

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

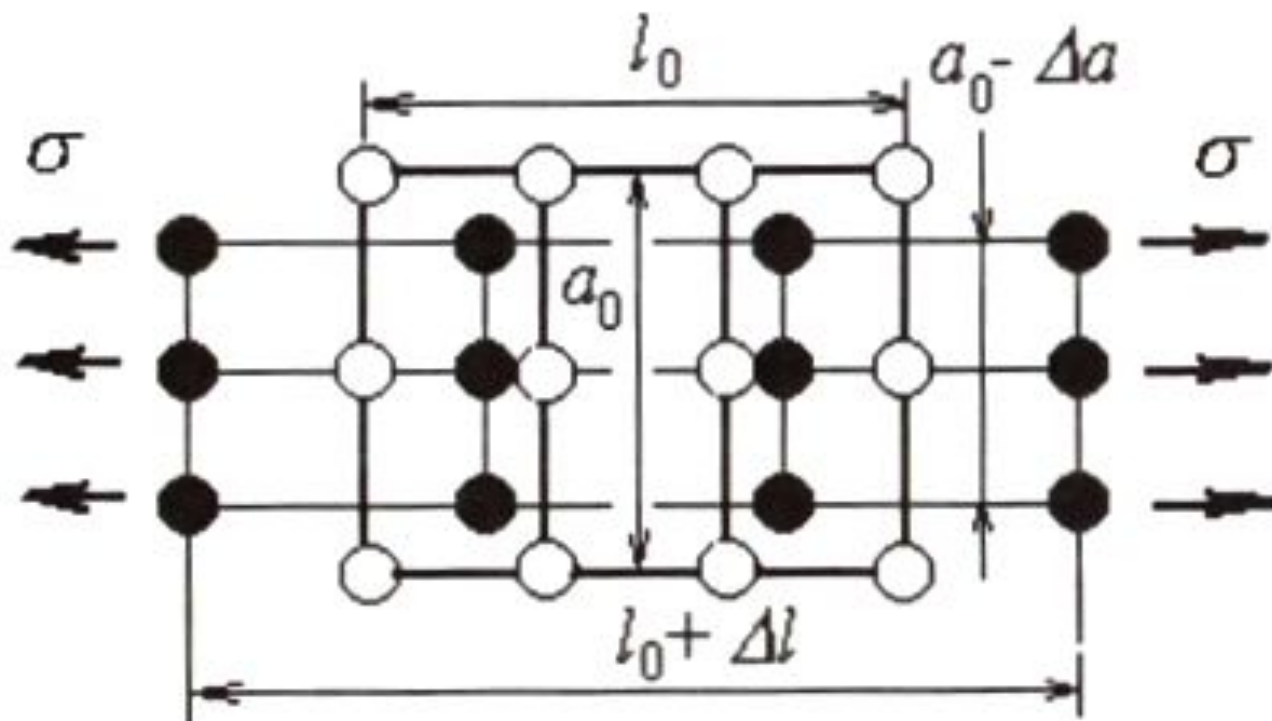
Деформация кристаллического тела бывает ***упругой*** и ***пластической***. Упругой называют такую деформацию, которая полностью исчезает после снятия нагрузки, т.е. является ***обратимой***.

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



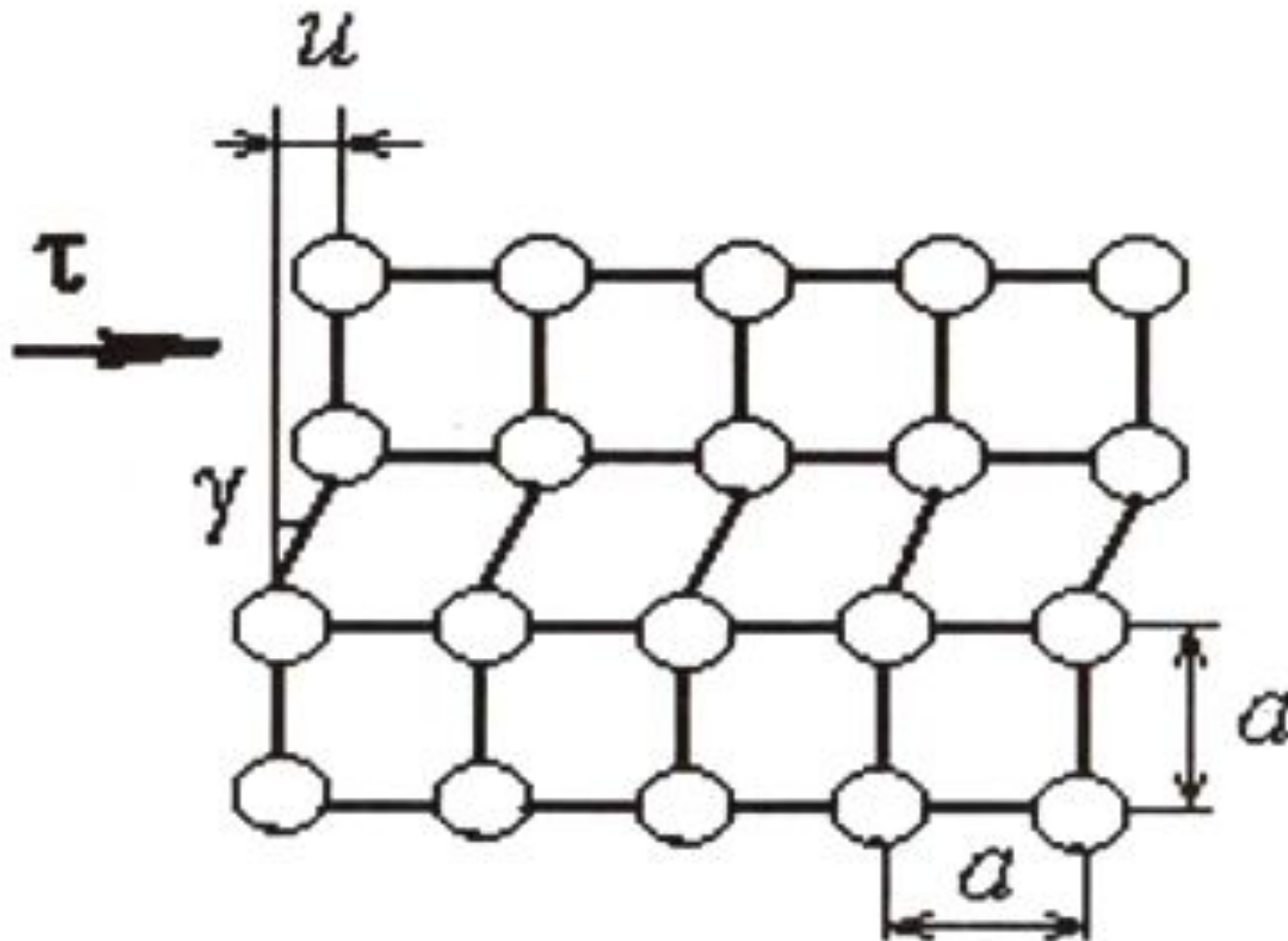
Упругое
растяжение
кристалла

$\sigma = E\varepsilon$, 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



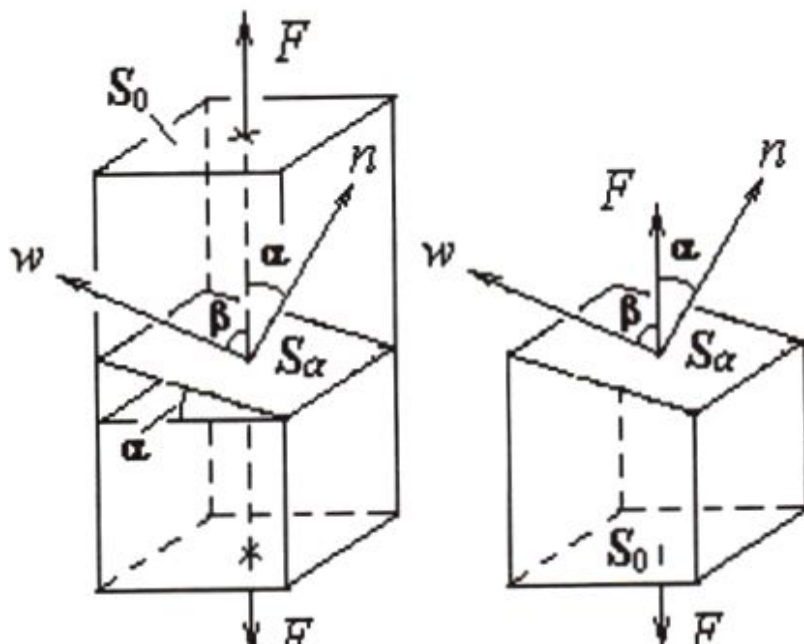
Упругий
сдвиг в
кристалле

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

Лекция 4 Деформация, механические свойства и разрушение металлов

$\epsilon' = \mu \epsilon$, μ – 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*

