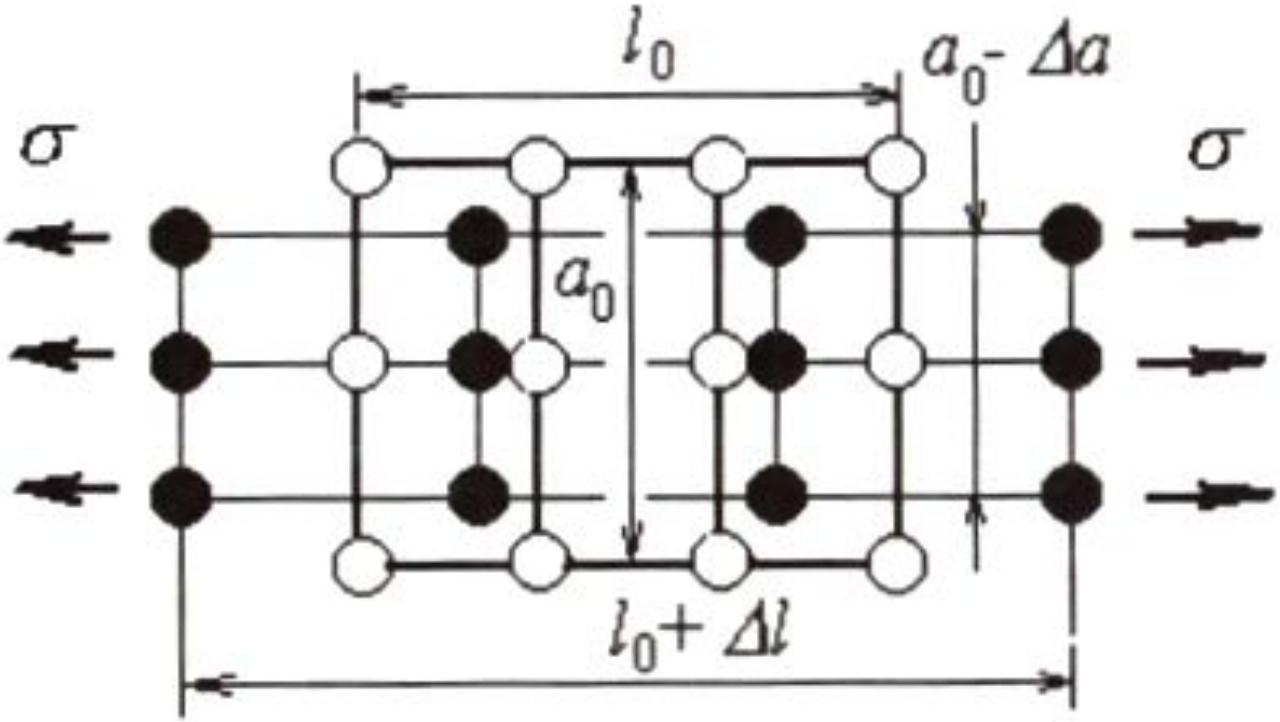
Деформацией называют изменение размеров и формы твердого тела под действием механических сил - ***нагрузок.***

