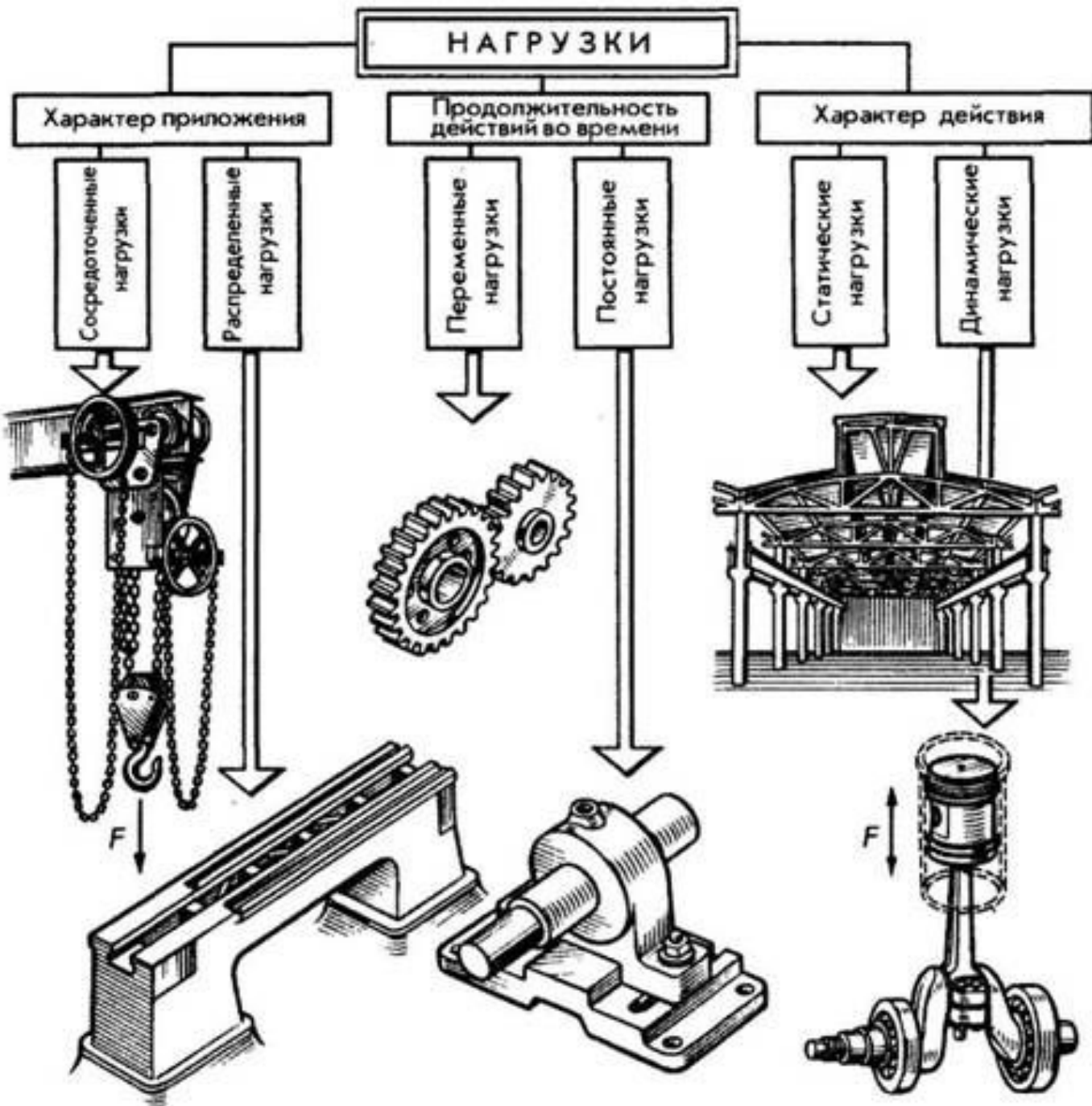


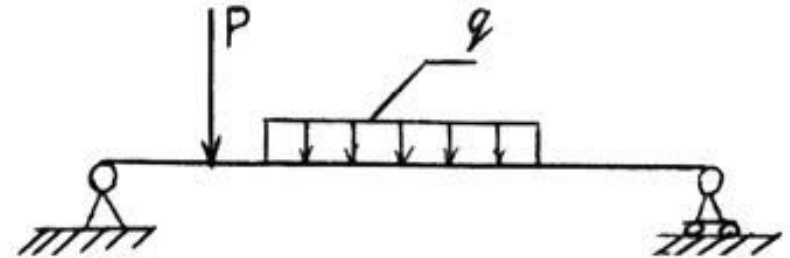
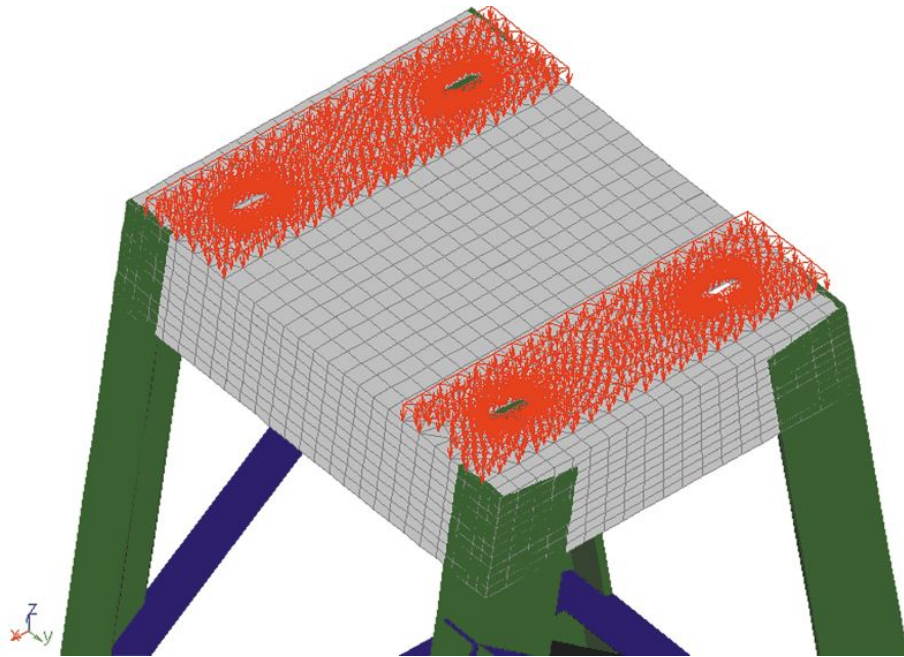
# Лекция 6

Нагрузки и требования к деталям машин.  
Проектирование деталей машин

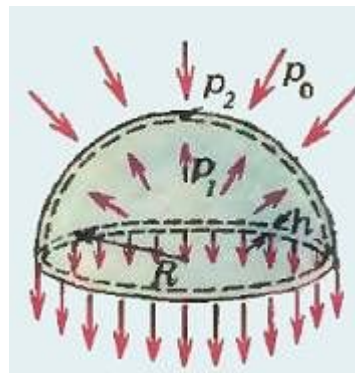
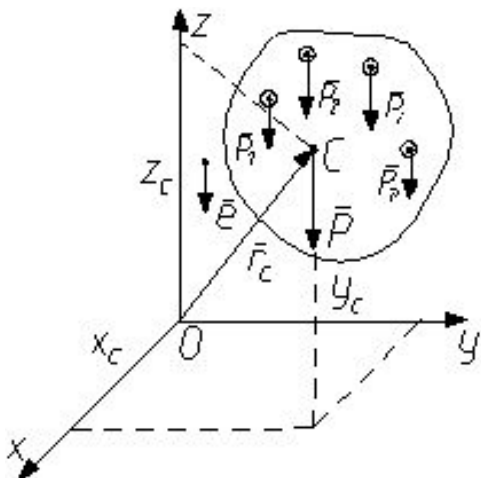
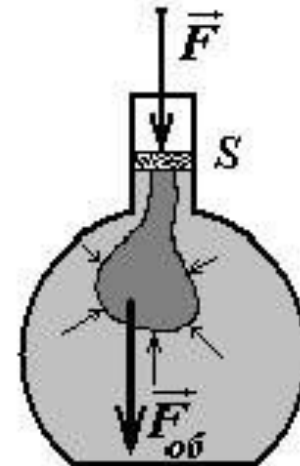
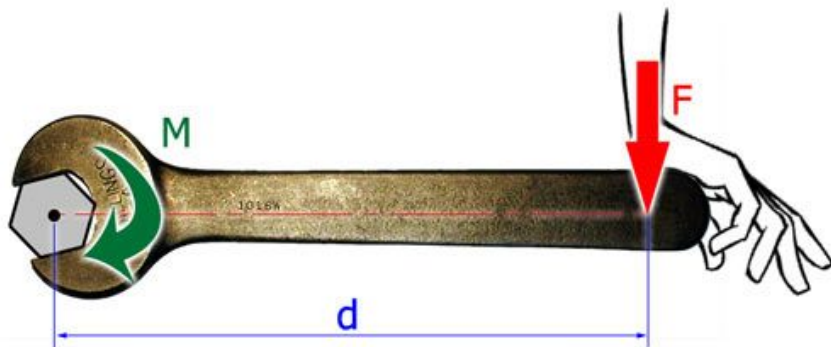


## Технологические нагрузки и воздействия:

- Поверхностная нагрузка (давление,  $\text{H}/\text{m}^2$ )
- Распределённая по линии (погонная,  $\text{H}/\text{м}$ )
- Сосредоточенные силы ( $\text{H}$ )

