



**ПОЛИТЕХ**

Санкт-Петербургский  
Политехнический Университет  
Петра Великого

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ПЕТРА ВЕЛИКОГО



## СТРУКТУРА и СВОЙСТВА ЗАГОТОВОК и ДЕТАЛЕЙ

доцент  
Теплухин  
Василий Гельевич

[ledebur1147@yandex.ru](mailto:ledebur1147@yandex.ru)

*Высшая школа  
машиностроения*

# Лекция 3. Деформация и разрушение металлов. Механические свойства.

## Физическая природа деформации

*Деформацией* называется изменение формы и размеров тела под действием напряжений.

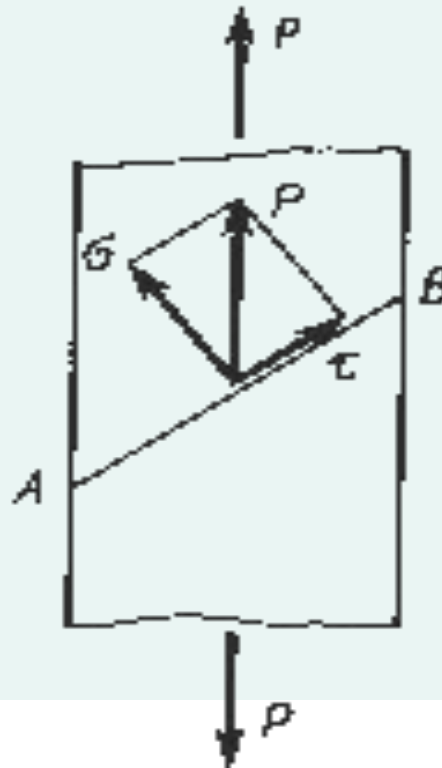
*Напряжение* – сила, действующая на единицу площади сечения детали.

Напряжения и вызываемые ими деформации могут возникать при действии на тело **внешних сил** растяжения, сжатия и т.д., а также в результате **фазовых** (структурных) **превращений**, усадки и **других физико-химических процессов**, протекающих в металлах, и связанных с изменением объема.

# Нормальные и касательные напряжения

Металл, находящийся в напряженном состоянии, при любом виде нагружения всегда испытывает напряжения нормальные и касательные

Схема возникновения нормальных и касательных напряжений в металле при его нагружении



# Упругая деформация

Деформация металла под действием напряжений может быть упругой и пластической.

*Упругой* называется деформация, полностью исчезающая после снятия вызывающих ее напряжений.

При упругом деформировании изменяются расстояния между атомами металла в кристаллической решетке. Снятие нагрузки устраняет причину, вызвавшую изменение межатомного расстояния, атомы становятся на прежние места, и деформация исчезает.

Упругая деформация на диаграмме деформации характеризуется линией

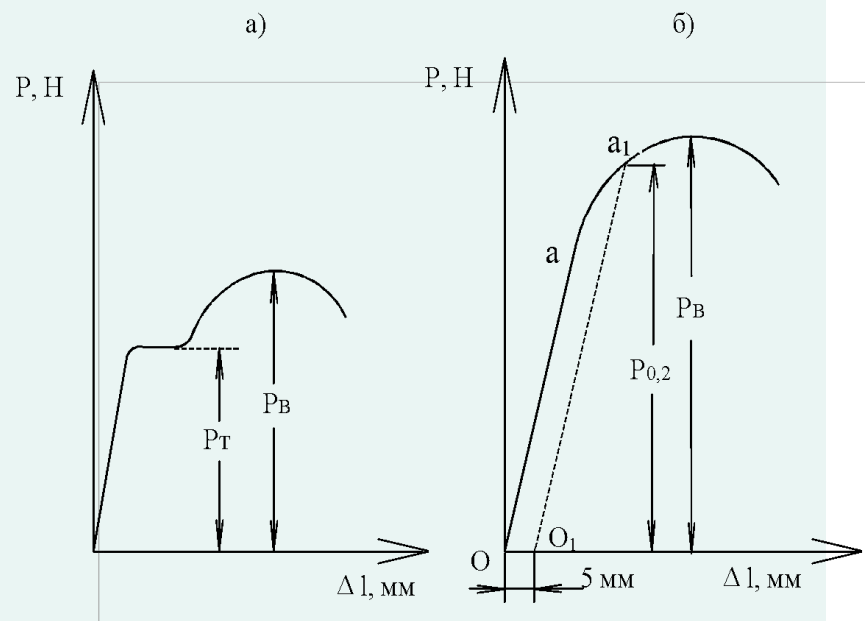


Диаграмма деформации металла от действующих напряжений (нагрузки).  
растяжения

зависимости от напряжений  
Диаграмма

## Модуль упругости

Зависимость между упругими напряжениями и деформацией описывается законом Гука:

$P = k\Delta l$ , где  $k$ -коэффициент упругости (жесткости)

$$k = \frac{ES}{L}$$

площадь сечения  $L$  – длина

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{L}$$

- относительное удлинение

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

напряжение в поперечном сечении  $S$

$$\sigma = E\varepsilon$$

закон Гука в относительных величинах

Модуль упругости является важнейшей характеристикой упругих свойств металла. По физической природе величина модуля упругости рассматривается как мера прочности связей между атомами в твердом теле.

