

# Механические свойства

## Оценка свойств конструкционных материалов

**Механические свойства** определяют способность металлов сопротивляться воздействию внешних сил.

По характеру действия на металл различают три вида нагрузок:

***статические*** – действующие постоянно или медленно возрастающие:

***динамические*** – действующие мгновенно, принимающие характер удара:

***циклические или знакопеременные***, изменяющиеся или по величине, или по направлению, или одновременно и по величине, и по направлению.

Любая деталь механизма или конструкции, работающая под нагрузкой испытывает деформацию той или иной величины и знака.

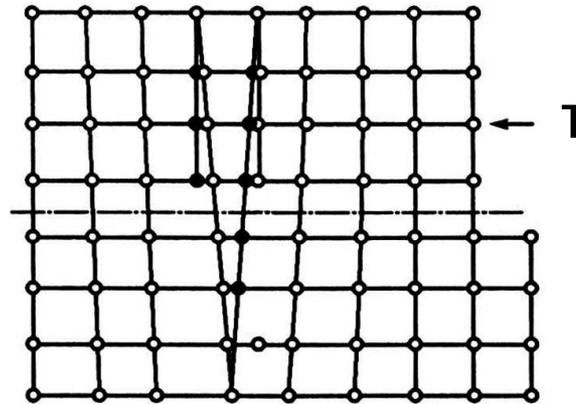
**Деформацией** называется изменение формы и размеров тела под действием нагрузки.

На первой стадии нагрузки происходит **упругая деформация**, исчезающая после снятия нагрузки. В основе упругих деформаций лежат обратимые смещения атомов от положения равновесия.

Если деформация сохраняется после снятия нагрузки - она называется **пластической деформацией**. В основе пластических деформаций – необратимые перемещения атомов от исходного положения равновесия.

Пластическая деформация в кристалле осуществляется путем сдвига одной его части относительно другой. Сдвиг вызывают касательные напряжения, когда их значение превышает критическое  $\tau$ .

### **Механизм пластической деформации – скольжение дислокаций.**



Пластическое деформирование при скольжении дислокаций. Так как в плоскости скольжения движутся сотни дислокаций, то в результате их выхода на поверхность образуются ступеньки, изменяющие форму каждого зерна. Зерна вытягиваются в направлении пластического течения.

При дальнейшей нагрузке движущиеся дислокации встречаются с препятствиями (точечными дефектами, другими дислокациями, мелкодисперсными частицами) и тормозятся этими препятствиями или огибают их. При этом плотность дислокаций увеличивается, мешая дальнейшему движению дислокаций. Для осуществления дальнейшей деформации требуется увеличение нагрузки. Это явление называется наклепом.

**Наклеп** – это явление повышения прочности и твердости, и снижения пластичность материала при пластической деформации.

На последней стадии деформации, на границе зерен в местах скопления дислокаций образуются **зародыши разрушения** – микротрещины. При дальнейшей нагрузке одна из микротрещин увеличивается и происходит **разрушение детали**.

Таким образом, на прикладываемую нагрузку материал реагирует в четыре стадии:

- 1. упругая деформация**
- 2. пластическая деформация**
- 3. зарождение трещины и ее рост**
- 4. разрушение**

# Разрушение металлов

**Разрушение** – это процесс зарождения и развития в металле трещин, приводящий к разделению его на части.

Микротрещина возникает за счёт слияния дислокаций, что происходит при их большой плотности в результате скопления.

Скопление чаще (но не обязательно) возникает перед препятствием (см. след. слайд) – границами зёрен, межфазными границами, различными включениями.

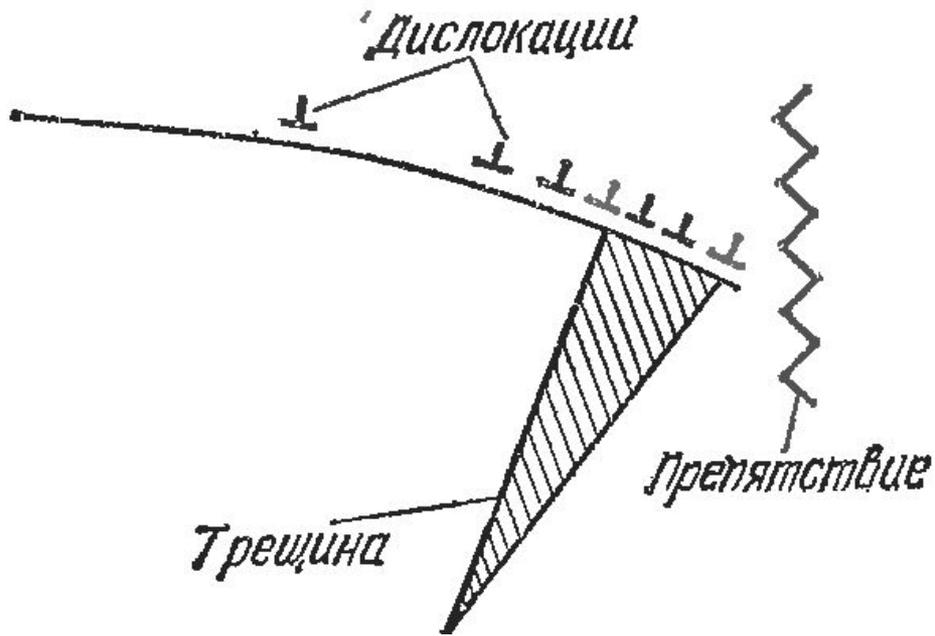
Механизмы разрушения:

**Хрупкое** – трещина растёт самопроизвольно, если её длина (при заданном напряжении) превышает некоторое критическое значение.