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

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.*

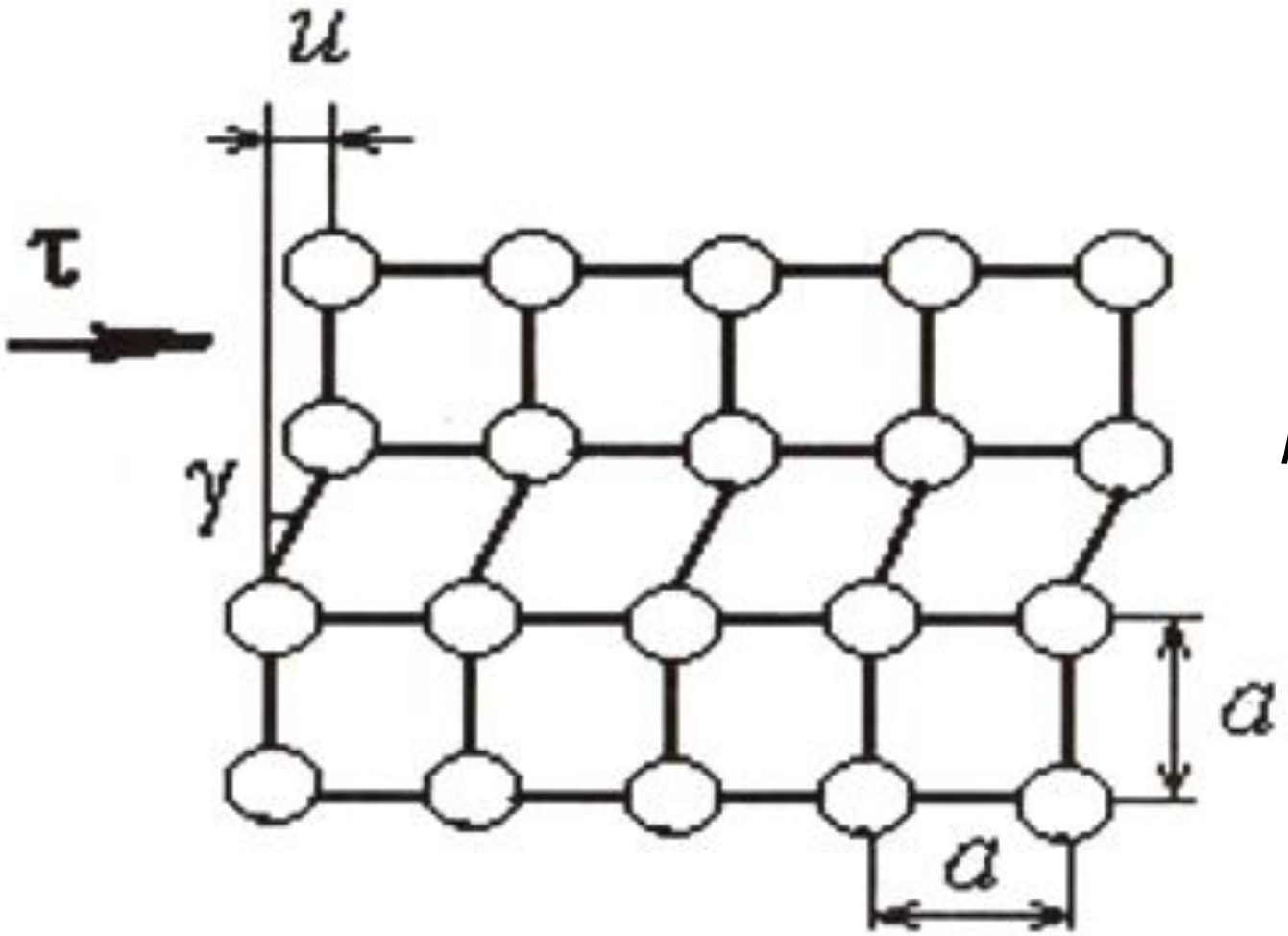


Упругое растяжение кристалла

σ = Eε, E – модуль нормальной упругости или ***модуль Юнга***

Резина: E= 0,5 МПа; алмаз: E=1,2x 10^6МПа

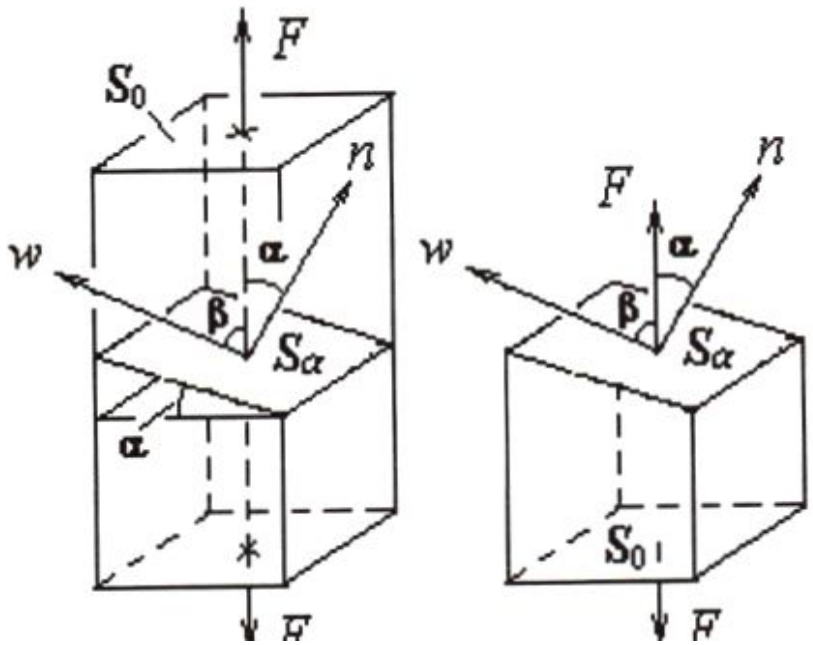
Металл	Pb	Al	Cu	Fe	Mo	W
$T_{пл}$, °C	327	660	1083	1539	2625	3410
E, ГПа	16	70	130	210	325	400



Упругий сдвиг в кристалле

τ = Gγ, G – модуль касательной упругости или ***модуль сдвига***

$\acute{\varepsilon} = \mu\varepsilon$, ***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.