Эта механическая характеристика структурно нечувствительна, т. е. термическая обработка или другие способы изменения структуры не изменяют модуля упругости, а повышение температуры, изменяющее межатомные расстояния, снижает модуль упругости

# Упругая деформация и хрупкое разрушение

Если нормальные напряжения достигают значения, достаточного для преодоления сил межатомных связей, то наблюдается хрупкое разрушение путем отрыва

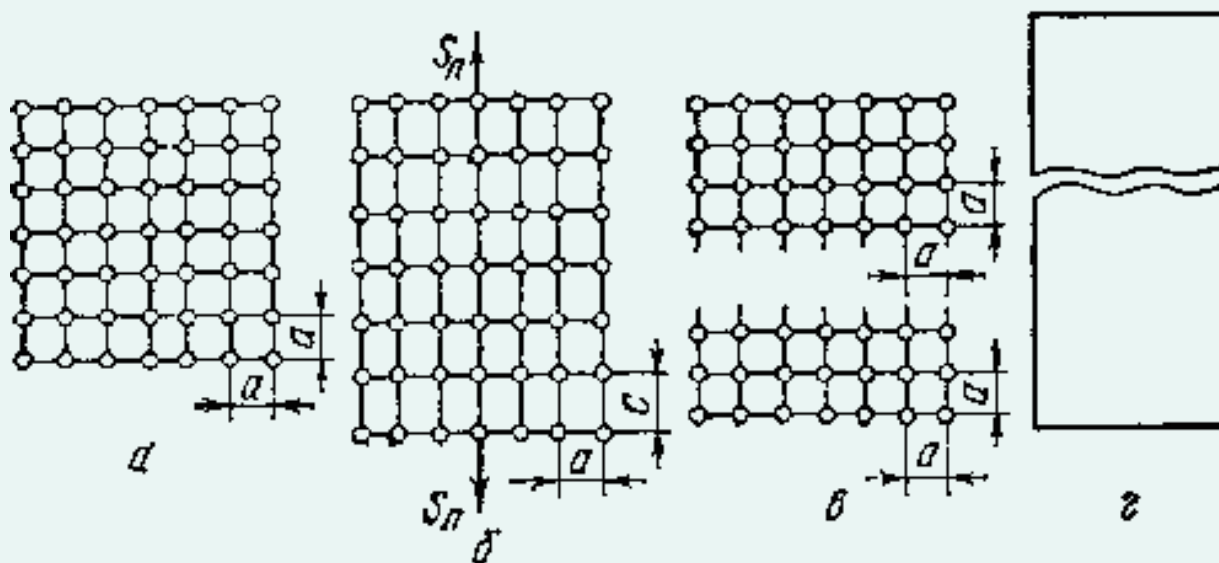


Схема упругой деформации и хрупкого разрушения под действием упругих напряжений *а* – ненапряженная решетка металла; *б* – упругая деформация; *в*, *г* – хрупкое разрушение в результате отрыва

# Пластическая деформация

*Пластической* называется остаточная деформация после прекращения действия вызвавших ее напряжений.

При пластическом деформировании одна часть кристалла перемещается по отношению к другой под действием касательных напряжений. При снятии нагрузок сдвиг остается, т.е. происходит пластическая деформация. В результате развития пластической деформации может произойти вязкое разрушение путем сдвига.

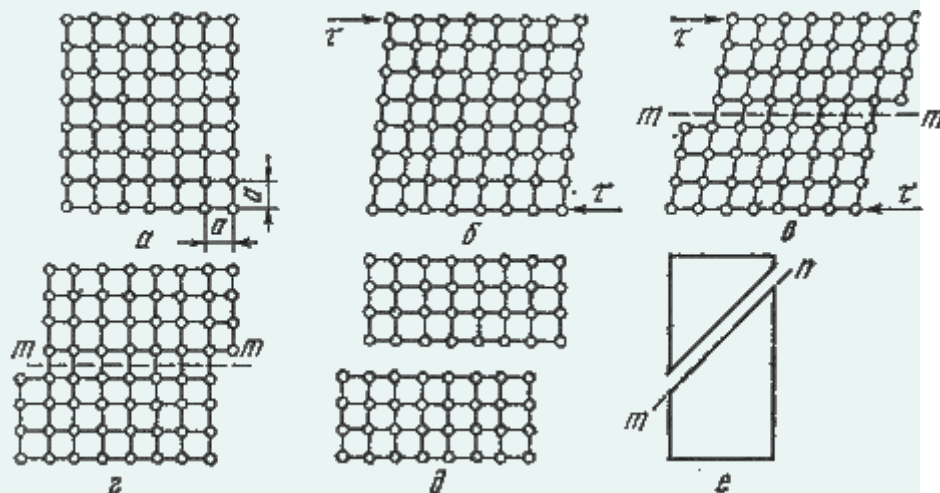


Схема пластической деформации и вязкого разрушения под действием касательных напряжений: *a* – ненапряженная решетка; *b* – упругая деформация; *c* – упругая и пластическая деформация; *d* – пластическая деформация; *e* – пластическое (вязкое) разрушение.

# Способы пластической деформации монокристаллов

Металлы и сплавы в твердом состоянии имеют кристаллическое строение, и характер их деформации зависит от типа кристаллической структуры и от наличия несовершенств в этой структуре.