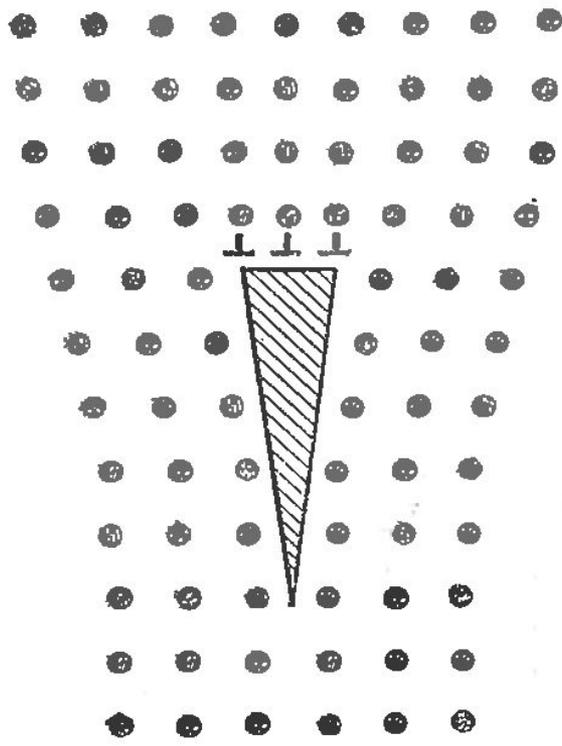
Скорость распространения близка к скорости звука.

Энергоёмкость хрупкого разрушения мала.

**Вязкое** – у вершины трещины большая пластическая зона; вершина трещины затуплена. Энергоёмкость роста трещины велика. Скорость распространения мала.



Скопление дислокаций  
у препятствия



Слияние дислокаций и  
образование зародышевой  
трещины (безбарьерный  
механизм)

Основные механические свойства металлов, описывающие поведения материала под нагрузкой:

***прочность, твердость, пластичность, ударная вязкость.***

**Прочность** – способность металла сопротивляться разрушению или появлению остаточных деформаций под действием внешних сил.

**Пластичность** – свойство металла изменять свои размеры и форму под действием внешних сил, не разрушаясь при этом.

**Твердость** – это способность металла сопротивляться внедрению более твердого тела.

**Ударная вязкость** – способность металла сопротивляться разрушению под действием динамической нагрузки

Многие металлы ( $\text{Fe}_\alpha$ , W, Mo, Zn и др.), имеющие **ОЦК** или **ГПУ** кристаллические решётки, в зависимости от температуры могут разрушаться как вязко, так и хрупко.

Понижение температуры вызывает переход от вязкого к хрупкому разрушению.

Это явление называется **хладноломкостью**.

Температура перехода от вязкого разрушения к хрупкому называется критической температурой хрупкости или **порогом хладноломкости**.

Порог хладноломкости не является постоянной материала, а зависит от его структуры, условий испытания, наличия концентраторов напряжений, размеров детали и т. д.

Чем выше прочность ( $\sigma_B$ ,  $\sigma_{0,2}$ ), тем выше порог хладноломкости.