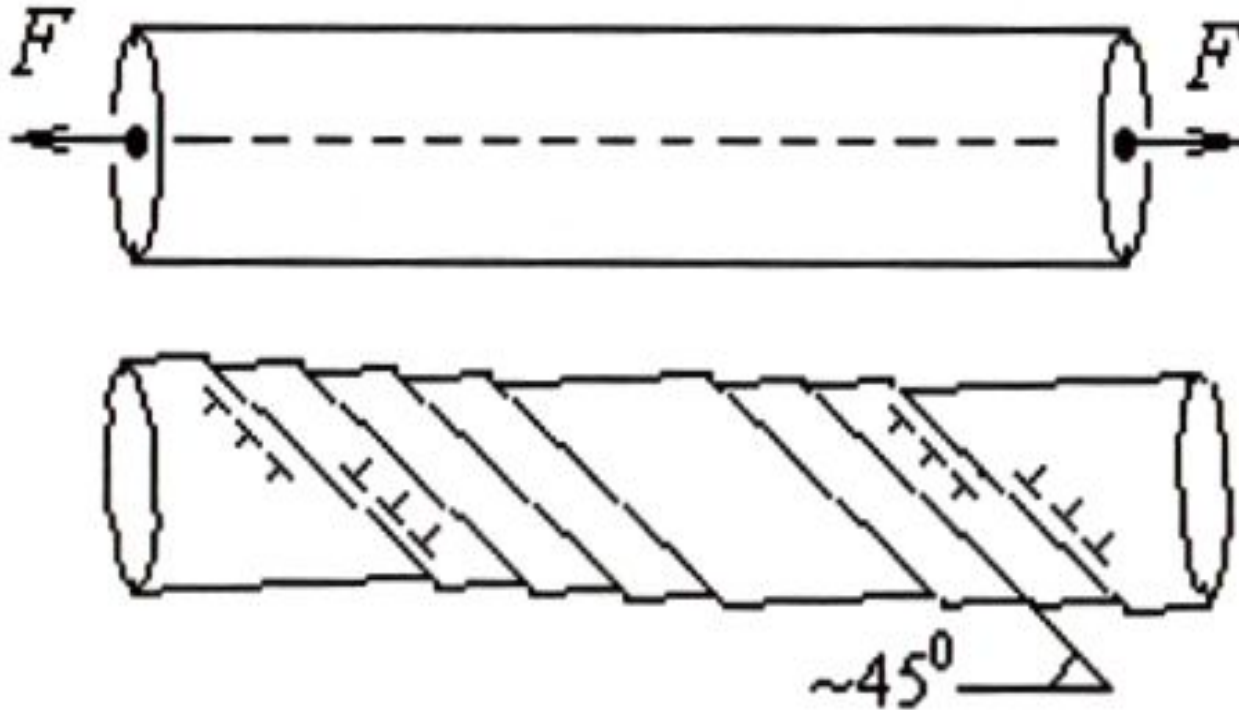
$$P = \frac{F}{S_\alpha} = \sqrt{(\sigma)^2 + (\tau)^2} = \frac{F \cos \alpha}{S_0},$$

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

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

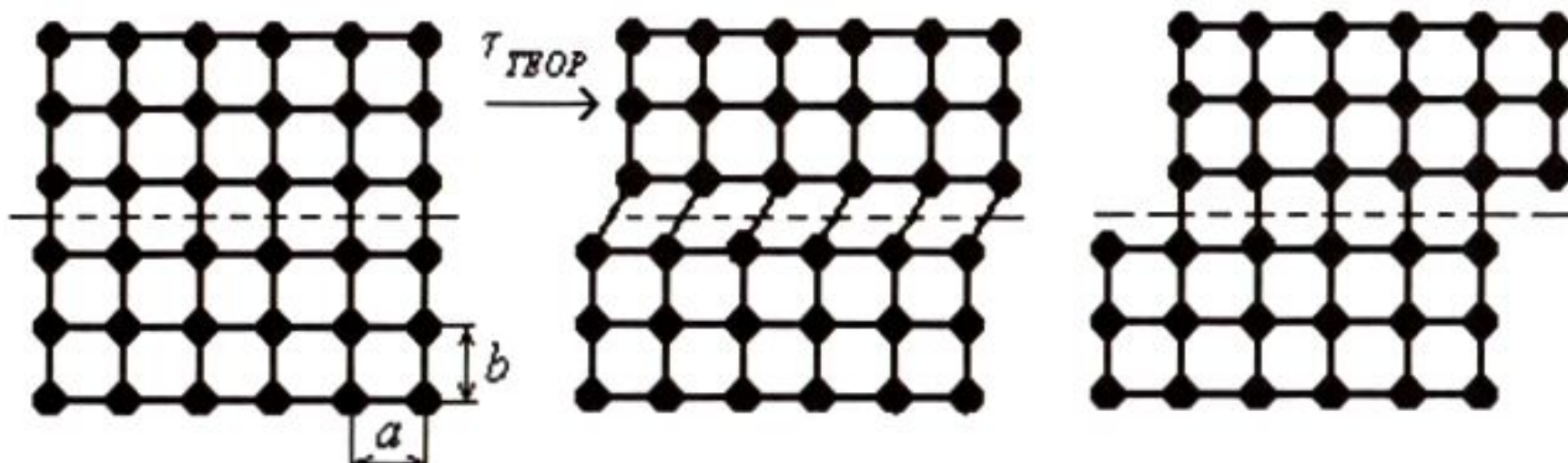
*Расчёт нормальных и
касательных напряжений в
кристалле*

Лекция 4 Деформация, механические свойства и разрушение металлов



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

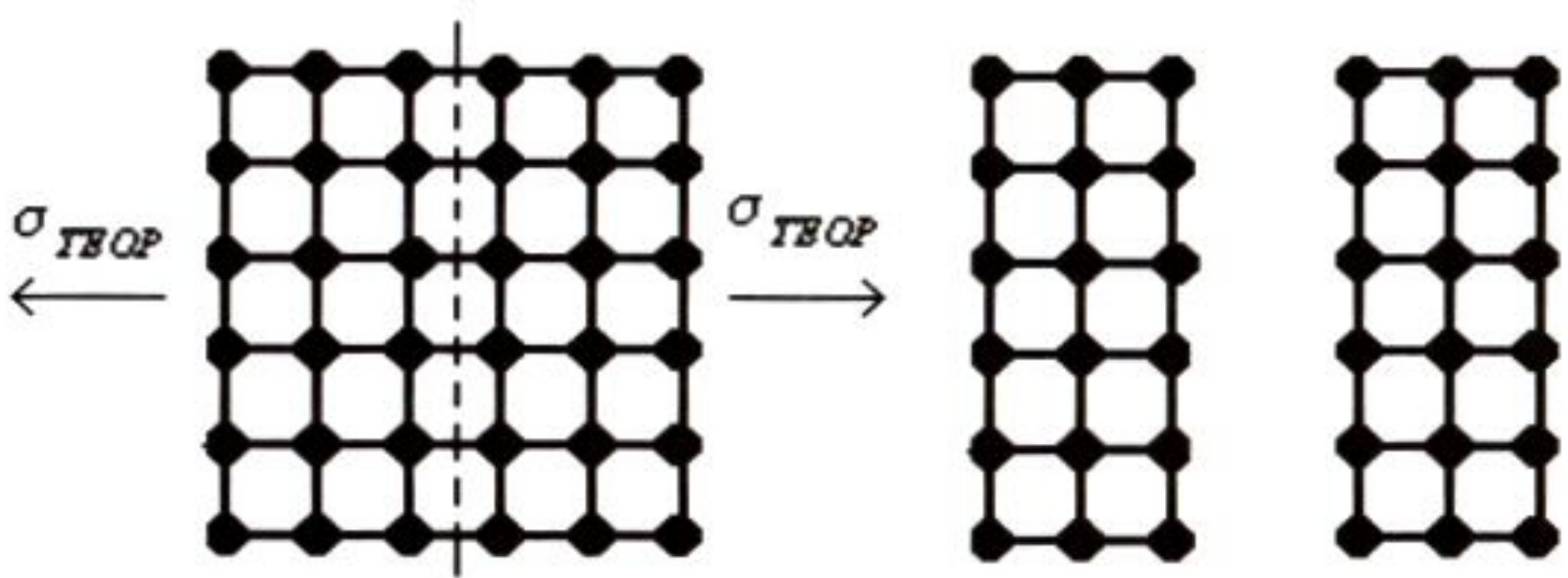
Лекция 4 Деформация, механические свойства и разрушение металлов