Рассмотрим пластическую деформацию **в монокристалле**.

Пластическая деформация может протекать под действием касательных напряжений и может осуществляться двумя способами.

## Деформация скольжением



Одни слои атомов кристалла скользят по другим слоям, причем они перемещаются на дискретную величину, равную целому числу межатомных расстояний.

В промежутках между полосами скольжения деформация не происходит. Твердое тело не изменяет своего кристаллического строения во время пластической деформации и расположение атомов в элементарных ячейках сохраняется. Плоскостями скольжения являются кристаллографические плоскости с наиболее плотной упаковкой атомов.



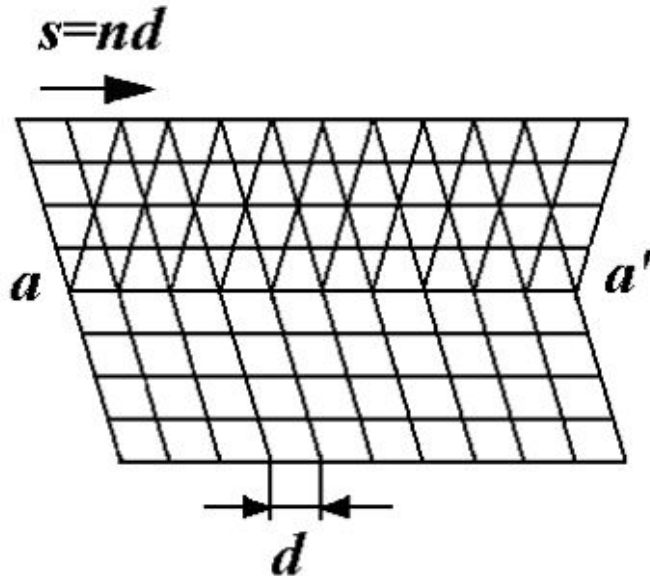
# Способы пластической деформации

## Монокристаллов

Двойникование – поворот одной части кристалла в положение симметричное другой его части. Плоскостью симметрии является плоскость двойникования. Двойникование чаще возникает при пластической деформации кристаллов с объемно-центрированной и гексагональной решеткой, причем с повышением скорости деформации и понижением температуры склонность к двойникованию возрастает.

Двойникование может возникать не только в результате действия внешних сил, но и в результате отжига (рекристаллизации) пластически деформированного тела.

## Деформация двойникованием

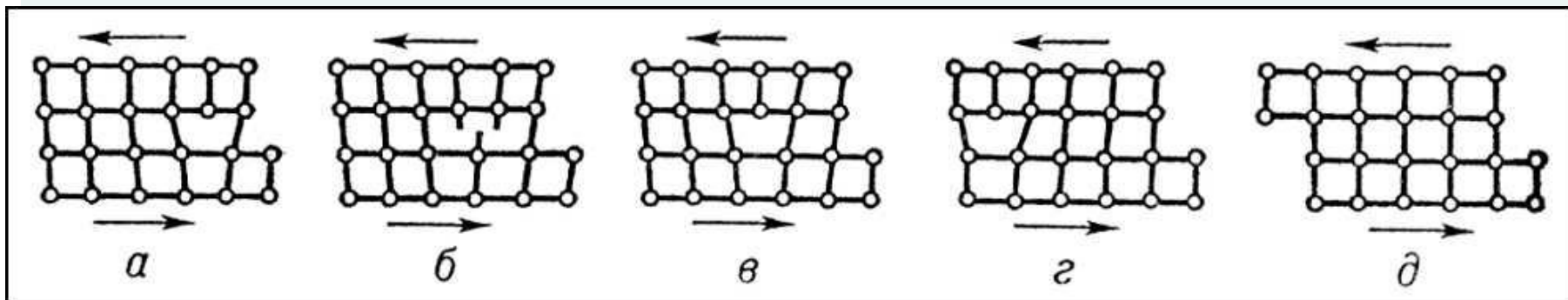


Сдвиг кристаллической решетки, деформированной двойникованием:  $a-a'$  – плоскость двойникования;  $d$  – параметр решётки;  $s$  – макросдвиг при двойниковании;  $n$  – не целое число

Двойникование требует больших напряжений, чем скольжение и происходит, когда скольжение не реализуется.

Выделение энергии сопровождается потрескиванием (напр., олово)

# Дислокационный механизм пластической деформации



Перемещение дислокации в плоскости скольжения сопровождается разрывом и пересоединением межатомных связей. В кристалле без дислокаций сдвиг в плоскости скольжения требует одновременного разрыва всех межатомных связей.

В результате перемещения дислокация выходит на поверхность кристалла и исчезает. На поверхности остается ступенька скольжения.

