

**Расчет прочности соединений в
машиностроении,
контроль и методы управления
качеством**

Лекция 1

Введение в сопротивление материалов

Основные понятия

Гипотезы и допущения

Классификация сил

Внутренние силовые факторы

Метод сечений

Напряжения в поперечных сечениях элементов

конструкций

Перемещения и деформации

Сопротивление материалов – раздел механики деформируемого твердого тела, в котором излагаются основы и методы инженерных расчетов элементов конструкций на прочность, жесткость, устойчивость и выносливость при одновременном удовлетворении требований надежности, экономичности и долговечности.

Методами сопротивления материалов ведутся практические расчеты и определяются необходимые (надежные) размеры деталей элементов инженерных конструкций.

Задача сопротивления материалов - определение деформаций и напряжений в твердом упругом теле, которое подвергается силовому или тепловому воздействию.

Прочность – способность материала (образца, детали, элемента конструкции...) не разрушаясь сопротивляться действию внешних сил.

Цель расчета на прочность - определение размеров деталей или величины внешних нагрузок, при которых исключается возможность разрушения элемента конструкции.

Жесткость – способность конструктивных элементов деформироваться без существенного изменения геометрических размеров.

Цель расчета на жесткость - определение нагрузок и размеров деталей, при которых исключается возможность появления недопустимых с точки зрения нормальной работы конструкции деформаций.

Устойчивость – способность конструктивного элемента сохранять под нагрузкой первоначальную форму равновесия. При потере устойчивости возникает **продольный изгиб** – изгиб первоначально прямолинейного стержня под действием центрально приложенных продольных сжимающих сил.

Выносливость или **циклическая прочность** – способность материала противостоять усталости.

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

Надежность – свойство объекта сохранять работоспособное состояние в течение некоторого времени или некоторой наработки.

Долговечность – свойство элемента или системы длительно сохранять работоспособность до наступления предельного состояния при определенных условиях эксплуатации.

ГИПОТЕЗЫ И ДОПУЩЕНИЯ

1. Гипотеза сплошности и однородности — материал представляет собой однородную сплошную среду; свойства материала во всех точках тела одинаковы и не зависят от размеров тела.

Гипотеза позволяет не учитывать особенности кристаллической структуры металла, разный химический состав и прочностные свойства связующего и наполнителей в пластмассах, бетонах (щебень, песок, цемент), наличие сучков в древесине.

2. Гипотеза об изотропности материала – физико-механические свойства материала одинаковы по всем направлениям.

В некоторых случаях предположение об изотропии неприемлемо, материал является анизотропным. Так, анизотропными являются древесина, свойства которой вдоль и поперек волокон различны, а также армированные (композиционные) материалы.

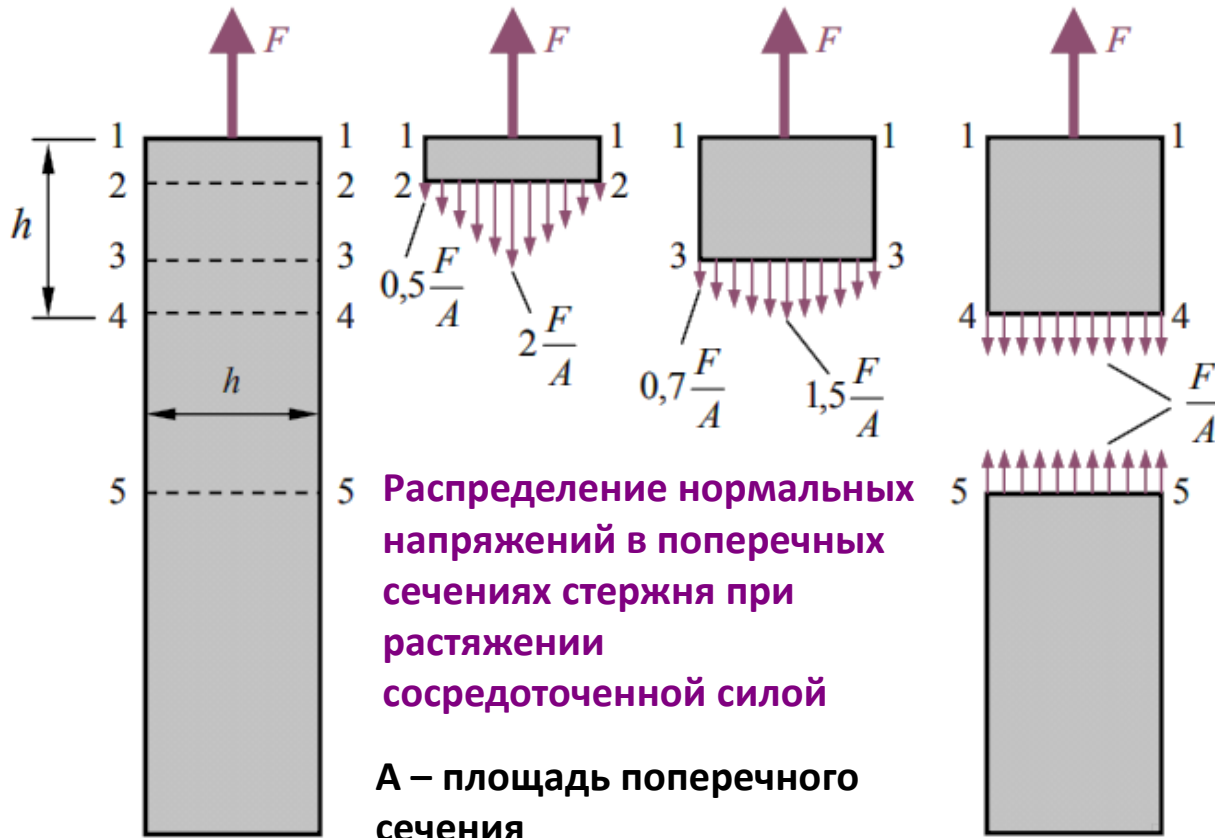
3. Гипотеза об идеальной упругости материала – тело способно восстанавливать свою первоначальную форму и размеры после устранения причин, вызвавших его деформацию.