# Для объяснения хладноломкости используют схему А.Ф.Иоффе

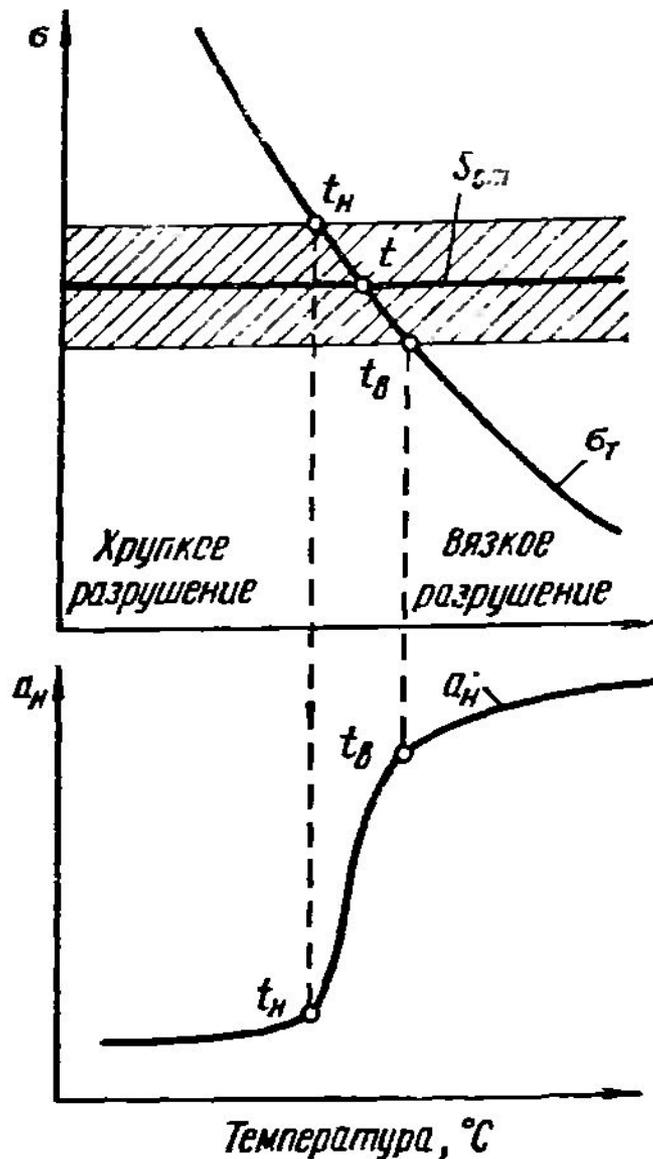


Схема хрупкого и вязкого разрушения металла в зависимости от температуры испытания:

$t_B$  и  $t_H$  – верхняя и нижняя границы критического температурного интервала хрупкости;

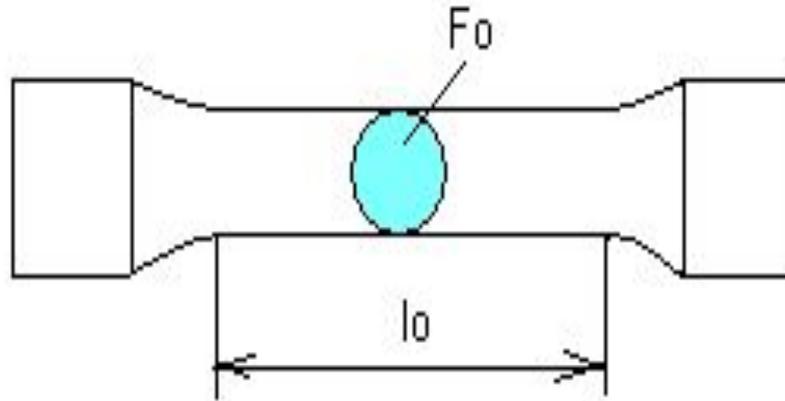
$S_{от}$  – сопротивление отрыву;

$\sigma_T$  – предел текучести.

Хладноломкость может быть снижена  
очисткой металлов от вредных примесей (P, As,  
Sb, W),  
термообработкой, легированием.

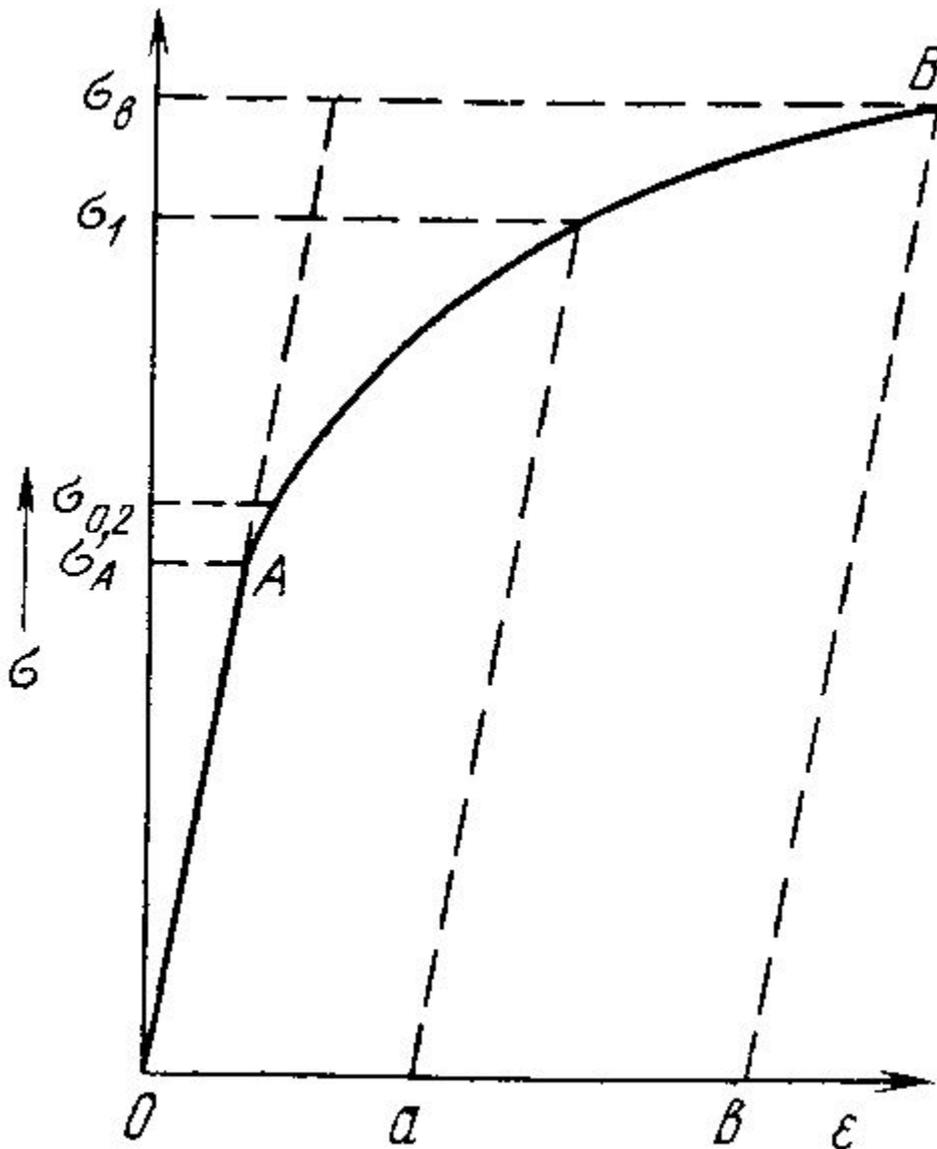
Хладноломкость имеет особое значение при эксплуатации конструкций в температурных условиях северных районов, для космических аппаратов, луноходов, водородных двигателей.