## □ Причины торможения дислокаций:

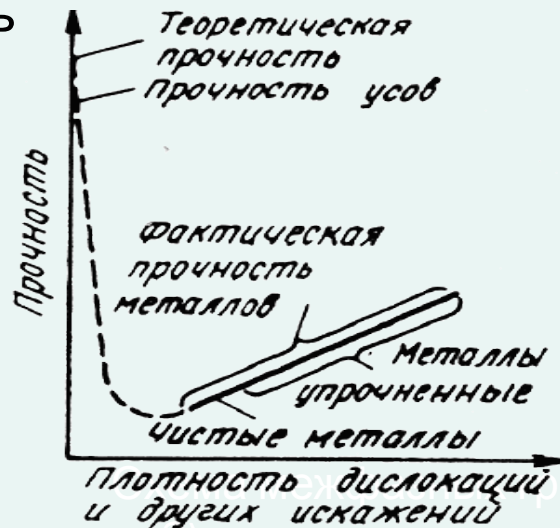
❖ высокая плотность дефектов кристаллической решетки:

- дислокаций;
- границ кристаллов;
- межфазных границ;
- других дефектов

❖ внутренние напряжения, вызванные

- образованием твердых растворов внедрения и замещения;
- разницей параметров решетки

когерентных фаз



а) когерентные; б) полукogerентные; в) некогерентные

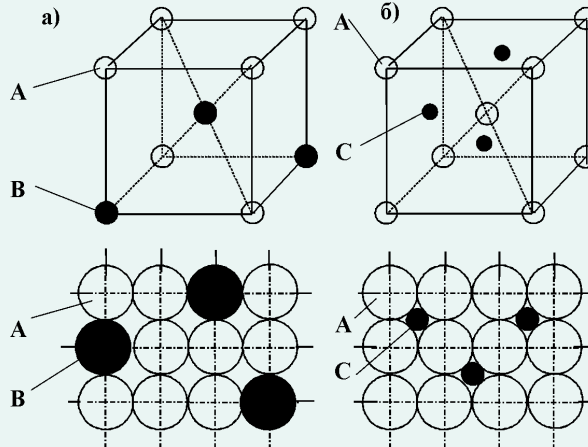
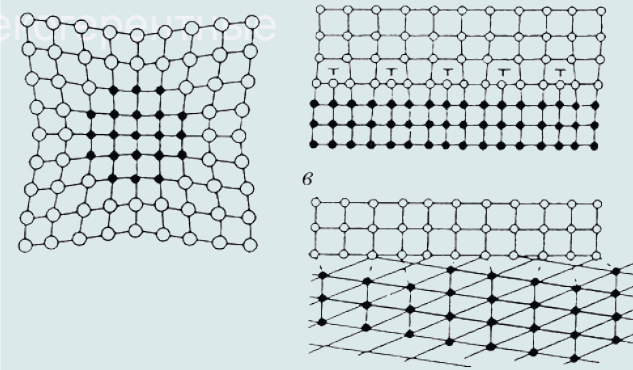


Схема межфазных границ:  
а) когерентные; б) полукogerентные; в) некогерентные



Твёрдые растворы: замещения (а) и внедрения (б)

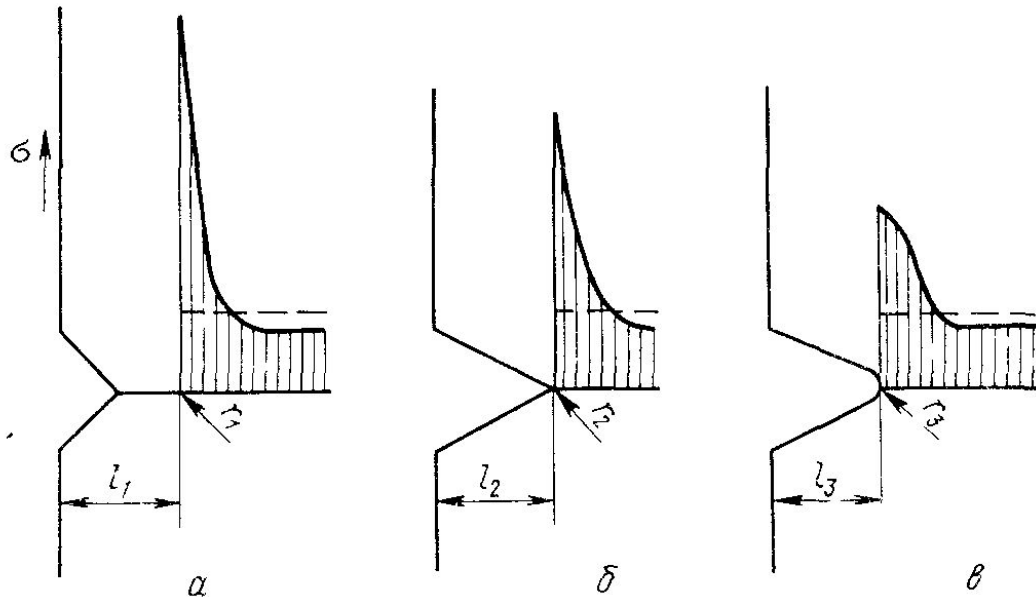
# Хрупкое и вязкое разрушение

Замечательные механические свойства металлов обусловлены тем, что за счет особенностей их строения, напряжение, вызывающее сдвиг одной части кристалла относительно другой, т.е. пластическую деформацию, достигается раньше, чем напряжение отрыва. За счет этого перемещения изменяется геометрия дефекта и концентрация напряжений уменьшается.

В случае хрупких (например, неметаллических) материалов пластической деформации не происходит, и при возникновении значительных локальных напряжений выше теоретического предела прочности наблюдается одновременный разрыв связей, то есть хрупкое разрушение.

