхностях деталей образуется защитная пленка (Образование металлической защитной пленки может происходить за счет материала, содержащегося в смазке и самих трущихся парах. Например, в паре сталь+медь или ее сплавы (бронза, латунь) пленкообразующим материалом будет медь. Пленкообразующим присадком смазки для пары сталь+сталь может быть, например, медный порошок, добавляемый в специальную смазку).

### Расчеты на износостойкость

1. Обеспечение режима **жидкостного трения**, т.е. необходимо обеспечить смазочный слой между поверхностями контактирующих деталей, превышающий высоту микронеровностей (шероховатость) и отклонений формы (Подшипники скольжения). Сложности: необходимость постоянной подачи смазочного материала, свободного от абразивных частиц.

2. При невозможности создания режима жидкостного трения, обеспечение требуемого ресурса достигается назначением допустимых давлений, установленных практикой  $p \leq [p]$ , где допустимое давление  $[p] = 1 \dots 4$  МПа – для подшипников скольжения большинства стационарных машин.

Также применяют расчет по произведению давления на скорость  $pv \leq [pv]$ , где  $[pv] = 2 \dots 10$  МПа·м/с – для подшипников скольжения большинства стационарных машин.

3. В общем случае, применяют следующую зависимость, характеризующую износостойкость  $p^m S = \text{const}$ , где  $p$  – давление (контактное напряжение);  $S$  – путь трения;  $m \approx 1$  – при абразивном изнашивании,  $m \approx 1 \dots 2$  – при сухом трении со значительными давлениями,  $m \approx 3$  – при полужидкостной смазке.

## ТЕПЛОСТОЙКОСТЬ

Работа машин сопровождается тепловыделением, вызываемым рабочим процессом машин и трением в их механизмах.

Тепловыделение, связанное с рабочим процессом, особенно интенсивно у тепловых двигателей, электрических машин, литейных и машин для горячей обработки материалов.

Виды тепла: 1) внешняя среда; 2) источники энергии внутри машины; 3) внешнее трение; 4) внутреннее трение в материале (переменные напряжения).

Нагрев деталей может вызывать следующие вредные последствия:

1. Понижение прочности материала и появление ползучести (Жаропрочность).  
Следствие: Понижение несущей способности деталей, изменение зазоров в сопряженных деталях, что может привести к заклиниванию и заеданию.
2. Понижение защитной способности смазочного слоя.  
Следствие: Невозможность обеспечения режима жидкостного трения, что ведет к повышенному износу.
3. Изменение зазоров вследствие обратимых температурных деформаций.  
Следствие: Заклинивание или схватывание контактирующих деталей (вал в подшипнике скольжения).
4. Изменение свойств трущихся поверхностей (например, снижение коэффициента трения в тормозах, уменьшение вязкости масла).
5. Понижение точности работы машины (прецизионные станки).



### Тепловой расчет

$$Q_1 \leq Q_2$$

$Q_1$  – выделяемое тепло;  $Q_2$  – отводимое тепло.

[тепловыделение за единицу времени должно быть меньше или равно теплоотдаче]

В общем случае

$$Q_1 = N_1 \psi,$$

где  $N_1$  – мощность источников тепла внутри машины;  $\psi$  – коэффициент рассеивания энергии.

$$Q_2 = \alpha A (T_p - T_a),$$

где  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи;  $A$  – площадь поверхности теплообмена с окружающей средой;  $T_p$  – температура внутри машины;  $T_a$  – температура окружающей среды.

В случае невыполнения условия теплового баланса необходимо вводить конструкцию элементы для дополнительного охлаждения: увеличивать площадь теплообмена с помощью ребер охлаждения (конвективный теплообмен) или введение циркуляционной системы охлаждения с использованием жидкости.

Для тепловых машин используют более точные методы расчетов полей температур, рассматриваемых в теории теплопередачи.

## ВИБРОУСТОЙЧИВОСТЬ – способность конструкций работать в нужном диапазоне режимов без недопустимых колебаний.

В машинах основное распространение имеют:

**1. Вынужденные колебания**, вызываемые внешними периодическими силами (неуравновешенность вращающихся деталей, погрешностями изготовления, переменными силами в поршневых машинах и т.д.).

**2. Автоколебания** или **самовозбуждающиеся** колебания, т.е. колебания, в которых возмущающие силы вызываются самими колебаниями (фрикционные автоколебания, вызываемые падением силы трения с ростом скорости; гидродинамические автоколебания в подшипнике скольжения, вызываемые неуравновешенной частью реакции смазочного слоя).

Расчет на виброустойчивость проводят из условия несовпадения частоты рабочего режима с критическими частотами.

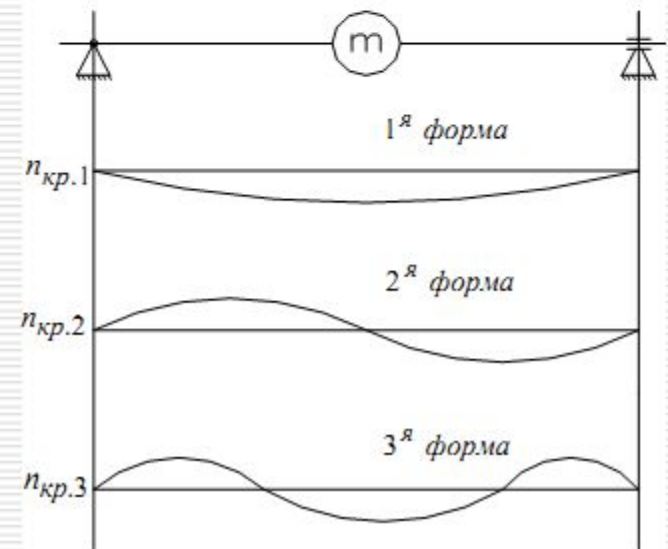
**Критическая частота** – частота **собственных колебаний** технической системы.

Реальное твердое тело имеет бесконечное множество критических частот.

При расчетах техническую систему значительно упрощают и на практике рассматривают обычно первые три критические частоты.

Для одномассовой колебательной системы первая критическая частота

$$n_{кр} = \frac{30}{\pi} \sqrt{\frac{c}{m}}$$



В общем виде условие виброустойчивости можно записать

$$k_1 n_{кр} \geq n \geq k_2 n_{кр}$$

де  $k_1, k_2$  – коэффициенты запаса,  $k_1 = 0,7 \dots 0,85$ ,  $k_2 = 1,15 \dots 1,3$ .

Физический смысл заключается в том, что рабочие частоты не должны находиться в зоне резонанса, т.к. в этом случае возможно разрушение ротора. Материал валов обладает демпфирующей способностью, что позволяет при определенных условиях переходить в зарезонансную зону.