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

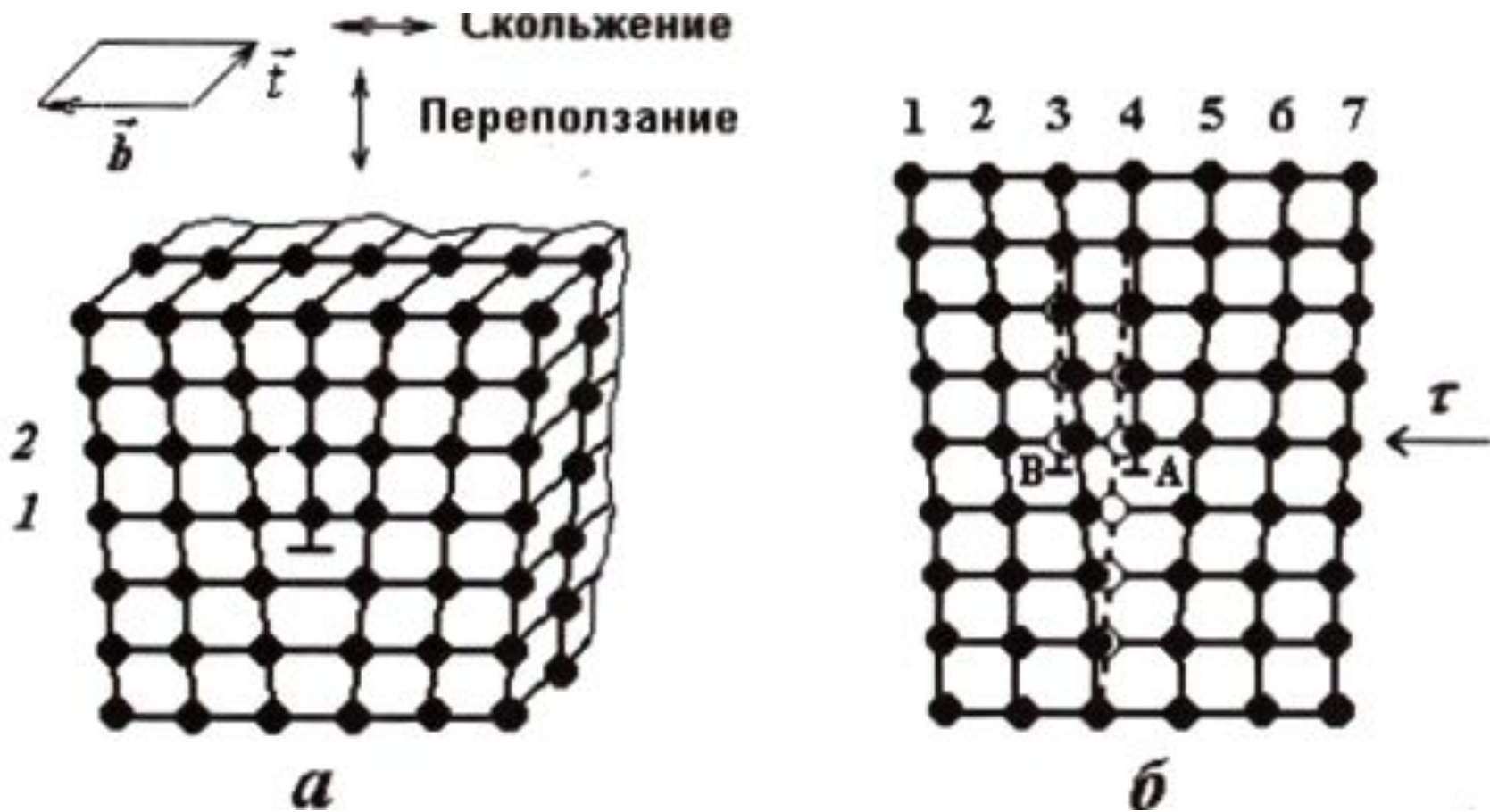
Железо высокой чистоты, монокристалл – 50 МПа

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.

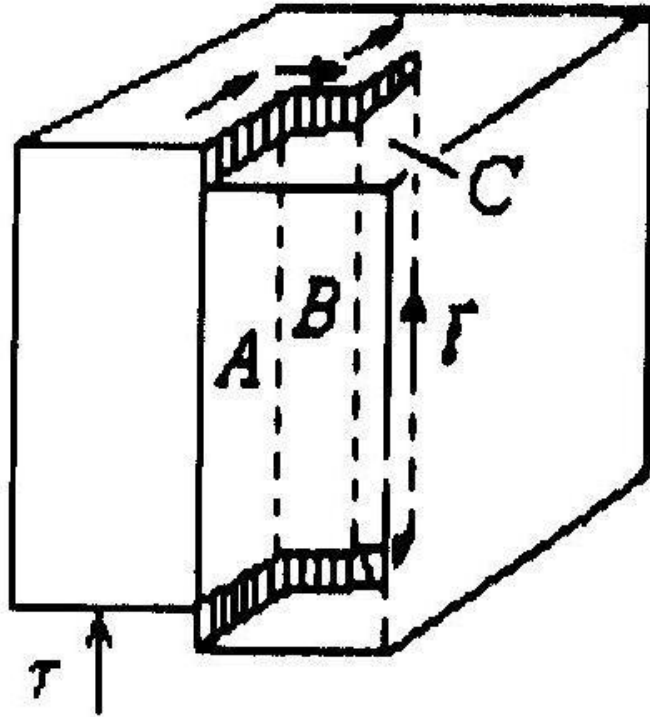
Согласно современным представлениям, ***пластическая деформация*** металлических материалов тесно связана с перемещением дислокаций. Различают два вида движения дислокаций - ***скольжение и переползание.***

Лекция 4 Деформация, механические свойства и разрушение металлов



Движение краевой дислокации

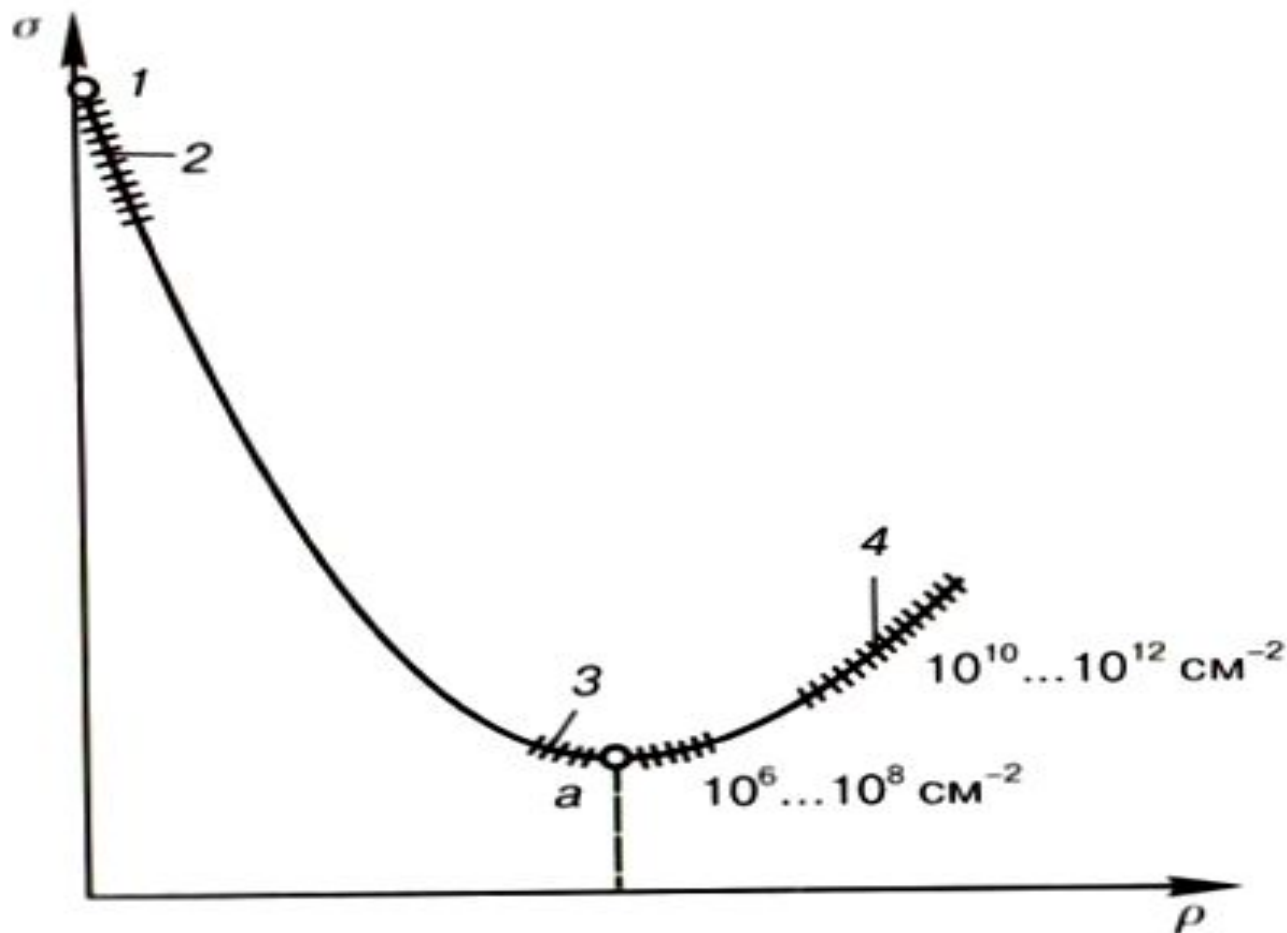
τ - касательное напряжение



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

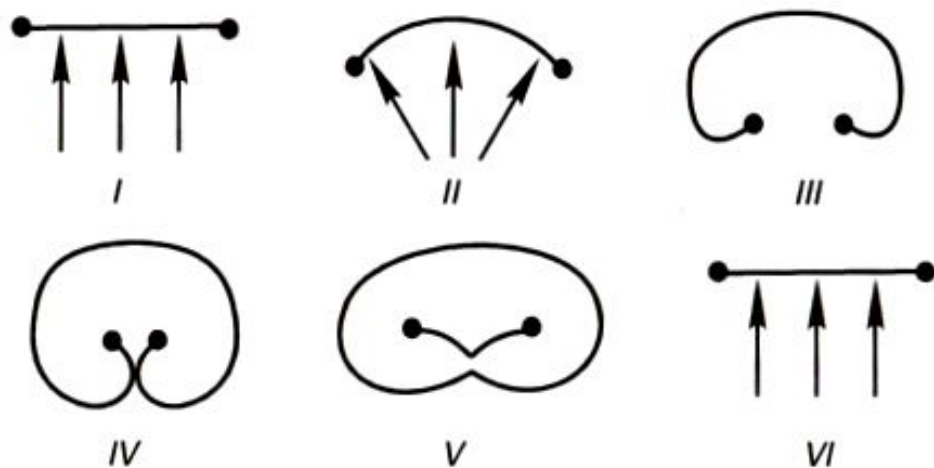
Рис. 4.9. Поперечное скольжение винтовой дислокации

