

## ЛЕКЦИЯ 9

1. Поведение кристаллической решетки при внешнем воздействии
2. Виды деформаций тел
3. Механические свойства твердых тел
4. Закон Гука
5. Диаграмма растяжения
6. Пластичность и хрупкость
7. Тепловое расширение твердых тел и жидкости

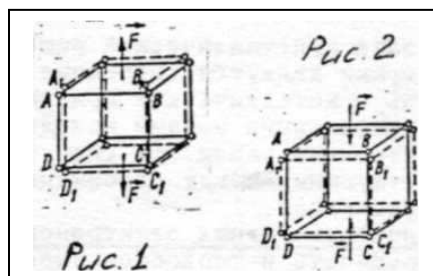
### 1. Поведение кристаллической решетки при внешнем воздействии.

Каждая частица в кристалле (молекула, атом или ион) находится в определенном положении равновесия, в котором силы отталкивания и притяжения, действующие на нее со стороны других частиц, составляющих кристалл, равны.

Но если какая-то внешняя сила (или другое внешнее воздействие типа нагревания или охлаждения) сдвинет частицу немного в сторону от ее положения равновесия, то сразу же какая-либо из этих сил превысит остальные.

Если, например, тело растягивать, то расстояния между частицами кристалла увеличиваются; при этом силы притяжения начинают превышать силы отталкивания и стремятся вернуть частицы в прежнее положение равновесия (рис.1).

Наоборот, если тело сжимать и тем самым сближать атомы или молекулы кристалла, то начнут преобладать силы отталкивания, стремящиеся вернуть частицы в первоначальное положение равновесия (рис.2).



Наблюдать и непосредственно измерять силы, действующие на отдельные молекулы, атомы или ионы, нельзя.

Но если внешние силы смещают конечную часть тела, изменяя его форму и размеры (т.е. вызывая деформацию тела), то и противодействующие им внутренние силы (известные как силы упругости) будут действовать на ту же часть тела, стремясь ликвидировать вызванное внешними силами изменение его формы или размеров.

При расчете конструкций машин, станков, различных сооружений, при обработке различных материалов важно знать, как будет деформироваться та или иная деталь под действием сил, при каких условиях ее деформация не будет влиять на работу машины в целом, при каких нагрузках наступит разрушение детали и т.д.

Изучением этих важных для техники вопросов занимаются многие технические науки: сопротивление материалов, детали машин и механизмов, материаловедение и т.д.

Мы рассмотрим лишь некоторые основы учения о деформациях тел.

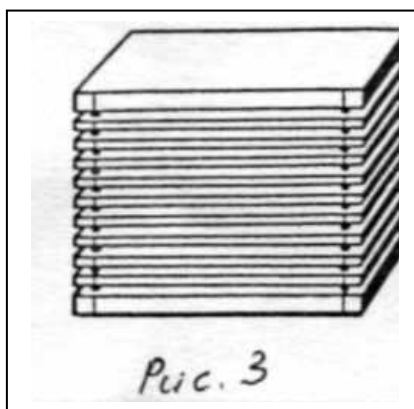
## 2. Виды деформаций.

Недеформируемых тел в природе не существует. В то же время часто приходится иметь дело со столь малыми деформациями, что их трудно обнаружить.

Например, если наступить на кирпич, то его высота уменьшится примерно на  $1/20000$  см. При такой деформации соседние атомы сближаются примерно на  $2 \cdot 10^{-14}$  см!

Среди деформаций, возникающих в твердых телах, можно выделить пять ОСНОВНЫХ видов: растяжение, сжатие, сдвиг, кручение и изгиб.

Для демонстрации этих видов деформаций можно воспользоваться моделью, состоящей из нескольких деревянных пластин, скрепленных пружинами (рис.3). Каждая пластина изображает слой атомов (молекул) в кристаллической решетке, пружины моделируют действие сил связи.



