

**Деформацией** называют изменение размеров и формы твердого тела под действием механических сил - ***нагрузок***.

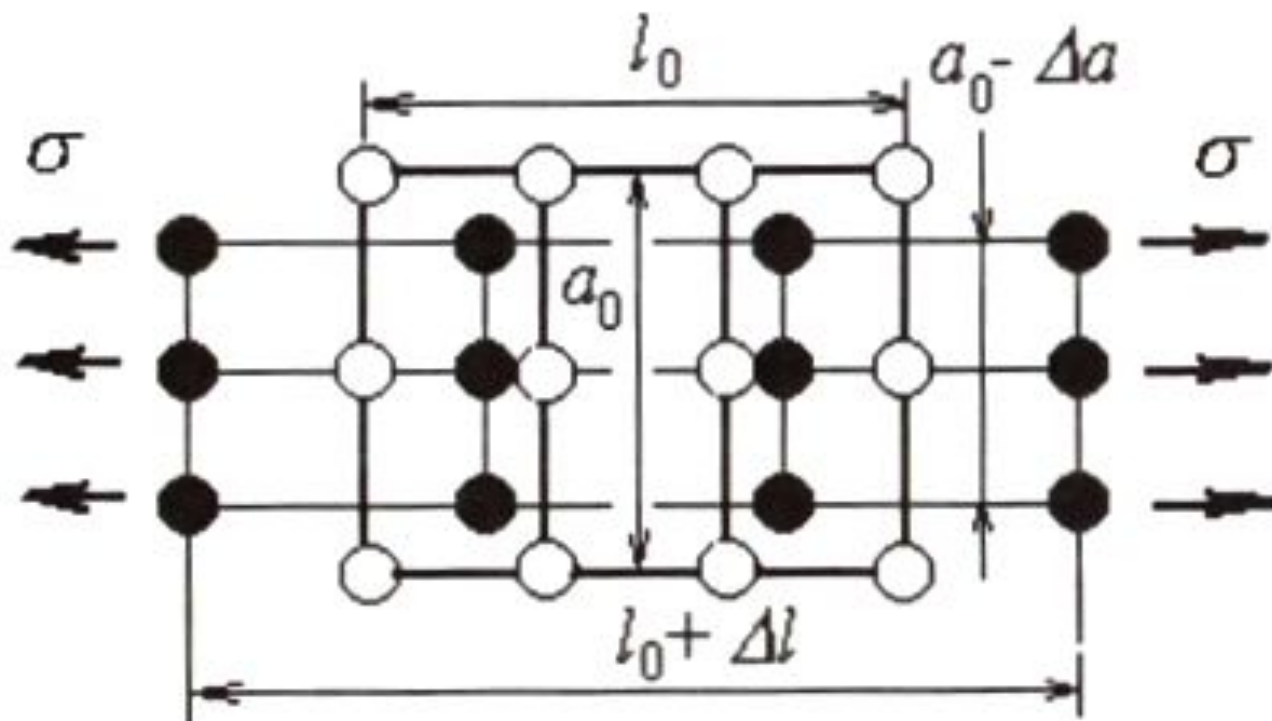
Деформация кристаллического тела бывает ***упругой*** и ***пластической***. Упругой называют такую деформацию, которая полностью исчезает после снятия нагрузки, т.е. является ***обратимой***.

## Лекция 4 Деформация, механические свойства и разрушение металлов

При *пластической* деформации одна часть кристалла смещается *сдвигом* по отношению к другим его частям, причем такая деформация является *необратимой* и сохраняется после снятия нагрузки. В результате пластической деформации кристалл может существенно изменить размеры и форму.

Чем больше *обратимые* деформации, которые можно вызвать в материале, тем выше *упругость* этого материала. Способность материала претерпевать большие *необратимые* деформации говорит о его высокой *пластичности*.

# Лекция 4 Деформация, механические свойства и разрушение металлов



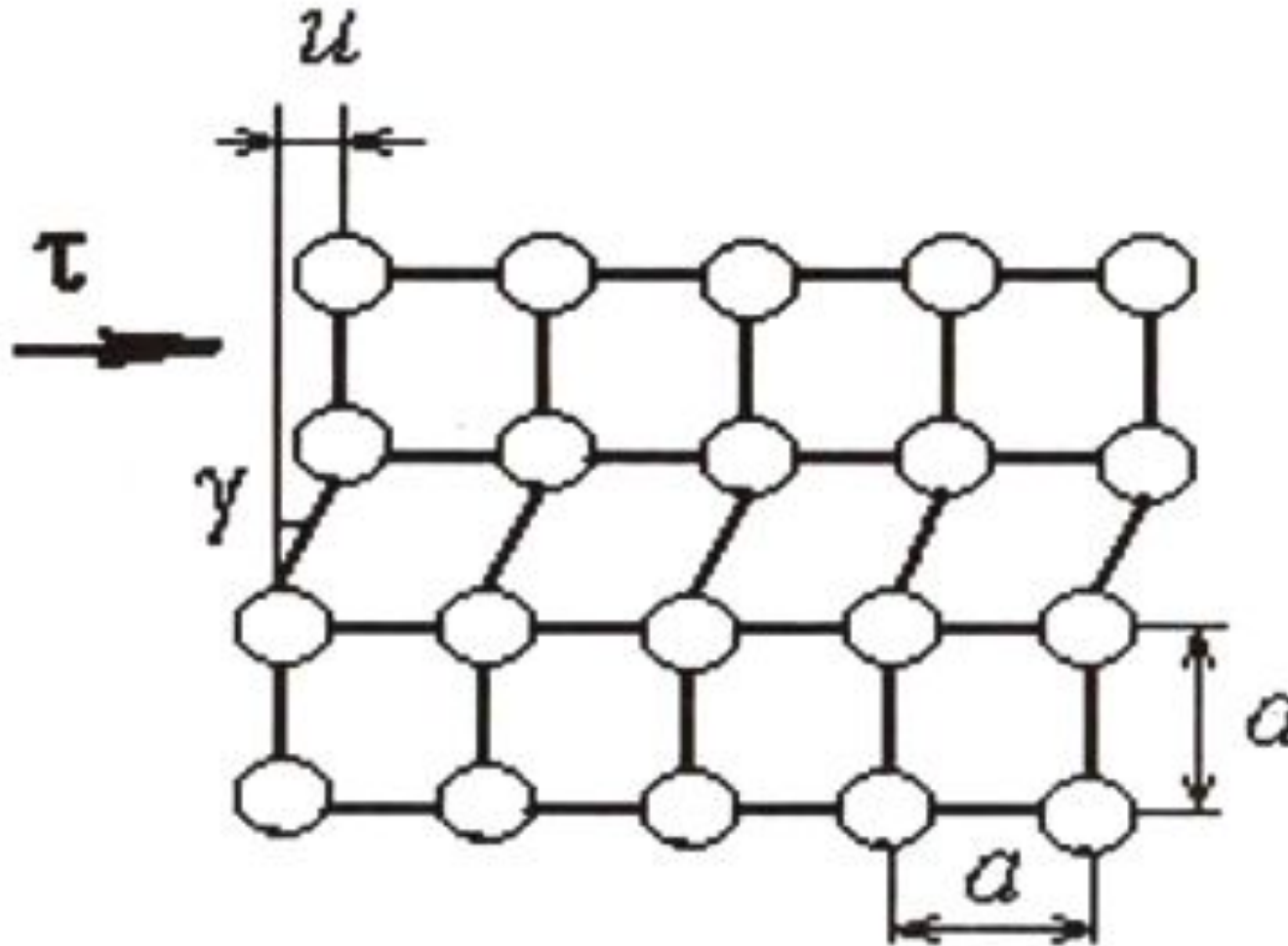
Упругое  
растяжение  
кристалла

$\sigma = E\varepsilon$ ,  $E$  – модуль нормальной упругости или **модуль Юнга**

**Резина:  $E = 0,5$  МПа; алмаз:  $E = 1,2 \times 10^6$  МПа**

Металл	· · · · ·	Pb	Al	Cu	Fe	Mo	W
$T_{пл}, ^\circ\text{C}$	· · · · ·	327	660	1083	1539	2625	3410
$E, \text{ГПа}$	· · · · ·	16	70	130	210	325	400

Лекция 4 Деформация, механические свойства и разрушение металлов



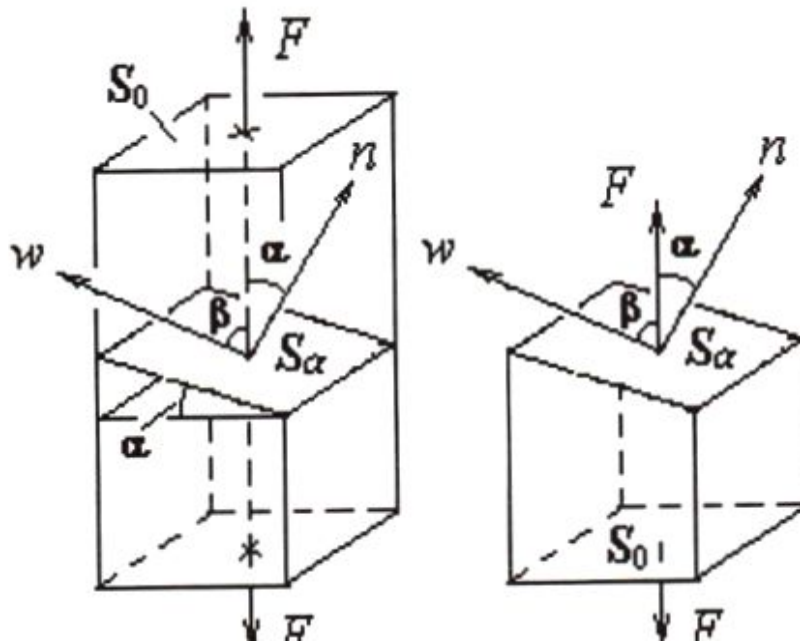
Упругий  
сдвиг в  
кристалле

$\tau = G\gamma$ ,  $G$  – модуль касательной упругости или  
**модуль сдвига**

## Лекция 4 Деформация, механические свойства и разрушение металлов

$\epsilon' = \mu \epsilon$ ,  $\mu$  – коэффициент Пуассона – безразмерный коэффициент пропорциональности, связывающий поперечную деформацию с продольной; модуль сдвига связан с модулем Юнга и коэффициентом Пуассона соотношением  $G = E/2(1 + \mu)$ . Модули упругости характеризуют жёсткость материала. Для металлов и металлических сплавов коэффициент Пуассона находится в пределах от 0,2 до 0,4.