4. Гипотеза о совершенной упругости материала – перемещения точек конструкции в упругой стадии работы материала прямо пропорциональны силам, вызывающим эти перемещения (справедлив закон Гука).

В действительности реальные тела можно считать упругими только до определенных величин нагрузок, и это необходимо учитывать, применяя формулы сопротивления материалов.

5. Гипотеза Бернулли о плоских сечениях – поперечные сечения, плоские и нормальные к оси стержня до приложения к нему нагрузки, остаются плоскими и нормальными к его оси в деформированном состоянии; при изгибе сечения поворачиваются не искривляясь.

6. Принцип Сен-Венана – в сечениях, достаточно удаленных от мест приложения нагрузки, деформация тела не зависит от конкретного способа нагружения и определяется только статическим эквивалентом нагрузки.



Резко выраженная неравномерность распределения напряжений по сечению 2-2, показанная на рисунке, постепенно выравнивается (сечение 3-3) и на удалении, равном ширине сечения (сечения 4-4 и 5-5), исчезает.

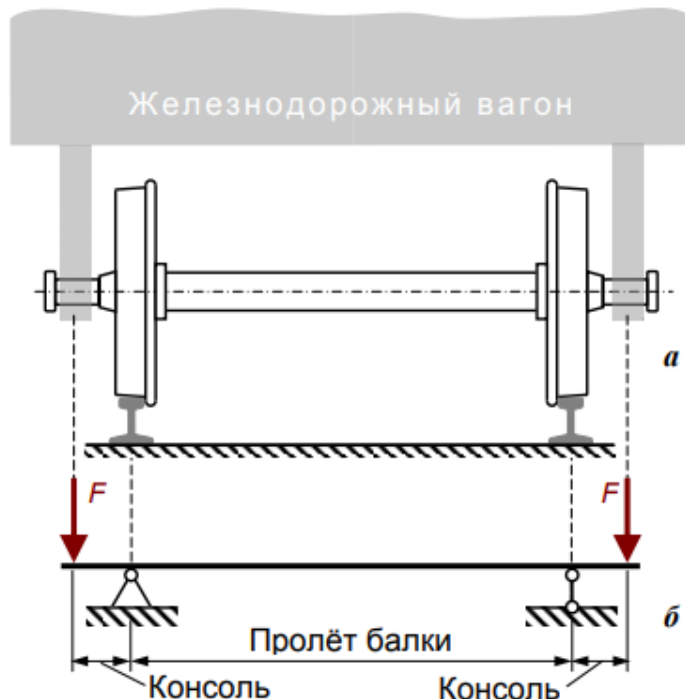
7. **Принцип Даламбера** – если к активным силам, действующим на точки механической системы, и реакциям наложенных связей присоединить силы инерции, то получится уравновешенная система сил. Принцип используется в расчетах на прочность при динамическом действии сил.
8. **Принцип независимости действия сил (принцип суперпозиции)** – результат воздействия нескольких внешних факторов равен сумме результатов воздействия каждого из них, прикладываемого в отдельности, и не зависит от последовательности их приложения. Это же справедливо и в отношении деформаций.
9. **Принцип начальных размеров (гипотеза о малости деформаций)** – деформации в точках тела настолько малы по сравнению с размерами деформируемого тела, что не оказывают существенного влияния на взаимное расположение нагрузок, приложенных к телу. Допущение применяют при составлении условий статики, считая тело абсолютно твердым.
10. **Допущение об отсутствии начальных внутренних усилий в теле до приложения нагрузки.** Почти во всех реальных деталях и элементах конструкций указанное допущение полностью не выполняется. Внутренние напряжения возникают в деревянных конструкциях вследствие неравномерного высыхания; в стальных и чугунных отливках – вследствие неравномерного охлаждения; в стальных деталях – вследствие термической и механической обработок. Формирование колесных пар для железнодорожных вагонов осуществляют путем запрессовки колес на ось. За счет натяга создаются напряжения в ступице колеса и подступичной части оси.

Типы схематизаций, используемых в сопротивлении материалов

Реальный объект – исследуемый элемент конструкции, взятый с учетом всех своих особенностей: геометрических, физических, механических и других.