Лекция 4 Деформация, механические свойства и разрушение металлов



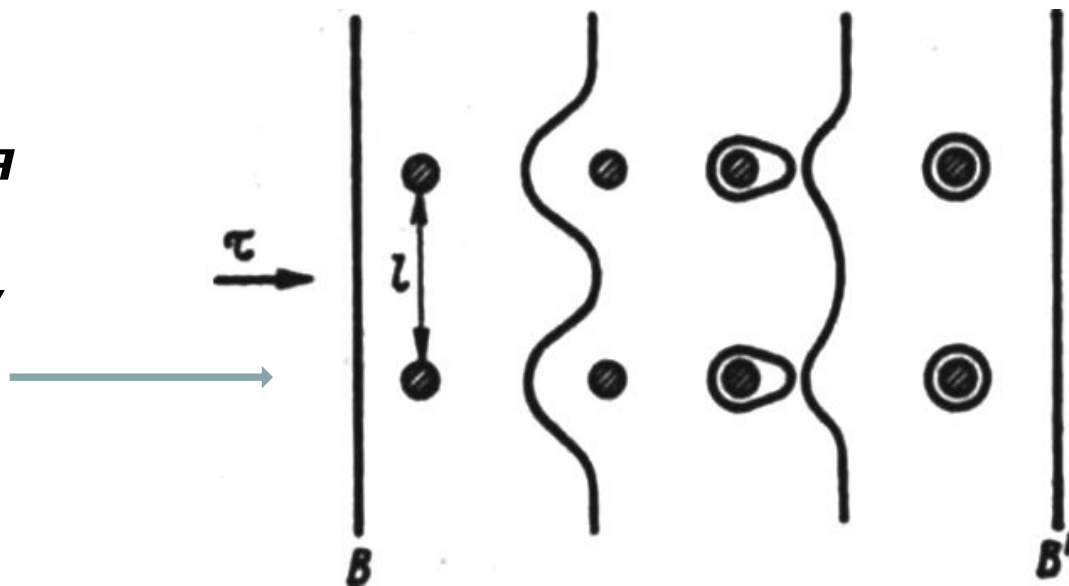
Зависимость сопротивления металла деформации от плотности дислокаций в кристаллической решётке: 1 – теоретическая прочность, 2 – прочность монокристаллических «усов», 3 – прочность чистого неупрочнённого металла, 4 – прочность упрочнённых металлических сплавов

Лекция 4 Деформация, механические свойства и разрушение металлов



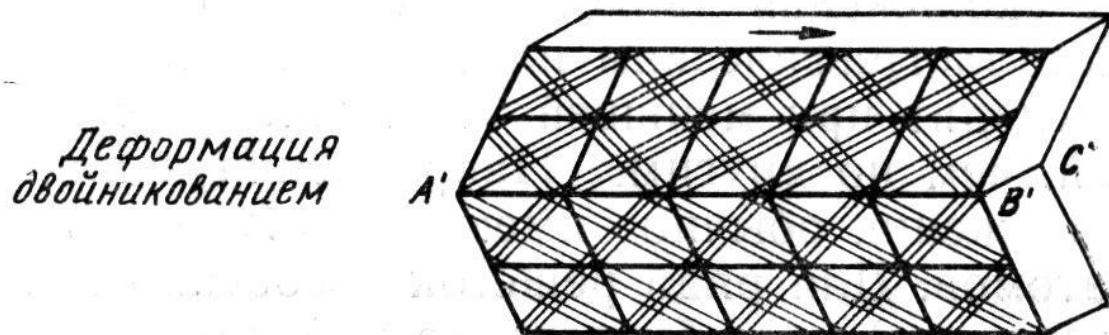
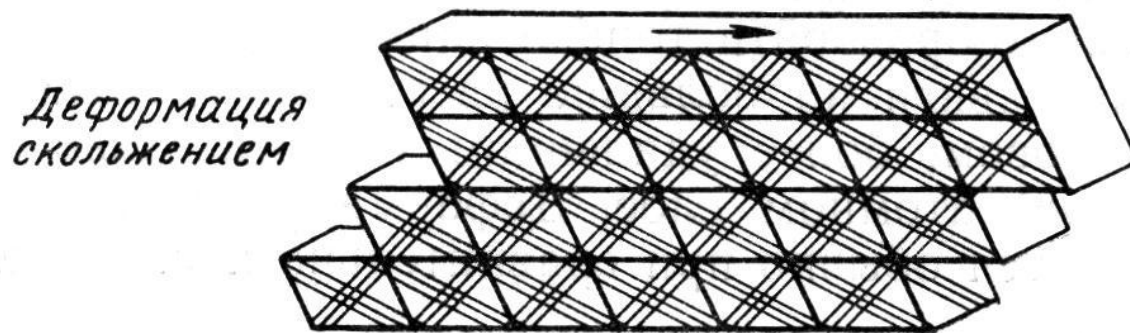
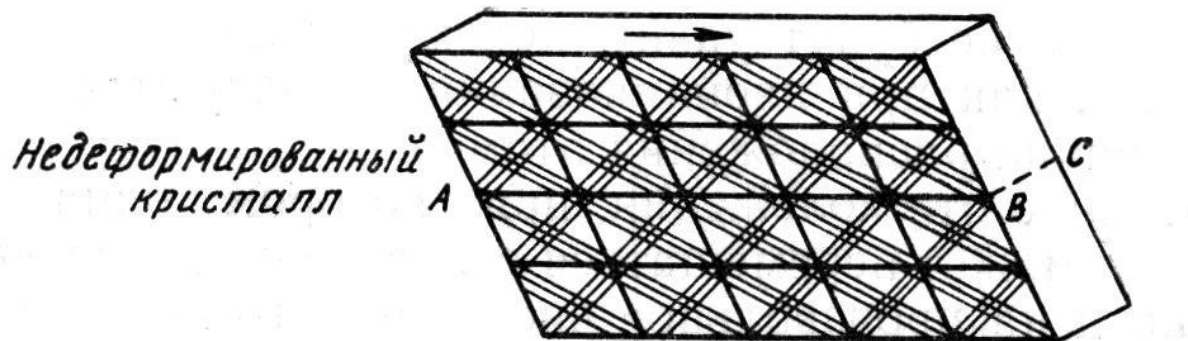
Стадии образования дислокации по механизму Франка-Рида