### а. растяжение (сжатие)

При деформации сжатия (рис.4) и растяжения (рис.5) пластины остаются параллельными друг к другу и расстояния между каждой парой соседних пластин изменяется на одну и ту же величину.

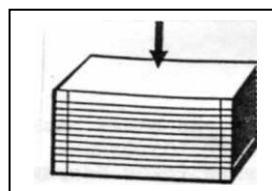


рис.4

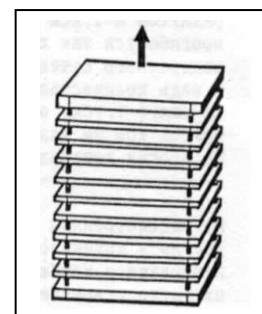


Рис.5

Такого вида деформацию испытывают тросы, канаты, цепи в подъемных устройствах, стяжки между вагонами, струны музыкальных инструментов. Сжатию подвергаются колонны, стены и фундаменты зданий.

### б. деформация сдвига.

Деформацию сдвига можно получить, смещая верхнюю пластину параллельно самой себе и удерживая нижнюю неподвижной. При этом все пластины сместятся так, что расстояния между ними останутся неизменными. (рис.6). При деформации сдвига не происходит изменение объема тела.

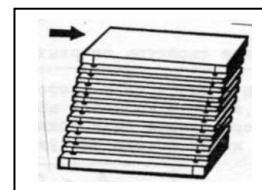


Рис.6

Деформацию сдвига испытывают заклепки и болты, соединяющие металлические конструкции. Сдвиг на большие углы может привести к разрушению тела - срезу. Срез происходит при работе ножниц, зубила, зубьев пилы.

#### *в. деформация кручения.*

Деформацию кручения можно наблюдать при повороте верхней пластины модели вокруг вертикальной оси (рис.7). При этом расстояния между пластинами не меняются, но точки пластин, ранее лежавшие на одной прямой, смещаются в сторону друг от друга.

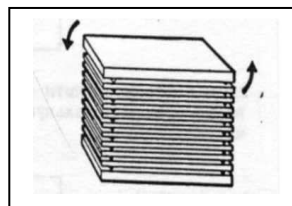


Рис.7

Деформации кручения возникают при завинчивании гаек, при работе валов машин, при сверлении и т.п.

#### *г. деформация изгиба.*

Деформацию изгиба можно наблюдать, закрепив один конец балки, а к другому подвесив груз (рис.8). Или изгиб можно смоделировать с помощью стержня, один конец которого закреплен, а на другой действует сила (рис.8), или с помощью стержня, оба конца которого закреплены, а нагрузка приложена к его середине (рис.9). При изгибе выпуклые части тел всегда растягиваются, а вогнутые - сжимаются, т.е. деформация изгиба сводится к деформациям растяжения и сжатия, причем средние слои стержня практически не деформируются.

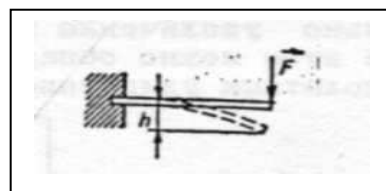


рис.8

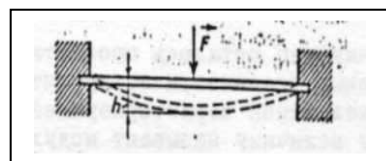


рис.9

Таким образом, наличие среднего (нейтрального) слоя практически не влияет на сопротивляемость тела изгибу и его можно выбросить и таким образом уменьшить массу тела.

Замена сплошных стержней и брусков трубами и балками, у которых частично удален средний слой, дает экономию материала и значительно снижает массу конструкций без ухудшения их механических свойств. В результате длительной эволюции кости животных, птиц и человека приобрели трубчатое строение. Такое же строение имеют также и стебли некоторых растений (бамбук, тростник и др.).