## Лекция 4 Деформация, механические свойства и разрушение металлов



*К определению напряжений  
в кристалле*

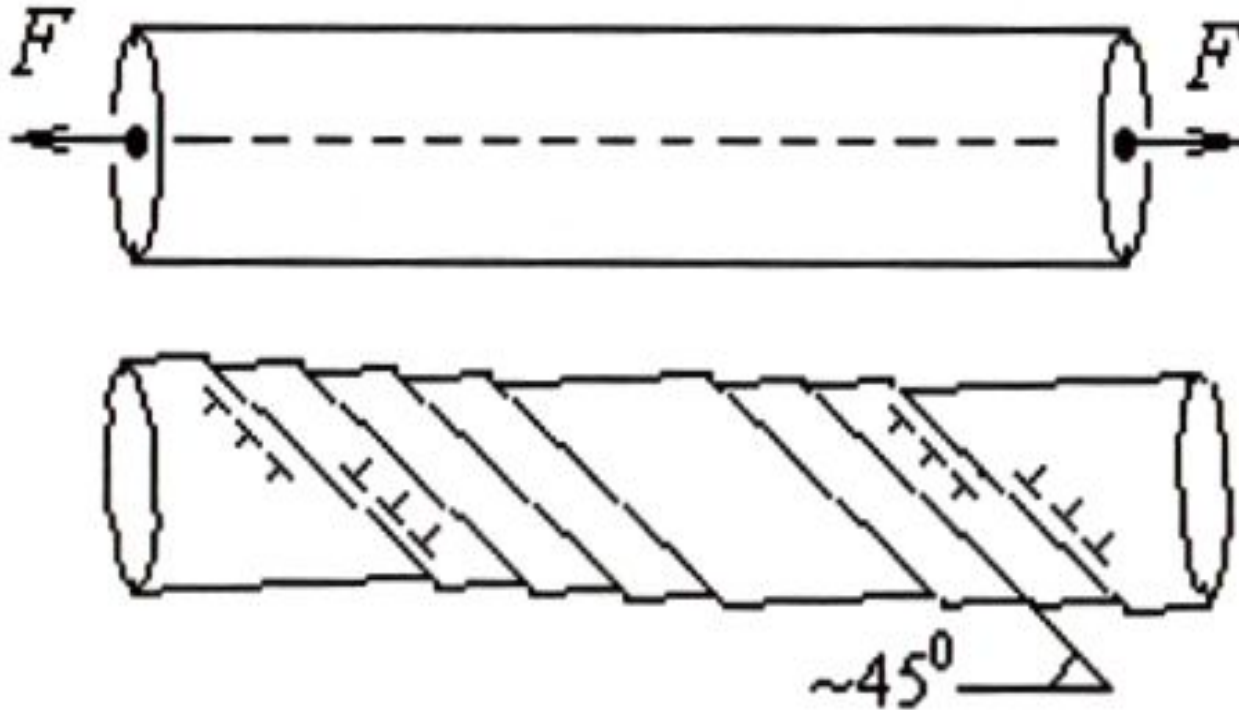
$$P = \frac{F}{S_\alpha} = \sqrt{(\sigma)^2 + (\tau)^2} = \frac{F \cos \alpha}{S_0},$$

$$\sigma = \frac{F_n}{S_\alpha} = \frac{F \cos \alpha}{S_\alpha} = \frac{F \cos^2 \alpha}{S_0},$$

$$\tau = \frac{F_\tau}{S_\alpha} = \frac{F \sin \alpha}{S_\alpha} = \frac{F \sin \alpha \cos \alpha}{S_0} = \frac{F \sin 2\alpha}{2S_0}.$$

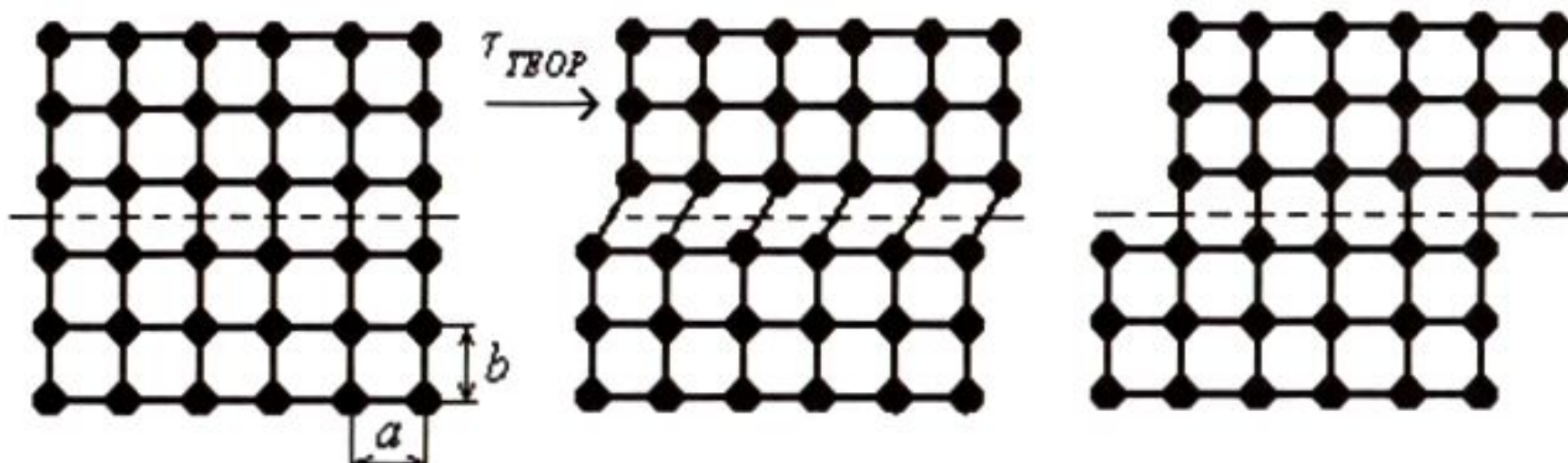
*Расчёт нормальных и  
касательных напряжений в  
кристалле*