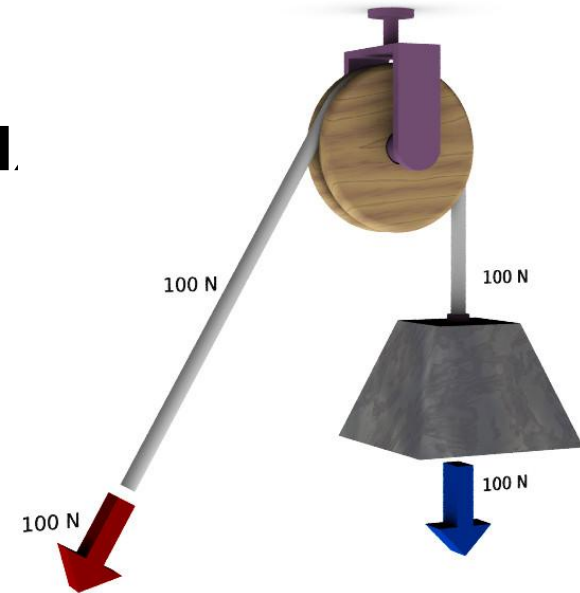


- Сосредоточенные моменты сил (Н\*м)
- Объёмные силы (силы собственного веса, силы инерции, центробежные силы и др., Н/м<sup>3</sup>)
- Тепловые нагрузки



# Сила

- – мера механического взаимодействия материальных тел между собой. Единица измерения силы – Ньютон(Н).
- Сила как векторная величина характеризуется **модулем (величиной), линией действия, направлением и «точкой» приложения силы.**



# Связи и реакции связей

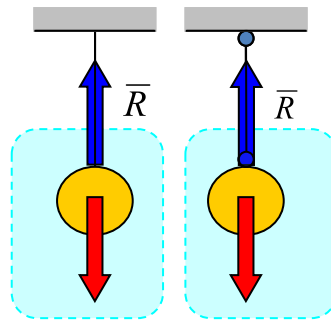
**Связь** – тело, ограничивающее свободу перемещений объекта.

**Реакция связи** – сила, действующая на объект со стороны связи.

**Принцип освобожденности от связи** – несвободное тело можно рассматривать как свободное, если отбросить связи и заменить их действие соответствующими реакциями.

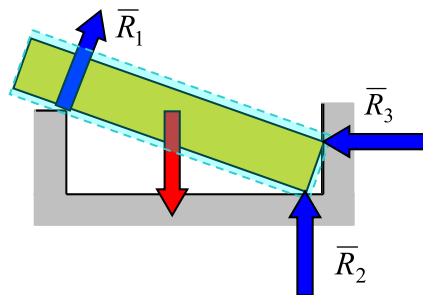
# Типовые связи и их

## 1. Реакции нити, шарнирный стержень:



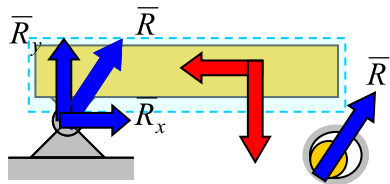
Реакция нити (стержня) направлена по нити (по стержню).

## 2. Абсолютно гладкая поверхность:



Реакция гладкой поверхности направлена перпендикулярно общей касательной плоскости, проведенной к соприкасающимся поверхностям тела и связи.

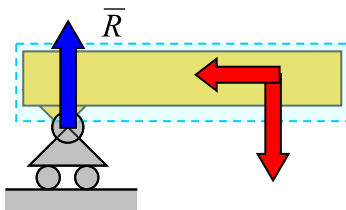
### 3. Неподвижный цилиндрический шарнир:



Реакция неподвижного шарнира проходит через центр шарнира перпендикулярно оси шарнира и имеет произвольное

Реакцию неподвижного шарнира можно разложить на две составляющие, например,  $R_x$  и  $R_y$ , параллельные координатным осям.

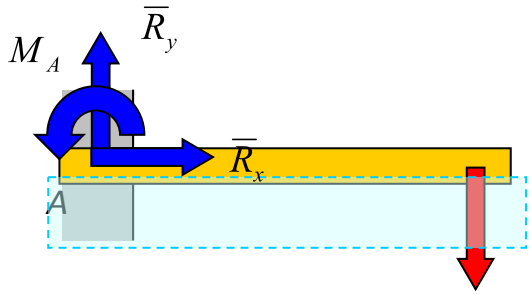
### 4. Подвижный цилиндрический шарнир:



Реакция подвижного шарнира проходит через центр шарнира перпендикулярно оси шарнира и плоскости опирания.

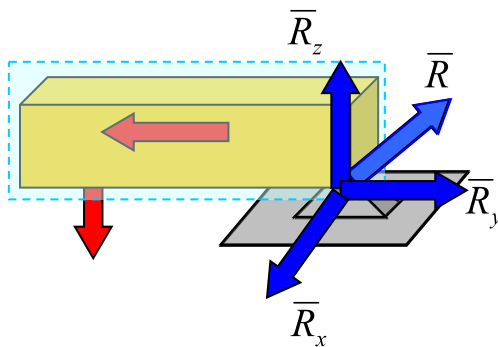


## 5. Жесткая плоская заделка:



В жесткой плоской заделке возникает три реактивных усилия: две составляющие реактивные силы  $R_x$  и  $R_y$ , а также реактивный момент (пара сил)  $M_A$ .

## 6. Неподвижный сферический шарнир:



Реакция неподвижного сферического шарнира проходит через центр шарнира и имеет произвольное направление в пространстве.

Реакцию неподвижного сферического шарнира можно разложить на три составляющие, например,  $R_x$ ,  $R_y$ ,  $R_z$ , параллельные координатным осям.

Момент силы относительно точки

## Общее правило для связей любого

### вида:

**Если связь препятствует одному или нескольким перемещениям (максимальное число перемещений – три поступательных и три вращательных), то по направлению именно ЭТИХ и только ЭТИХ перемещений возникают**

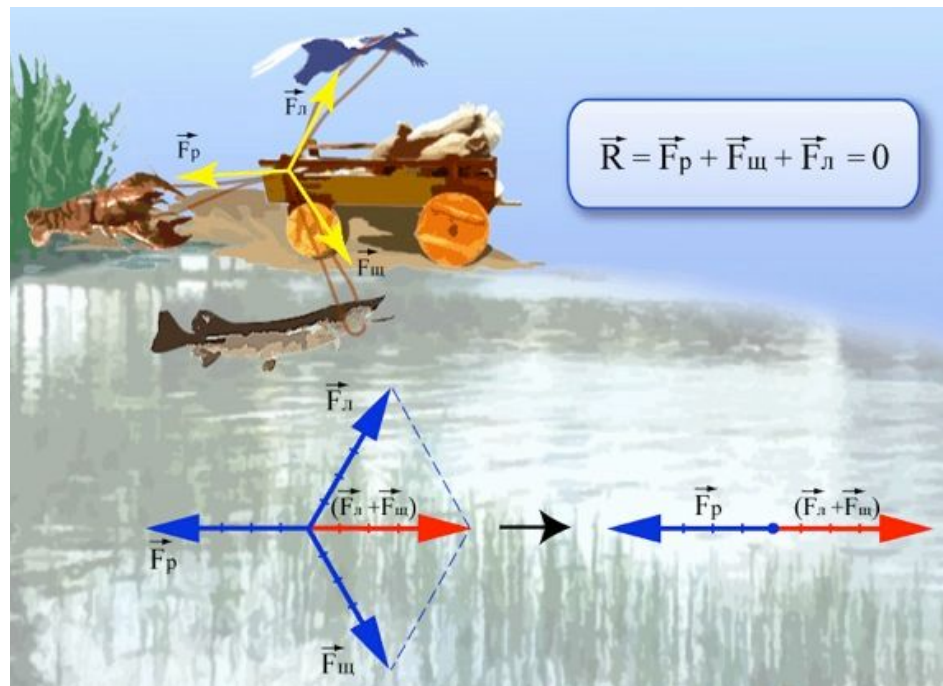
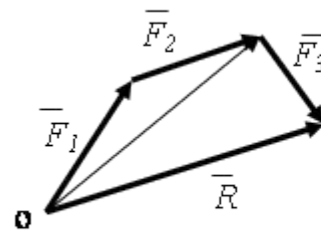
**соответствующие реакции (силы и моменты).**

## Система сходящихся сил

Силы называют сходящимися, если их линии действия пересекаются в одной точке

**Теорема:** Система сходящихся сил ( $F_n$ ) приводится к одной равнодействующей силе  $R$ .

**Для равновесия** тела, находящегося под действием системы сходящихся сил, необходимо и достаточно, чтобы их равнодействующая равнялась нулю.



[Пример](#)

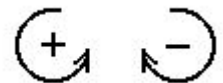
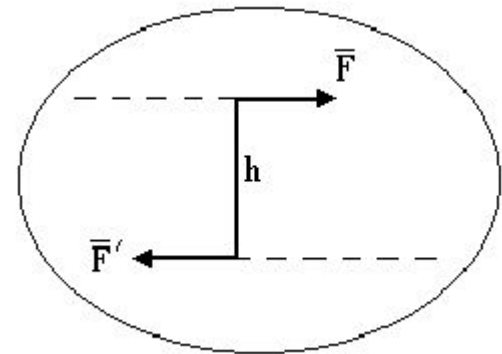
# Пара сил и

## МОМЕНТ СИЛ ОТНОСИТЕЛЬНО ТОЧКИ

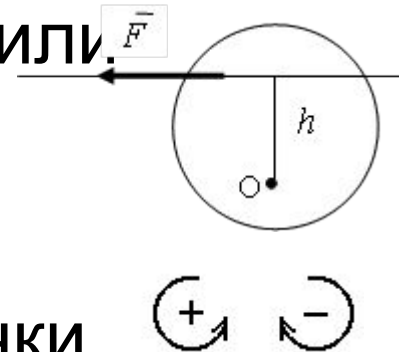
- **Пара сил** – это две силы, равные по абсолютному значению, противоположные по направлению и имеющие разные линии действия.
- Пара сил не имеет равнодействующей, создаёт **вращающий момент**
- Момент пары равен произведению одной из её сил на плечо пары.

$$M = F \cdot h, \text{ [Н/м]}$$

- **Плечо пары** – кратчайшее расстояние между линиями действия сил пары



- **Моментом силы** относительно любой точки **O** называется произведение модуля силы на плечо, взятое со знаком плюс или минус.