Прогиб балки зависит от формы сечения балки. Однако "чемпионом" станет балка в виде трубы. Например, трубка с внешним радиусом  $H=1,2$  см и внутренним  $h=0,75$  см прогибается так же, как сплошной брусок квадратного сечения со стороной  $a=2$  см. А ведь количество материала, пошедшее на такую трубку в 1,5 раза меньше, чем на брусок той же длины.

На многих деталях машин, например, кузовов автомобиля, делают ребра жесткости.

Из рассмотренных деформаций основными являются растяжение и сдвиг, а две другие - кручение и изгиб - сводятся к ним. В большинстве случаев на практике наблюдаются комбинации этих простейших видов деформаций и разделение их чисто условное.

### 3. Механические свойства твердых тел. Закон Гука.

При действии внешней силы (деформирующей силы) тело удлиняется на величину  $\Delta l$ , которую называют *абсолютным удлинением*.

Изменяя деформирующую силу можно обнаружить прямо пропорциональную зависимость между абсолютным удлинением и деформирующей силой:

$$\Delta l \sim F$$

Если повторить опыты с упругими телами разной длины, то можно обнаружить прямо пропорциональную зависимость между абсолютным удлинением и первоначальной длиной:

$$\Delta l \sim l$$

Теперь можно взять тела такой же длины, но сложенными вдвое, втрое, что равносильно увеличению площади поперечного сечения в 2 или 3 раза. При этом можно обнаружить обратно пропорциональную зависимость между абсолютным удлинением и площадью поперечного сечения:

$$\Delta l \sim \frac{1}{S}$$

И наконец, осталось провести опыты с телами из разного материала при прочих равных условиях, и обнаружить зависимость между абсолютным удлинением и величиной характеризующей упругие свойства материала. Эту величину называют *модулем Юнга (E)*.

$$\Delta l \sim \frac{1}{E}$$

Объединив результаты проделанных опытов, можно записать:

$$\Delta l \sim \frac{Fl}{SE}$$

Для перехода от знака пропорциональности к знаку равенства надо ввести коэффициент пропорциональности. Однако, если для измерения всех величин, входящих в формулу, мы будем применять единицы одной и той же системы, то этот коэффициент будет равен единицы и можно тогда записать:

$$\Delta l = \frac{Fl}{SE}$$

Эта зависимость была установлена в 1660г. английским физиком Р. Гуком и носит название *закона Гука*.

Деформации, подчиняющиеся закону Гука, называются *упругими*.

Характерным признаком упругих деформаций является то, что после снятия нагрузки тело через некоторое время восстанавливает свою первоначальную форму и размеры.

Такого типа деформации испытывают *резиновые шнуры, пружины, стальные шарикоподшипники*.

Деформации, которые не исчезают после прекращения действия внешних сил, называются *пластическими*. Пластическую деформацию испытывают пластилин, глина, воск, свинец.

Сущность упругих и неупругих деформаций твердого тела объяснить следующим образом. В случае упругой деформации происходит незначительное изменение формы

элементарных ячеек кристалла (рис.10). При этом изменение расстояний между узлами таково, что оно не приводит к нарушению равновесия сил взаимодействия частиц в кристалле. Каждая частица решетки остается в окружении прежних своих "соседей". Изменение расстояний

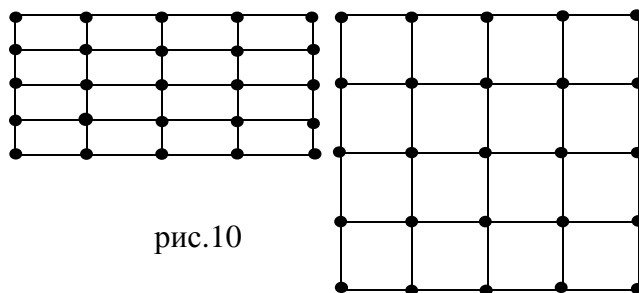


рис.10

между частицами приводит к возникновению сил упругости, восстанавливающей первоначальную форму и размеры тела после снятия нагрузки.