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

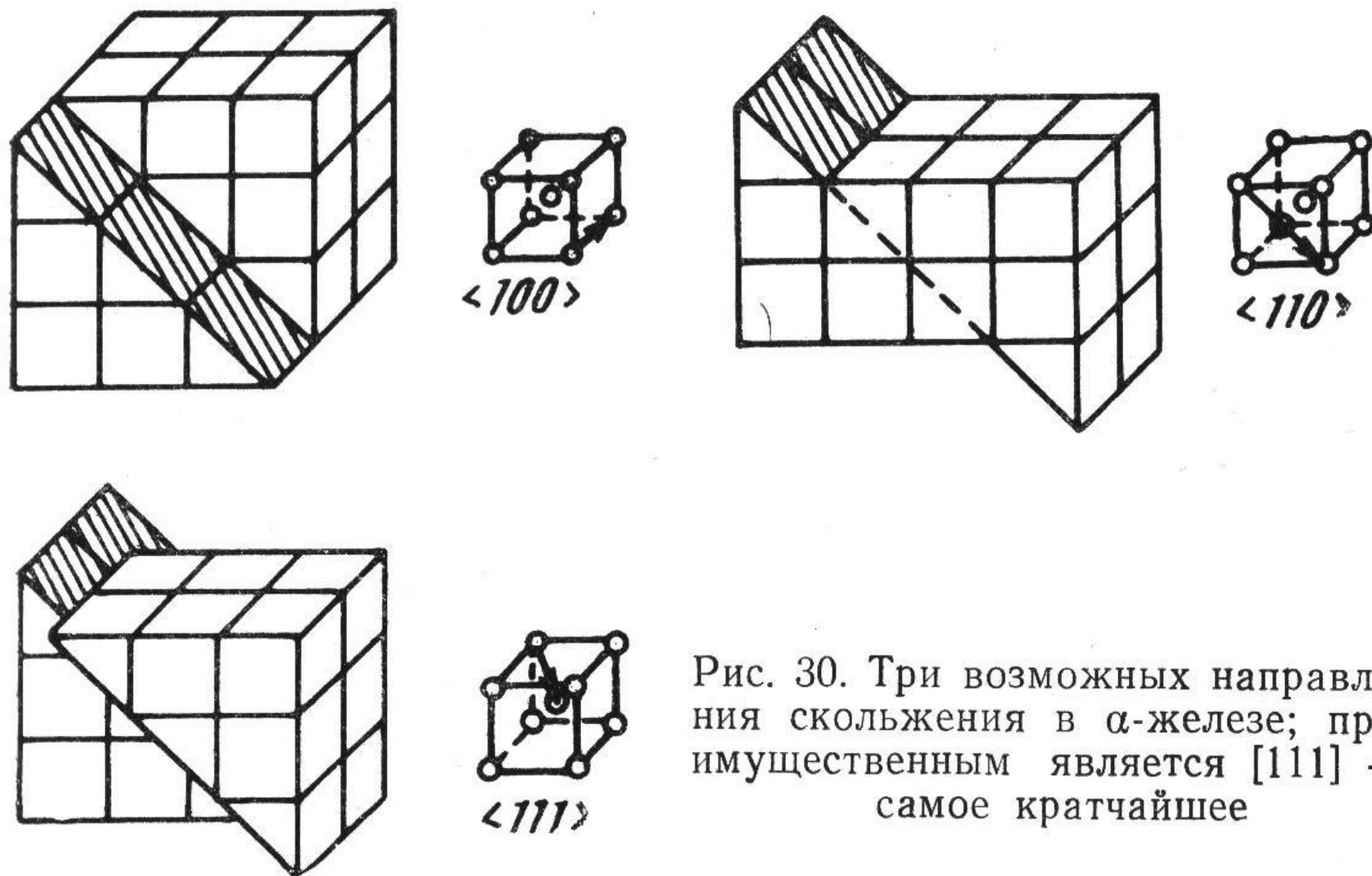
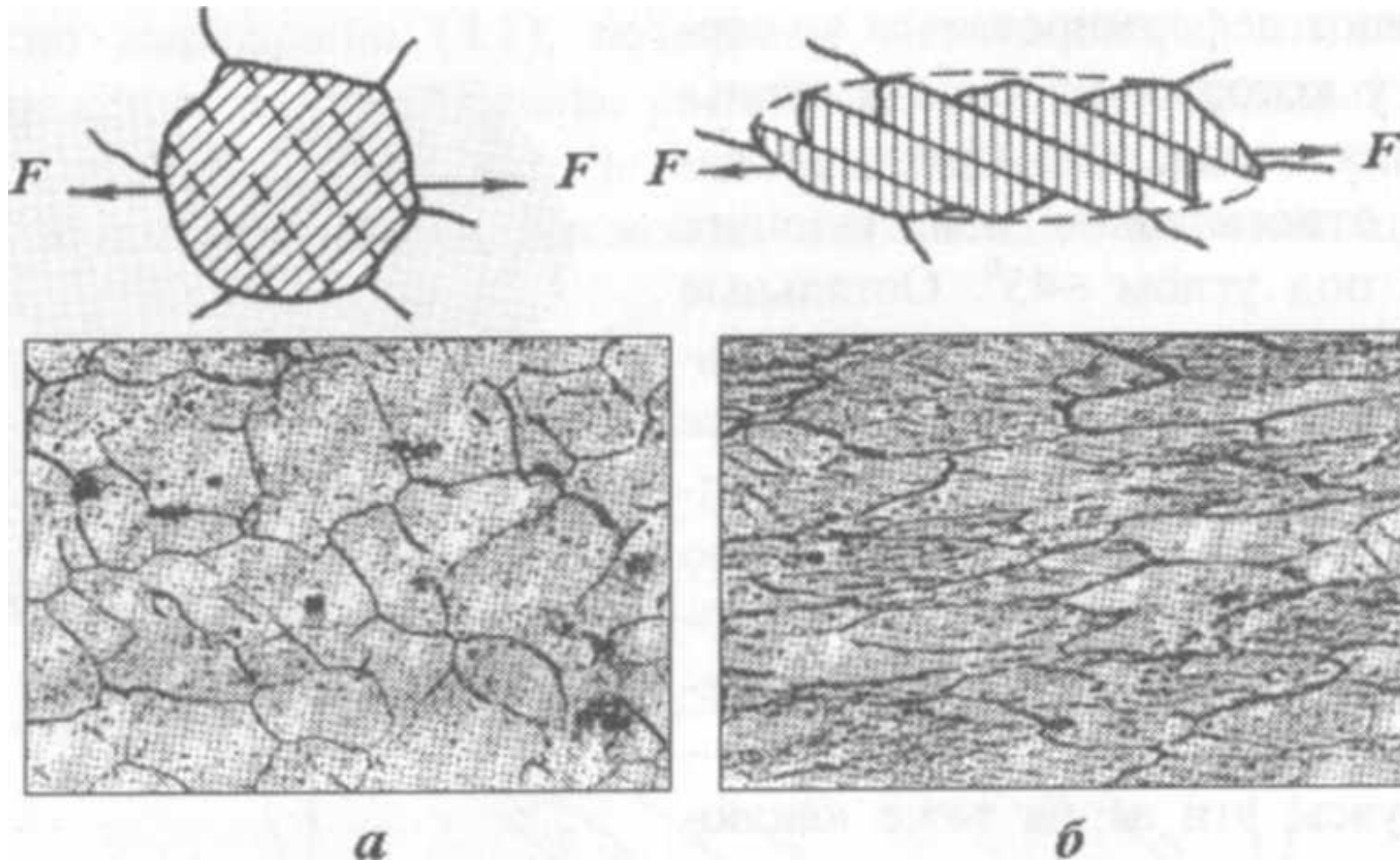


Рис. 30. Три возможных направления скольжения в α -железе; преимущественным является $[111]$ — самое кратчайшее



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.

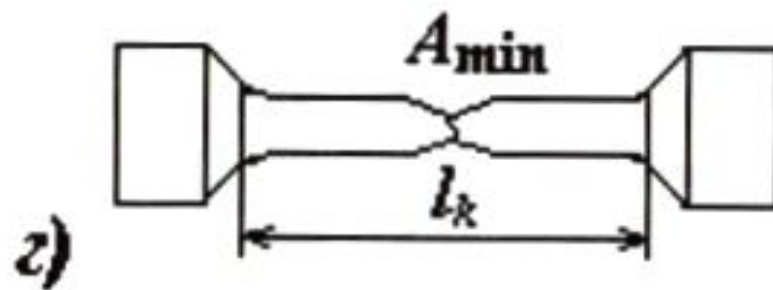
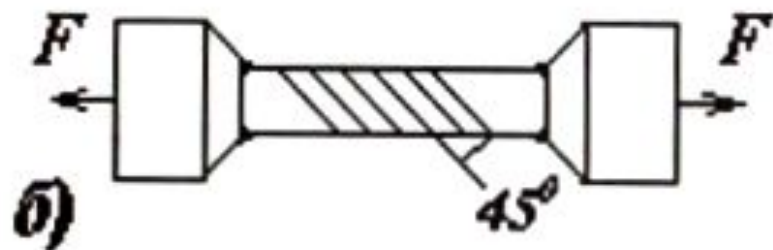
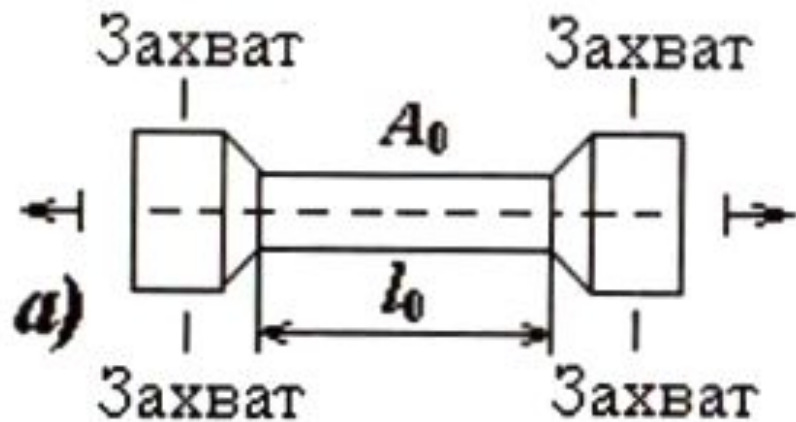
Конструкционной прочностью называется комплекс механических свойств, обеспечивающих **надёжную** и **длительную** работу материала в условиях эксплуатации

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, σ_y – напряжение, соответствующее появлению остаточных деформаций, определённой заданной величины (0,001; 0,003; 0,005%); допуск на остаточную деформацию указывается в индексе при σ_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, σ_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, σ_v – условное напряжение, соответствующее наибольшей нагрузке, выдерживаемой образцом.