Расчет реального объекта является или теоретически невозможным, или практически неприемлемым по своей сложности. Поэтому в сопротивлении материалов используют расчетные схемы, в которых применяют упрощения, облегчающие расчет.

Расчетная схема – идеализированная схема, отражающая наиболее существенные особенности реального объекта, определяющие его поведение под нагрузкой.



В зависимости от постановки задачи и требуемой точности ее решения для одной и той же конструкции может быть предложено несколько расчетных схем. Так же и одна расчетная схема может соответствовать различным конструкциям.

Пример реальной конструкции (а)
и соответствующей расчетной схемы (б)

Основная цель сопротивления материалов – создать практически приемлемые простые приемы (методики) расчета типовых наиболее часто встречающихся элементов конструкций. Необходимость перехода от реального объекта к расчетной схеме (с целью упрощения расчетов) заставляет вводить схематизацию понятий.

Выделяют следующие типы схематизации:

- физическая схематизация;
- геометрическая схематизация;
- силовая схематизация

Физическая схематизация (модель материала)

Все изучаемые тела считают выполненными (изготовленными) из материалов, наделенными идеализированными свойствами. Материал элементов конструкций считают *сплошным, однородным, изотропным и линейно упругим* (см. выше гипотезы 1, 2, 3, 4).

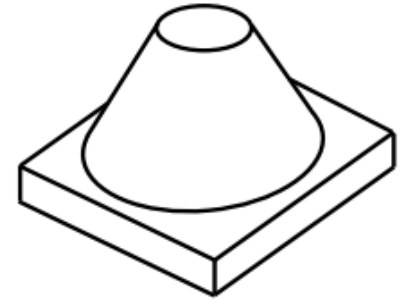
Геометрическая схематизация (модель формы)

Виды конструктивных элементов, встречающихся в сооружениях и машинах, при всем их разнообразии, можно свести к четырем основным категориям.

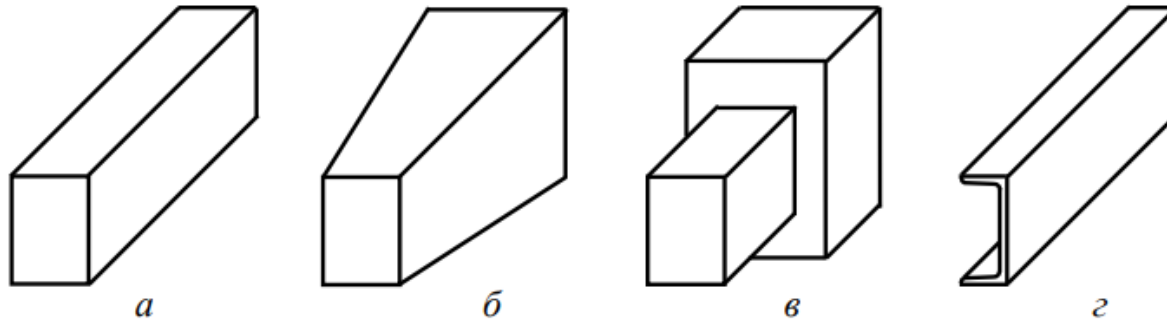
Массивное тело – тело, у которого все три размера величины одного порядка.

Это фундаменты сооружений, подпорные стенки, станины станков и т. п.

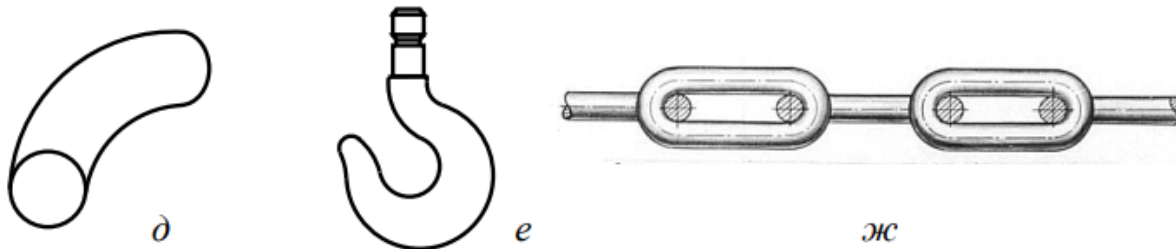
Брус – тело, одно из измерений которого, значительно больше двух других.



Брусья с прямолинейной осью:



- постоянного сечения (а),
- переменного сечения б),
- ступенчатый (в),
- тонкостенный (г)



С криволинейными осями (д), (е), (ж).

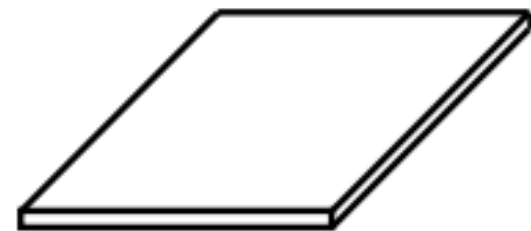
Оболочка – тело, ограниченное двумя криволинейными поверхностями, расположенными на близком расстоянии одна от другой.

Геометрическое место точек, равноудаленных от обеих поверхностей оболочки, называют срединной поверхностью. По форме срединной поверхности различают оболочки цилиндрические, конические, сферические и др. К оболочкам относятся тонкостенные резервуары, котлы, купола зданий, обшивки фюзеляжей, крыльев (и других частей летательных аппаратов), корпуса судов и т. п.