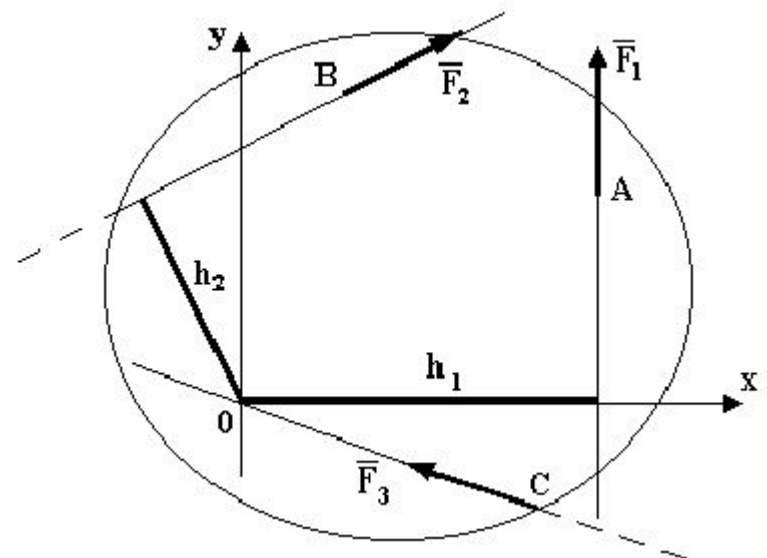
$$M_0(F) = \pm F \cdot h$$

- **Плечо** - кратчайшее расстояние от точки поворота **O** до линии действия силы. Если линия действия силы пересекает точку **O**, то ее момент относительно этой точки равен нулю, так как  $h=0$ .

$$M_0(\bar{F}_1) = +F_1 \cdot h_1$$

$$M_0(\bar{F}_2) = -F_2 \cdot h_2$$

$$M_0(\bar{F}_3) = 0,$$



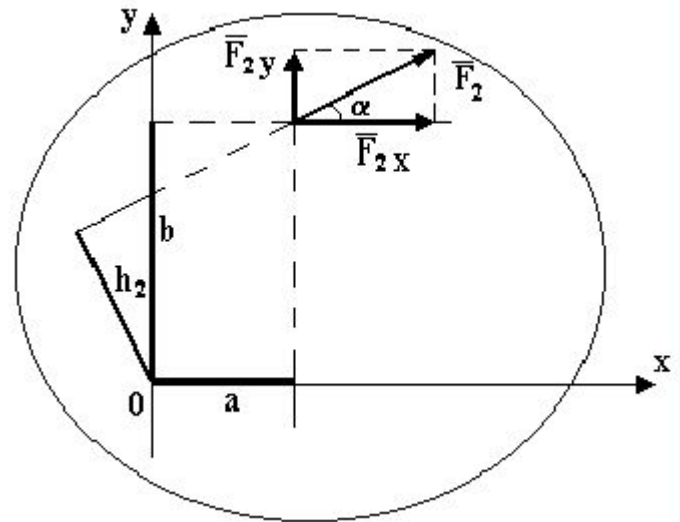
# Теорема Вариньона

Момент равнодействующей силы относительно точки **O** равен алгебраической сумме моментов составляющих ее сил относительно той же точки **O**.

$$M_0(\bar{F}) = M_0(\bar{F}_x) + M_0(\bar{F}_y)$$

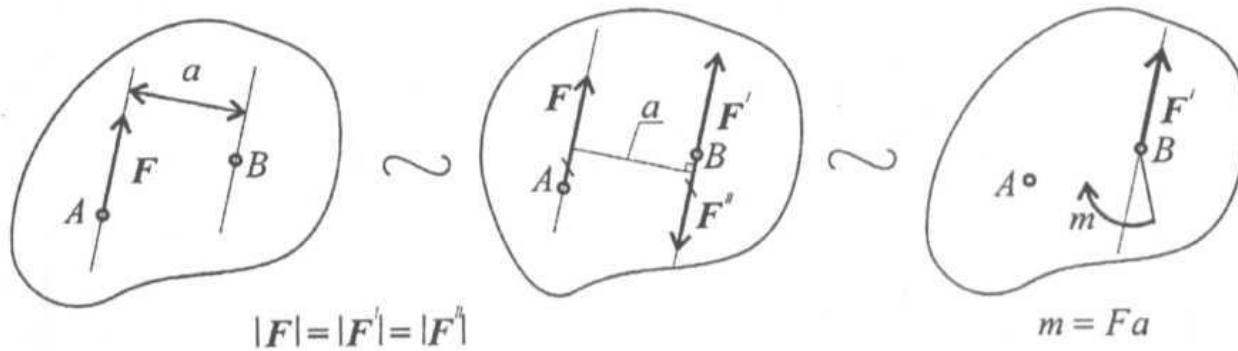
$$M_0(\bar{F}_2) = -F_{2x} \cdot b + F_{2y} \cdot a$$

$$M_0(\bar{F}_2) = -F_2 \cdot \cos \alpha \cdot b + F_2 \cdot \sin \alpha \cdot a$$

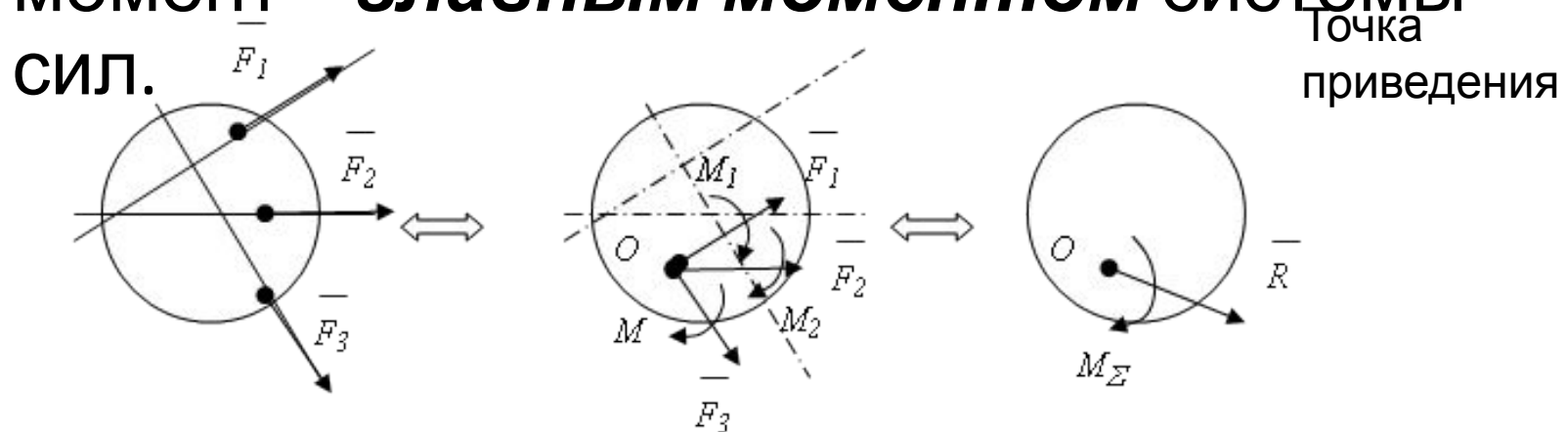


## Теорема Пуансо:

*Силу можно перенести параллельно линии ее действия, при этом нужно добавить пару сил с моментом, равным произведению модуля силы на расстояние, на которое перенесена сила.*



- **Следствие:** любую плоскую систему сил можно представить как сходящуюся систему сил и сумму моментов пар сил.
- Действие сходящейся системы сил заменяют действием суммарной силы, действие моментов – суммарным моментом. Суммарный вектор называют **главным вектором** системы сил, суммарный момент – **главным моментом** системы сил.