Характеристики **прочности и пластичности** металлов обычно определяют при **испытаниях на статическое растяжение** (плавно возрастающее). При этом испытуемый образец закрепляют в захватах разрывной машины и деформируют при плавно возрастающей (статической) нагрузке.



Испытание проводят на стандартных образцах с определенным соотношением между расчетной длиной  $l_0$  и площадью поперечного сечения  $F_0$ . Наиболее широко применяются образцы круглого сечения.

# Условные и истинные напряжения



$0A$  – упругая деформация (продолжается по штриховой линии) – изменяется расстояние между атомами;  
обратимая

$AB$  – в реальном материале появляется пластическая деформация за счёт необратимого перемещения одной части кристалла относительно другой.

Пластическая деформация является необратимой.

Величина – горизонтальный отрезок от штриховой до сплошной линии.

$\sigma; S, \text{МПа}$

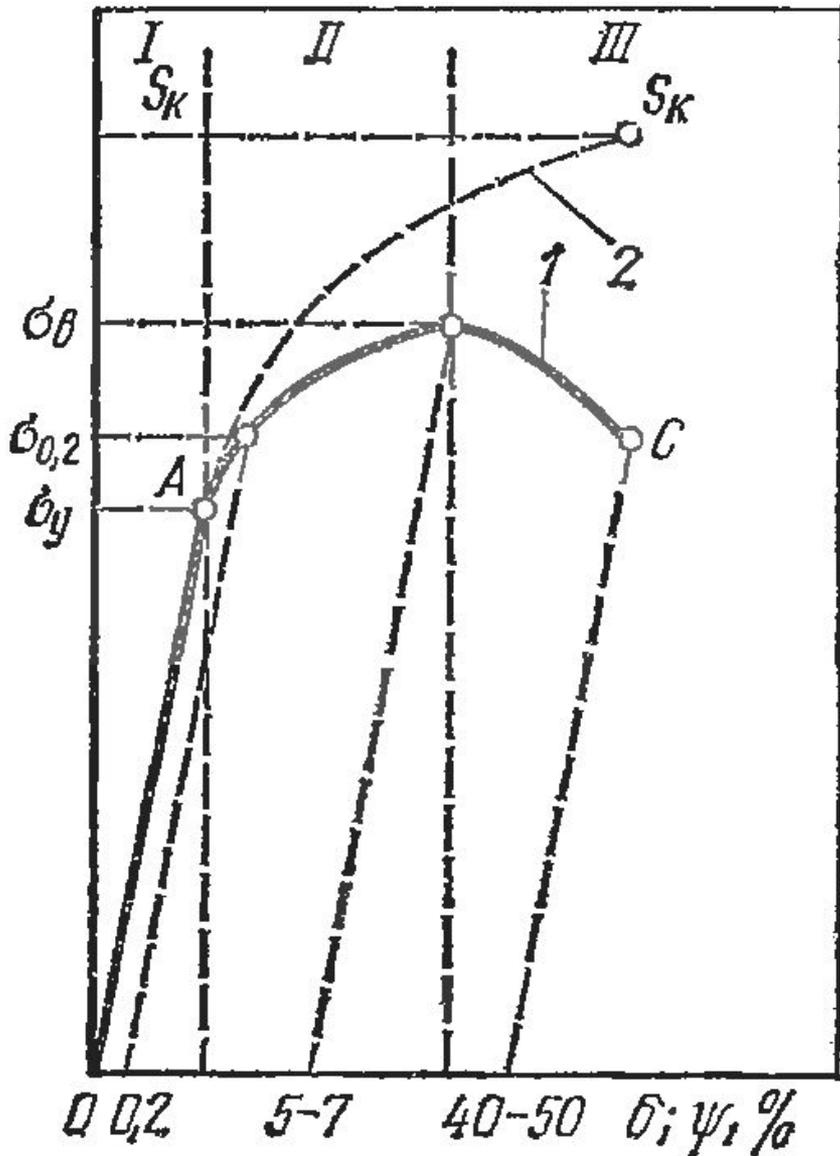


Диаграмма растяжения металлов для условных (сплошная линия) и истинных (штриховая линия) напряжений:  
I – область упругой деформации  
II – область пластической деформации  
III – область развития трещин