Пластина – тело, ограниченное двумя параллельными поверхностями

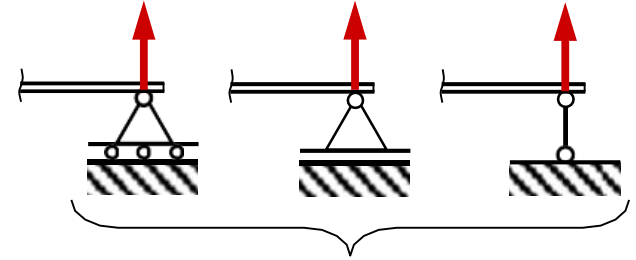
Пластины могут быть круглыми, прямоугольными и иметь другие очертания. Толщина пластин, как и оболочек, может быть постоянной или переменной. Пластинами являются плоские днища и крышки резервуаров, перекрытия инженерных сооружений, диски турбомашин и т. п.



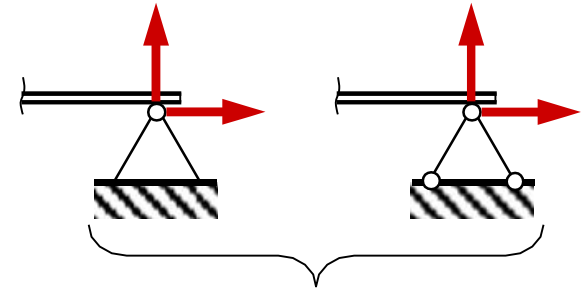
Схематизация опор

Схемы реальных опорных устройств можно свести к трем типам.

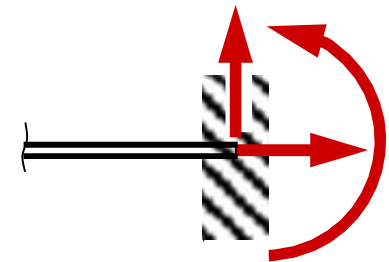
Шарнирно-подвижная опора балки препятствует только вертикальному перемещению конца балки, но ни горизонтальному перемещению, ни повороту. Такая опора при любой нагрузке дает одну реакцию.



Шарнирно-неподвижная опора препятствует вертикальному и горизонтальному перемещениям конца балки, но не препятствует повороту сечения. Дает две реакции: вертикальную и горизонтальную.



Жесткая заделка (защемление) Опора препятствует вертикальному и горизонтальному перемещениям конца балки, а также повороту сечения. Дает три реакции: вертикальную и горизонтальную силы и пару сил.



Силовая схематизация (модель нагружения)

В нагруженном теле, находящемся в равновесии, **внешние нагрузки** стремятся вызвать деформацию тела, а **внутренние усилия** стремятся сохранить тело как единое целое.

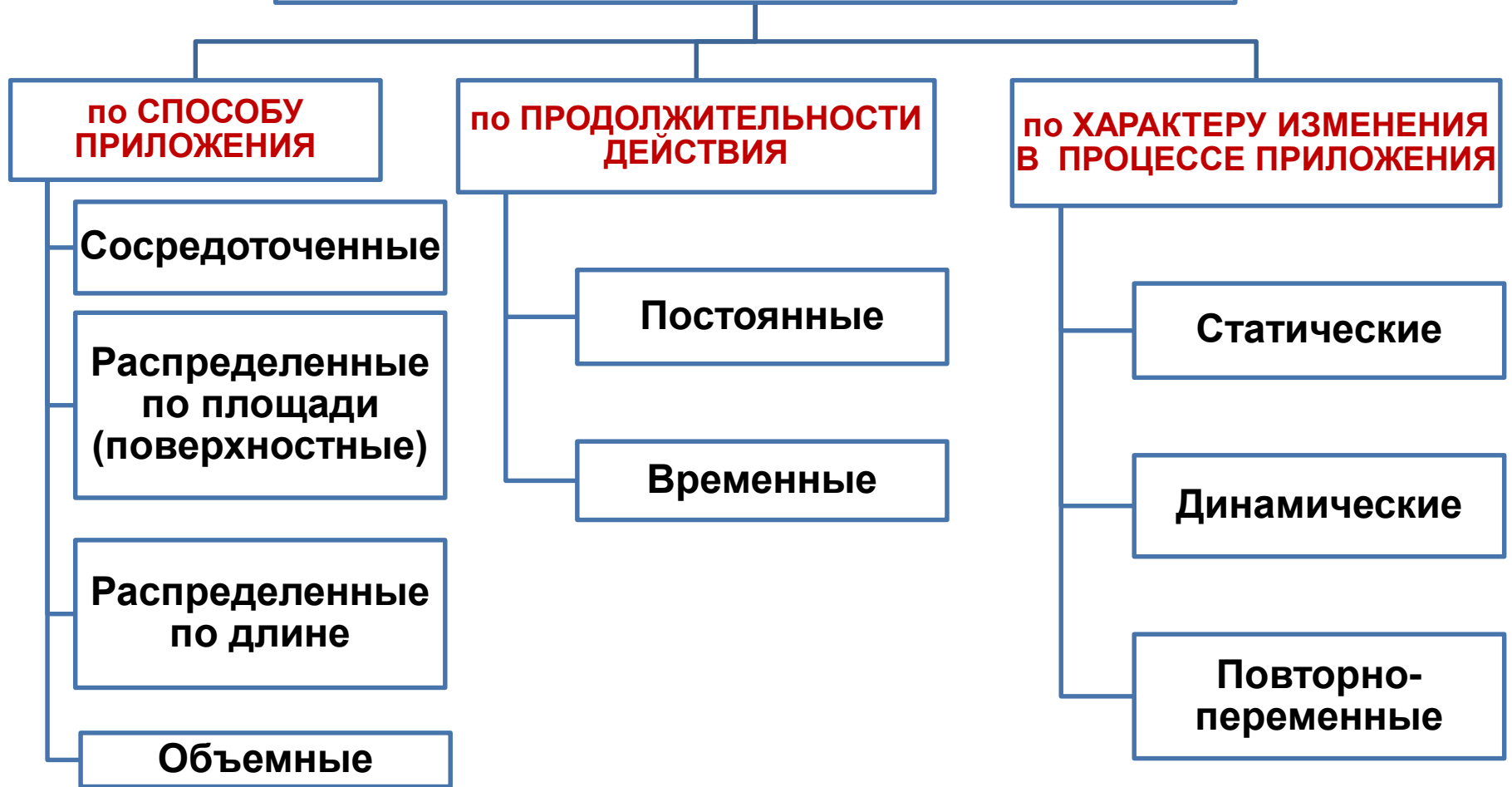
Внешние нагрузки – силы взаимодействия между рассматриваемым элементом конструкции и другими телами, связанными с ним.