**Лекция 4 Деформация, механические свойства и разрушение металлов**



**Следы скольжения на поверхности деформированного кристалла (линии Чернова – Людерса)**

## Лекция 4 Деформация, механические свойства и разрушение металлов

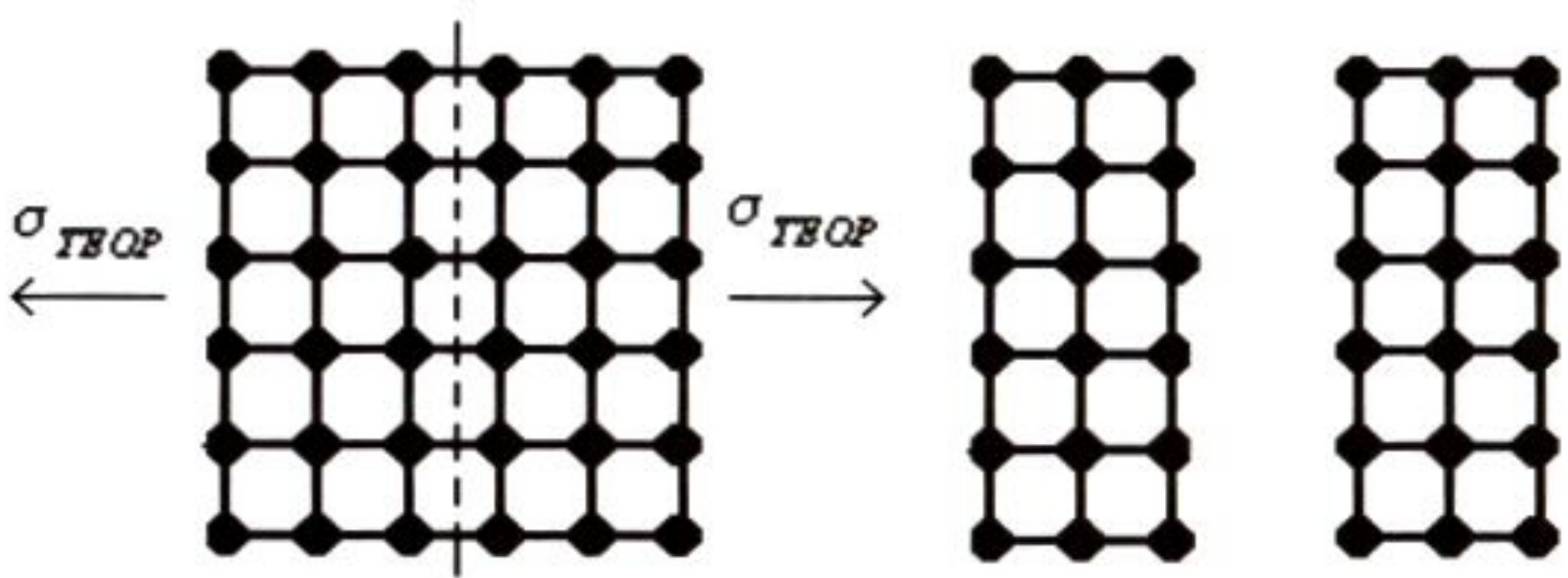


*Сдвиг в идеальном (бездефектном) кристалле*

$$\tau_{\text{ТЕОР}} = \frac{G}{2\pi} \left( \frac{a}{b} \right),$$



**Лекция 4 Деформация, механические свойства и разрушение металлов**



***Разрыв идеального (бездефектного) кристалла***

***Теоретическая прочность при отрыве для железа – 40 ГПа***

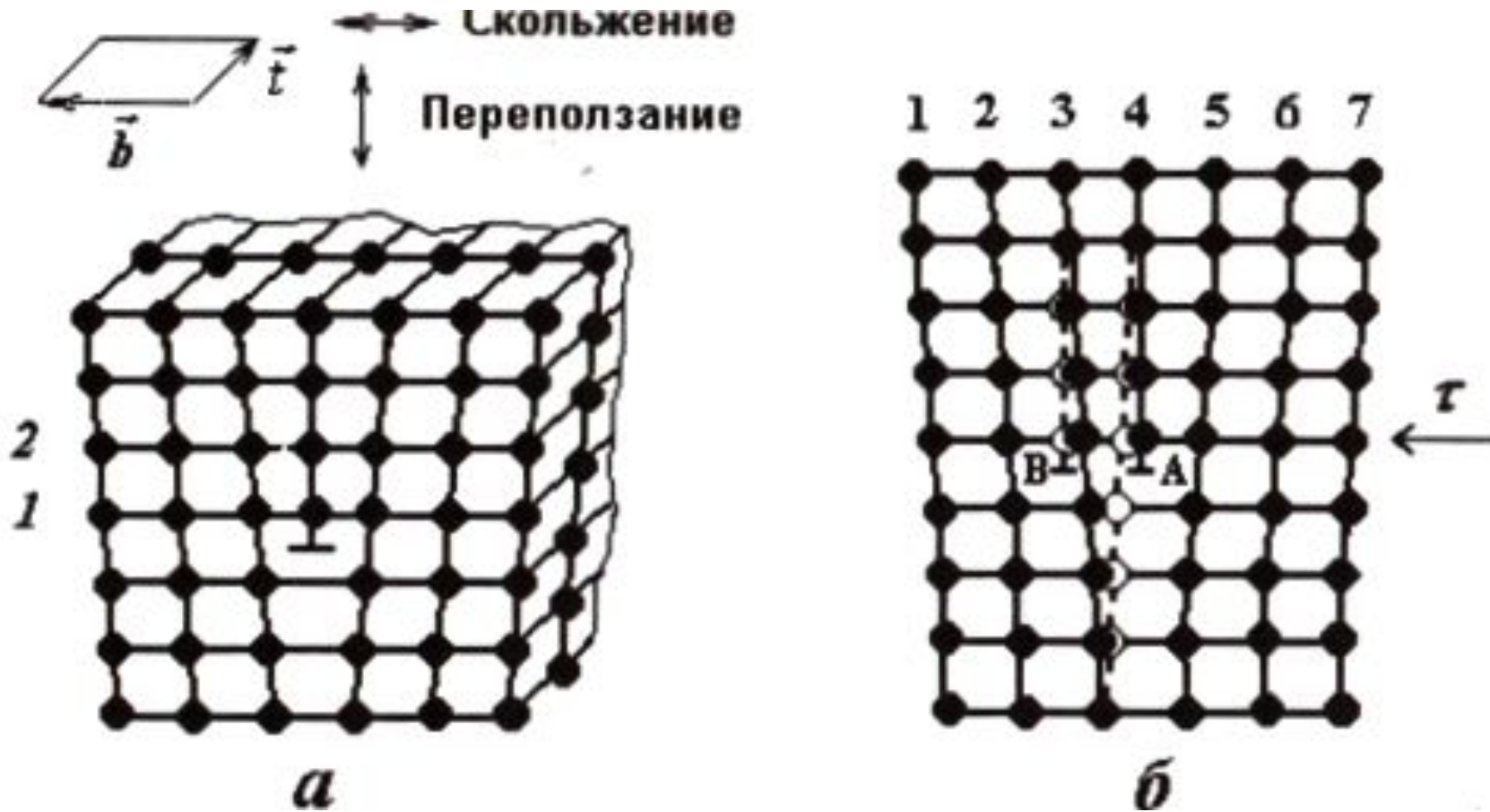
***Железо высокой чистоты, монокристалл – 50 МПа***

Лекция 4 Деформация, механические свойства и разрушение металлов

**Прочностью** называют **способность материала сопротивляться необратимым (пластическим) деформациям и разрушению.** Чем больше усилия, необходимые для того, чтобы вызвать пластическую деформацию и разрушение материала, тем он прочнее.

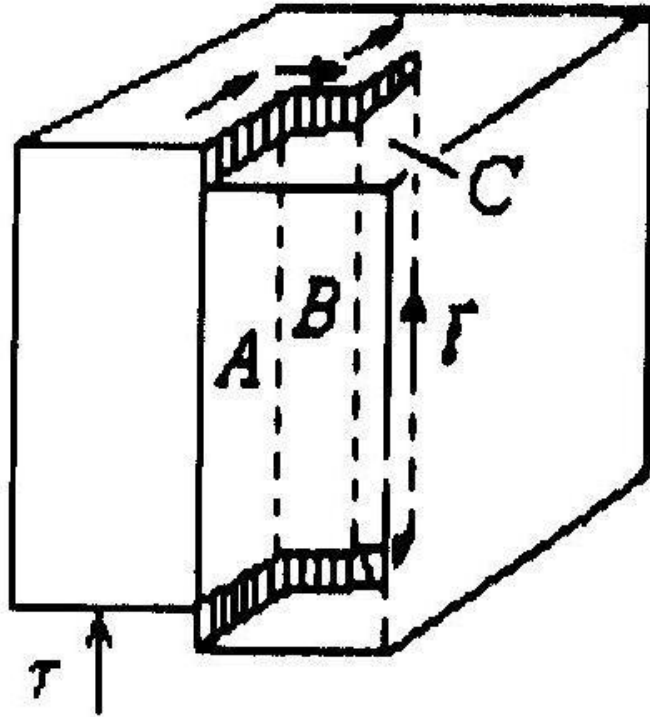
Согласно современным представлениям, ***пластическая деформация*** металлических материалов тесно связана с перемещением дислокаций. Различают два вида движения дислокаций - ***скольжение и переползание.***

# Лекция 4 Деформация, механические свойства и разрушение металлов



**Движение краевой дислокации**

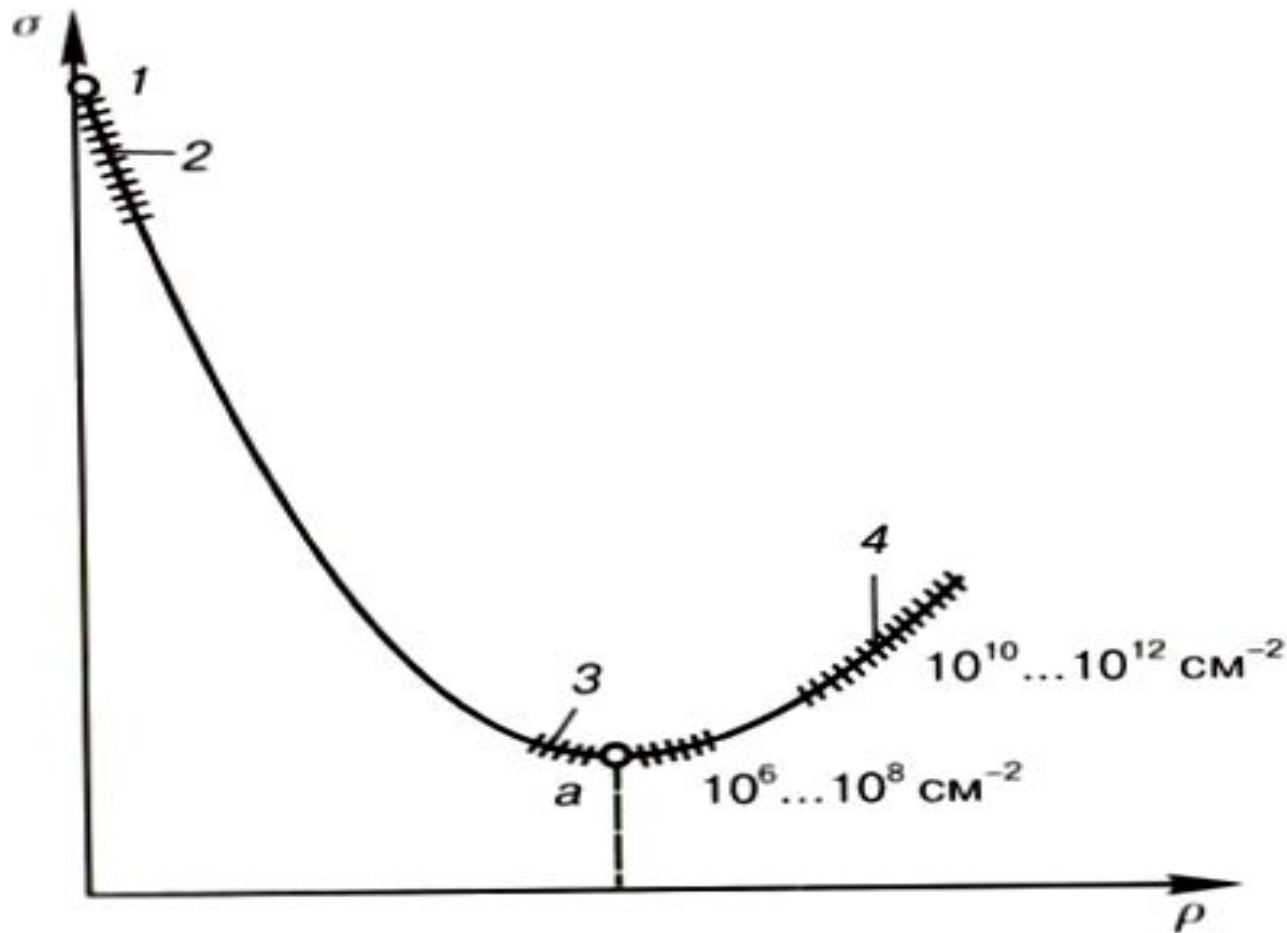
**$\tau$  - касательное напряжение**



Винтовая дислокация перемещается **только скольжением**, которое происходит перпендикулярно вектору Бюргерса. Если на пути винтовой дислокации встречается препятствие, она может продолжить скольжение в другой плоскости, такое скольжение называют **поперечным**

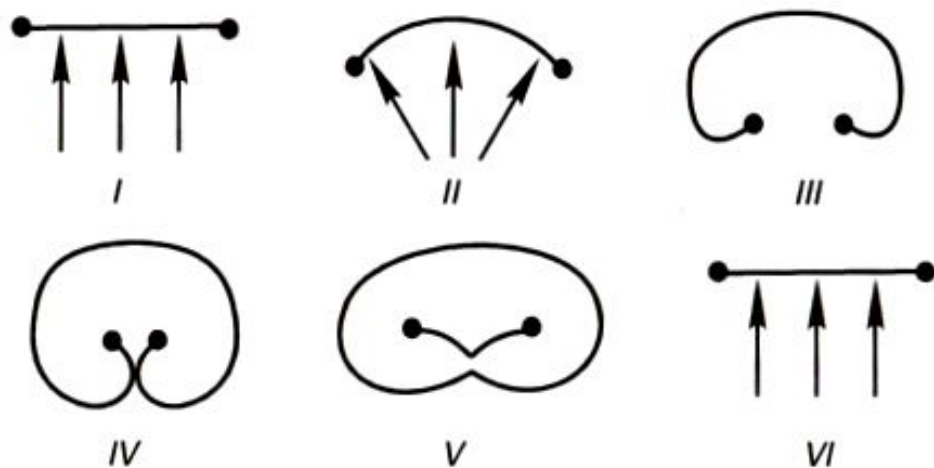
**Рис. 4.9. Поперечное скольжение винтовой дислокации**