$$\sigma = P/F_0 \text{ [МПа]}$$

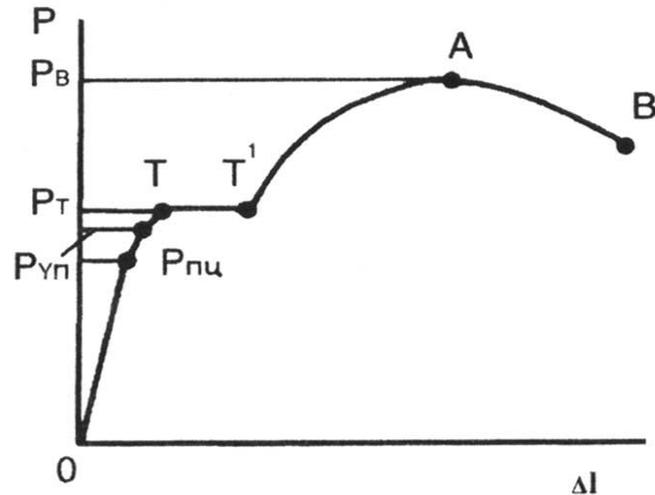
$$S = P/F_K$$

$I = (l_K - l_0)/l_0 \cdot 100 \%$  - относительное удлинение

$\Psi = (F_0 - F_K)/F_0 \cdot 100\%$  - относительное сужение

$l_0, l_K, F_0, F_K$  – длина образца и площадь поперечного сечения до и после разрушения соответственно

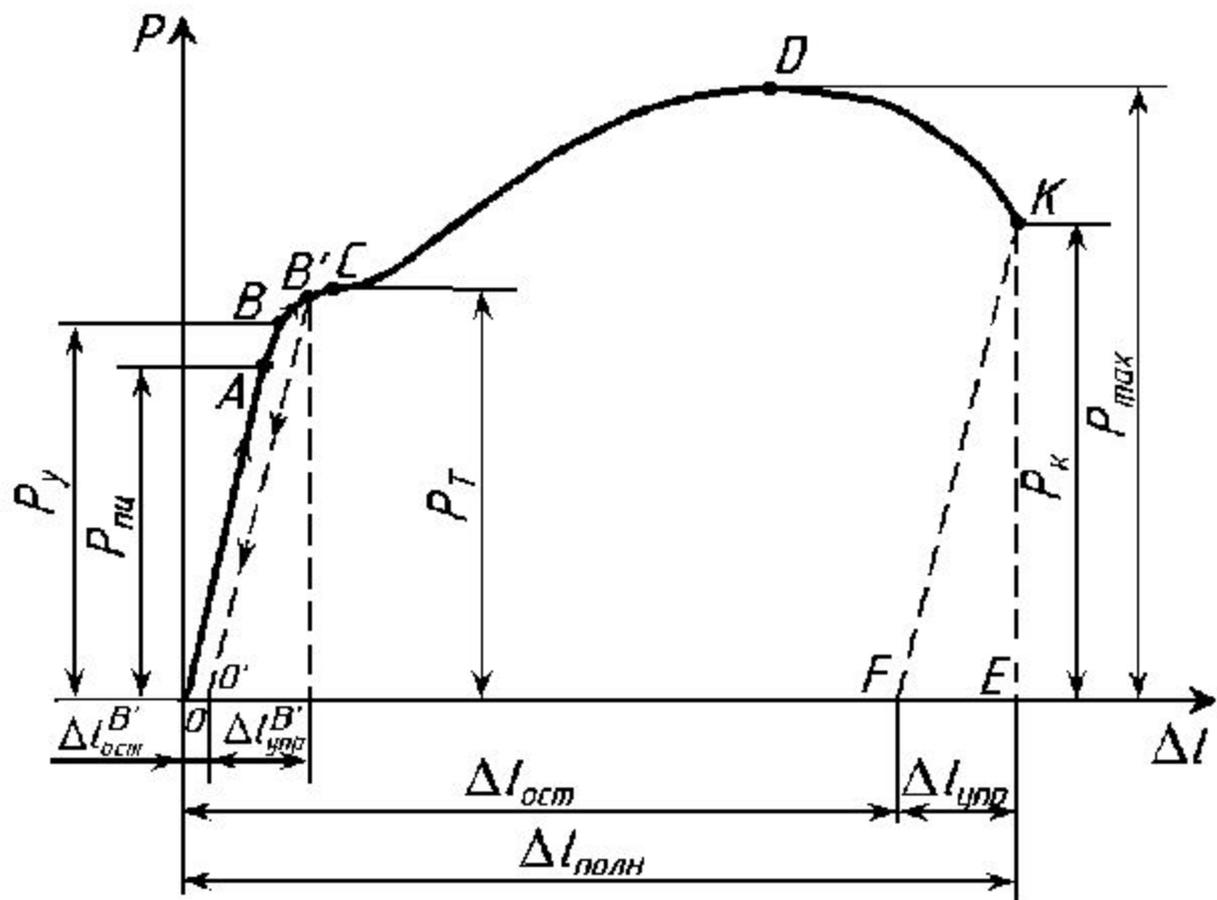
По результатам испытаний строят **диаграммы растяжения** образца в координатах «нагрузка – деформация»