Величиной внутренних усилий определяется степень деформации элемента конструкции и возможность разрушения в том или ином опасном сечении элемента конструкции.

Внутренние усилия – силы взаимодействия между частицами тела (кристаллами, молекулами, атомами), возникающие внутри элемента конструкции, как противодействие внешним нагрузкам.

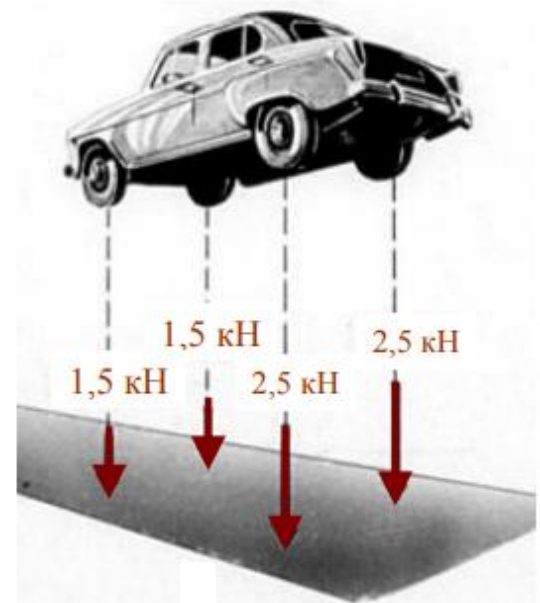
Силовая схематизация (модель нагружения)

Классификация **ВНЕШНИХ** нагрузок



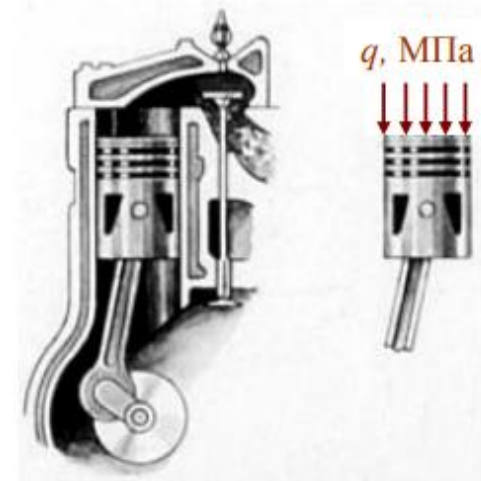
ПО СПОСОБУ ПРИЛОЖЕНИЯ

Сосредоточенные силы - силы, приложенные к площадкам, размеры которых малы по сравнению с размерами объекта (давление обода колеса на рельс).

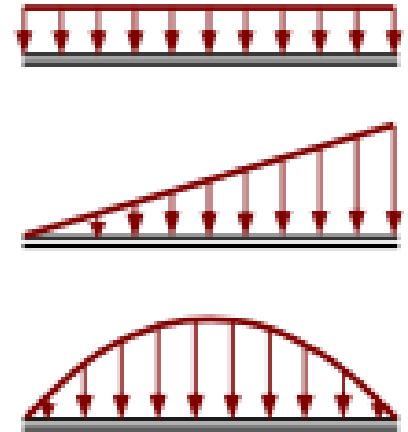


Распределенные по площади (поверхностные) силы - силы, приложенные к площадкам контакта (давление жидкости или газа на стенки сосуда, снеговая нагрузка на кровлю здания).