## Лекция 4 Деформация, механические свойства и разрушение металлов



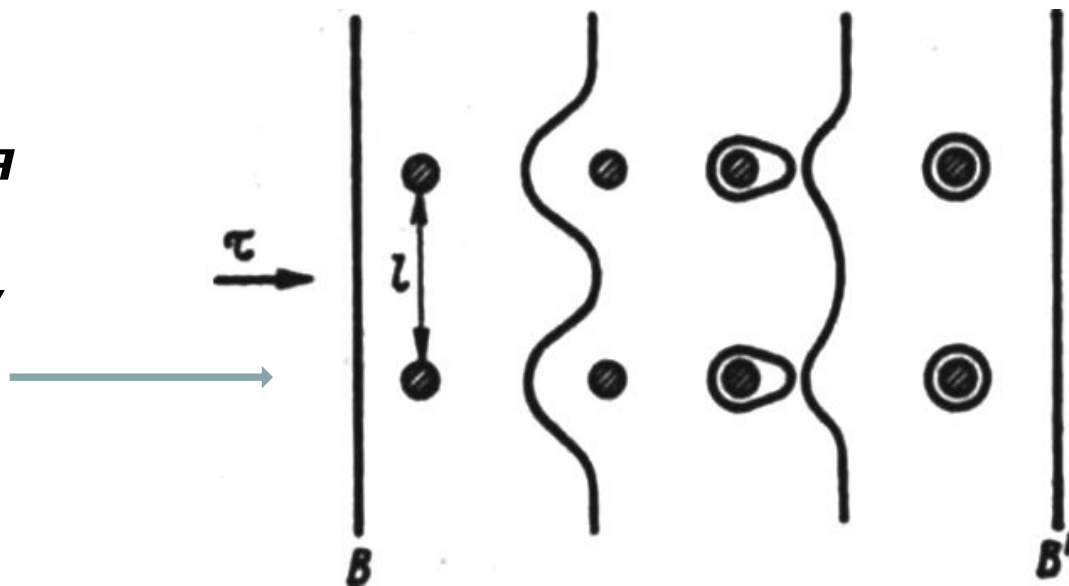
**Зависимость сопротивления металла деформации от плотности дислокаций в кристаллической решётке: 1 – теоретическая прочность, 2 – прочность монокристаллических «усов», 3 – прочность чистого неупрочнённого металла, 4 – прочность упрочнённых металлических сплавов**

# Лекция 4 Деформация, механические свойства и разрушение металлов



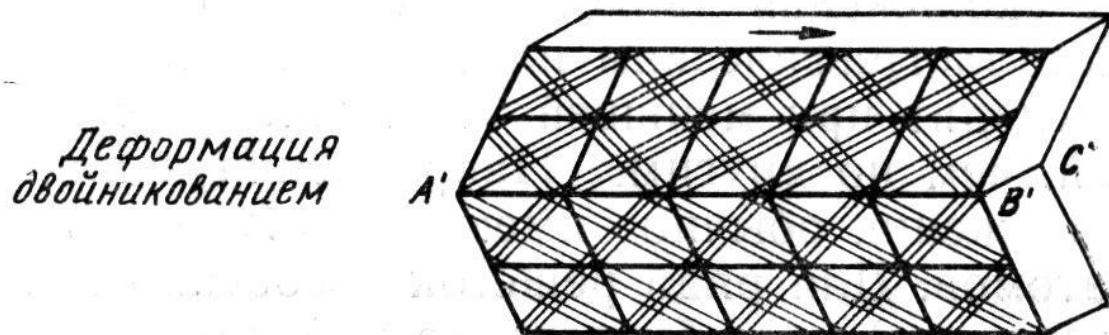
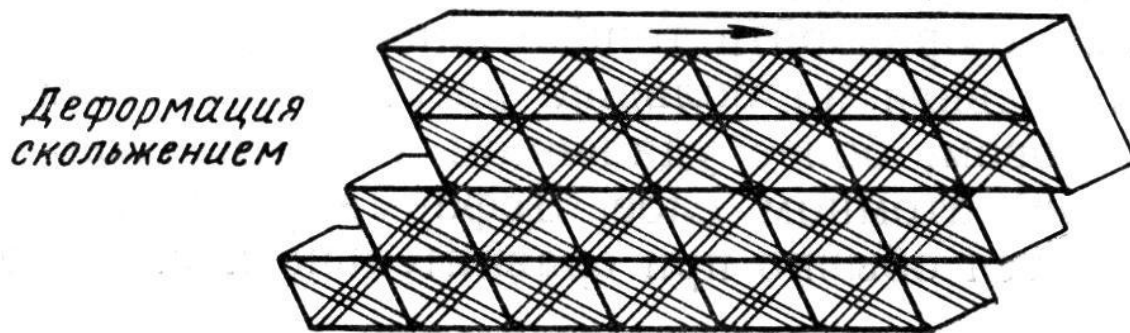
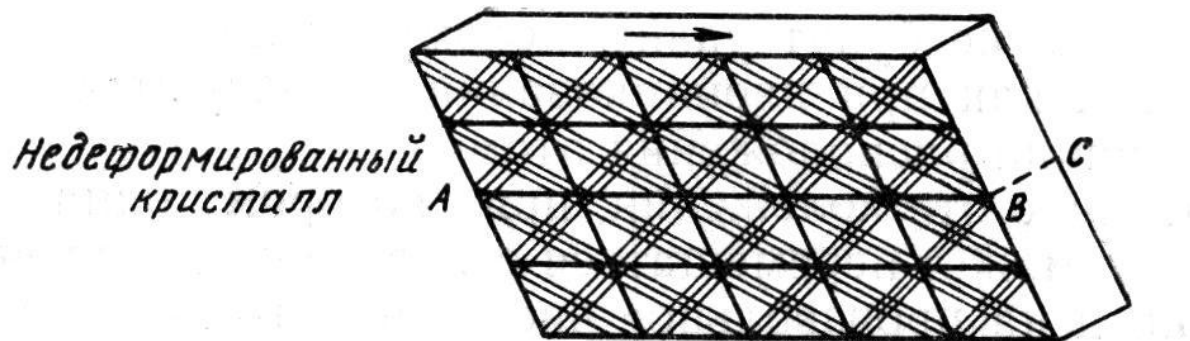
Стадии образования дислокации по механизму Франка-Рида

Стадии выгибания скользящей дислокации между частицами с образованием петель



## Лекция 4 Деформация, механические свойства и разрушение металлов

### Схема скольжения и двойникования в кристалле



Металлы, имеющие решетку ОЦК или ГЦК, деформируются преимущественно путем **скольжения** дислокаций, а металлы с ГПУ решеткой - как **скольжением**, так и **двойникованием**.

Лекция 4 Деформация, механические свойства и разрушение металлов

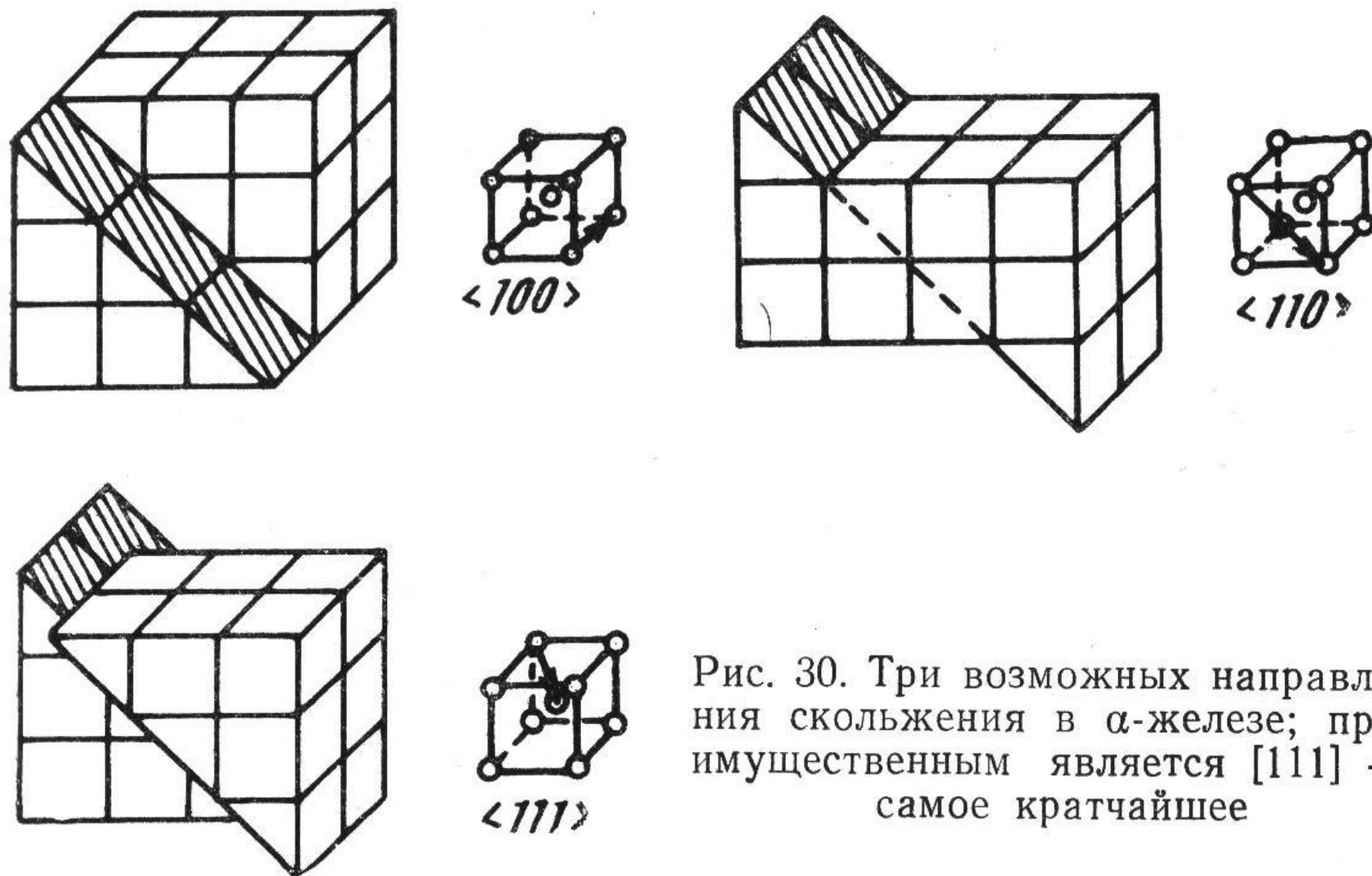
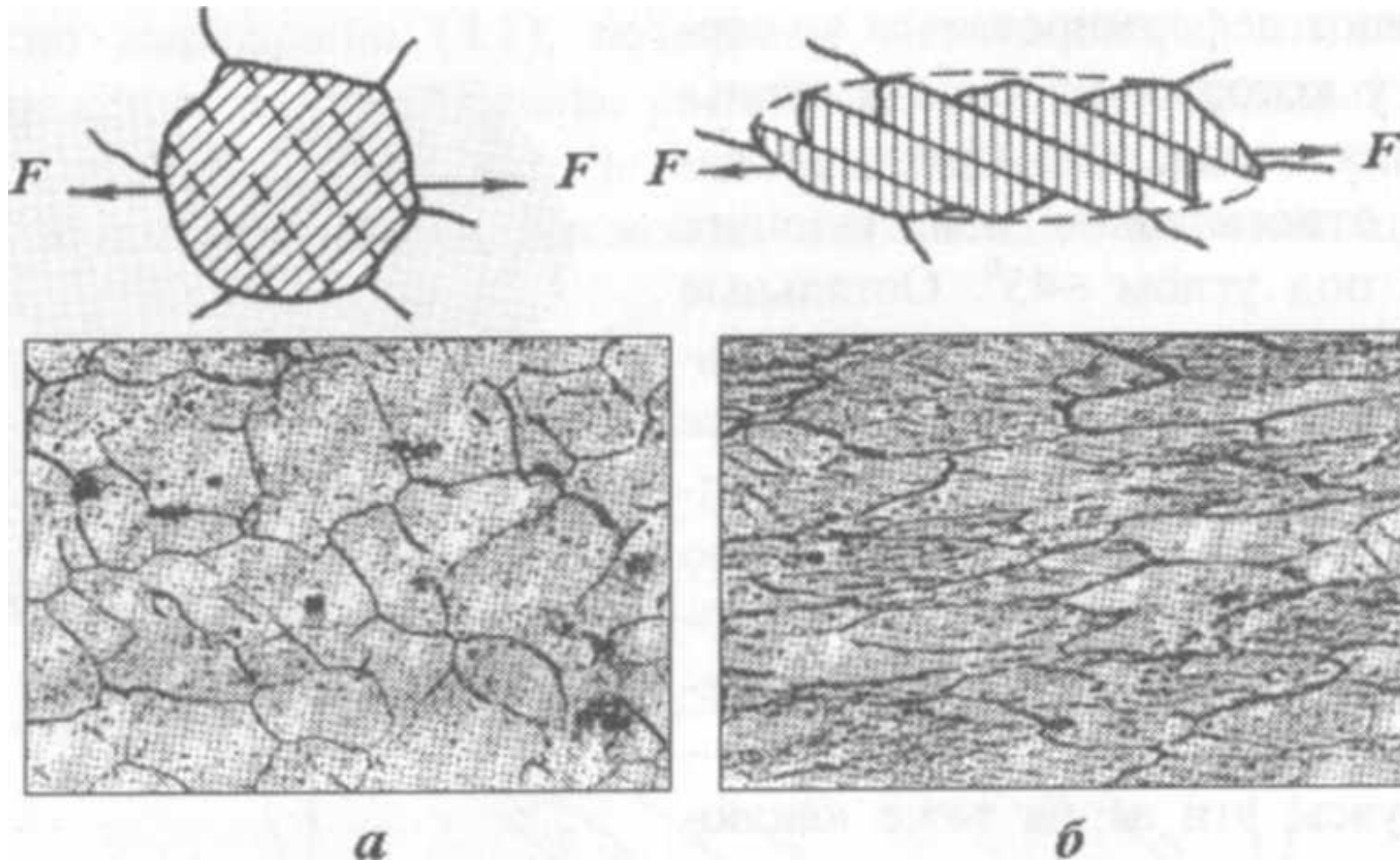