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

Относительное остаточное сужение, ψ - характеристика пластичности

Лекция 4 Деформация, механические свойства и разрушение металлов

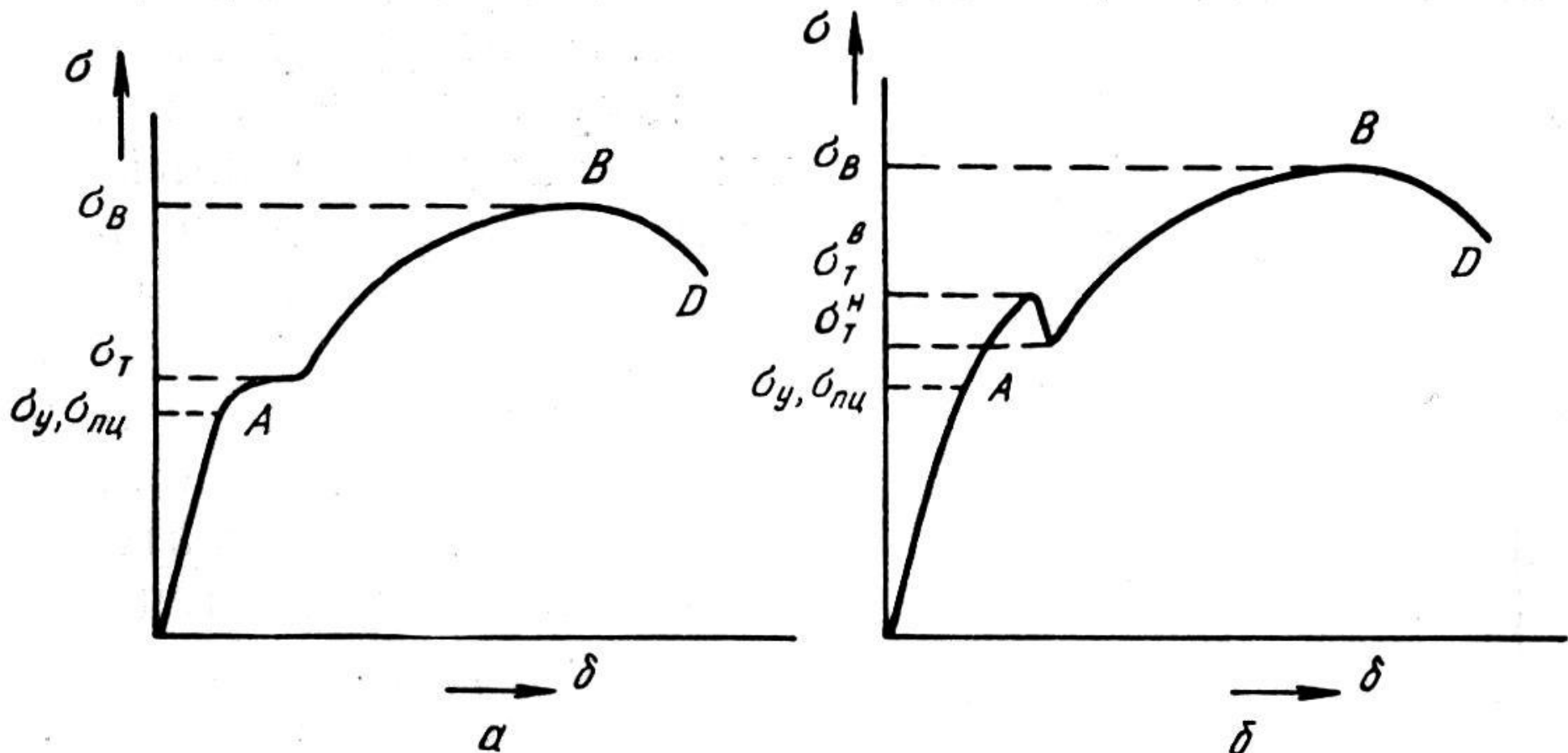


Диаграмма растяжения металлов, дающих площадку (а) и зуб (б) текучести

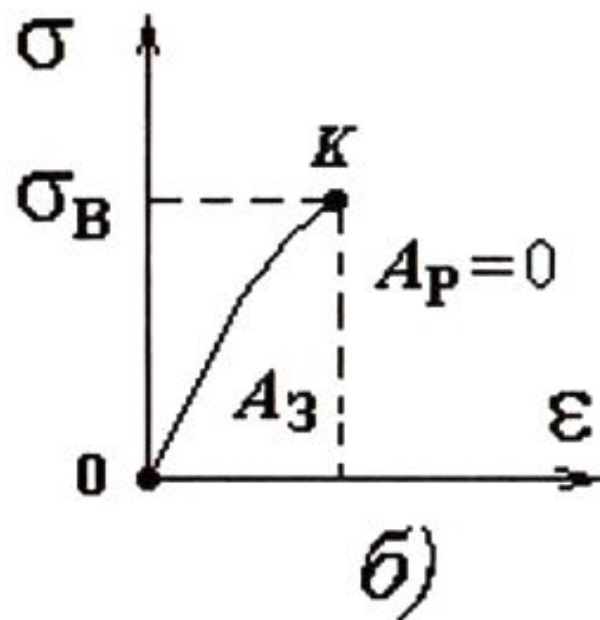
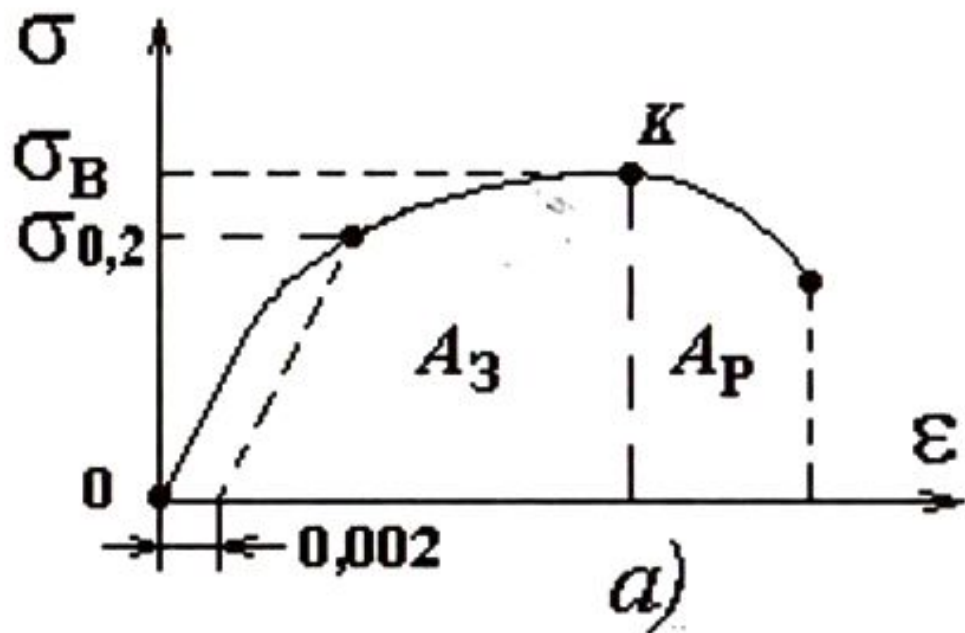
Лекция 4 Деформация, механические свойства и разрушение металлов



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

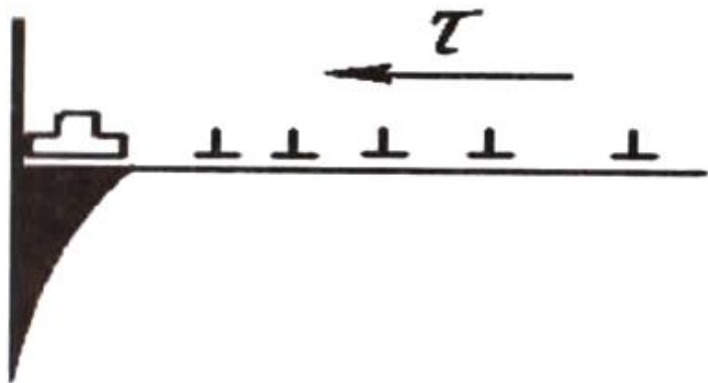


Варианты диаграммы растяжения: а) высокопластичный (вязкий) металл, б) низкопластичный (хрупкий) металл

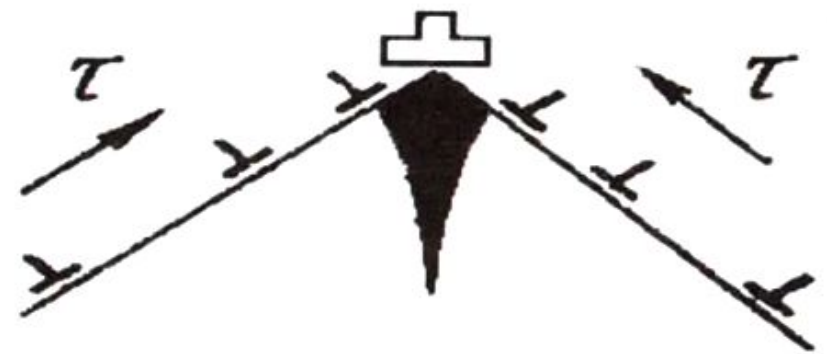
Лекция 4 Деформация, механические свойства и разрушение металлов