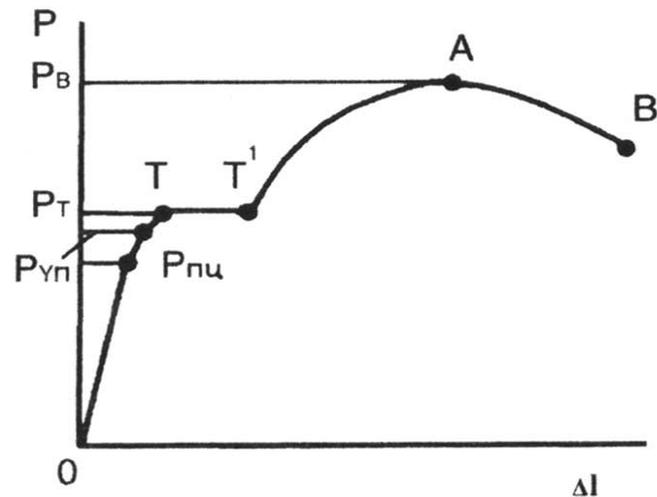


На диаграмме по кривой растяжения определяют характеристики механических свойств металла:

**Предел упругости  $\sigma_y$**  – максимальное напряжение, до которого образец испытывает только упругую деформацию.

$$\sigma_y = P_y / F_0, \text{ МПа.}$$

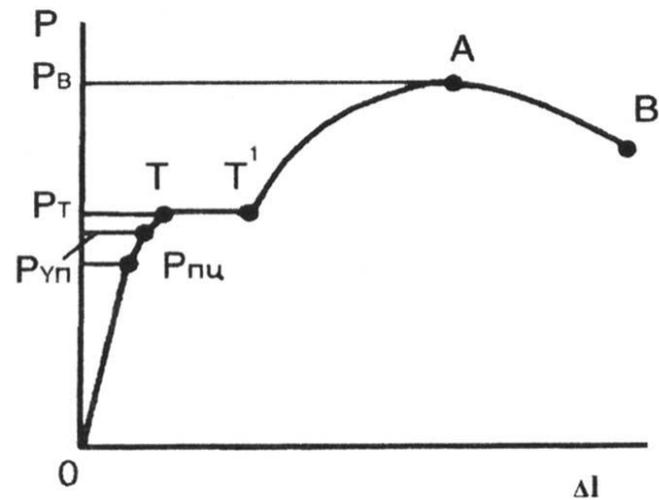




**Предел текучести  $\sigma_T$**  – это напряжение при котором происходит увеличение деформации при постоянной нагрузке.

$$\sigma_T = P_T / F_0, \text{ МПа}$$

**Условный предел текучести  $\sigma_{0,2}$**  – остаточная деформация равна 0,2% от начальной длины.



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

$$\sigma_B = P_B / F_0, \text{ МПа}$$

**Относительное удлинение** ( $\delta$ ) измеряется в процентах и определяется по формуле:

$$\delta = \frac{l_k - l_0}{l_0} \cdot 100 \% ,$$

где  $l_0$  и  $l_k$  - начальная и конечная длины образца до и после разрыва.

**Твёрдость** – это способность металла сопротивляться поверхностной деформации под действием более твёрдого тела.

Обычно проводят статические **испытания на твёрдость**.

### **Твёрдость по Бринеллю (НВ)**

определяют вдавливанием в поверхность металла стального закаленного шарика диаметром 2,5; 5 и 10 мм при нагрузке до 250 кг. Число твёрдости НВ определится формулой

$$HB = \frac{2P}{\pi D \cdot (D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

где P – приложенная нагрузка, кгс; D – диаметр шарика, мм; d – диаметр отпечатка, мм.

Обычно расчёты не производят, а пользуются готовыми стандартными таблицами. 19

## Твёрдость по Роквеллу

определяют вдавливанием в поверхность алмазного конуса с углом при вершине 120 или стального закалённого шарика диаметром 1,6 мм. Твёрдость определяется по глубине впадины.

Твёрдость по Роквеллу в зависимости от твёрдости испытуемых материалов обозначают **HRA, HRB, HRC**.

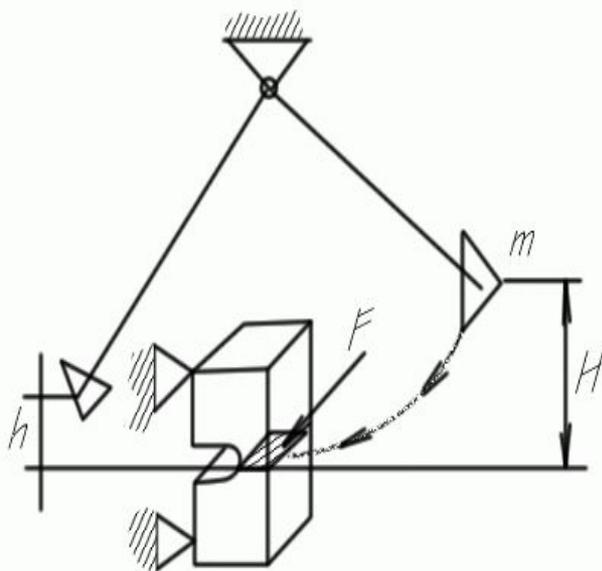
**Шкала С** служит для испытания твердых материалов, например закаленная сталь. Алмазный конус вдавливается под нагрузкой 150 кгс.