Рис. 30. Три возможных направления скольжения в  $\alpha$ -железе; преимущественным является  $[111]$  — самое кратчайшее





**Форма зерен поликристаллического металла:**

**а - до деформации; б - после деформации**

**Формирование кристаллографической текстуры в металлах, имеющих решетку ГПУ, проходит при меньших деформациях, чем в металлах с решетками ОЦК или ГЦК.**

## Лекция 4 Деформация, механические свойства и разрушение металлов

**Как показывают рентгеноструктурные исследования, даже после значительной пластической деформации металлические образцы сохраняют свое кристаллическое строение (решетку). Тем не менее, в кристаллах возникает большое количество дефектов, которые серьезно влияют на физико-механические свойства материала: увеличивают его прочность и электросопротивление, уменьшают пластичность и плотность, изменяют магнитные, диффузионные и коррозионные свойства.**

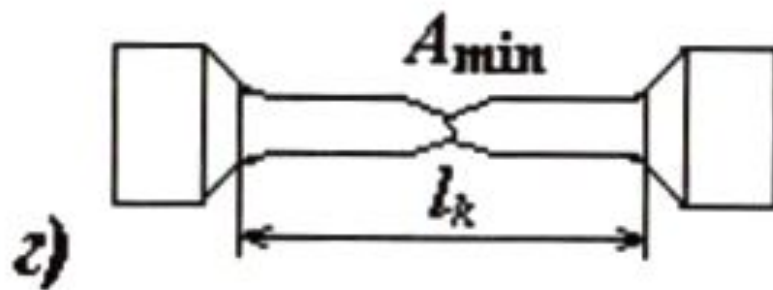
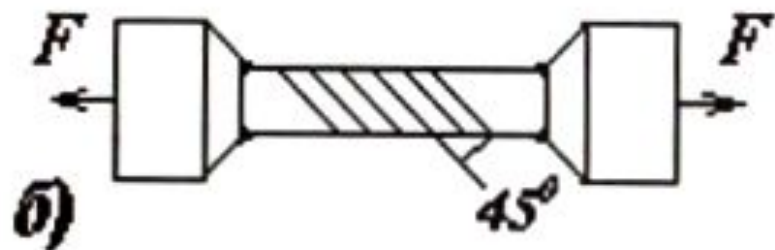
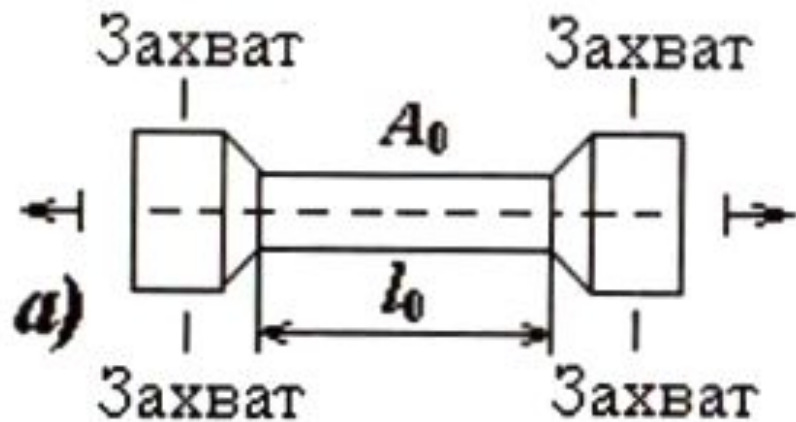
**Конструкционной прочностью** называется комплекс механических свойств, обеспечивающих **надёжную** и **длительную** работу материала в условиях эксплуатации

Виды механических испытаний – **статические, динамические.**

**Статические** - испытания на растяжение, сжатие, изгиб, ползучесть, твёрдость.

**Динамические** – испытания на ударную вязкость, усталостные испытания.

## Лекция 4 Деформация, механические свойства и разрушение металлов



**Форма образца на разных стадиях испытания:**

**а) до испытания, б) на стадии пластической деформации, в) при образовании шейки, г) после разрыва**

## **Лекция 4 Деформация, механические свойства и разрушение металлов**

**Предел упругости,  $\sigma_y$**  – напряжение, соответствующее появлению остаточных деформаций, определённой заданной величины (0,001; 0,003; 0,005%); допуск на остаточную деформацию указывается в индексе при  $\sigma_y$ .

**Условный предел текучести** – условное напряжение, при котором остаточная деформация достигает определённой величины (обычно 0,2% от рабочей длины образца –  $\sigma_{0,2}$ ).

**Физический предел текучести,  $\sigma_m$**  – условное напряжение, соответствующее наименьшей нагрузке площадки текучести, когда деформация образца происходит без увеличения нагрузки.

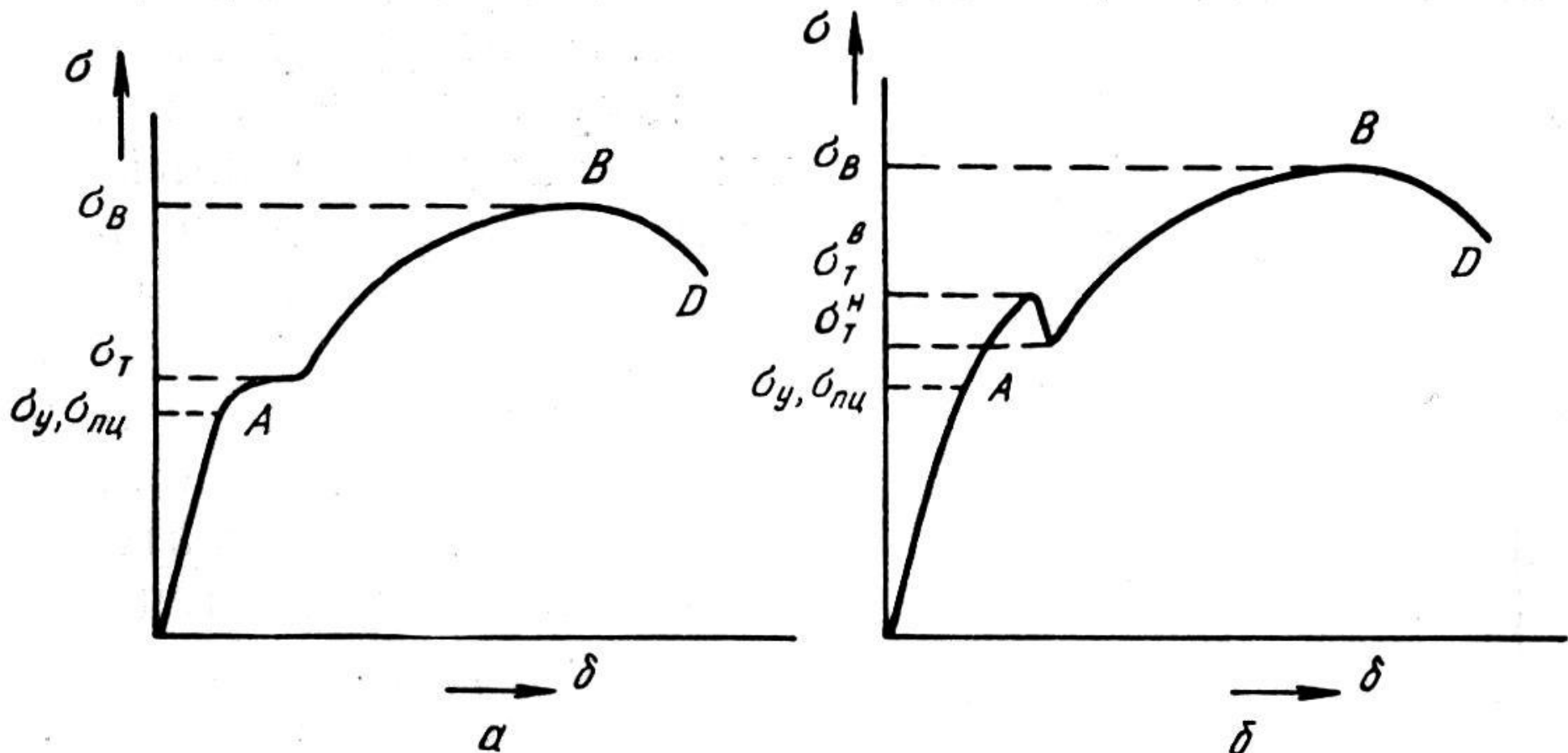
## Лекция 4 Деформация, механические свойства и разрушение металлов

**Предел прочности,  $\sigma_v$**  – условное напряжение, соответствующее наибольшей нагрузке, выдерживаемой образцом.

**Относительное остаточное удлинение,  $\delta$**  – характеристика пластичности материала,  $\delta = (L_k - L_0)/L_0$ .