# Сила тяжести

**Сила тяжести** — равнодействующая сил притяжения к Земле, распределена по всему объему тела.

**Вес тела** — сила, с которой тело под действием силы тяжести действует на опору или подвес.

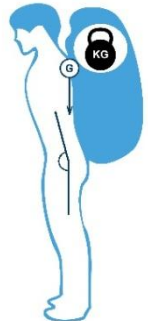
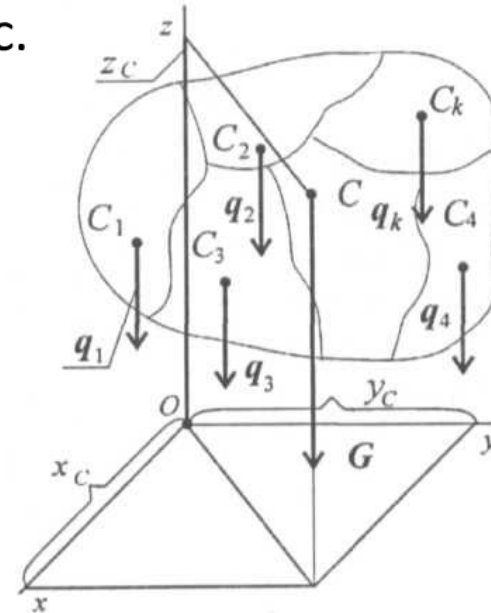
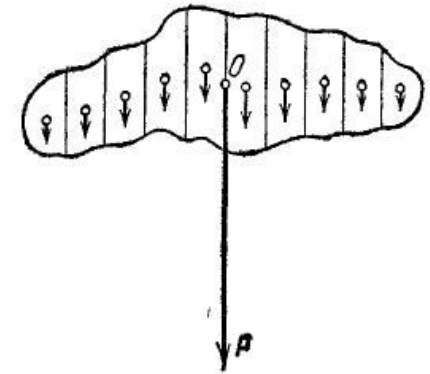
**Центр тяжести** — точка приложения равнодействующей

Координаты центра тяжести  $C$

- $x_c = \frac{1}{G} \sum_0^n q_k x_k$
- $y_c = \frac{1}{G} \sum_0^n q_k y_k$
- $z_c = \frac{1}{G} \sum_0^n q_k z_k$

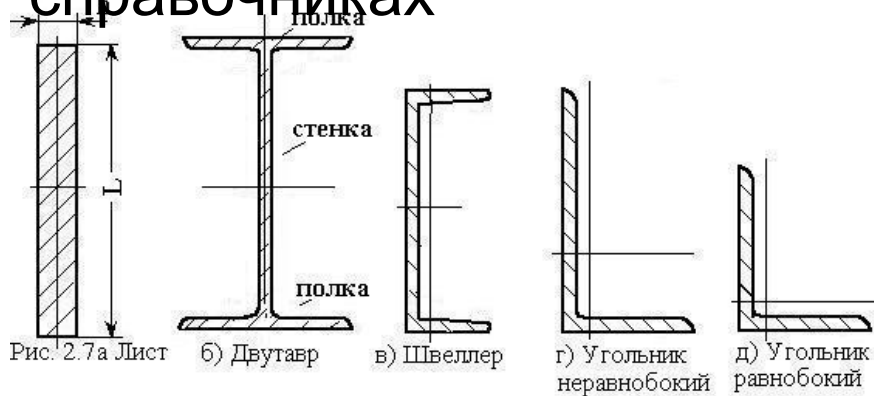
В однородном теле сила тяжести:

- 1) пропорциональна объёму (в формулах вместо  $q_k$  и  $G$  можно писать  $v_k$  и  $V$ )
- 2) для плоских фигур пропорциональна площади (в формулах вместо  $q_k$  и  $G$  можно писать  $A_k$  и  $A$ )



# Ферменные конструкции

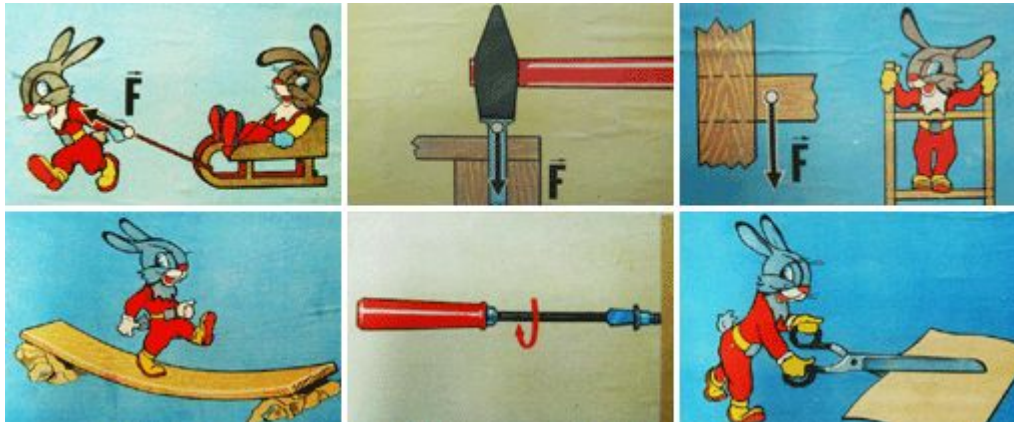
Центры тяжести (и другие геометрические характеристики) стандартных прокатных профилей приводятся в справочниках



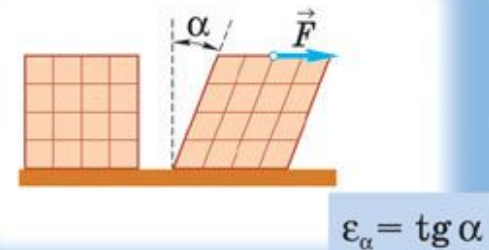
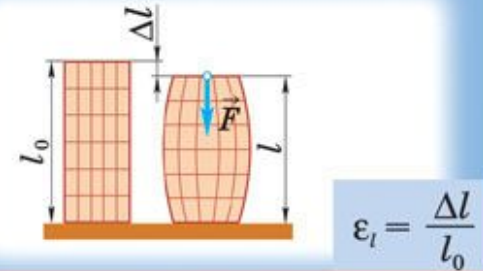
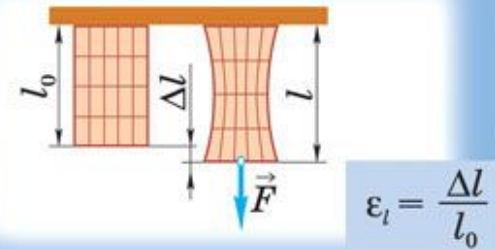
**Фёрма** (от [лат.](#) *firmitus* прочный), в строительной механике стержневая система, остающаяся геометрически неизменяемой после замены её жёстких узлов шарнирными. В элементах фермы, при отсутствии расцентровки стержней и внеузловой нагрузки, возникают только усилия растяжения-сжатия

# Напряжения и деформации

- Внешние нагрузки вызывают **напряжения** в материале детали и **деформации**.
- **Деформация** – это изменение первоначального размера элемента; измеряется в единицах длины [м] или в процентах (относительная деформация).
- Наиболее простые виды деформации: растяжение, сжатие, сдвиг, изгиб, кручение, срез.



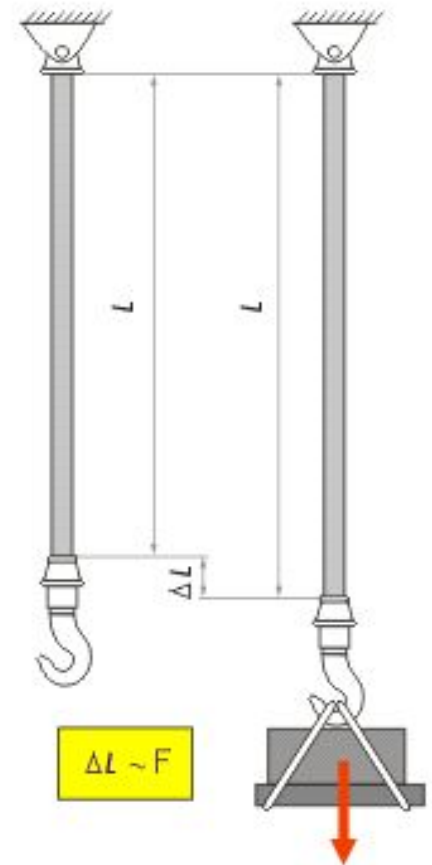
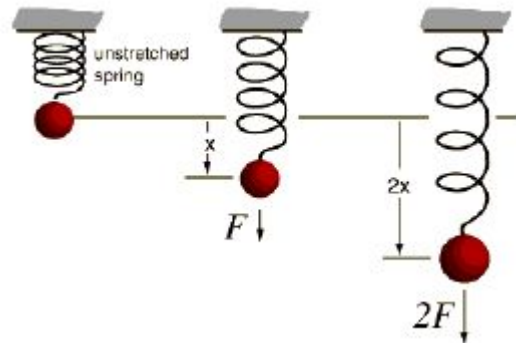
## МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИЙ



- **Упругая деформация** — это деформация, при которой металл полностью восстанавливает форму и размеры после прекращения действия внешних сил.
- Упругая деформация характеризуется двумя основными константами:
  - модулем Юнга, который определяет сопротивляемость материала упругой деформации,
  - коэффициентом Пуассона, который определяет относительное перераспределение объема металла при деформации.
- **Пластическая деформация** — это деформация, при которой материал под действием внешних сил необратимо изменяет, свою форму и размеры, т. е. деформируется без разрушения и сохраняет новую форму и размеры после прекращения действия сил.

# Линейная деформация

- **Абсолютное удлинение** – деформация (увеличение) длины бруса при его растяжении, относительно его исходной длины.
- **Относительное удлинение** - деформация бруса, деленная на первоначальную длину бруса.
- Согласно закону Гука упругая деформация пропорциональна силе.