**Шкала А** используется при испытании твердых и хрупких материалов, например твердый сплав. Применяют тот же алмазный конус, но вдавливают под нагрузкой в 60 кгс.

**Шкала В** предназначена для испытания мягких материалов, например бронзы. Стальной шарик вдавливается под нагрузкой в 100 кгс.

**Ударная вязкость** – способность металла сопротивляться разрушению под действием динамической нагрузки.

Для оценки ударной вязкости металлов проводят **ударные испытания** надрезанных образцов на маятниковых копрах.



На разрушение образца затрачивается работа:

$$A = P \cdot (H - h),$$

где  $P$  – вес маятника,  $H$  и  $h$  – высоты подъема маятника до и после удара.

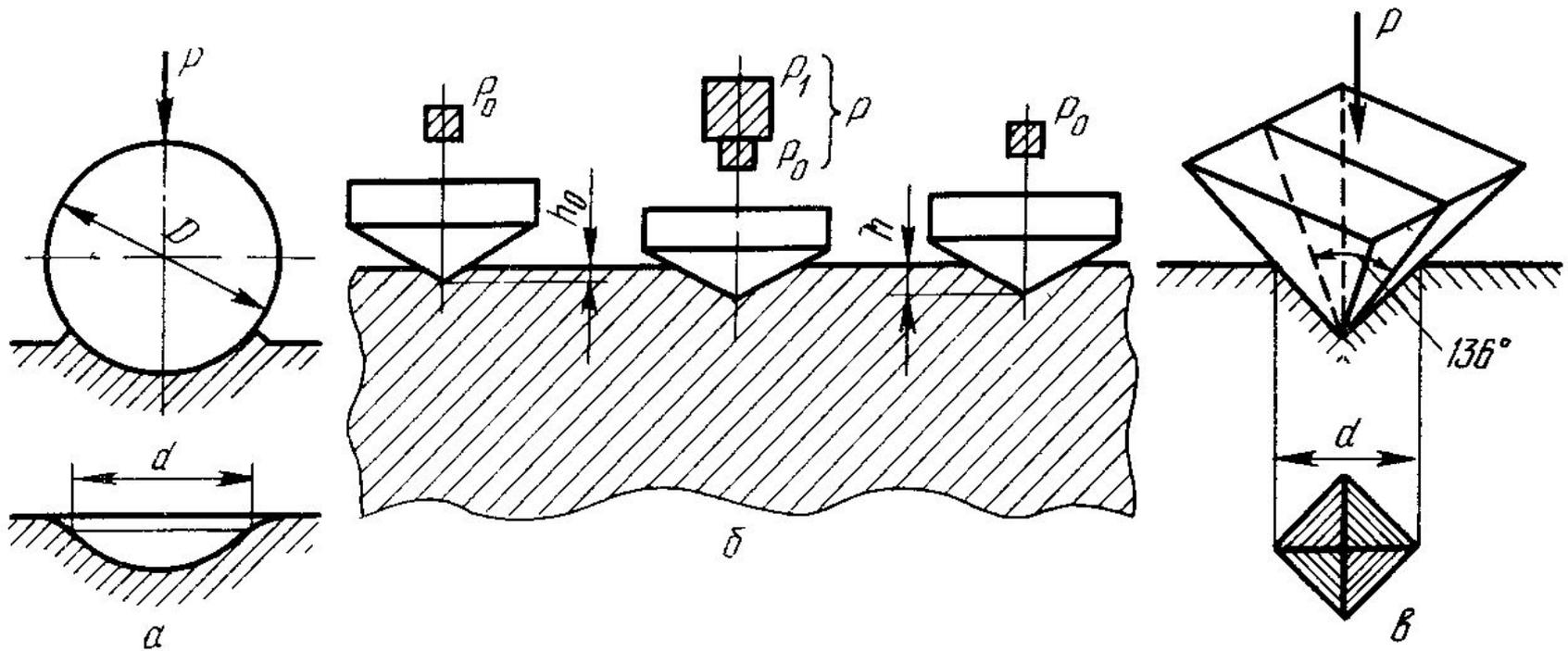
Значение ударной вязкости определяется по формуле:

$$KCV = \frac{A}{F_0} \left[ \frac{KGM}{CM^2} \right],$$

где  $A$  – работа разрушения образца,  
 $F_0$  – площадь поперечного сечения образца

Ударную вязкость обозначают **KCV, KCU и KCT**, где третий символ показывает вид надреза: острый (V), с радиусом закругления (U), трещина (T).

# Схемы испытания на твёрдость



а – по Бринеллю;

б – по Роквеллу;

в – по Виккерсу

# **Механизмы упрочнения металлов и сплавов**

Сопротивление деформированию металлических материалов в кристаллическом состоянии формируется четырьмя принципиально различными механизмами:

**1. Твердорастворное**

**2. Дислокационное**

**3. Зернограничное**

**4. Упрочнение дисперсными частицами**

## Твердорастворное упрочнение

основано на введении в кристаллическую решетку металла атомов замещения или внедрения.

При этом кристаллическая решетка основного металла искажается вследствие различного размера атомов, образующих твердый раствор.