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

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

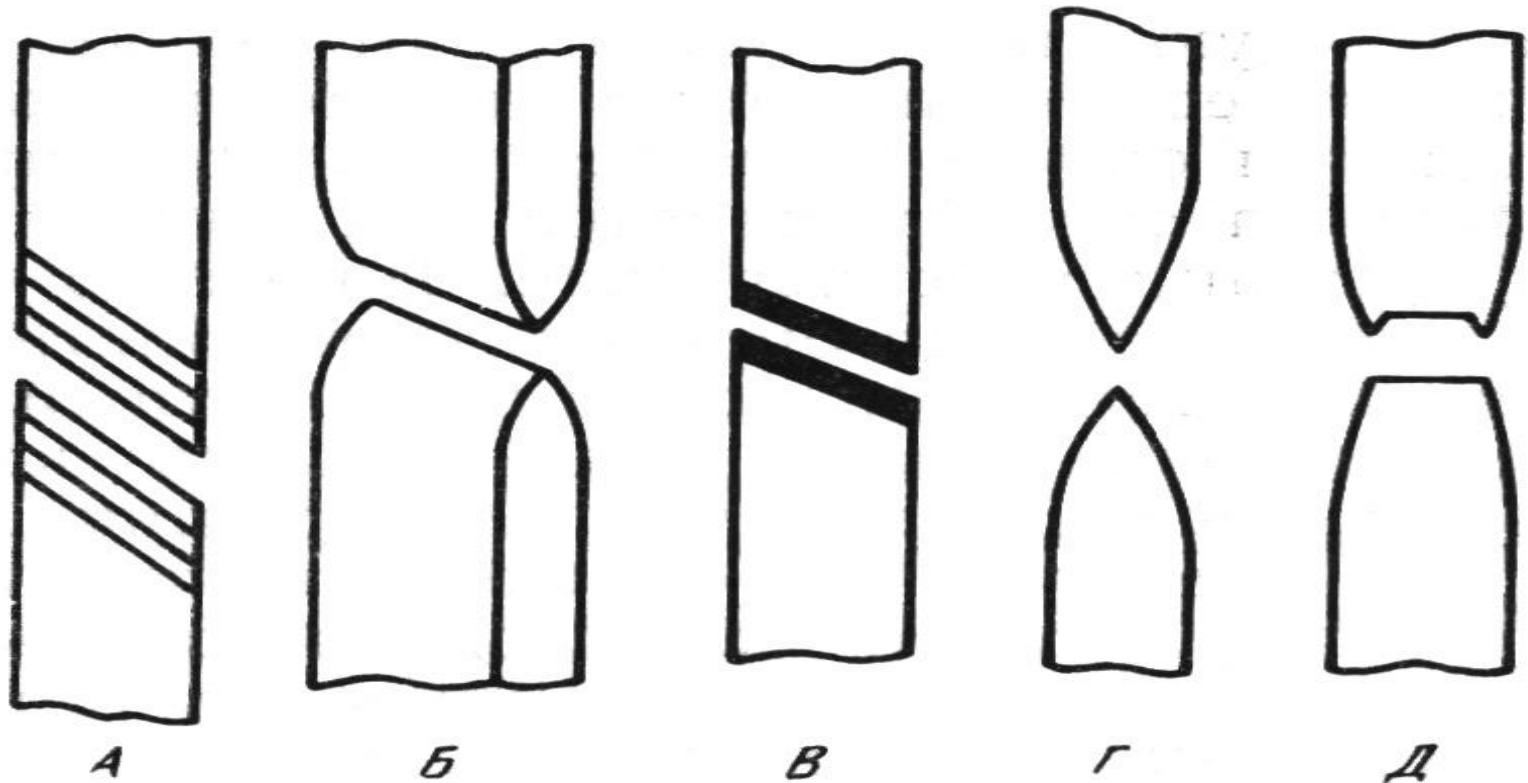
Критическое напряжение трещины для вязкого разрушения; величина γ_p представляет собой сумму истинной поверхностной энергии и энергии, затраченной на пластическую деформацию

**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) |

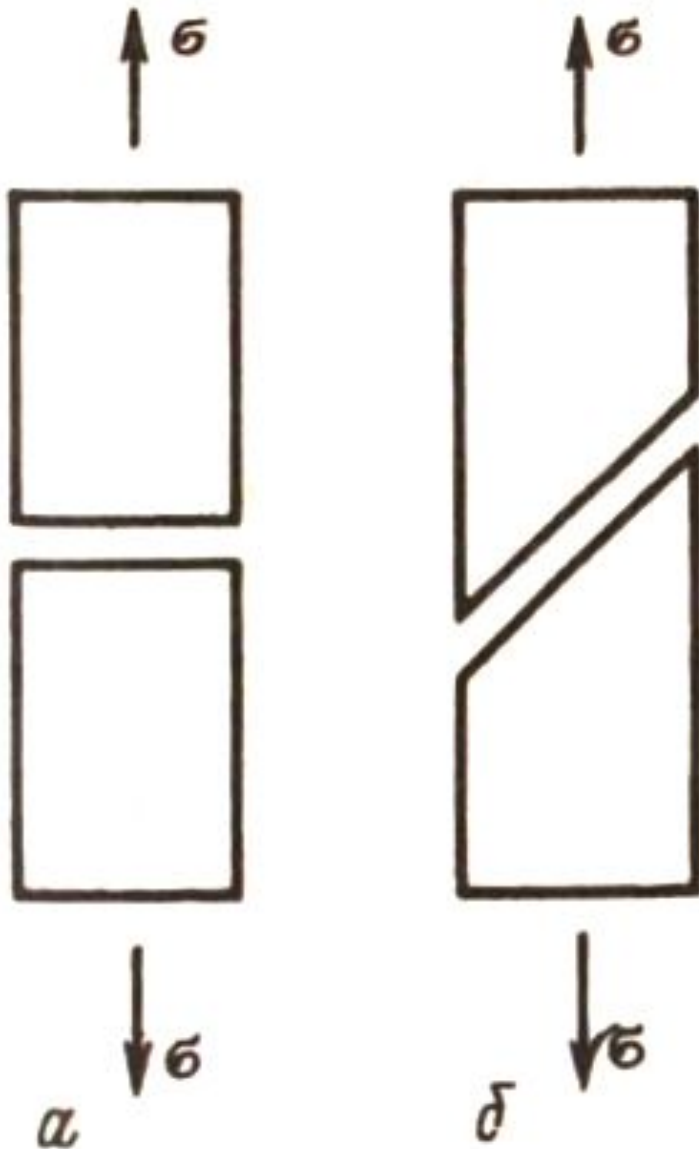
Лекция 4 Деформация, механические свойства и разрушение металлов



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

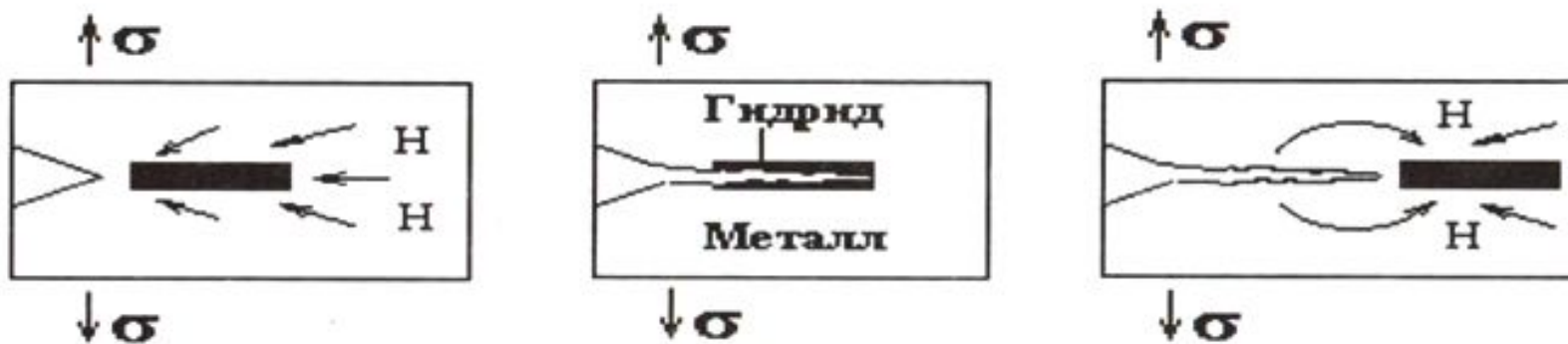
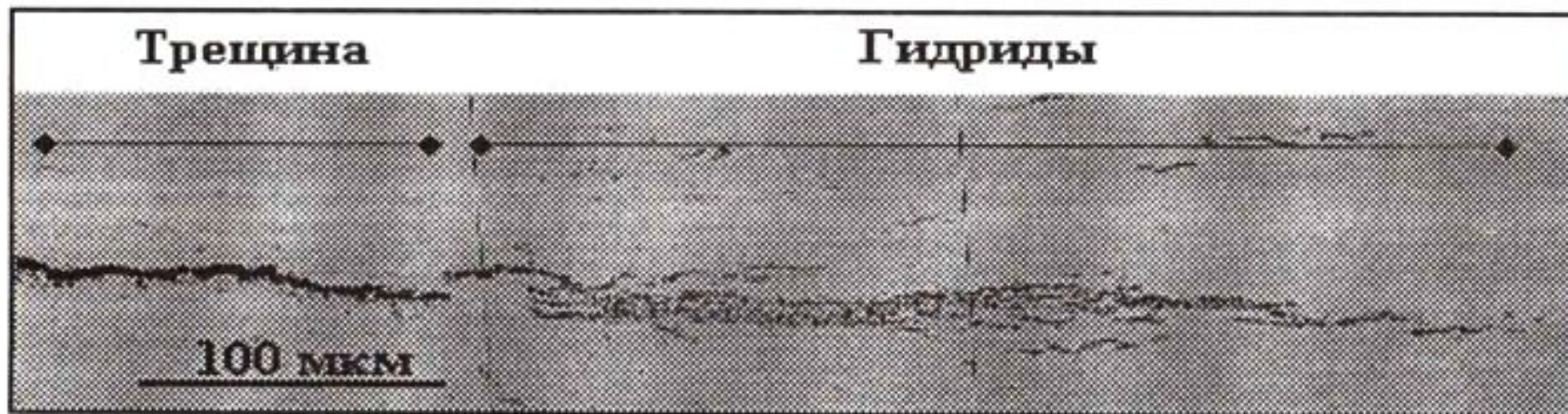