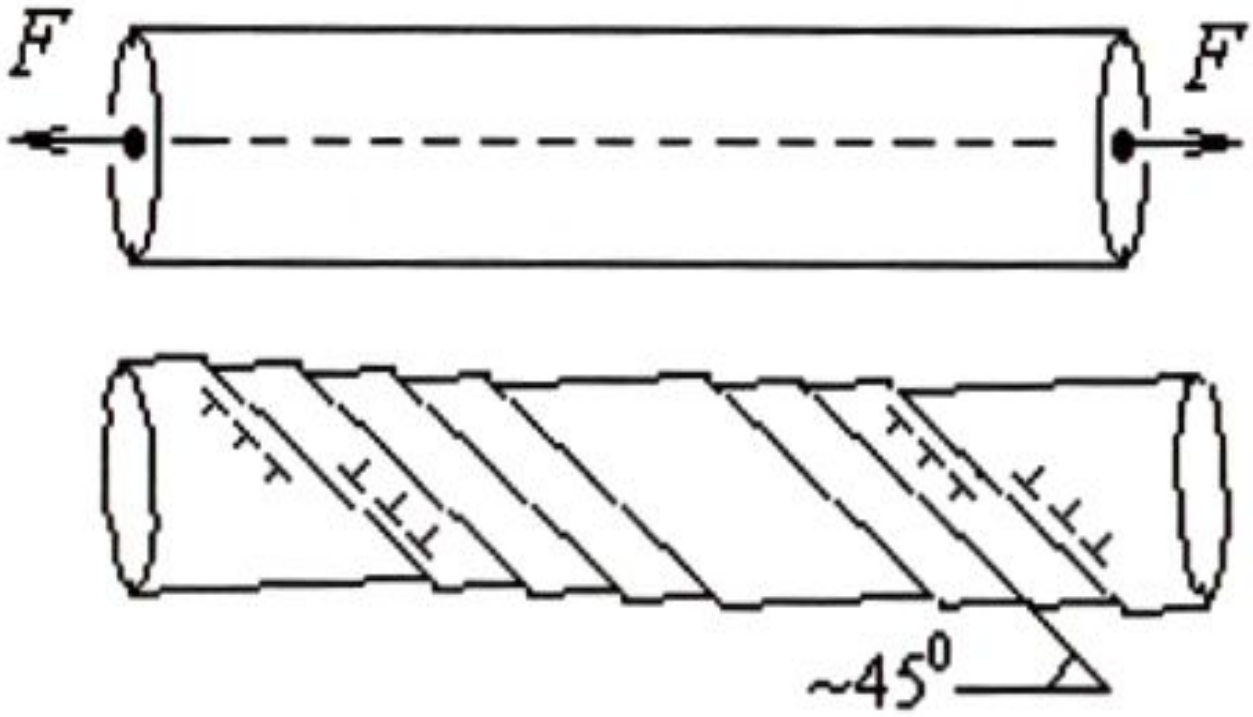
К определению напряжений в кристалле

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

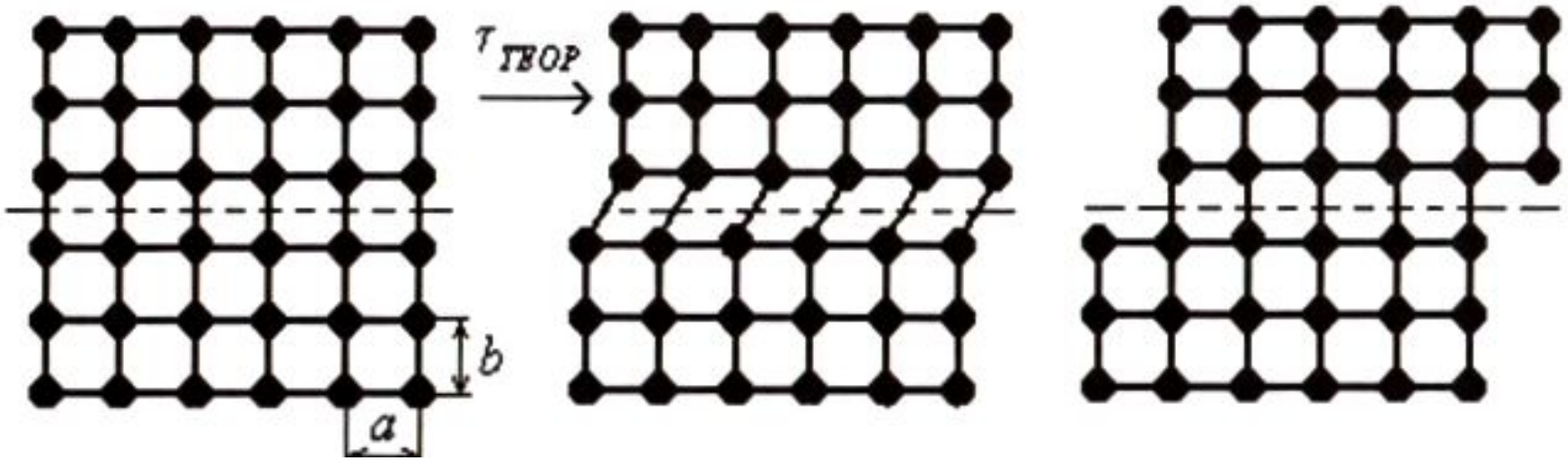
$$\sigma = \frac{F_n}{S_\alpha} = \frac{F\cos\alpha}{S_\alpha} = \frac{F\cos^2\alpha}{S_0},$$

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

Расчёт нормальных и касательных напряжений в кристалле

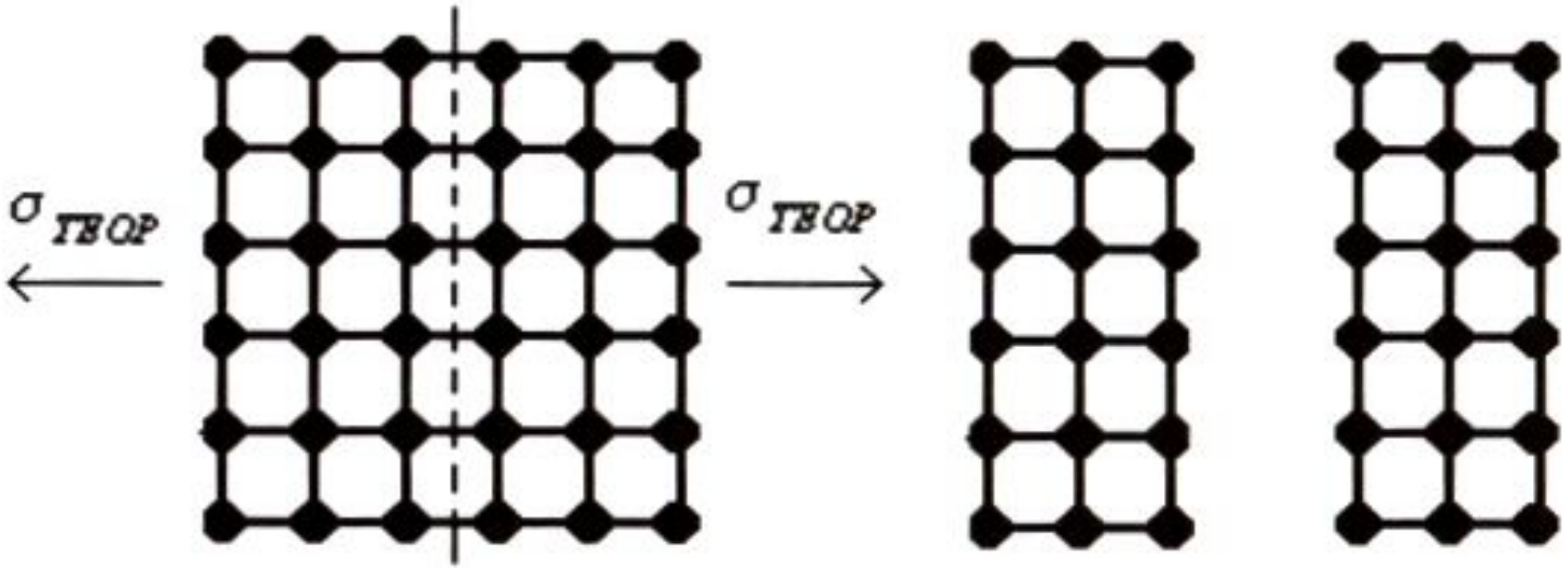


Следы скольжения на поверхности деформированного кристалла (линии Чернова – Людерса)