В реальных металлах разрушение носит смешанный характер. Тем не менее разрушение делят на **хрупкое и вязкое в зависимости от степени пластической деформации, предшествовавшей разрушению.**

# Хрупкое и вязкое разрушение

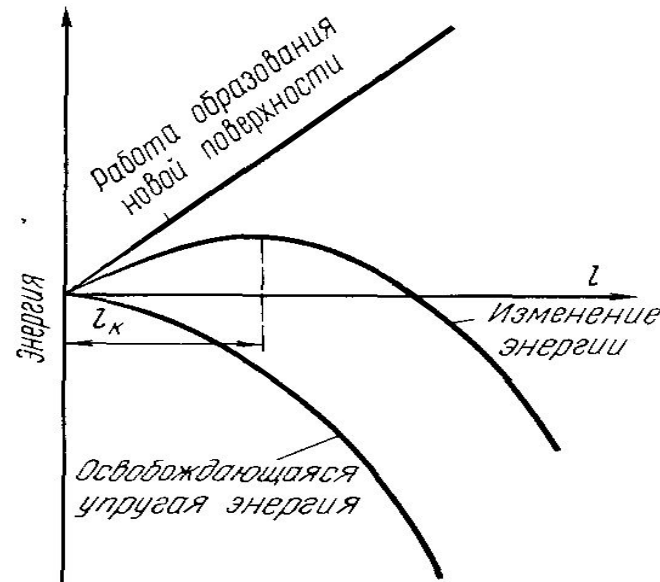


Концентрация напряжений  $K$  пропорциональна остроте дефекта и его длине:

$$K = 2\sqrt{l/r},$$

Где  $l$  – длина дефекта;  $r$  – радиус закругления в его вершине

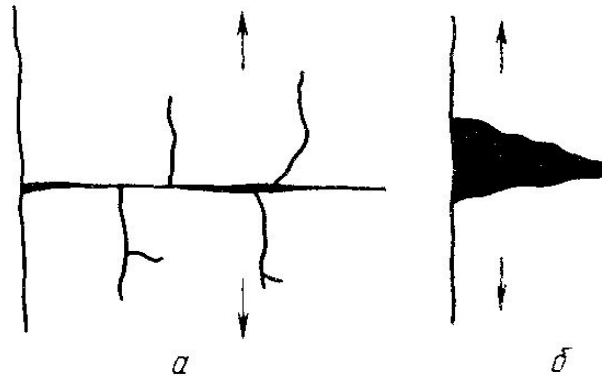
# Хрупкое и вязкое разрушение



## Изменение энергии при росте трещины

При росте трещины высвобождается накопленная упругая энергия. При определенном размере трещины эта энергия превышает работу образования новых поверхностей и трещина развивается самопроизвольно без дополнительного подвода энергии. Размер трещины, после которого выполняется это условие, и является критическим

# Хрупкое и вязкое разрушение



## хрупкая а) и вязкая б) трещины

Вязкое разрушение – путем среза под действием касательных напряжений. Ему всегда предшествует значительная пластическая деформация.

Трещина тупая раскрывающаяся. Величина пластической зоны впереди трещины велика. Малая скорость распространения трещины. Энергоемкость значительная, энергия расходуется на образование поверхностей раздела и на пластическую деформацию. Большая работа затрачивается на распространение трещины. Поверхность излома негладкая, рассеивает световые лучи, матовая (волокнистый) излом. Плоскость излома располагается под углом.

По излому можно определить характер разрушения.

# Механические свойства и способы их определения

В зависимости от условий нагружения механические свойства могут определяться при:

- статическом нагружении – нагрузка на образец возрастает медленно и плавно.
- динамическом нагружении – нагрузка возрастает с большой скоростью, имеет ударный характер.
- повторно, переменном или циклическим нагружении – нагрузка в процессе испытания многократно изменяется по величине или по величине и направлению.