**Относительное остаточное сужение,  $\psi$**  - характеристика пластичности

Лекция 4 Деформация, механические свойства и разрушение металлов



**Диаграмма растяжения металлов, дающих площадку (а) и зуб (б) текучести**

## Лекция 4 Деформация, механические свойства и разрушение металлов

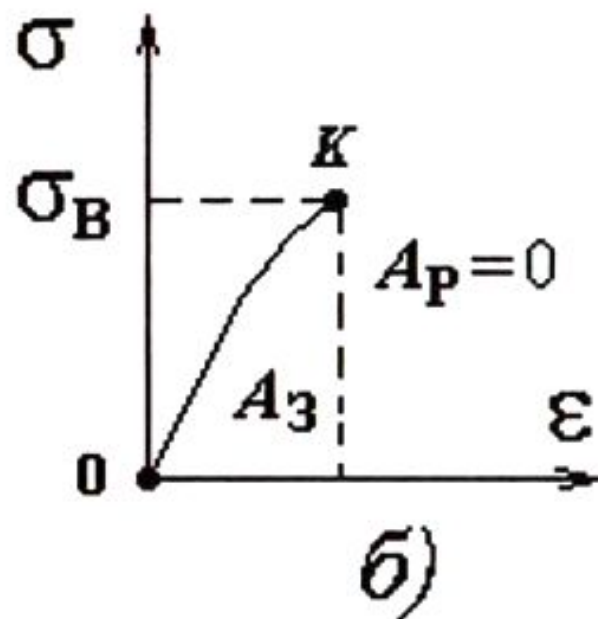
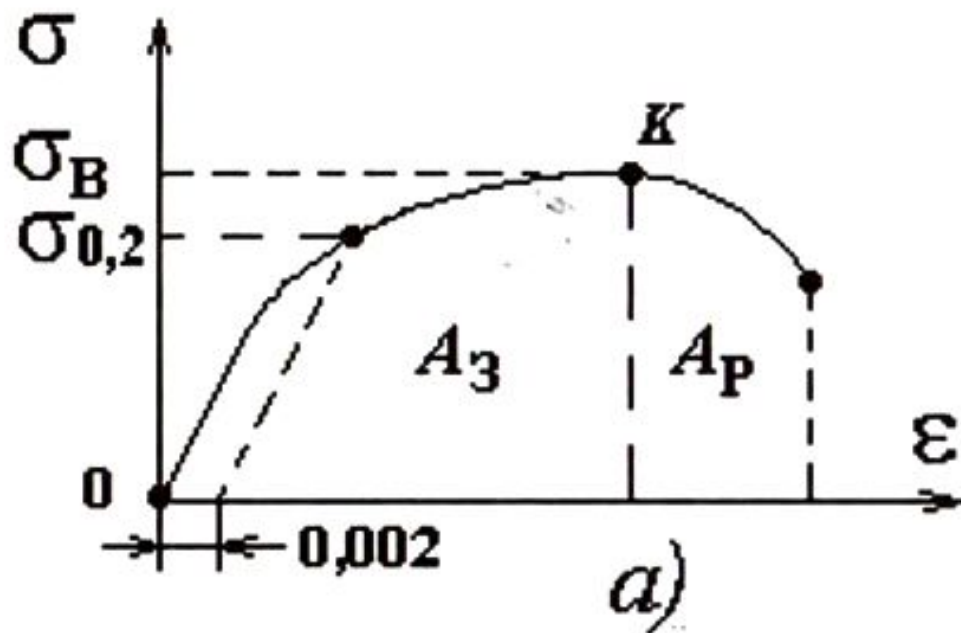


Упрочнение металла в результате пластической деформации называют наклепом или нагартовкой



## Лекция 4 Деформация, механические свойства и разрушение металлов

**Разрушение** – разделение материала на части в результате распространения в нём трещин. Выделяют четыре типа разрушения: 1) хрупкое, 2) пластичное (вязкое), 3) усталостное, 4) разрушение при ползучести

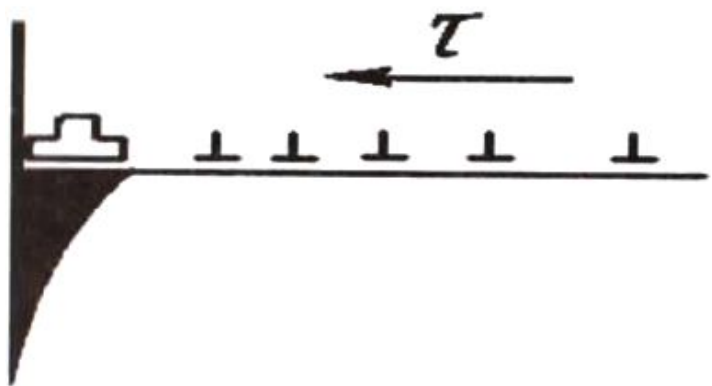


**Варианты диаграммы растяжения: а) высокопластичный (вязкий) металл, б) низкопластичный (хрупкий) металл**

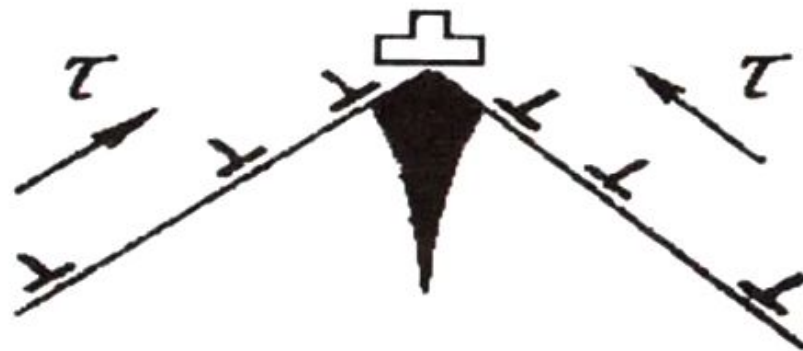
## Лекция 4 Деформация, механические свойства и разрушение металлов

Разрушающие трещины возникают на стадии изготовления изделий или появляются в процессе их эксплуатации. Дефекты первого вида называются *технологическими*, второго рода – *эксплуатационными*. Даже в таких ответственных изделиях как оболочки тепловыделяющих элементов атомных реакторов размер технологических трещин достигает 50 мкм при изначальной толщине изделий 600-900 мкм!

Лекция 4 Деформация, механические свойства и разрушение металлов



***а***



***б***

**Образование трещины в результате слияния дислокаций**

## Лекция 4 Деформация, механические свойства и разрушение металлов

### Уравнения Гриффитса

$$\sigma_G = \left( \frac{2\gamma_s E}{\pi C} \right)^{1/2} \approx \left( \frac{\gamma_s E}{C} \right)^{1/2}.$$

Критическое напряжение роста острой трещины длиной  $2C$  ( $C$  – радиус трещины) – хрупкое разрушение

$$\sigma_G = \left( \frac{\gamma_p E}{C} \right)^{1/2}.$$

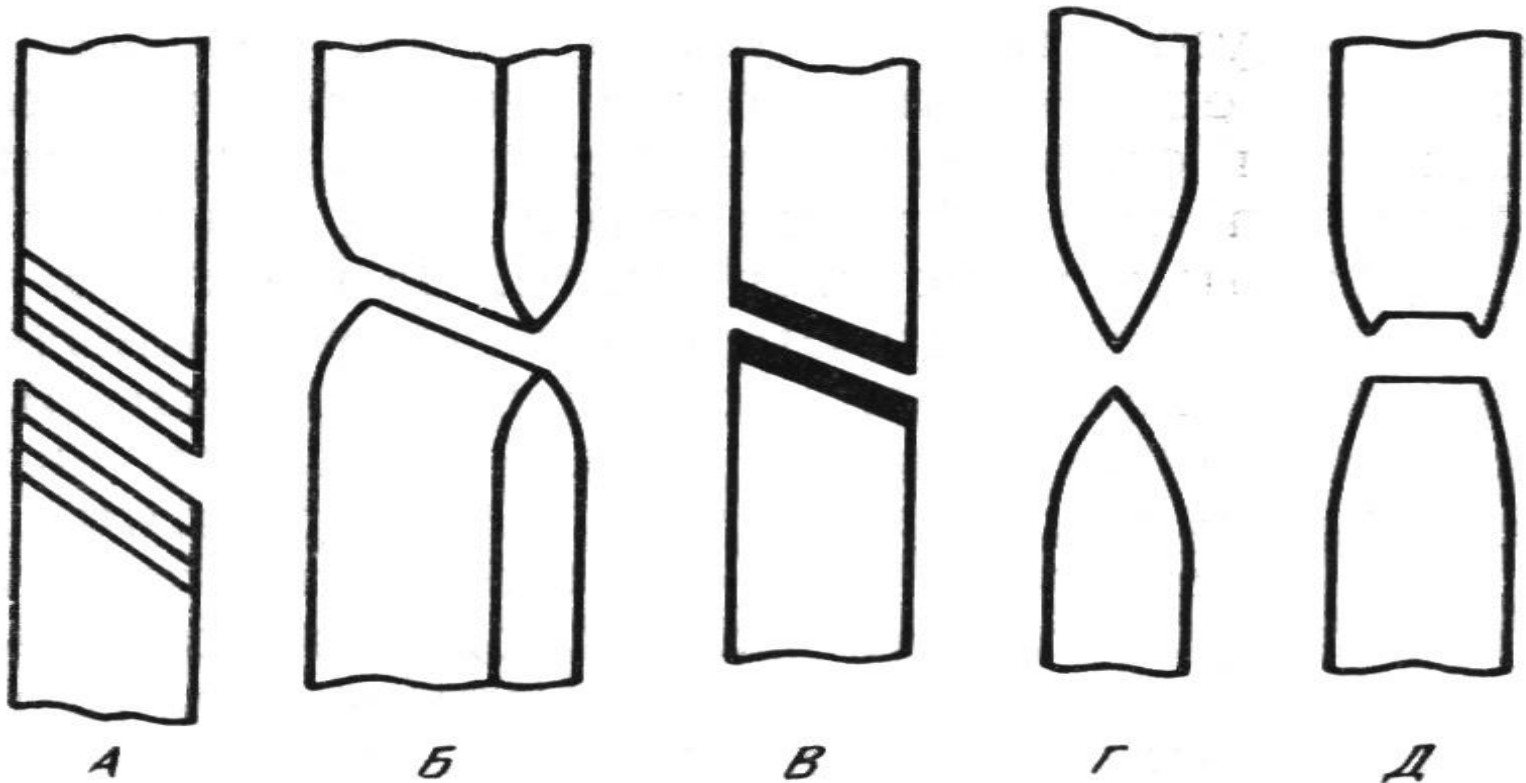
Критическое напряжение трещины для вязкого разрушения; величина  $\gamma_p$  представляет собой сумму истинной поверхностной энергии и энергии, затраченной на пластическую деформацию