При неупругой деформации происходит значительное искажение элементарных ячеек, одни ячейки скользят относительно других. Нарушается связь между частицами.

Так как величины  $l$ ,  $S$ , и  $E$  для данного тела постоянны, то и дробь  $\frac{l}{ES}$  тоже постоянна

Обозначив ее через  $\frac{1}{k}$ , тогда получим

$$\Delta l = \frac{1}{k} E$$

т.е. абсолютное удлинение стержня при упругих деформациях прямо пропорционально деформирующей силе.

*Модуль Юнга характеризует сопротивляемость материала упругой деформации растяжения или сжатия. Для большинства материалов модуль Юнга определен экспериментально. Чем больше модуль Юнга, тем меньше деформируется стержень при прочих равных условиях.*

Перепишем последнее уравнение в следующем виде:

$$\frac{F}{S} = \frac{\Delta l / E}{l}$$

В левой части мы видим отношение модуля силы упругости  $F$  к площади поперечного сечения  $S$  тела. Эта величина получила название – механическое напряжение, которая характеризует состояние деформированного тела.

$$\frac{F}{S} = \sigma$$

В правой части – обозначим отношение  $\frac{\Delta l}{l} = \varepsilon$  и назовем *относительным удлинением*.

В результате получим следующее:

$$\sigma = \varepsilon / E$$

Эта другая запись закона Гука, которая читается так:

*При малых деформациях механическое напряжение прямо пропорционально относительному удлинению.*

Относительное удлинение в формуле взято по модулю, так как закон Гука справедлив как для деформации растяжения, так и для деформации сжатия.

#### 4. Диаграмма растяжения.

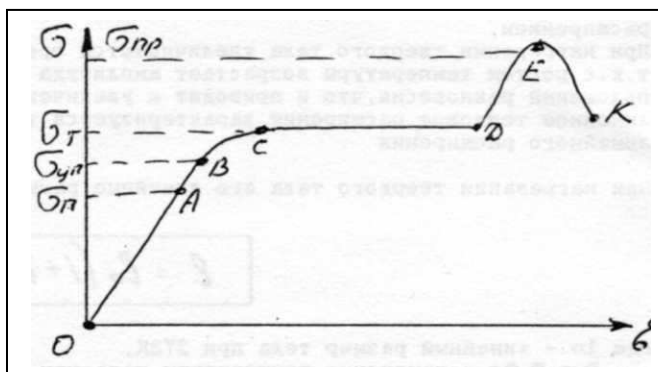
Зависимость относительного удлинения образца от приложенного к нему напряжения является одной из важнейших характеристик механических свойств твердых тел.

Графическое изображение этой зависимости называется диаграммой растяжения.

При небольших напряжениях относительное удлинение прямо пропорционально напряжению, а после снятия нагрузки размеры тела полностью восстанавливаются.

Такая деформация и называется *упругой*. Именно для этого участка и справедлив закон Гука.

Максимальное напряжение  $\sigma_{п}$ , при котором деформация еще остается упругой, называется *пределом пропорциональности (т.А)*.



Если еще увеличивать нагрузку, то деформация становится нелинейной, напряжение перестает быть прямо пропорциональным относительному удлинению. Тем не менее при небольших нелинейных деформациях после снятия нагрузки форма и размеры тела практически восстанавливаются (*участок АВ*). Максимальное напряжение, при котором еще не возникают заметные остаточные деформации, называют пределом упругости  $\sigma_{уп}$ . Предел упругости превышает предел пропорциональности лишь на сотые доли процента.

При напряжениях, превышающих предел упругости  $\sigma_{уп}$ , образец после снятия нагрузки не восстанавливает свою форму или первоначальные размеры.

Такие деформации называют *остаточными или пластическими (участок ВС)*. На этом участке деформация происходит не пропорционально увеличению напряжения.