# Механические свойства и способы их определения

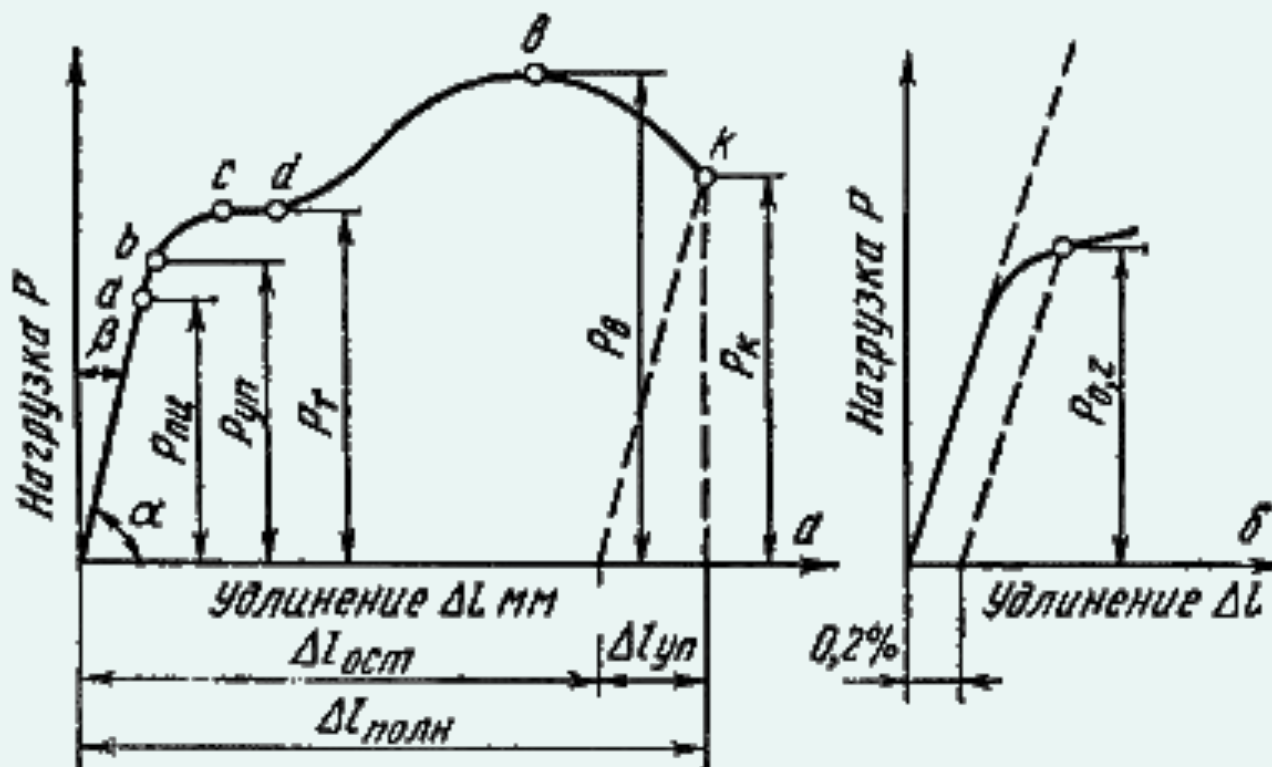


Диаграмма растяжения. Схема определения условного предела текучести

# Механические свойства и способы их определения

*Прочность* – способность материала сопротивляться деформациям и разрушению

*Предел пропорциональности* ( $\sigma_{пц}$ ) – максимальное напряжение, до которого сохраняется линейная зависимость между деформацией и напряжением.

$$\sigma_{пц} = P_{пц} / F_0,$$

где  $F_0$  – площадь поперечного сечения образца

*Условный предел упругости*, – максимальное напряжение, до которого образец получает только упругую деформацию. Считают напряжение, при котором остаточная деформация очень мала (0,005...0,05%).

В обозначении указывается значение остаточной деформации  $\sigma_{0,005}$ .

$$\sigma_{0,005} = P_{0,005} / F_0$$

## Механические свойства и способы их

**предела текучести** характеризует сопротивление материала небольшим пластическим деформациям.

*Физический предел текучести*  $\sigma_T$  – это напряжение, при котором происходит увеличение деформации при постоянной нагрузке (наличие горизонтальной площадки на диаграмме растяжения). Используется для очень пластичных материалов

$$\sigma_T = P_T / F_0$$

*Условный предел текучести*  $\sigma_{0,2}$  – это напряжение вызывающее остаточную деформацию 0,2%

$$\sigma_{0,2} = P_{0,2} / F_0$$

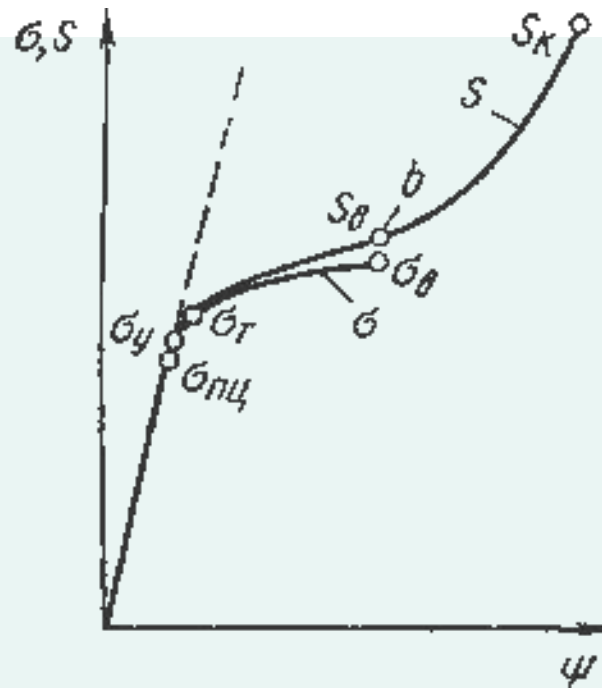
Равномерная по всему объему пластическая деформация продолжается до значения предела прочности.

В точке в, в наиболее слабом месте начинает образовываться шейка – сильное местное утонение образца.

*Предел прочности*  $\sigma_B$  – напряжение, соответствующее максимальной нагрузке, которую выдерживает образец до разрушения (временное сопротивление разрыву)

$$\sigma_B = P_B / F_0$$

# Истинное сопротивление разрушению



*Истинное сопротивление разрушению* – это максимальное напряжение, которое выдерживает материал в момент, предшествующий разрушению образца .

Истинное сопротивление разрушению значительно больше предела прочности, так как оно определяется относительно конечной площади поперечного сечения образца.