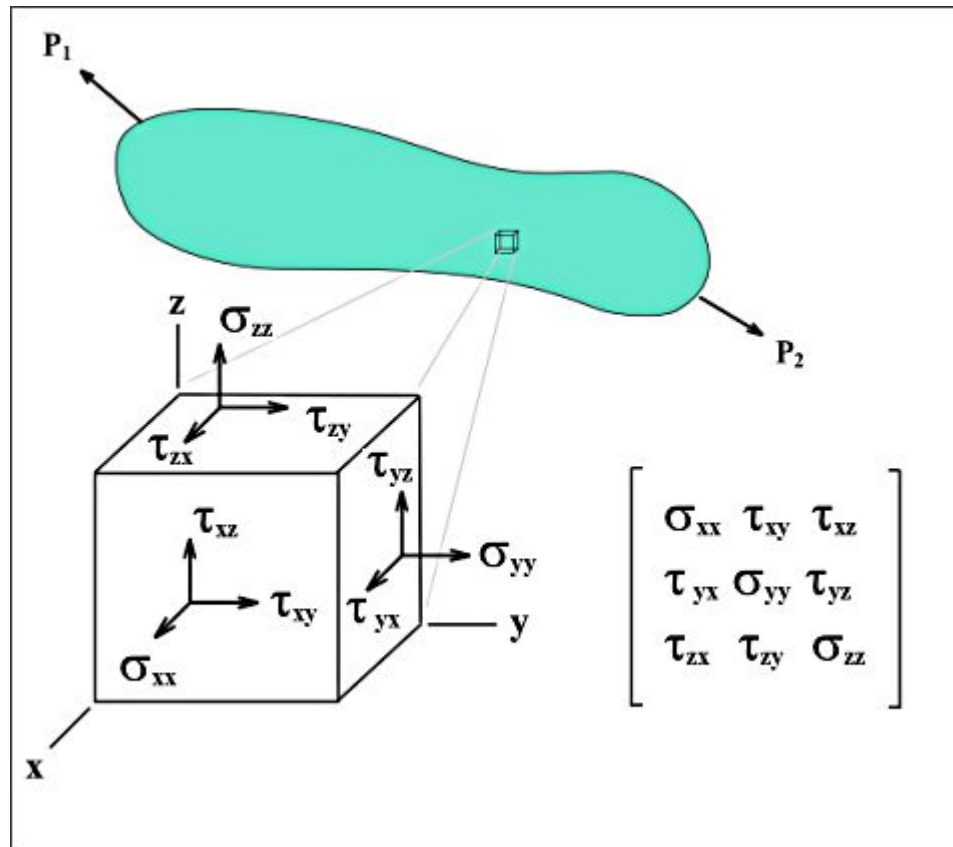
# Напряжения в материале деталей

- **Механическое напряжение** — это мера внутренних сил, возникающих в деформируемом теле под влиянием различных факторов.
- В практических случаях принимают, что напряжение пропорционально внешней силе  $F$  (или крутящему моменту  $T$  для вала):

$$Q = F/A, \text{ Па}$$

- $Q$  — механическое напряжение,
- $F$  — сила, возникшая в теле при деформации,
- $A$  — площадь.
- Различают две составляющие вектора механического напряжения:
- *Нормальное механическое напряжение* — приложено на единичную площадку сечения, по нормали к сечению (обозначается  $\sigma$ ).
- *Касательное механическое напряжение* — приложено на единичную площадку сечения, в плоскости сечения по касательной (обозначается  $\tau$ ).

# Тензор напряжений





# Пример:

Каково направление силы,  $F$ ,  $N$ ?

Растягивает или сжимает?

От чего зависит напряжение,  $s$ ,  $N/m^2 = 1 \text{ Па}$  (Паскаль)?

Как определить площадь сечения?

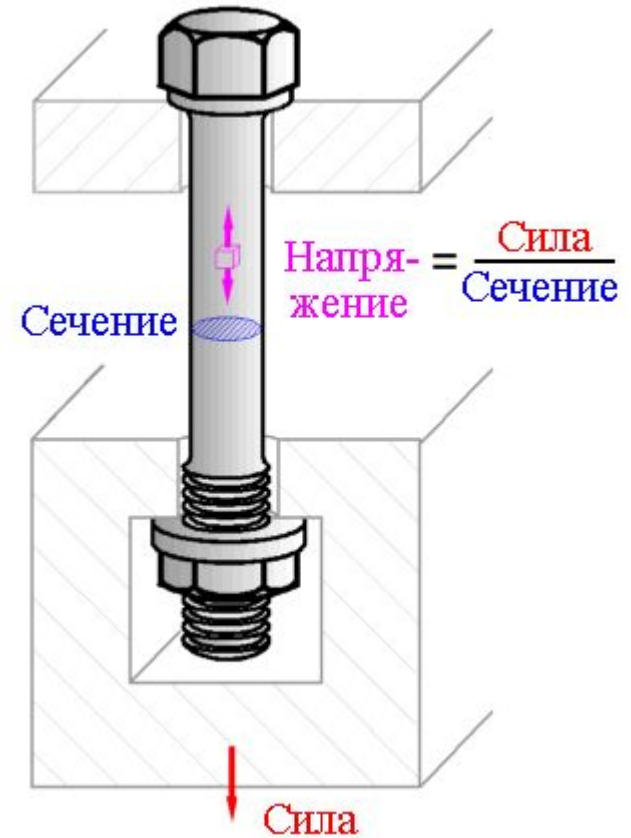
Как изменится напряжение, если:

А) силу увеличить/уменьшить в 2 раза?

Б) диаметр болта увеличить/уменьшить в 2 раза?

Влияет ли длина болта на напряжение в сечении?

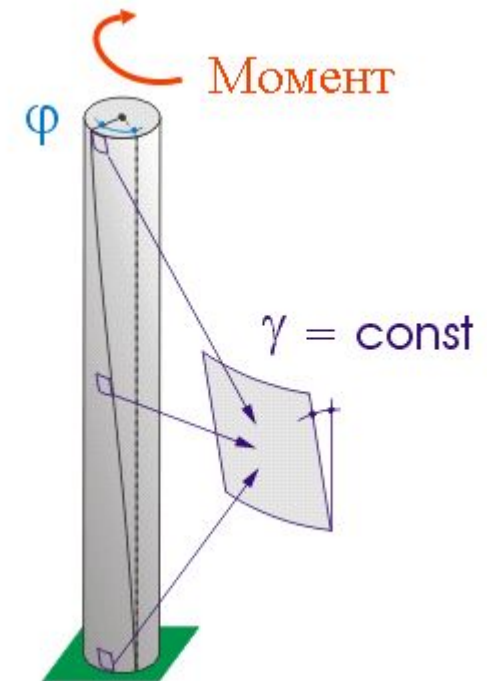
Критическое напряжение для стальных болтов обычно  $\leq 1000 \text{ МПа}$  ( $1000 \cdot 10^6 \text{ Па}$ )





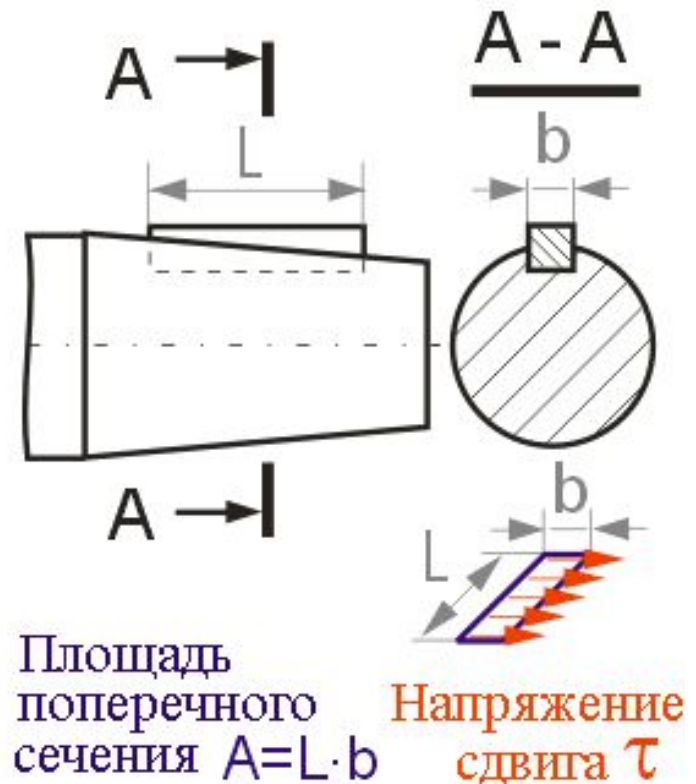
# Деформация сдвига вследствие кручения

- Угол сдвига  $\phi$  и угол закручивания  $\gamma$  описывают деформационное состояние цилиндра.
- Угол сдвига  $\phi$  не зависит от длины вала при постоянном крутящем моменте. Чем длиннее вал, тем больше угол закручивания  $\gamma$ .



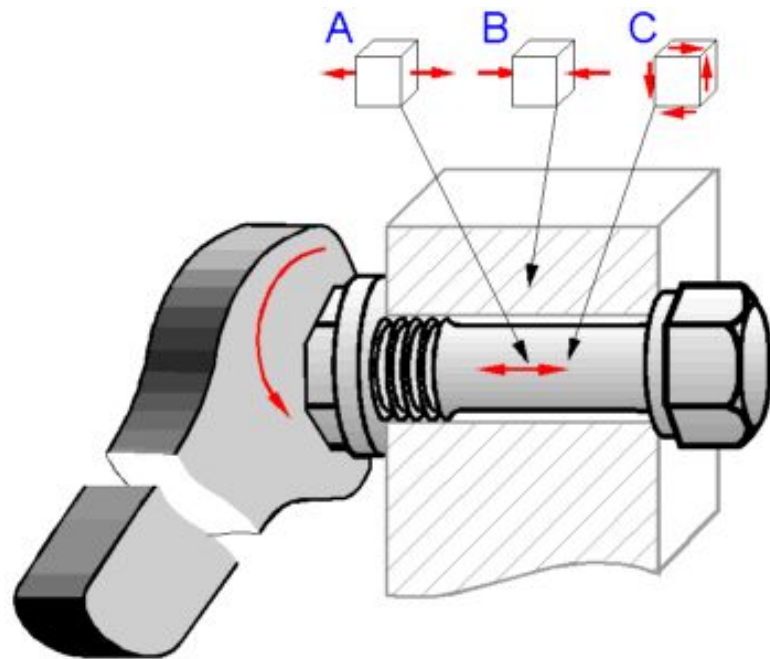
**Пример:** Крутящий момент передается через шпонку.

- Напряжение сдвига  $\tau$  обратно пропорционально площади поперечного сечения  $A$  [м<sup>2</sup>] шпонки.
- Площадь сдвига не зависит от высоты шпонки.
- Если имеются несколько шпонок, то напряжение сдвига определяется по их суммарной площади сдвига.