**Скорость распространения трещины в  
некоторых материалах ( $\times 10^5$  см/сек)**

**в скобках – расчётные значения**

Сталь . . . . .	1,0—1,8 (2,0)
Стекло . . . . .	1,5—2,0 (1,0)
Ацетатная целлюлоза . . . . .	0,3 (0,4)
Облученный полиэтилен . . . . .	0,05—0,09 (0,05)
Силиконовая резина . . . . .	0,007—0,008 (0,008)

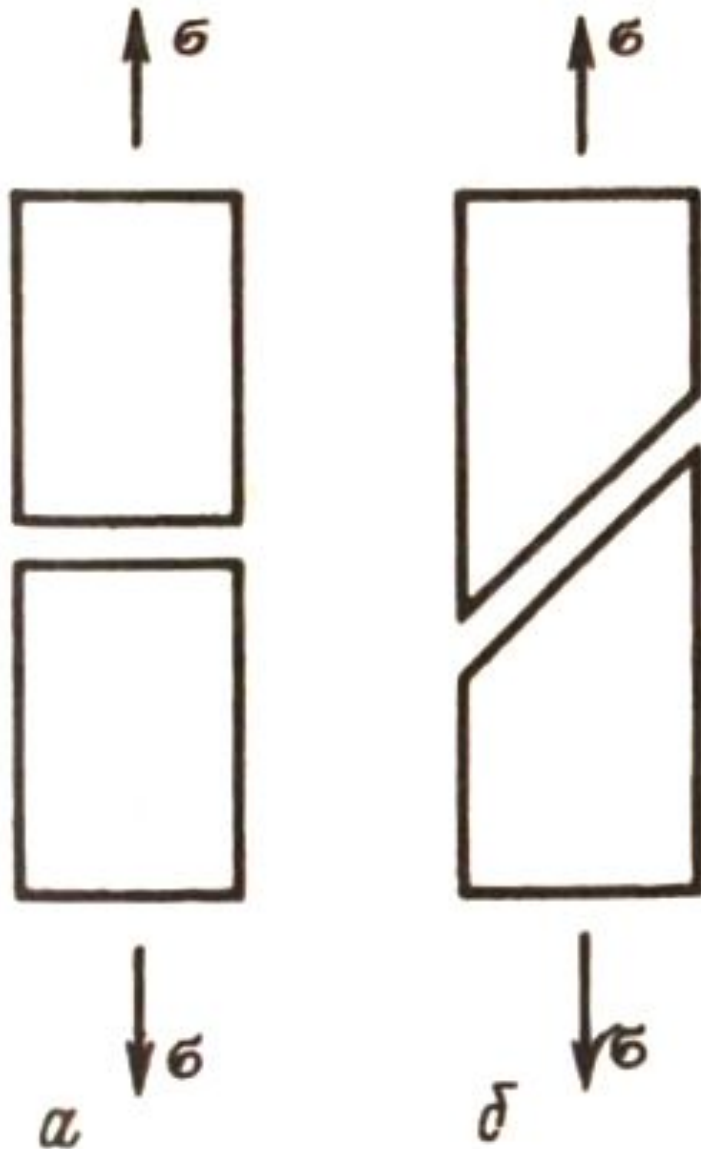
## Лекция 4 Деформация, механические свойства и разрушение металлов



### *Типы пластического разрушения:*

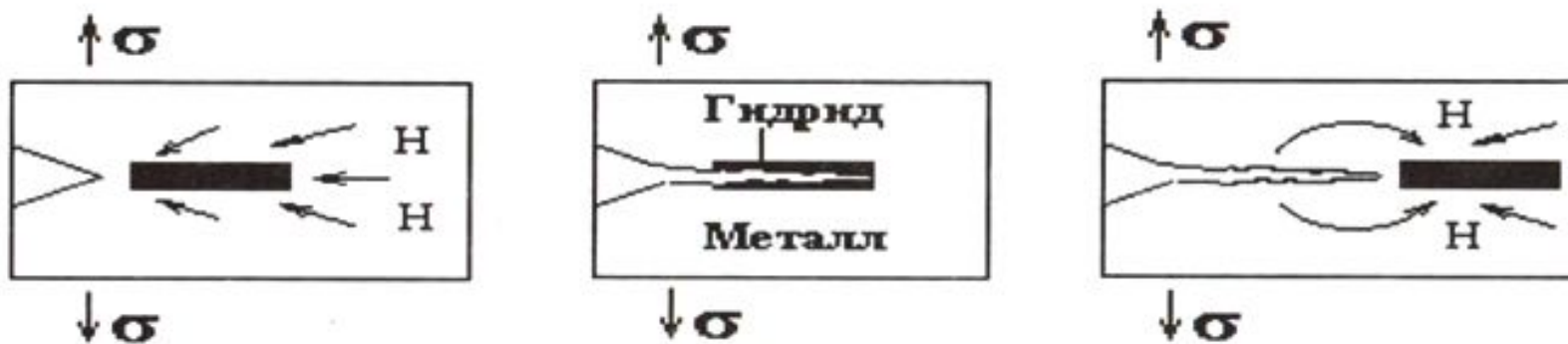
- А** – монокристаллы ГПУ-металлов,
- Б** – монокристаллы некоторых ГЦК-металлов (медь, серебро),
- В** – сплав медь-алюминий,
- Г** – поликристаллы высокопластичных ГЦК-металлов,
- Д** – менее пластичные поликристаллы (наиболее типичный излом)

Лекция 4 Деформация, механические свойства и разрушение металлов

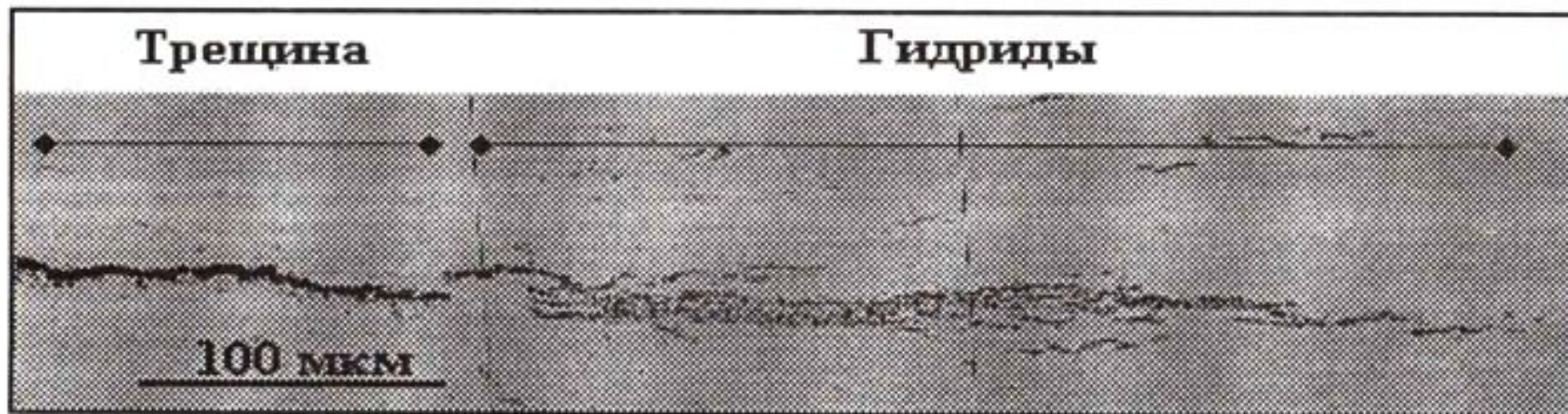


**Типы хрупкого  
разрушения:  
а) отрывом,  
б) срезом**

## Лекция 4 Деформация, механические свойства и разрушение металлов



**Схема замедленного гидридного растрескивания**



**Гидриды у вершины трещины в наводороженном циркониевом сплаве**



## Лекция 4 Деформация, механические свойства и разрушение металлов

**Вязкость** – способность металла или сплава поглощать работу внешних сил за счёт пластической его деформации.

**Усталость** – процесс постепенного накопления повреждений под действием циклических нагрузок. Различают малоцикловую ( $\sim 10^4$ ) и многоцикловую ( $\sim 10^6$ ) усталость.

**Ползучесть** – непрерывная пластическая деформация, происходящая при постоянной температуре и постоянном напряжении (постоянной нагрузке) в зависимости от времени.

## Лекция 4 Деформация, механические свойства и разрушение металлов

**Жаропрочность** — это способность металлического материала сопротивляться деформации и разрушению при кратковременном или длительном воздействии нагрузок при повышенных температурах.

**Твёрдость** – свойство материала сопротивляться пластической деформации при внедрении в него более твёрдого тела (**индентора**).

**Предел выносливости или усталости** – максимальное напряжение, при котором материал может выдержать, не разрушаясь, неограниченное число циклов нагружения.

## Лекция 4 Деформация, механические свойства и разрушение металлов

**Хладноломкость** – способность материалов хрупко разрушаться при низких температурах, усиливающаяся с понижением температуры.

**Красноломкость** – охрупчивание сплавов при высоких температурах или горячем деформировании, вызванное оплавлением границ зёрен.

**Ударная вязкость (КС)** – работа удара, отнесённая к начальной площади поперечного сечения в месте расположения концентратора; характеризует сочетание прочностных свойств и пластичности материала – *вязкость разрушения* или *трещиностойкость*, т.е. способность материала сопротивляться распространению острых трещин.