# Механические свойства и способы их определения

*Пластичность* — способность материала к пластической деформации, т.е. способность получать остаточное изменение формы и размеров без нарушения сплошности.

*относительное удлинение.*  $\delta = (l - l_0) / l_0 \times 100, \%$

$l$  и  $l_0$  – начальная и конечная длина образца.

$\delta$  – абсолютное удлинение образца, определяется измерением образца после разрыва.

$\phi$  относительное сужение

$\phi = (F_0 - F) / F_0 \times 100, \%$

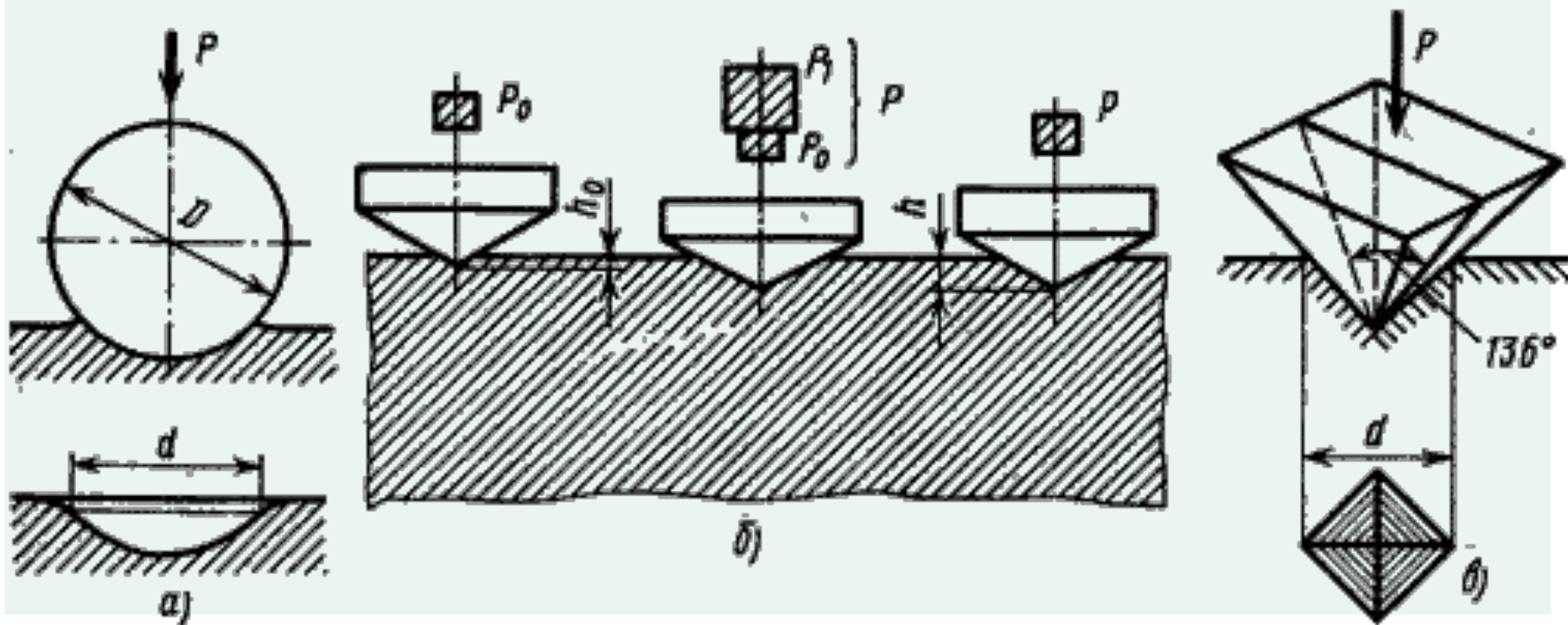
$F_0$  - начальная площадь поперечного сечения

$F$  - площадь поперечного сечения в шейке после разрыва.

Относительное сужение более точно характеризует пластичность и служит технологической характеристикой, например, при листовой штамповке.

# Механические свойства и способы их определения

*Твердость* – это сопротивление материала проникновению в его поверхность стандартного тела (индентора), не деформирующегося при испытании.