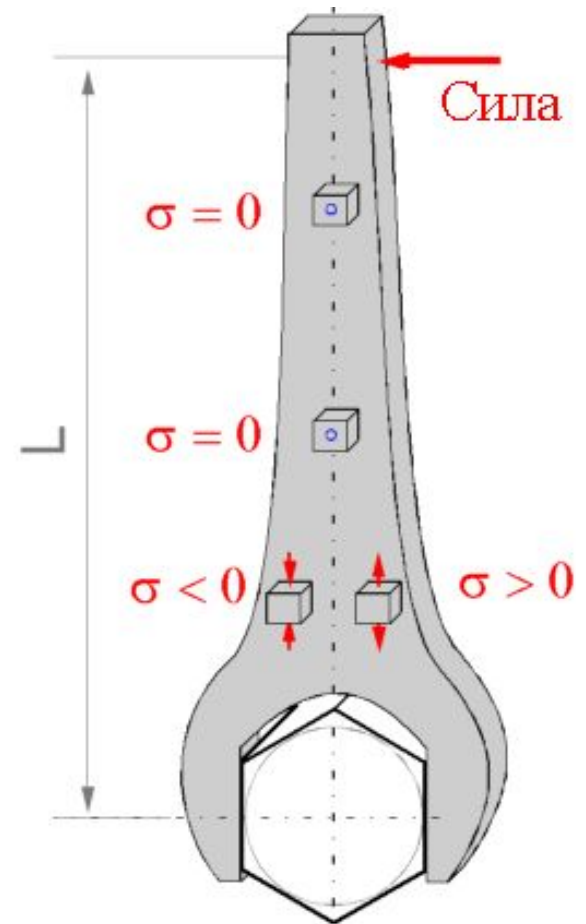


## Пример:

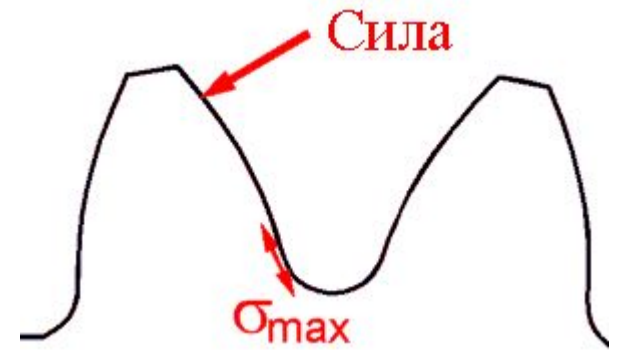
- В соединяемой детали возникают сжимающие напряжения.
- В середине болта – растягивающее напряжение и напряжение сдвига.
- Напряжение растяжения вызвано преднатягом.
- Напряжение сдвига вызвано крутящим моментом.
- Напряжение растяжения существенно выше, чем напряжение сдвига.



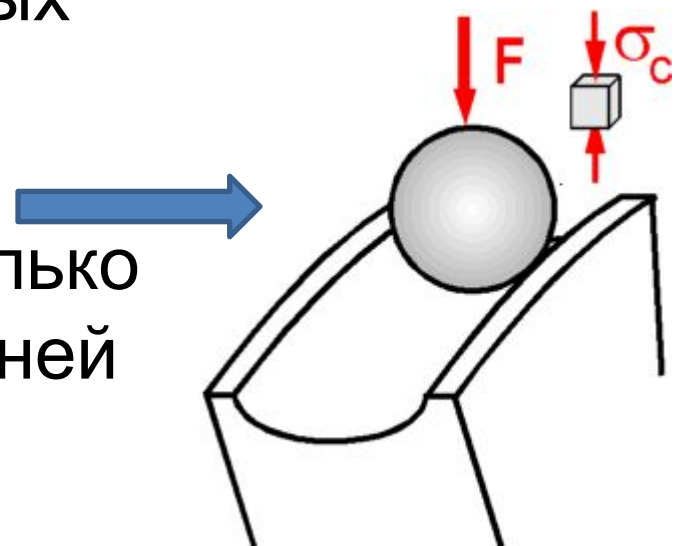
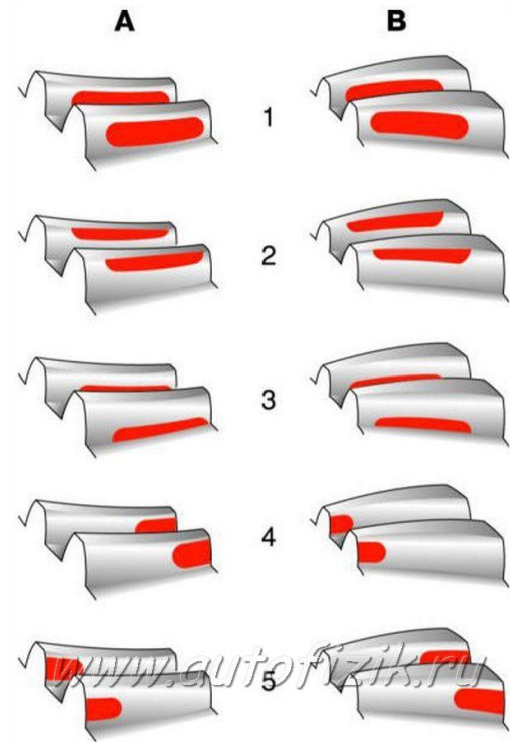
- **Пример:**
- Приложенная сила вызывает изгиб гаечного ключа.
- Как изменится изгибающий момент при увеличении расстояния от точки приложения силы?
- Напряжение изгиба пропорционально изгибающему моменту.
- На нейтральной линии напряжение изгиба равно нулю.
- Слева от нейтральной линии напряжение имеет отрицательное значение и справа положительное значение.
- Максимальное значение находится на ребре гаечного ключа.



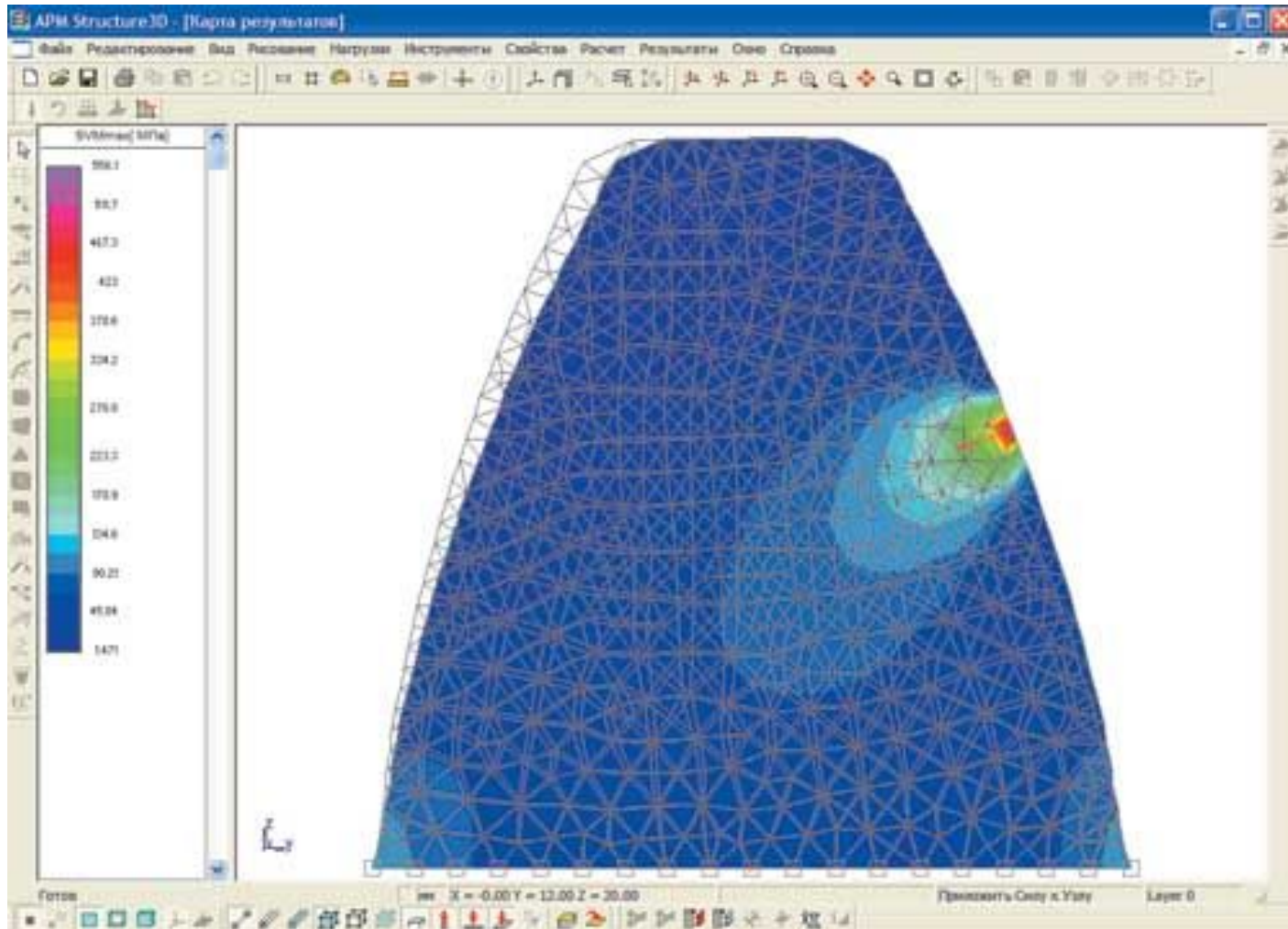
- **Пример**
- Изгиб вызывает растягивающее напряжение в зубчатом колесе. Наибольший изгибающий момент находится в корне зуба.