Схема замедленного гидридного растрескивания



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

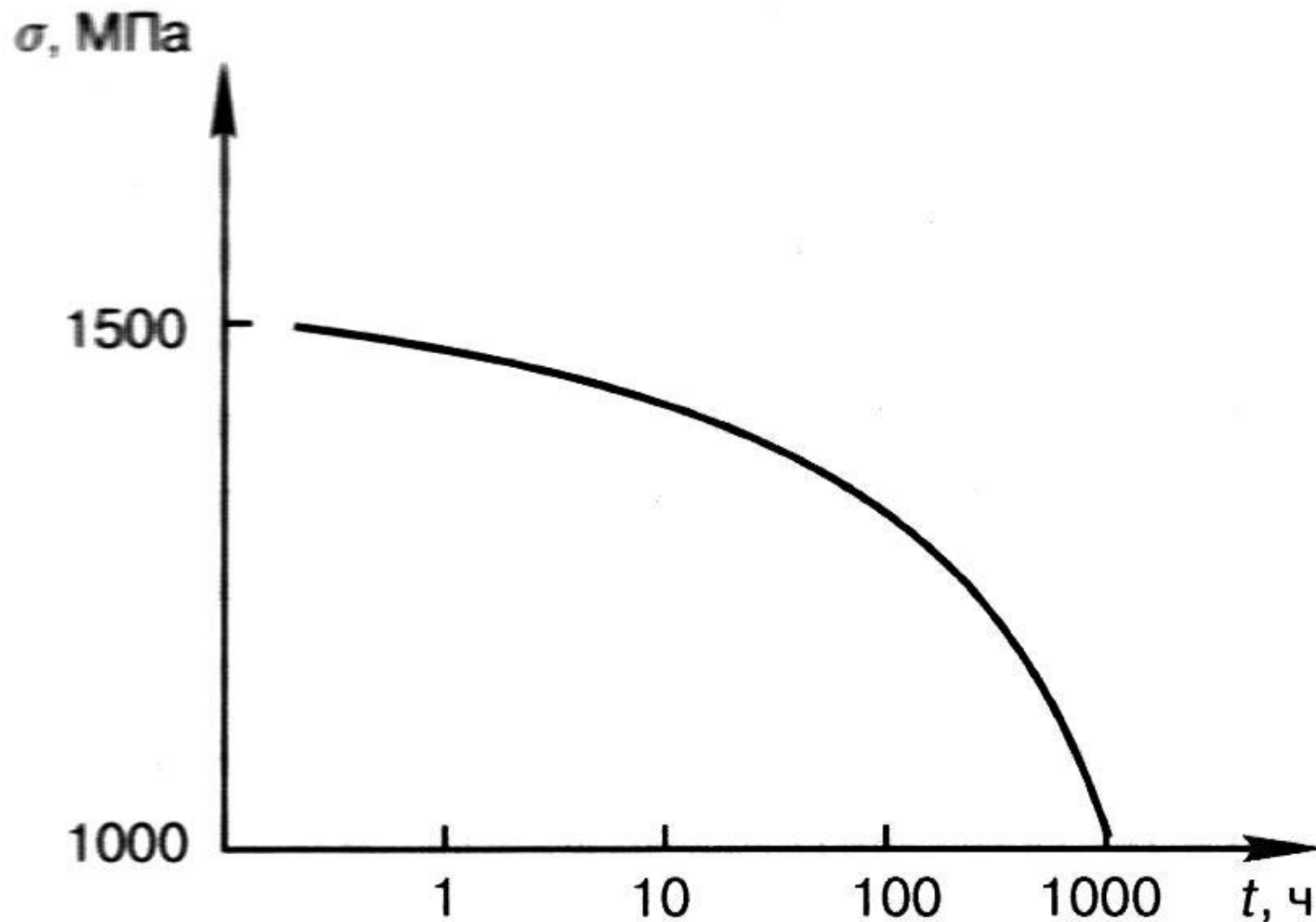
Высокоцикловое усталостное поведение

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

Низкоцикловое усталостное поведение

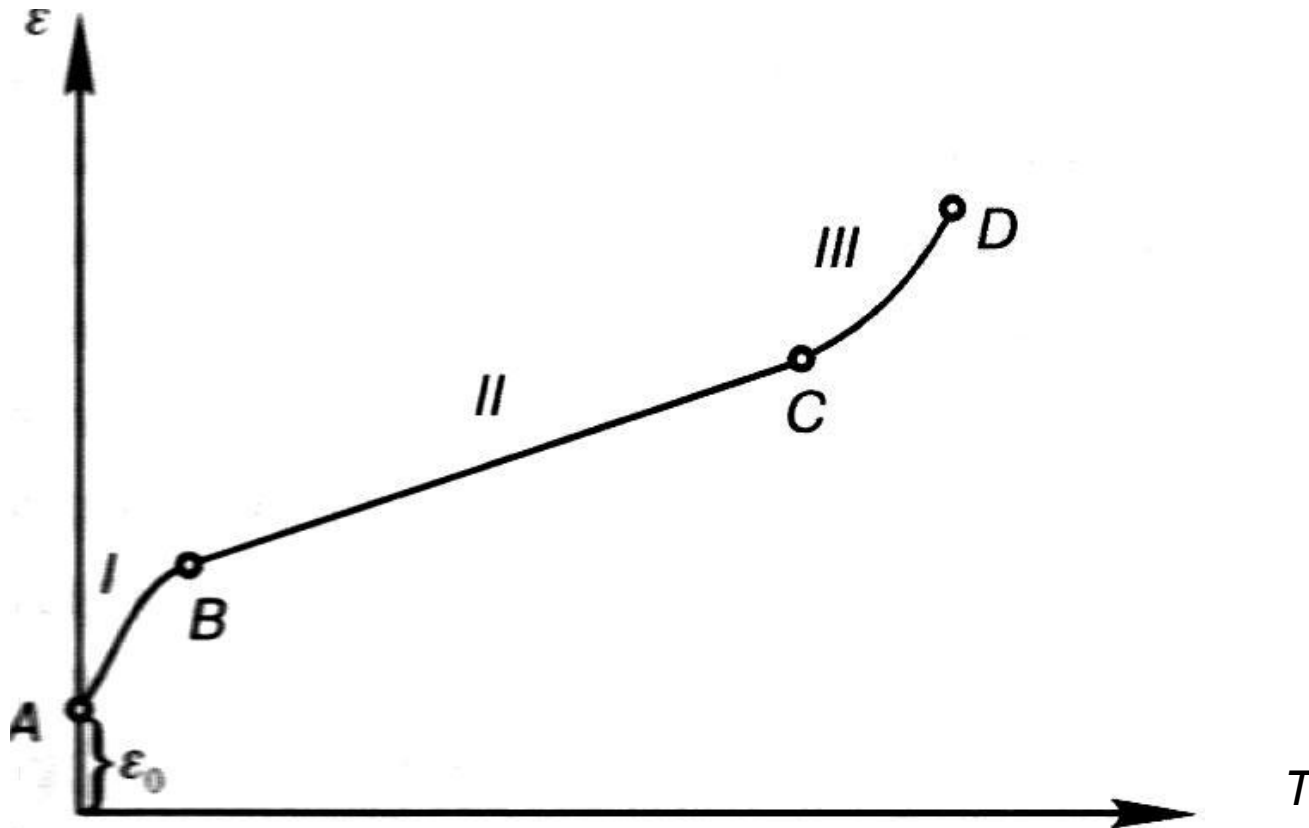
Разрушение при напряжении выше предела текучести. Количество циклов до разрушения $\lesssim 10^4$. Примеры: детали активной зоны ядерных реакторов, корпуса самолетов, детали турбин, детали, время от времени испытывающие перегрузки

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 — неустановившейся ползучести; BC — установившейся, идущей с постоянной скоростью; CD — ускоренной ползучести; точка D — момент разрушения; ε_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?