Давление выражается в единицах силы, отнесенных к единице площади, Н/м^2 , кгс/см^2 . Производная единица Паскаль: $1 \text{ Па} = 1 \text{ Н/м}^2$.



Распределенные по длине равномерно или по заданному закону (треугольному, параболическому...). Размерность Н/м



Объемные силы непрерывно распределены по объему, занимаемому элементом (сила тяжести, сила инерции) Характеризуются интенсивностью, то есть отношением единицы силы к единице объема, Н/м³.



ПО ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ ДЕЙСТВИЯ

Постоянные действуют в течение всего времени существования конструкции (нагрузка на фундамент здания).

Временные действуют на протяжении отдельных периодов эксплуатации объекта (давление газа в баллоне).

ПО ХАРАКТЕРУ ИЗМЕНЕНИЯ В ПРОЦЕССЕ ПРИЛОЖЕНИЯ

Статические – *постоянные* (нагрузка от собственного веса), или *медленно изменяющиеся* так, что силами инерции вследствие ускорения можно пренебречь (изменение давления от снеговой нагрузки).

Динамические – вызывающие в конструкции или отдельных ее элементах большие ускорения, которыми пренебречь нельзя. Величина этой нагрузки значительно изменяется за малые промежутки времени (например, ударная нагрузка).

Повторно-переменные – изменяющиеся по некоторому закону. (изменение натяжения ветви ремня или цепи в зависимости от ее положения в текущий момент времени – сбегаящая или набегающая ветвь на ведущий шкив (звездочку); изменение натяжения спицы велосипедного колеса в зависимости от ее положения (верхнее или нижнее в данный момент вращения колеса).

МЕТОД СЕЧЕНИЙ

1. Рассечь нагруженное тело плоскостью P на две части.
2. Отбросить одну из частей. Реальное тело представляет собой конгломерат различно ориентированных зерен, от граней которых в разных направлениях действуют элементарные внутренние усилия.
3. Заменить действие отброшенной части внутренними усилиями.

При этом используется аппарат теоретической механики: определение равнодействующей системы сходящихся сил, параллельных сил, перенос сил в заданную точку – центр тяжести сечения 0. Полученные в результате приведения главный вектор R и главный момент M спроецировать на главные оси инерции z , y и геометрическую ось x .

4. Уравнения равновесия позволяют определить внутренние усилия. Всего их шесть:

три силы – проекции главного вектора R

$\Sigma F_x = 0$; $N = \dots$ Продольное усилие

$\Sigma F_y = 0$; $Q_y = \dots$ Поперечное усилие

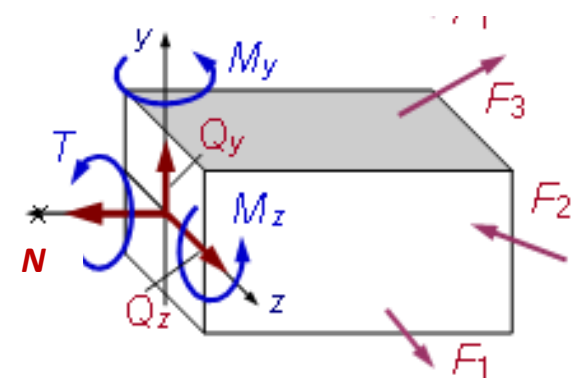
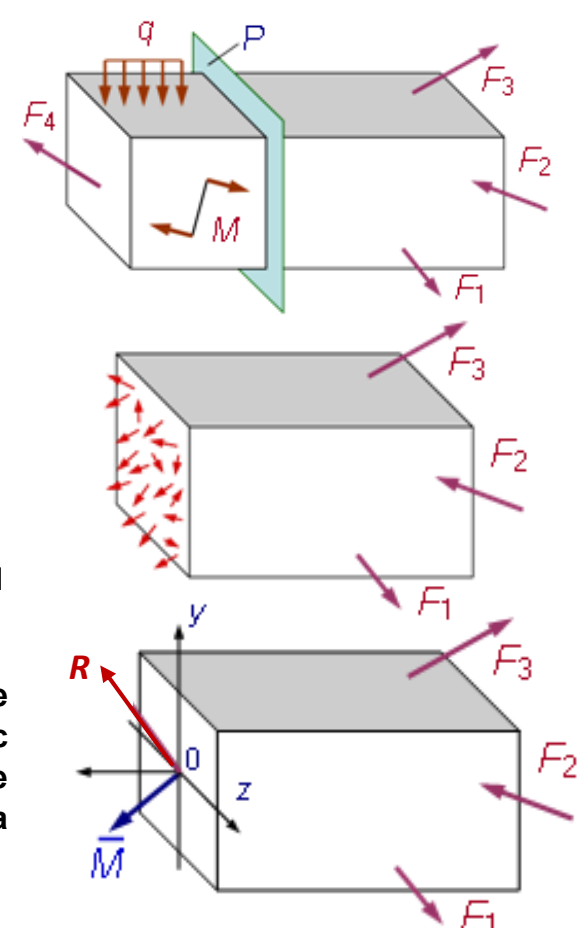
$\Sigma F_z = 0$; $Q_z = \dots$ Поперечное усилие

три момента

$\Sigma M_x = 0$; $T = \dots$ Крутящий момент

$\Sigma M_y = 0$; $M_y = \dots$ Изгибающий момент

$\Sigma M_z = 0$; $M_z = \dots$ Изгибающий момент



Таким образом, можно сформулировать **правило определения внутренних силовых факторов:**

Внутренние силы N , Q_y , Q_z численно равны алгебраической сумме проекций всех внешних сил (в том числе и реакций), приложенных к брусу по одну сторону от рассматриваемого сечения.