- **КОНТАКТНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ** возникают на площадках соприкасания твёрдых деформируемых тел и вблизи площадок (пятно контакта).
- Знание  $K. н.$  важно для расчёта на прочность подшипников, зубчатых и червячных передач, шариковых и цилиндрич. катков, кулачковых механизмов и т. п.
- Максимальное контактное напряжение увеличивается только в 2 раза, при увеличении внешней силы  $F$  в 8 раз.



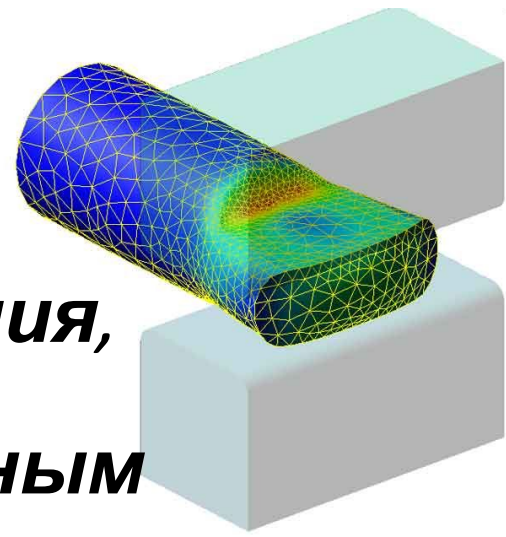
# Пример: Расчёт напряженно-деформированного состояния зуба шестерни





# Требования, предъявляемые к деталям машин:

- **Прочность** – способность сопротивляться разрушению, а также необратимому изменению формы под действием внешних нагрузок;
- **Жесткость** – способность сопротивляться упругим деформациям;
- **Износостойкость** – сопротивление изнашиванию;
- **малый вес и минимальные габариты;**
- **стоимость материалов;**
- **технологичность изготовления,**
- **безопасность эксплуатации,**
- **соответствие государственным стандартам**





# Основные характеристики прочности материалов

**Предел упругости** – механическое напряжение, при котором деформация исчезает после снятия нагрузки

**Предел текучести** – напряжение, при котором начинает развиваться пластическая деформация.

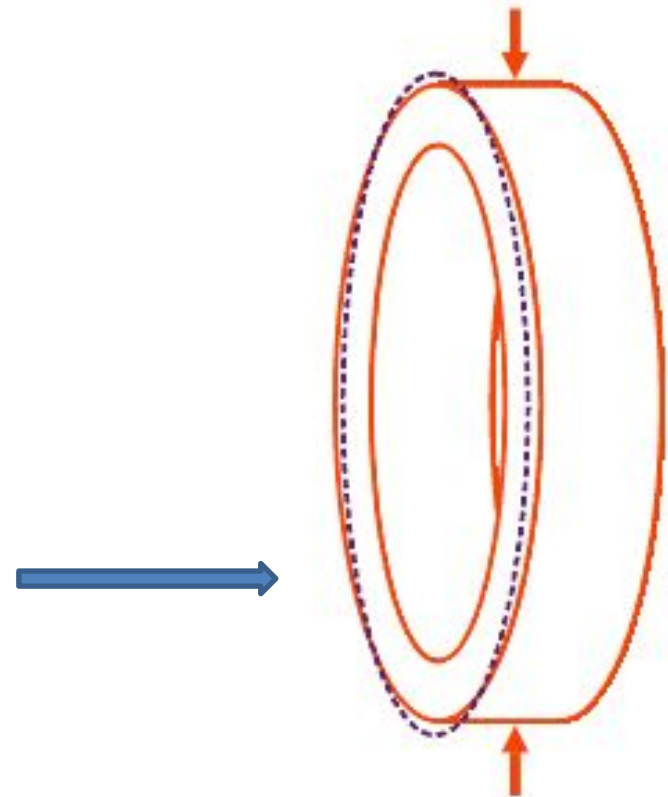
**Предел прочности** – напряжение, выше которого происходит разрушение материала.

**Предел выносливости (предел усталости)** – напряжение, характеризующее выносливость материала при циклических нагрузках

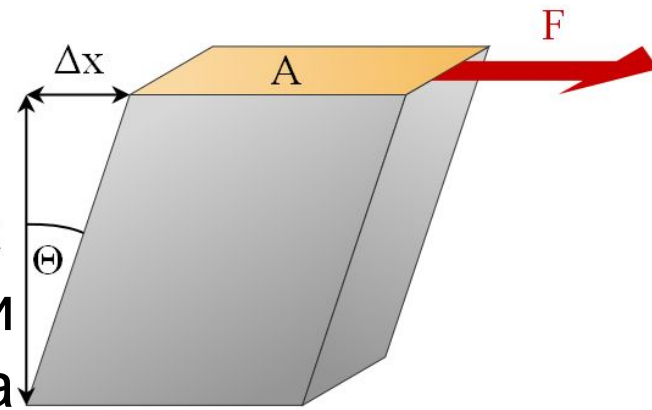


## ГИБКОСТЬ И ЖЁСТКОСТЬ

- **Гибкость** (свойство, обратное жесткости) зависит от модуля упругости материала (модуль Юнга), геометрических характеристик поперечного сечения и схемы загрузки.
- **Модуль Юнга** – физическая величина, характеризующая свойства материала сопротивляться растяжению/сжатию при упругой деформации.
- для стали  $E=2 \cdot 10^{11} \text{ Н/м}^2$  (210 ГПа),  
для резины  $E=2 \cdot 10^6 \text{ Н/м}^2$
- Чем больше диаметр кольца, тем более гибкая структура.



- **Жёсткость** – способность конструктивных элементов деформироваться при внешнем воздействии без существенного изменения геометрических размеров.
- **Модуль сдвига** или модуль жесткости характеризует способность материала сопротивляться изменению формы при сохранении его объёма; он определяется как отношение напряжения сдвига к деформации сдвига.
- Модуль сдвига связан с модулем Юнга через коэффициент Пуассона.
- **Коэффициент жёсткости** равен силе, вызывающей единичное перемещение в характерной точке (чаще всего в точке приложения силы).



$$G \stackrel{\text{def}}{=} \frac{\tau_{xy}}{\gamma_{xy}} = \frac{F/A}{\Delta x/I} = \frac{FI}{A\Delta x}$$

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)}$$

## Пример

Жесткость плотно-навитой спиральной пружины из круглой проволоки зависит от:

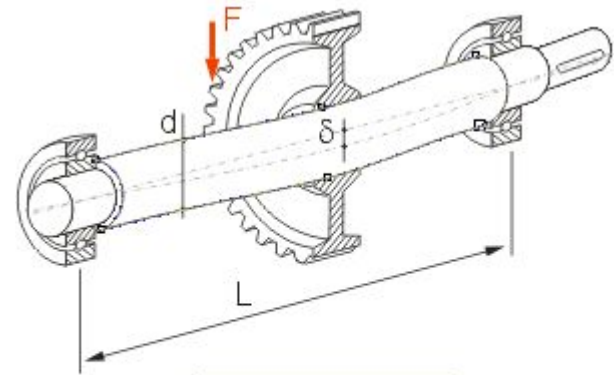
- числа витков  $n$ ,
- диаметра проволоки  $d$ ,
- диаметра пружины  $D$ ,
- модуля Юнга  $E$ ,
- приложенной силы  $F$ .

Гибкость (свойство, обратное жесткости) пропорциональна числу витков.

Начальная длина не влияет в некотором диапазоне значений на удлинение.



- **Пример:**
- Прогиб  $\delta$  пропорционален приложенной силе  $F$  и длине вала в кубе  $L^3$  и обратно пропорционален диаметру в кубе  $d^3$ .



$$\delta \sim \frac{FL^3}{d^3}$$

- **Пример**
- Контактные напряжения в зацеплении зависят от жесткости зубчатых колес. Нижнее колесо имеет постоянную толщину. Верхнее колесо более жестче в центре. Это наиболее жесткая часть зубчатой передачи. Контактные напряжения имеют максимальное значение в центре передачи.



**Остаточное напряжение** – напряжение, уравновешенное внутри тела при отсутствии внешних сил.



# Циклы переменных напряжений

- Возникают при воздействии на деталь переменной нагрузки или при действии постоянной нагрузки, если деталь изменяет своё положение по отношению к этой нагрузке (валы, оси, зубчатые колёса, пружины)

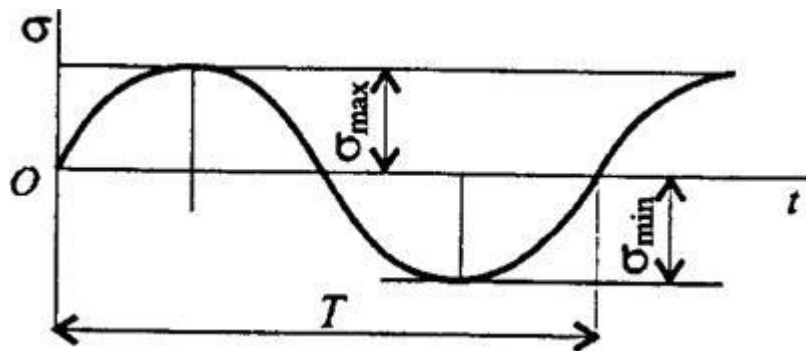


График симметричного цикла

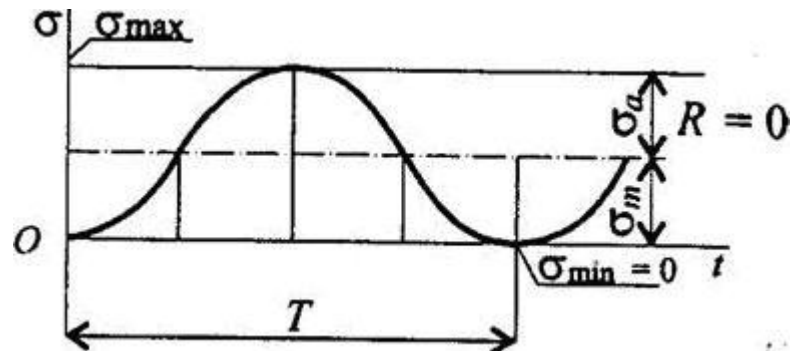
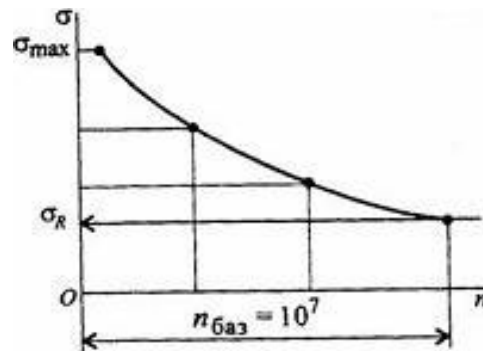