Сдвиг в идеальном (бездефектном) кристалле

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



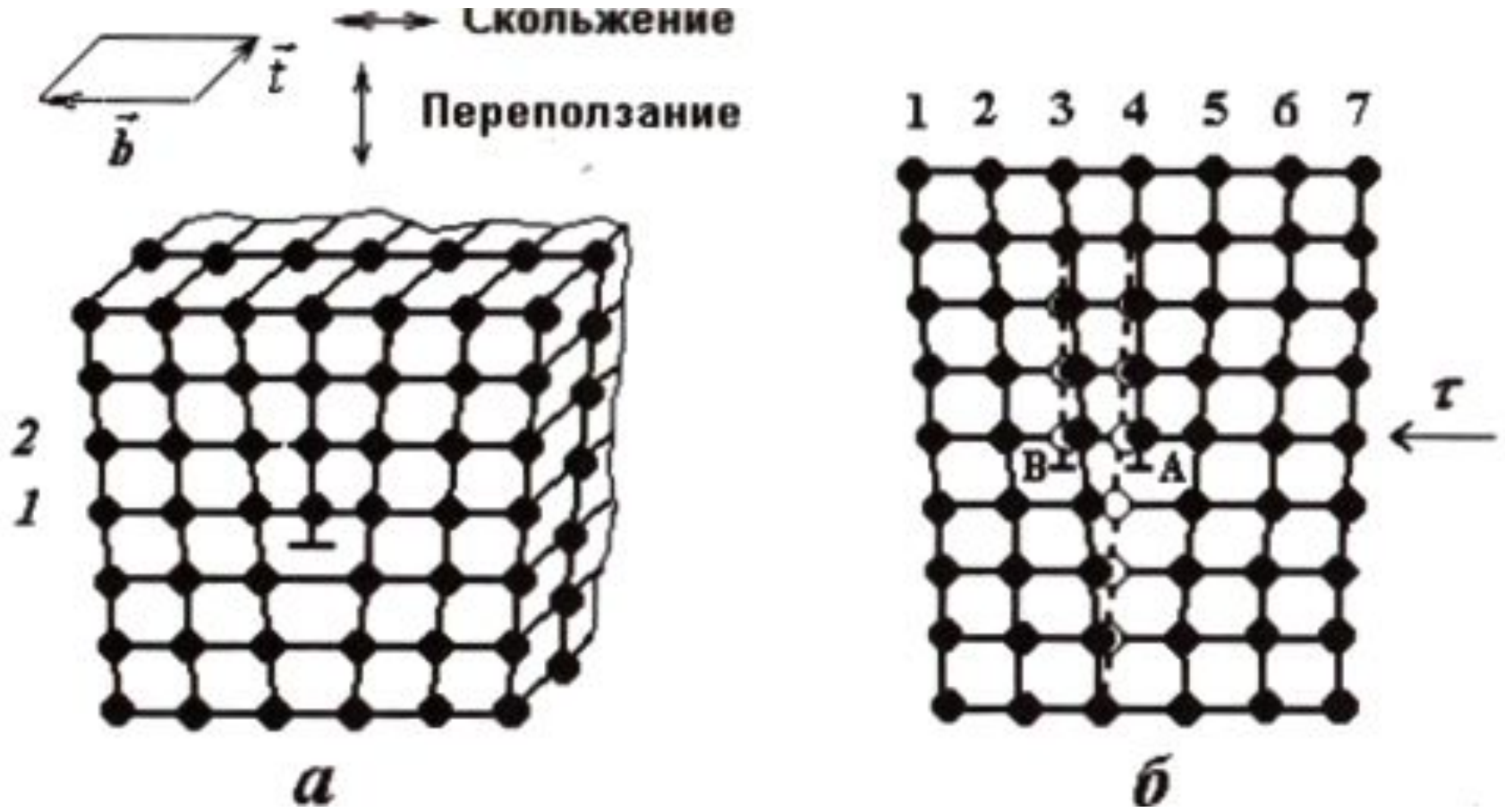
Разрыв идеального (бездефектного) кристалла

Теоретическая прочность при отрыве для железа – 40 ГПа

Железо высокой чистоты, монокристалл – 50 МПа

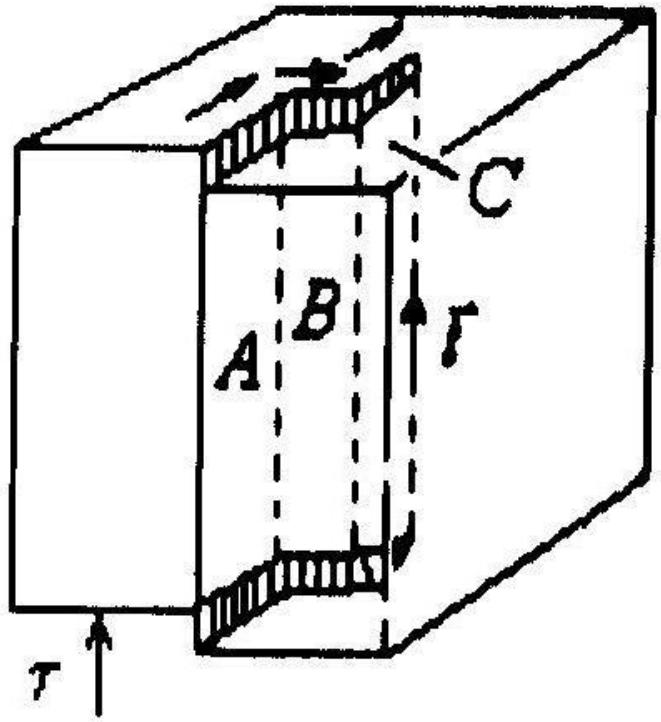
Прочностью называют **способность материала сопротивляться необратимым (пластическим) деформациям и разрушению.** Чем больше усилия, необходимые для того, чтобы вызвать пластическую деформацию и разрушение материала, тем он прочнее.