На горизонтальном *участке СД* материал "течет"-деформация возрастает при неизменном напряжении. Напряжение, при котором материал "течет", называют пределом текучести  $\sigma_{т}$ .

Если снять напряжение с тела, то его размеры не будут равны первоначальным. Разгрузка изображается пунктирной кривой.

Материалы, у которых область текучести *СД* значительна, могут без разрушения выдерживать большие деформации. Такие материалы называют *пластичными*. Пластичны пластилин, медь, золото.

Если же область текучести почти отсутствует, то материал без разрушения может выдерживать лишь небольшие деформации. Такие материалы называют *хрупкими*. Например, стекло, кирпич, бетон, чугун.

Далее с увеличением деформации кривая напряжений возрастает и достигает точки *Е*. Затем напряжение быстро падает и образец разрушается в точке *К*. Разрыв происходит после того, как напряжение достигает максимального значения  $\sigma_{пр}$ , называемого *пределом прочности*.

Для того чтобы машины, различные сооружения, здания, мосты были надежными, при их проектировании необходимо учитывать необходимый запас прочности. Очевидно, что все эти сооружения должны работать в области упругих деформаций.

## 5. Тепловое расширение твердых тел и жидкости.

При повышении температуры линейные размеры твердых тел увеличиваются, а при понижении - уменьшаются.

Увеличение линейных размеров тела и его объема называется *тепловым расширением*.

При нагревании твердого тела увеличиваются средние расстояния между атомами, т.к. с ростом температуры возрастает амплитуда колебаний атомов около положений равновесия, что и приводит к увеличению размеров тел.

Линейное тепловое расширение характеризуется *температурным коэффициентом линейного расширения*.

При нагревании твердого тела его линейные размеры  $l$  изменяются по закону.

$$l = l_0(1 + \alpha\Delta T)$$

где  $l_0$  – линейный размер тела при 273 К,

$\Delta T = T - T_0$  – изменение температуры тела при его нагревании от  $T_0=273\text{К}$  до  $T$ ,

$\alpha$  - коэффициент линейного расширения, К.

При нагревании твердого тела его объем  $V$  изменяется по закону

$$V = V_0(1 + \beta\Delta T)$$

где  $V_0$  - объем тела при 273 К,

$\beta$  - коэффициент объемного расширения, К

Между  $\alpha$  и  $\beta$  существует соотношение

$$\beta = 3\alpha \text{ ( т. к. } V = l^3 \text{ )}$$

При нагревании жидкости возрастает средняя кинетическая энергия хаотического движения ее молекул. Это приводит к увеличению расстояния между молекулами, а следовательно, и к увеличению объема.

Тепловое расширение жидкостей, как и твердых тел, характеризуется температурным коэффициентом объемного расширения. Объем жидкости при нагревании определяется по формуле

$$V = V_0(1 + \beta\Delta T)$$

Жидкости расширяются при нагревании больше, чем твердые тела. Одна из жидкостей – **вода** - представляет исключение. Оказывается, что вода в интервале температур от 0 до 4<sup>0</sup>С при нагревании сжимается, а при охлаждении расширяется. Вода имеет наибольшую плотность при 4<sup>0</sup>С. Это объясняется особенностями строения кристаллической решетки льда.

Как при нагревании, так и при охлаждении воды, взятой при 4<sup>0</sup>С, ее объем возрастает, а плотность уменьшается. Этой особенностью теплового расширения воды объясняется тот факт, что водоемы зимой не промерзают до дна. При охлаждении, пока температура поверхностного слоя не достигнет 4<sup>0</sup>С, плотность теплой воды ниже холодной, поэтому теплая вода поднимается вверх, а холодная опускается вниз.

В интервале температур от 0<sup>0</sup>С до 4<sup>0</sup>С значения плотностей меняются: теперь теплая вода опускается вниз, а холодная поднимается вверх. Поэтому температура воды на дне глубоких водоемов постоянна и равна 4<sup>0</sup>С.