Внутренние моменты T , M_y , M_z численно равны алгебраической сумме моментов от внешних сил, действующих по одну сторону от рассматриваемого сечения.

Каждая компонента внутренних усилий характеризует сопротивление тела какому-либо одному виду деформации – простому сопротивлению:

при $N \neq 0$ - растяжение или сжатие,

при $Q \neq 0$ - сдвиг,

при $T \neq 0$ - кручение,

при $M \neq 0$ - изгиб.

При наличии двух и более компонентов - сложное сопротивление тела.

Напряжения в поперечных сечениях элементов конструкций

Напряжение в точке по сечению – внутренняя сила взаимодействия, приходящаяся на единицу площади у этой точки.

Напряжение – величина, характеризующая интенсивность внутренних усилий в точке.

Рассмотренные ранее усилия N , Q_y , Q_z , M_y , M_z , T являются интегральным эквивалентом внутренних сил, распределенных по площади сечения. Эти силы характеризуются их интенсивностью

Разложение элементарного внутреннего усилия на составляющие

Напряжение полное

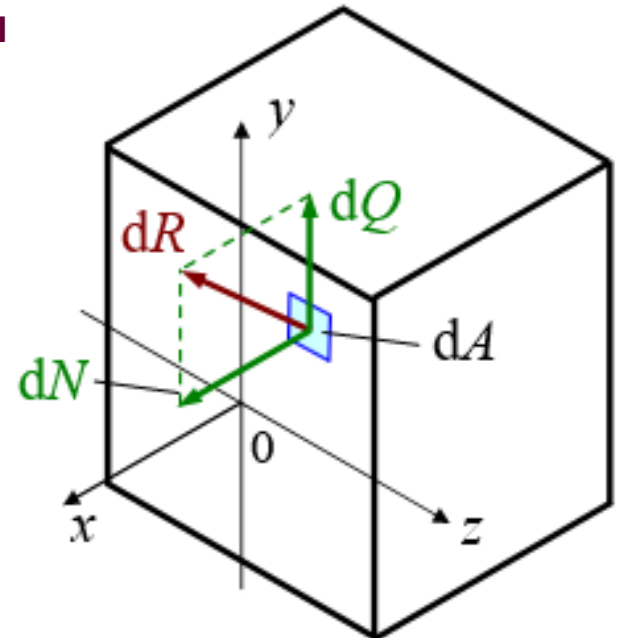
$$p = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta R}{\Delta A}$$

Напряжение нормальное

$$\sigma = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta N}{\Delta A}$$

Напряжение касательное

$$\tau = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta Q}{\Delta A}$$

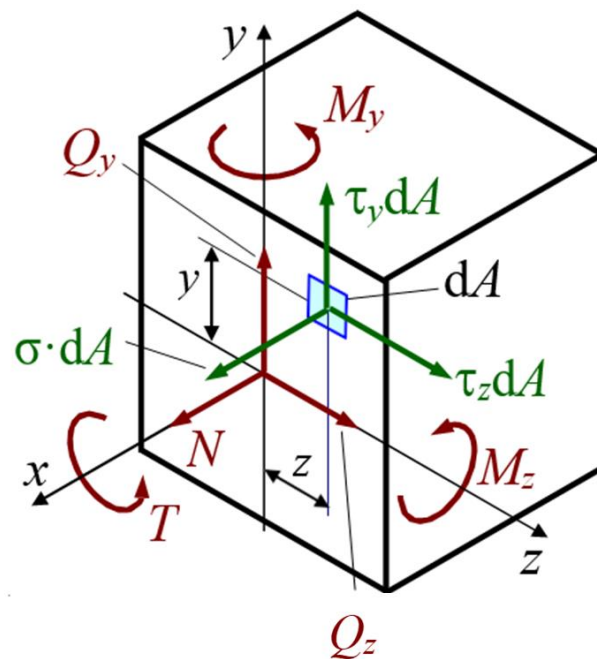


Напряжение нормальное σ – перпендикулярное к сечению, характеризует интенсивность сил отрыва или сжатия частиц элементов конструкции.

Напряжение касательное τ – действующее в плоскости сечения, характеризует интенсивность сил, сдвигающих эти части в плоскости сечения.