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



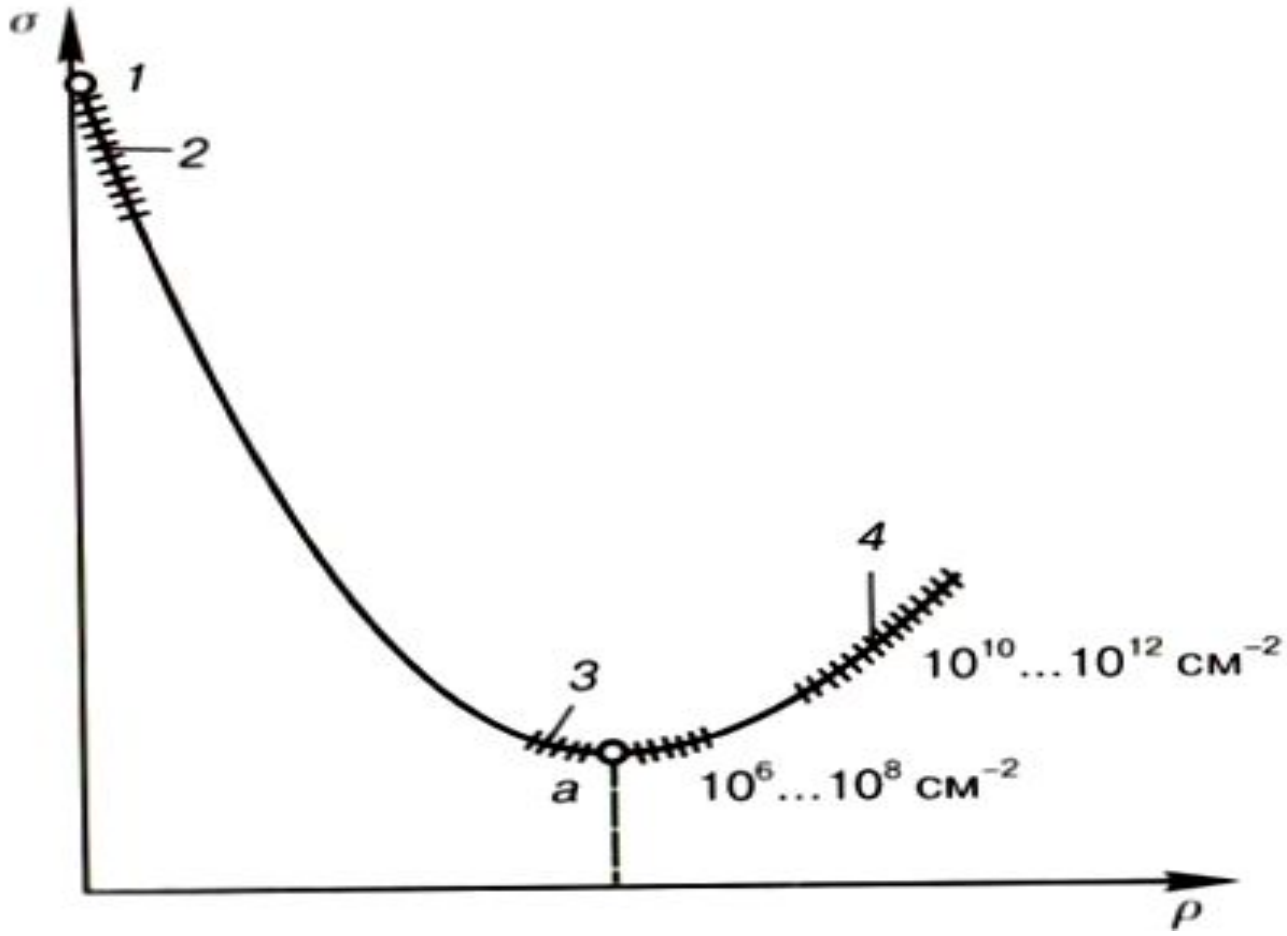
Движение краевой дислокации

τ - касательное напряжение

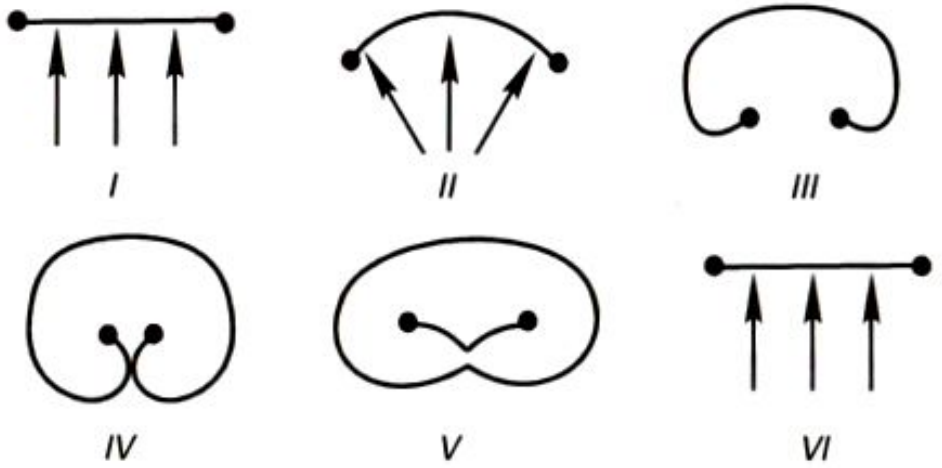


Винтовая дислокация перемещается ***только скольжением ,*** которое происходит перпендикулярно вектору Бюргерса. Если на пути винтовой дислокации встречается препятствие, она может продолжить скольжение в другой плоскости, такое скольжение называют ***поперечным***