Дислокации при своем движении должны преодолевать искажения кристаллической решетки, что затрудняет деформацию.

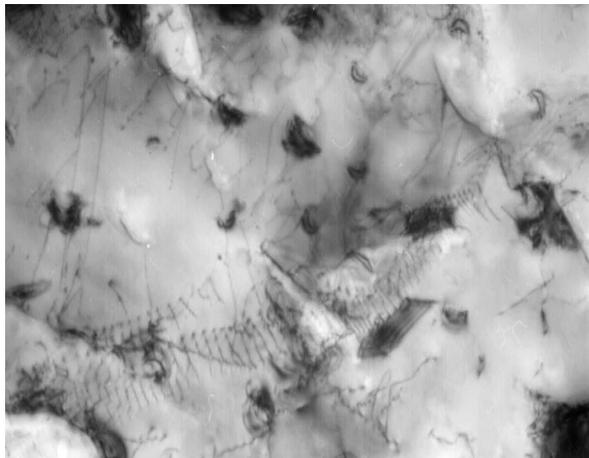
Данный механизм упрочнения проявляется при формировании любых сплавов с твердым раствором, особенно пересыщенным.

**Пример:** Применение сплавов. Закалка стали.

## Дислокационное упрочнение

достигается при формировании в кристаллической решетке большого числа дислокаций.

Дислокации, скользящие через хаотически расположенные неподвижные дислокации взаимодействуют. Плотность дислокаций увеличивается, и дислокации создают различные субструктуры, что в результате тормозит процесс пластической деформации (рис.)



а



б

Электронно-микроскопическое изображение дислокационной структуры в титане:

а – хаотически расположенные дислокации;

б – упорядоченная дислокационная

субструктура ( $\times 25000$ )

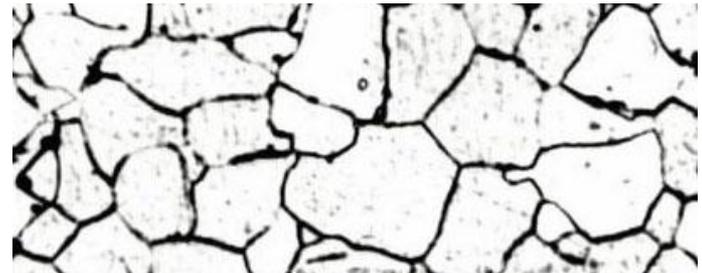
**Пример:** Упрочнение наклепом

## Зернограничное упрочнение

Наличие границ зерен в поликристалле приводит к его упрочнению.

При определенном значении напряжения дислокации не могут перейти через границу в другое зерно и начинают тормозиться. Для преодоления границы им необходимо дополнительное напряжение.

Чем мельче зерно, тем прочнее металл.



**Пример:** Измельчения структуры при кристаллизации.  
Закалка и высокий отпуск стали.

# Упрочнение дисперсными частицами

заключается в образовании мелких выделений второй фазы в матрице основного металла. В структуре сплавов могут формироваться дисперсные частицы карбидов, интерметаллических соединений, оксидов. Эти выделения создают препятствия для движения дислокаций и значительно повышают прочность материала.

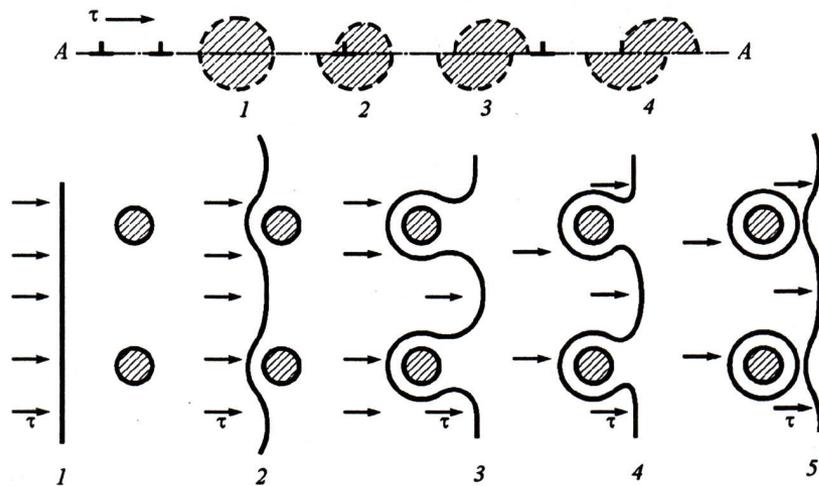


Схема перемещения дислокации в двухфазных сплавах при перерезании частиц второй фазы (а) и при образовании дислокационных петель (б)

**Пример:** Закалка со старением алюминиевых и никелевых сплавов.

Закалка с низким отпуском стали или старением стареющей стали.

**В современных конструкционных материалах чаще всего используется комбинированное взаимодействие нескольких из этих механизмов.**



Микроструктура стали  
45 после закалки

**Например:**

При закалке стали происходит формирование пересыщенного твердого раствора углерода в железе – мартенсита (твердорастворное упрочнение), формирование мелкозернистой структуры мартенсита (зернограничное упрочнение) с большой плотностью дислокаций (дислокационное упрочнение).