График отнулевого цикла напряжений



# Усталость материала

- - процесс накопления повреждений в материале под действием повторно-переменных напряжений
- Появление трещин под действием переменных напряжений называют усталостным разрушением



Пример:  
2009 – авария на  
Саяно-Шушенской  
ГЭС

Кривая  
усталости

# Предел выносливости

- способность материала воспринимать нагрузки, вызывающие циклические напряжения в материале.
- определяют с помощью испытаний серий одинаковых образцов (не менее 10 шт.): на изгиб, кручение, растяжение-сжатие или в условиях комбинированного нагружения



Усталостный излом

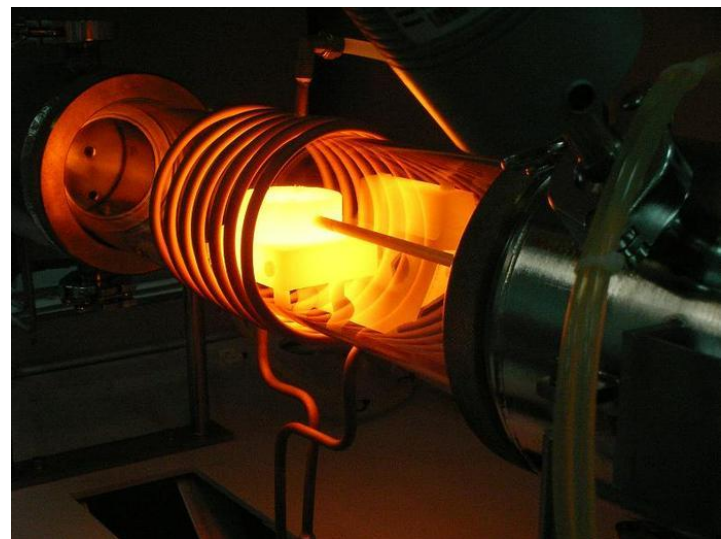
# Факторы, влияющие на предел выносливости

- **Концентрация напряжений.** В местах, где имеются резкие изменения размеров, отверстия, резьба, острые углы, возникают большие местные



Пример: Отверстия –  
концентраторы напряжений

- **Размеры детали.** В деталях больших размеров возможны внутренняя неоднородность, инородные включения, незаметные микротрещины.
- **Характер обработки поверхности.** Поверхность может быть шероховатой, т. е. ослабленной, а может быть усиленной специальными методами упрочнения: азотированием, поверхностной закалкой, цементацией и др.



# Коэффициент запаса прочности

- - расчётная величина, которая сравнивается с допускаемым значением:

$$s \leq [s]$$

- Ориентировочно для стальных деталей

$$[s] = 1,3 \dots 2,1$$

# Два вида расчётов деталей машин

## Проектировочный расчёт:

- составляют расчетную схему;
- определяют нагрузки, действующие на деталь;
- выбирают материал и назначают допускаемые напряжения;
- из условий прочности, жесткости, долговечности определяют размеры детали и характер ее сопряжения с другими;
- готовят документацию с указанием всех сведений, необходимых для изготовления детали;

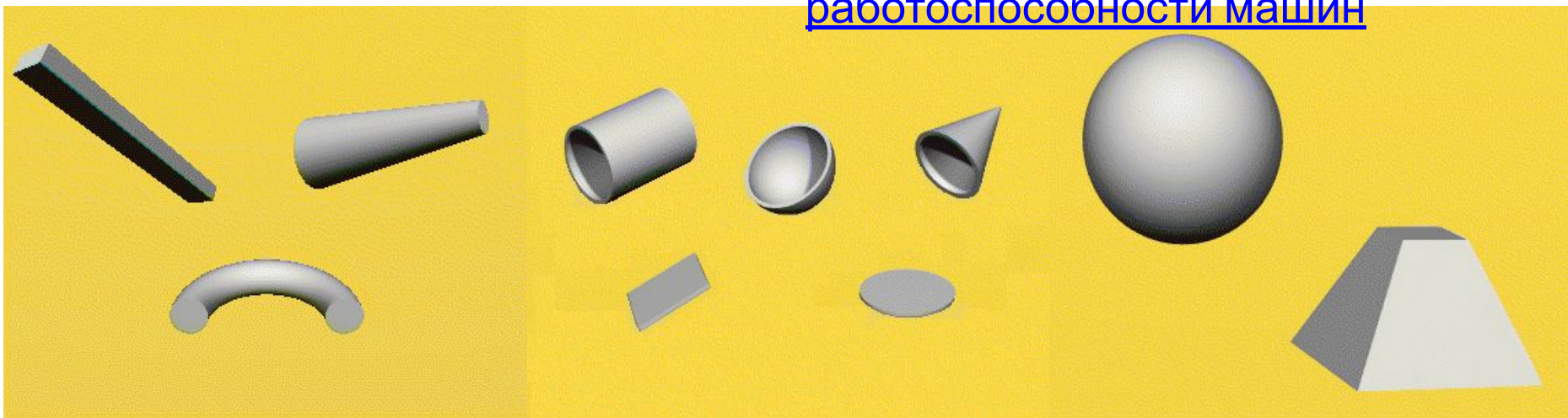
## Проверочный расчёт

- предварительно задают размеры и форму детали, исходя из ее назначения, характера сопряжения и общей компоновки узла,
- определяют фактические напряжения, действительные коэффициенты запаса прочности и сравнивают их с рекомендуемыми

## Типовые расчётные схемы деталей:

- «стержень» - используется при анализе работоспособности таких элементов оборудования как валы и оси, опорные балки и стойки, а также колонные аппараты большой высоты.
- «тонкостенная оболочка или пластина» - используется при анализе работоспособности элементов корпусов технологических аппаратов, трубных решеток в теплообменниках, трубопроводов.
- «массив» - тело, у которого все три измерения являются величинами одного порядка.

[Видео-критерии работоспособности машин](#)





# Краткие сведения о стандартизации, взаимозаменяемости деталей машин

**Стандартизация** – это установление обязательных норм.

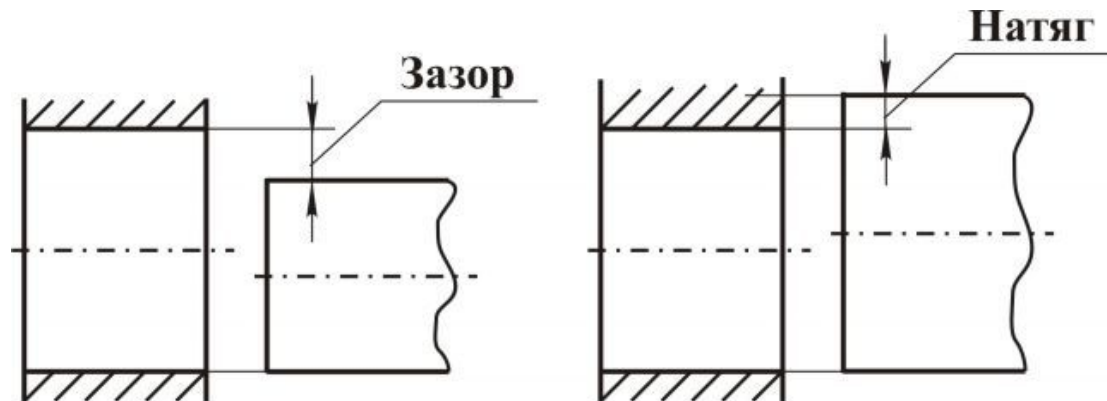
В машиностроении стандартизированы:

- обозначения общетехнических величин, правила оформления чертежей, ряды чисел, распространяющиеся на линейные размеры;
- точность и качество поверхности деталей;
- материалы, их химический состав, основные механические свойства и термообработка;
- форма и размеры деталей и узлов наиболее массового применения (болтов, гаек, шайб, заклепок, штифтов, приводных ремней и цепей, муфт, подшипников и др.);
- конструктивные элементы большинства деталей машин (модули зубчатых и червячных колес, конструктивные формы и размеры шлицевых



## Виды стандартизации:

- государственная,
- ведомственная,
- отраслевая,
- заводская (внутрифирменная).



**Унификация** деталей и узлов машин - устранение излишнего многообразия изделий, сортамента материалов и т. п. путем сокращения их номенклатуры.

**Взаимозаменяемость** – это свойство деталей и узлов машин, обеспечивающее возможность их использования при сборке без дополнительной обработки при сохранении технических требований, предъявляемых к работе данного узла.

Для обеспечения взаимозаменяемости деталей назначают в чертежах допустимые отклонения в размерах и форме