# Лекция 4 Деформация, механические свойства и разрушение металлов

## Усталость

```
graph TD; A[Усталость] --> B[Усталостное поведение деталей, не содержащих трещин]; A --> C[Усталостное поведение деталей, содержащих трещины]; B --> D[Высокоцикловое усталостное поведение]; B --> E[Низкоцикловое усталостное поведение];
```

### Усталостное поведение деталей, не содержащих трещин

Разрушение лимитируется инициацией трещины. Примеры: мелкие детали типа шпилек валков, шарикоподшипников качения, зубцов сцепления, осей, коленчатых валов, ведущих валов

### Усталостное поведение деталей, содержащих трещины

Разрушение лимитируется распространением трещин. Примеры: крупногабаритные конструкции, особенно если имеются сварные швы в мостах, судах, сосудов высокого давления

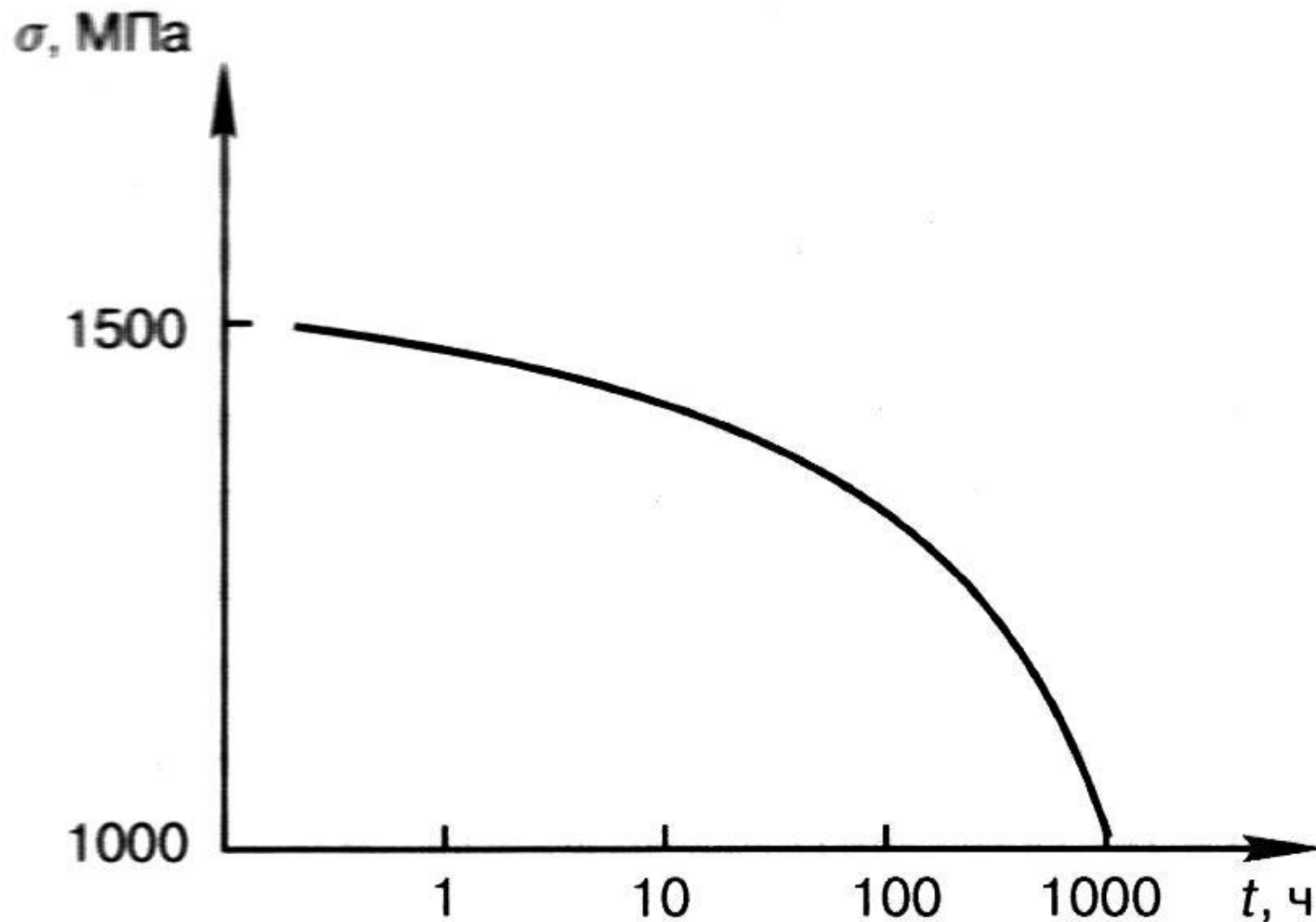
### Высокоцикловое усталостное поведение

Разрушение при напряжении ниже предела текучести. Количество циклов до разрушения  $\gtrsim 10^4$ . Примеры: вращающиеся или вибрирующие колеса, оси, детали двигателей

### Низкоцикловое усталостное поведение

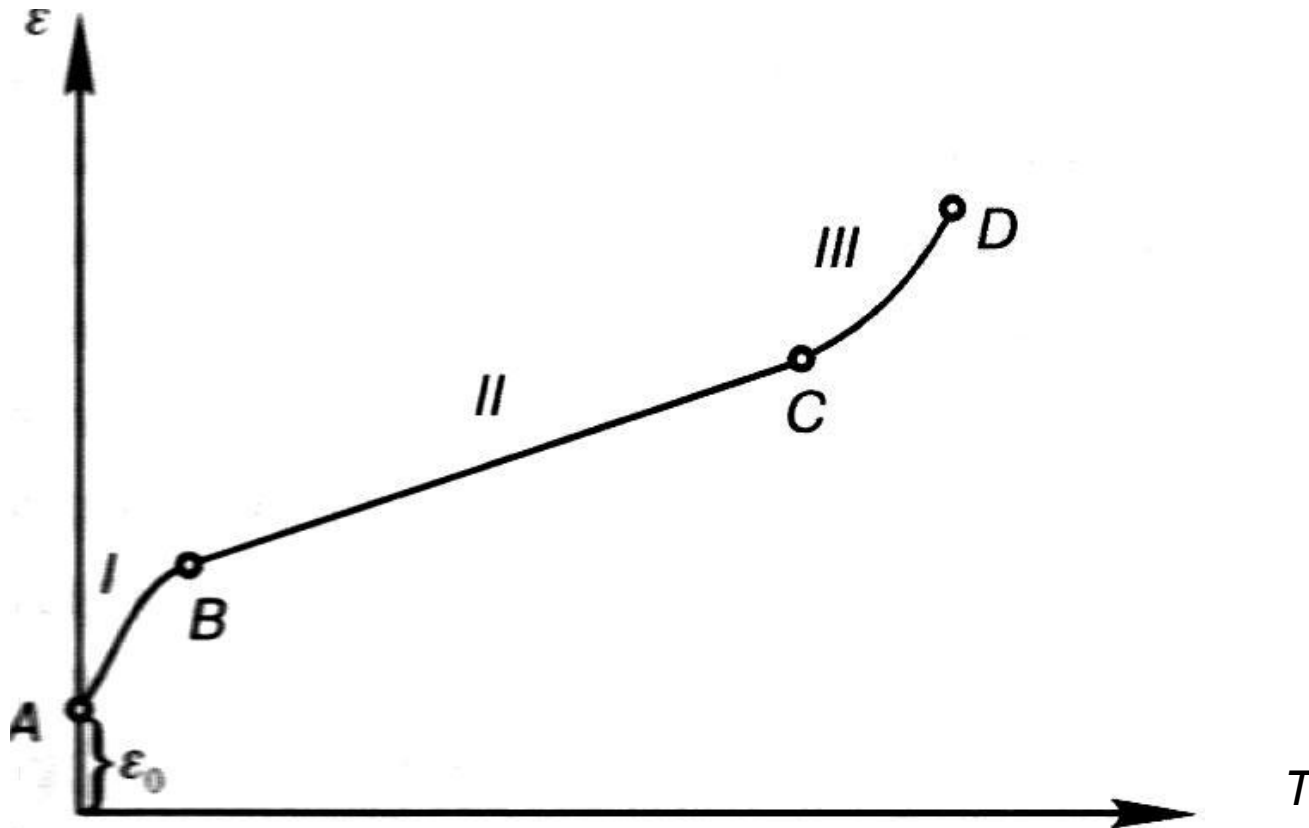
Разрушение при напряжении выше предела текучести. Количество циклов до разрушения  $\lesssim 10^4$ . Примеры: детали активной зоны ядерных реакторов, корпуса самолетов, детали турбин, детали, время от времени испытывающие перегрузки

## Лекция 4 Деформация, механические свойства и разрушение металлов



*Зависимость разрушающего напряжения при растяжении от продолжительности нагружения твёрдого материала*

## Лекция 4 Деформация, механические свойства и разрушение металлов



Типичная  
кривая  
ползучести  
твёрдого  
материала

Цифрами  $I$ – $III$  на кривой обозначены стадии ползучести. Они соответствуют участкам:  $AB$  — неуставившейся ползучести;  $BC$  — уставившейся, идущей с постоянной скоростью;  $CD$  — ускоренной ползучести; точка  $D$  — момент разрушения;  $\varepsilon_0$  — деформация образца в момент приложения нагрузки.

## Лекция 4 Деформация, механические свойства и разрушение металлов

Таблица 7.2. Характеристика некоторых видов изнашивания в подвижных сопряжениях из металлов и сплавов

Вид изнашивания	Условия трения	$I_h^*$	Пары трения	Материалы
Абразивное	В присутствии твердых частиц абразива	$10^{-5} \dots 10^{-3}$	Рабочие органы сельскохозяйственных машин; зубчатые передачи, работающие без смазки в запыленной среде; узлы дробильного оборудования	Стали, чугуны
Усталостное	В присутствии смазочного материала без абразива	$10^{-12} \dots 10^{-9}$	Подшипники качения опоры скольжения, зубчатые передачи	То же
Эрозионное	При взаимодействии металлических деталей с потоком жидкости или газа	$10^{-10} \dots 10^{-6}$	Детали энергетического оборудования, насосов, воздуходувок	Стали, чугуны, сплавы меди, титана и алюминия
Коррозионно-механическое	При колебательном движении в присутствии коррозионной среды	$10^{-8} \dots 10^{-5}$	Соединения, малоподвижные подшипники, муфты, кулачковые и шарнирные механизмы	Стали, чугуны, сплавы меди, алюминия

\*  $I_h$  — интенсивность линейного изнашивания, равна отношению толщины изношенного слоя к длине пути трения.

## Лекция 4 Деформация, механические свойства и разрушение металлов

Таблица 7.1. Характеристика методов измерения твердости металлов и сплавов

Метод измерения	Вид индентора	Диапазон нагрузок, Н	Измеряемый параметр	Объект измерения	ГОСТ
По Бринеллю:  НВ	Стальной шарик Ø, мм: 10 5 2,5	2500...30 000 625...7500 156...1875	Площадь отпечатка	Образцы металлов толщиной не менее 10 глубин, измерения твердости методом вдавливания	9012—59
По Роквеллу: HRC  HRA HRB	Алмазный конус  То же Стальной шарик	1500  600 1000	Глубина отпечатка То же То же	Закаленные стали, покрытия  Твердые сплавы, покрытия Мягкие стали, цветные металлы и сплавы	9013—59
По Виккерсу:  HV	Четырехгранная алмазная пирамида с углом 60°	10...1200	Площадь отпечатка	Образцы металлов с покрытиями малой толщины	2999—75
Микротвердость	То же	0,5...5	То же	Структурные составляющие металлов и сплавов	9450—76
Пластическая твердость	Стальной шарик	1000...3000	Глубина отпечатка	Образцы металлов	18835—73



## *Задание 30.09.20*

Коэффициент Пуассона пробки равен 0, каучуковой пробки – 0,5. Какую пробку легче протолкнуть в горлышко бутылки?