Рис. 4.9. Поперечное скольжение винтовой дислокации



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



Стадии образования дислокации по механизму Франка-Рида

Стадии выгибания скользящей дислокации между частицами с образованием петель

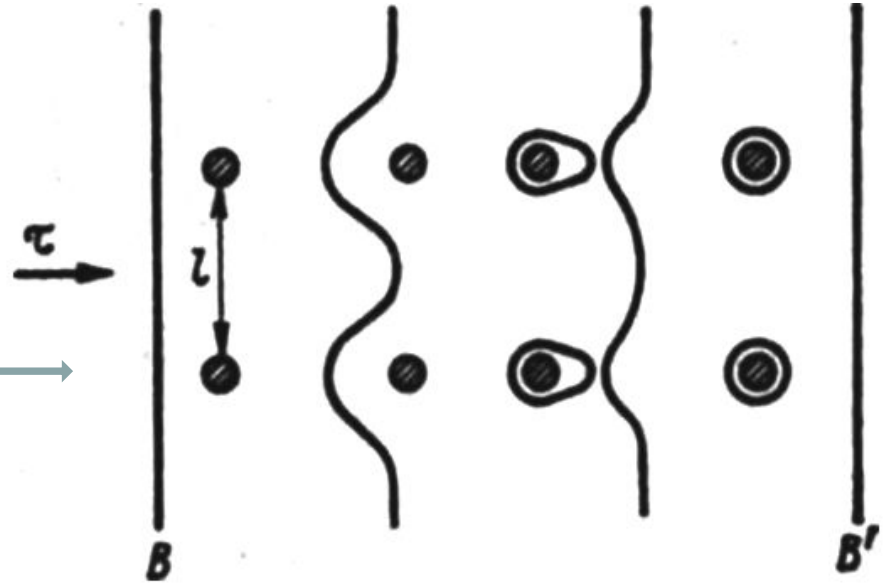
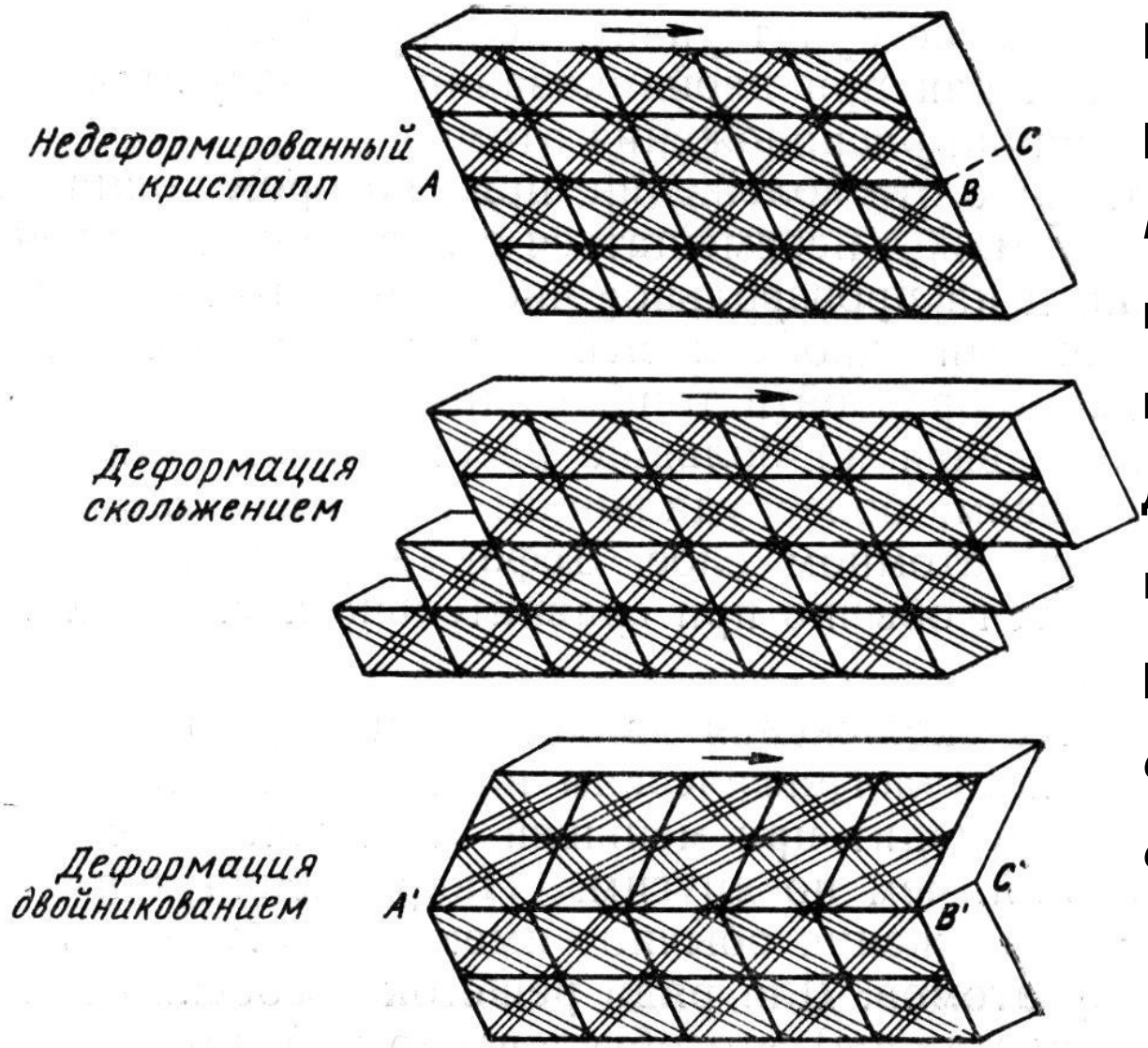