# Механические свойства и способы их определения

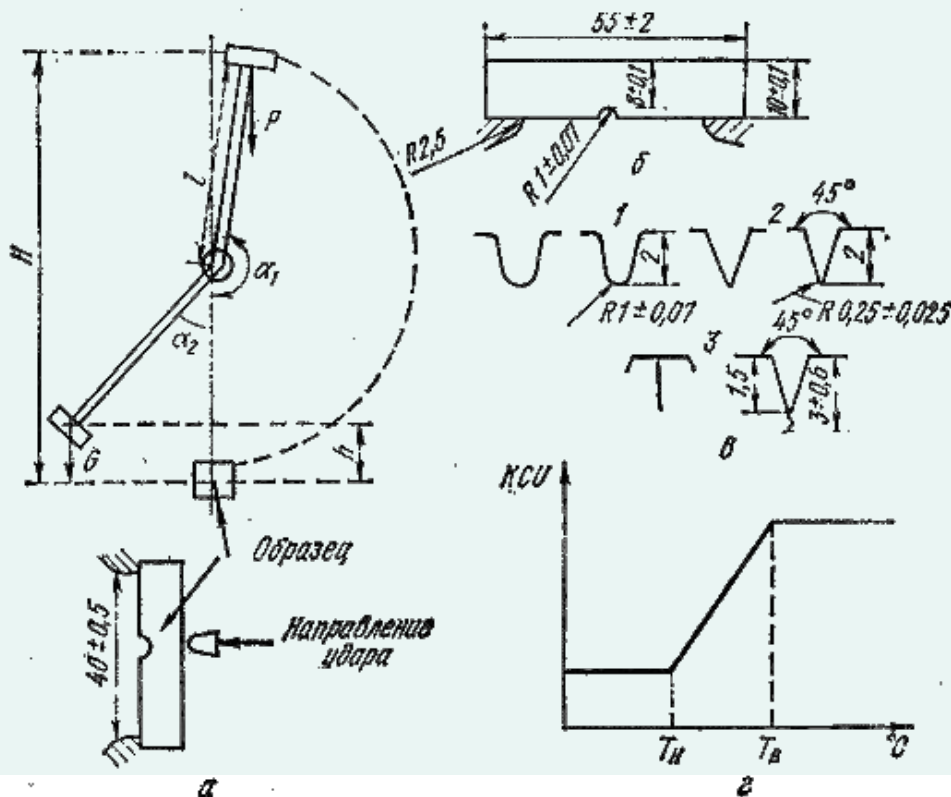
Ударная вязкость характеризует надежность материала, его способность сопротивляться хрупкому разрушению

В первоначальном положении маятник имеет потенциальную энергию  $A_0$ ; при свободном падении маятника часть его энергии расходуется на разрушение образца. С учётом этого на разрушение образца он имеет запасённую энергию  $A_{\text{зап.}}$ . Оставшуюся (неизрасходованную часть энергии)  $A_{\text{ост.}}$  определяют по вылету маятника после разрушения образца, по шкале угломера, протарированного в килограммометрах.

Работа, затраченная на разрушение образца, находится как разность:

$A = A_{\text{зап.}} - A_{\text{ост.}}$ , а величина ударной вязкости (Дж/см<sup>2</sup>):

$$KCU = A/F_0$$



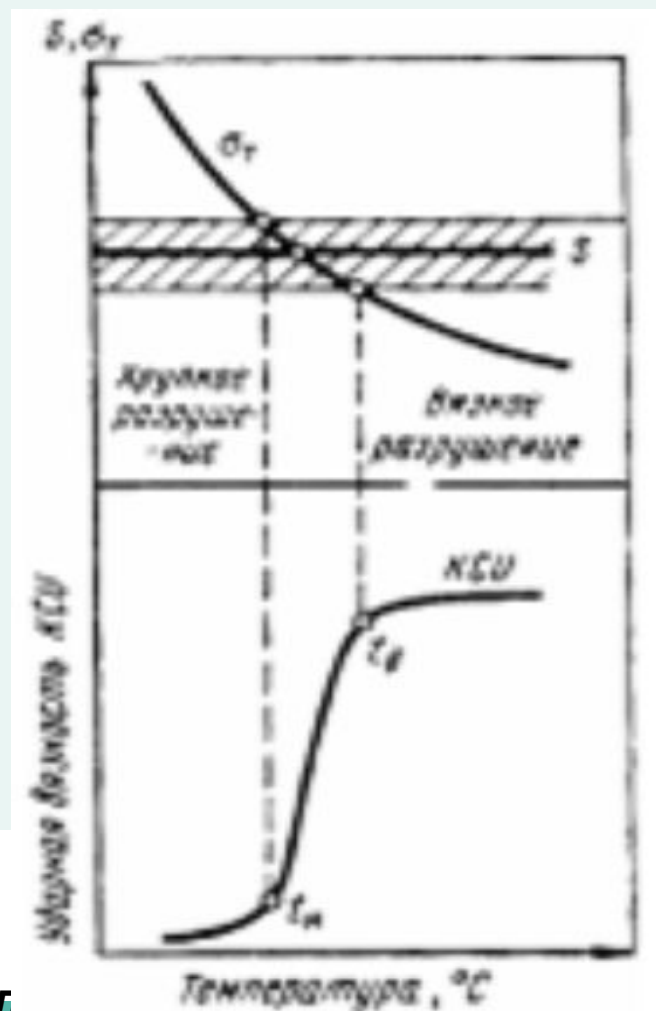
## Хладноломкость

*Хладоломкостью* называется склонность металла к переходу в хрупкое состояние с понижением температуры.

Предел текучести  $\sigma_T$  существенно изменяется с изменением температуры, а сопротивление отрыву  $\sigma_{от}$  не зависит от температуры. При температуре выше  $T_v$  предел текучести меньше сопротивления отрыву. При нагружении сначала имеет место пластическое деформирование, а потом – разрушение. Металл находится в вязком состоянии.

При температуре ниже  $T_n$  сопротивление отрыву меньше предела текучести. В этом случае металл разрушается без предварительной деформации, то есть находится в хрупком состоянии. Переход из вязкого состояния в хрупкое осуществляется в интервале температур

Хладоломкими являются железо, вольфрам, цинк и другие металлы, имеющие объемноцентрированную кубическую и гексагональную плотноупакованную кристаллическую решетку.







**СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!**