Напряжение полное p

$$p = \sqrt{\sigma^2 + \tau^2}$$



Связь напряжений с внутренними усилиями

Суммируя элементарные усилия $\sigma \cdot dA$, $\tau_y \cdot dA$, $\tau_z \cdot dA$, распределенные по сечению и их моменты относительно координатных осей, получим

$$N = \int \sigma \cdot dA; \quad T = \int (\tau_y z - \tau_z y) dA;$$

$$Q_y = \int \tau_y \cdot dA; \quad M_y = \int \sigma \cdot z \cdot dA;$$

$$Q_z = \int \tau_z \cdot dA; \quad M_z = \int \sigma \cdot y \cdot dA.$$

Единица измерения давления и механического напряжения - **ПАСКАЛЬ**

$$1 \text{ Па} = 1 \text{ Н/м}^2$$

$$1 \text{ МПа} = 0,102 \text{ кгс/мм}^2$$

$$1 \text{ МПа} = 10,2 \text{ кгс/см}^2$$

$$1 \text{ МПа} = 1 \text{ Н/мм}^2$$

$$1 \text{ кгс/мм}^2 = 9,81 \text{ МПа}$$

Перемещения и деформации

Реальные тела не являются абсолютно твердыми и под действием приложенных сил могут изменять свое положение в пространстве.

Перемещение – изменение положения в пространстве точки или поперечного сечения.

Деформация – изменение формы и размеров тела под действием приложенных сил.

Упругая деформация Δl_e - деформация, исчезающая после снятия нагрузки

Пластическая деформация Δl_p – деформация, остающаяся после снятия нагрузки

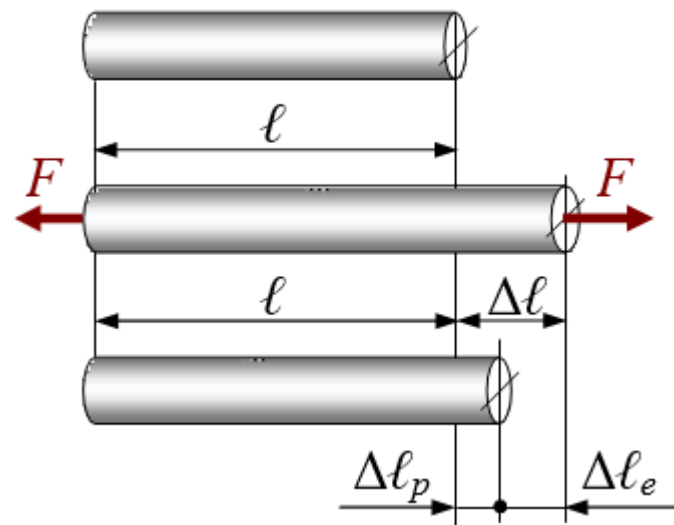
Деформация абсолютная (полная) – $\Delta l = \Delta l_e + \Delta l_p$

Деформация относительная $\varepsilon = \Delta l / l$

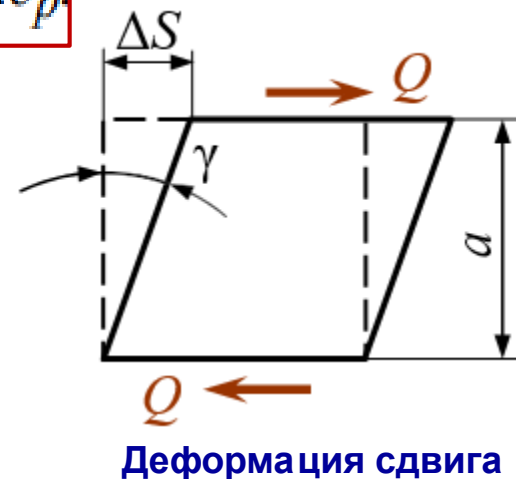
Угол сдвига - $\gamma \approx \text{tg } \gamma = \frac{\Delta S}{a}$

ΔS - абсолютный сдвиг

γ – относительный сдвиг, угловая деформация



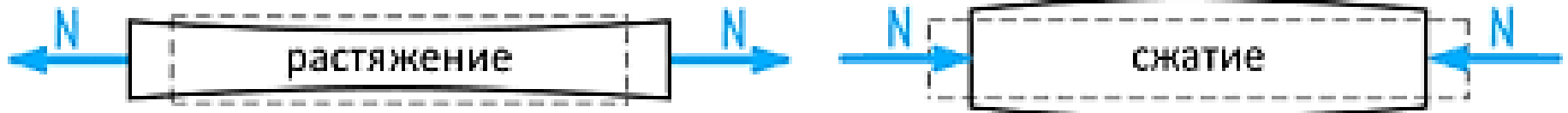
Составляющие деформации растяжения



Деформация сдвига

Виды деформаций

Растяжение (сжатие) – вид сопротивления (деформирования), при котором из шести внутренних усилий не равно нулю одно – **продольное усилие N** .



Стержень – брус, работающий на растяжение или сжатие.

Сдвиг – вид сопротивления (деформирования), характеризующийся взаимным смещением параллельных слоев материала под действием приложенных сил при неизменном расстоянии между слоями. Внутреннее усилие одно – **поперечная сила Q** .



Кручение – вид сопротивления (деформирования), при котором из шести внутренних усилий не равно нулю одно – **крутящий момент T** . Кручение возникает при действии на брус внешних сил, образующих момент относительно его продольной оси.



Вал – брус, работающий на кручение.

Вал – вращающаяся (обычно в подшипниках) деталь машины, передающая крутящий момент.

Изгиб – вид сопротивления (деформирования), при котором происходит искривление оси прямого бруса, или изменение кривизны кривого бруса.