Схема скольжения и двойникования в кристалле



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

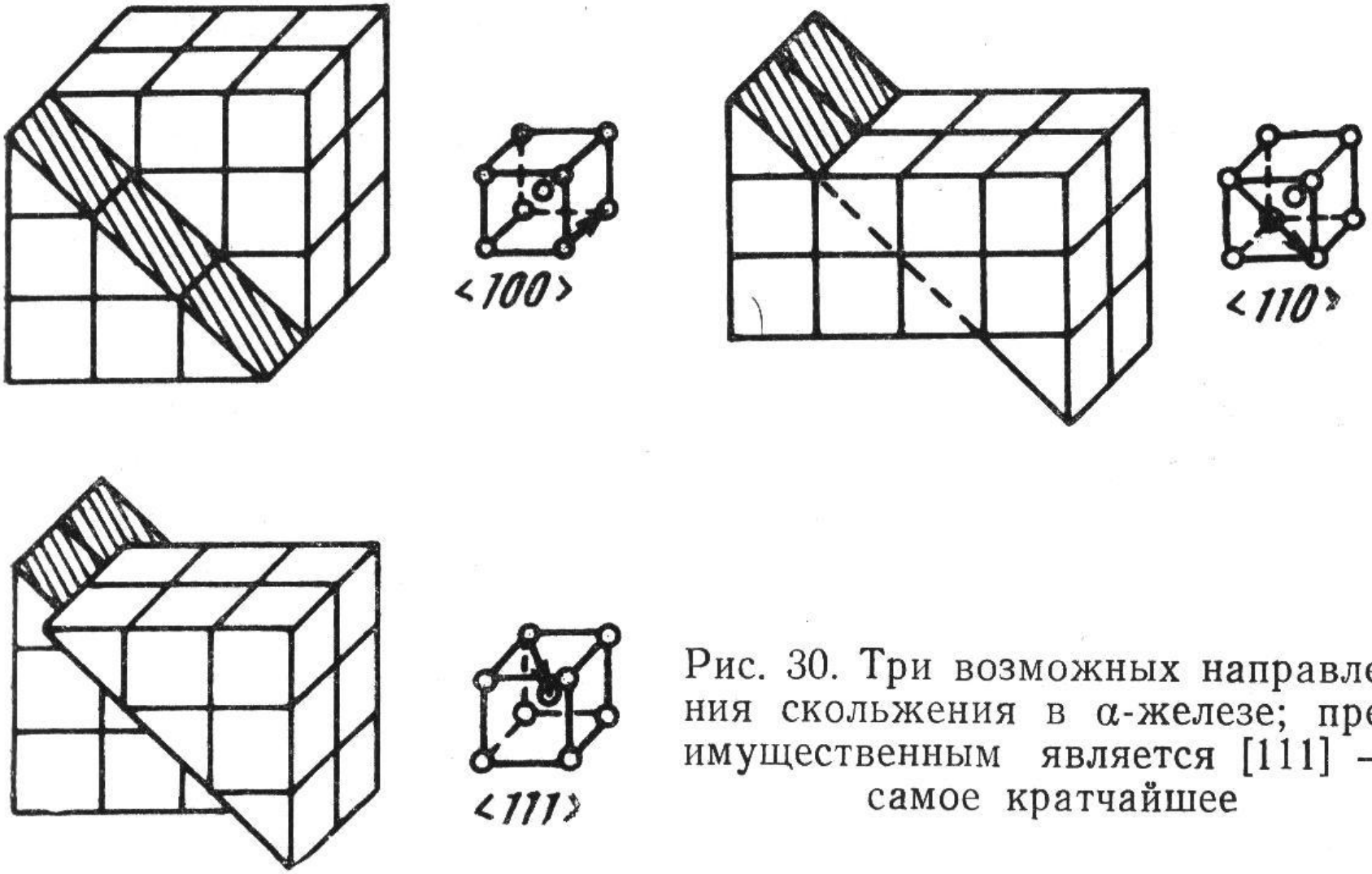
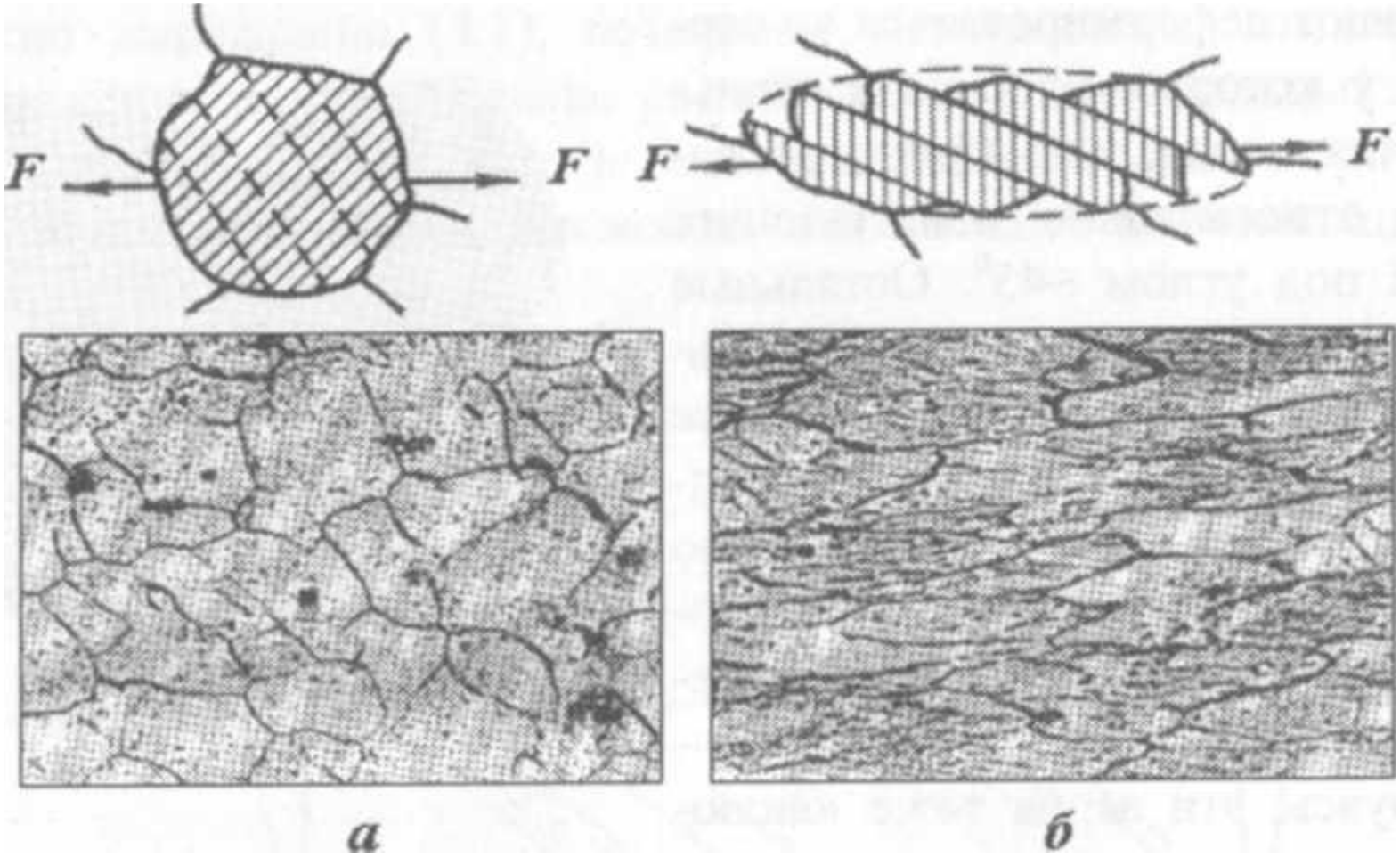


Рис. 30. Три возможных направления скольжения в α-железе; преимущественным является [111] — самое кратчайшее



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.

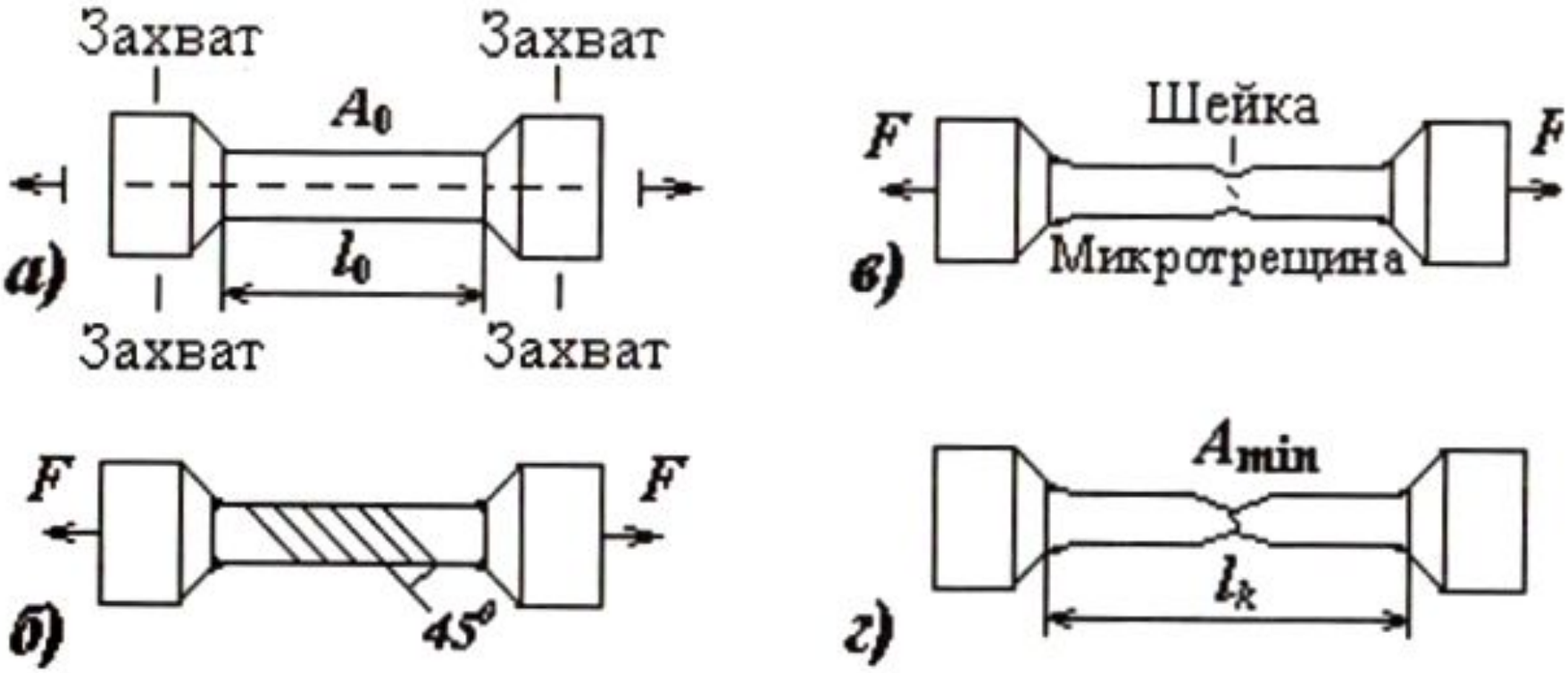
Как показывают рентгеноструктурные исследования, даже после значительной пластической деформации металлические образцы сохраняют свое кристаллическое строение (решетку). Тем не менее, в кристаллах возникает большое количество дефектов, которые серьезно влияют на физико-механические свойства материала: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

Конструкционной прочностью называется комплекс механических свойств, обеспеичвающих 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.



Форма образца на разных стадиях испытания:

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

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.

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

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

Относительное остаточное сужение, ψ - характеристика пластичности

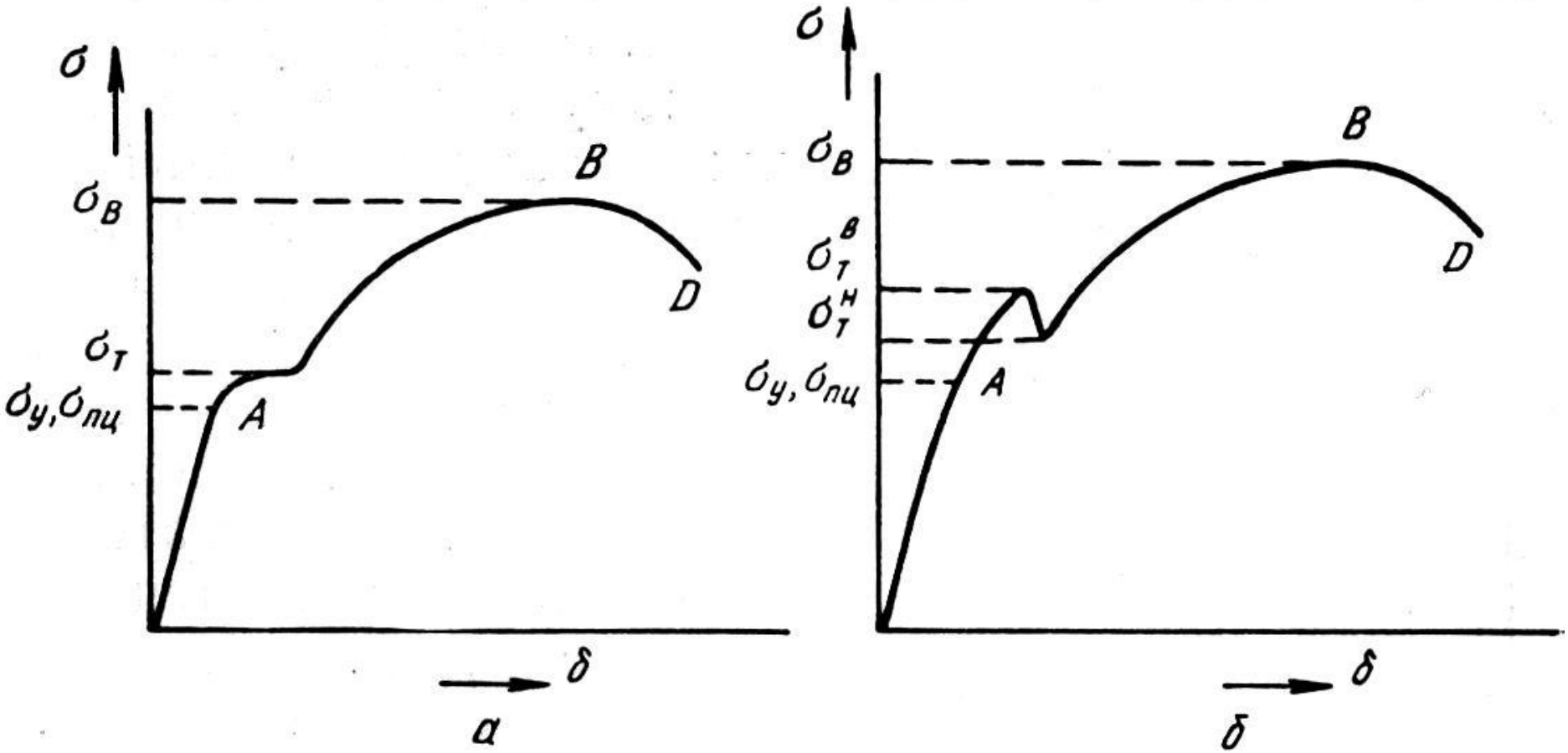
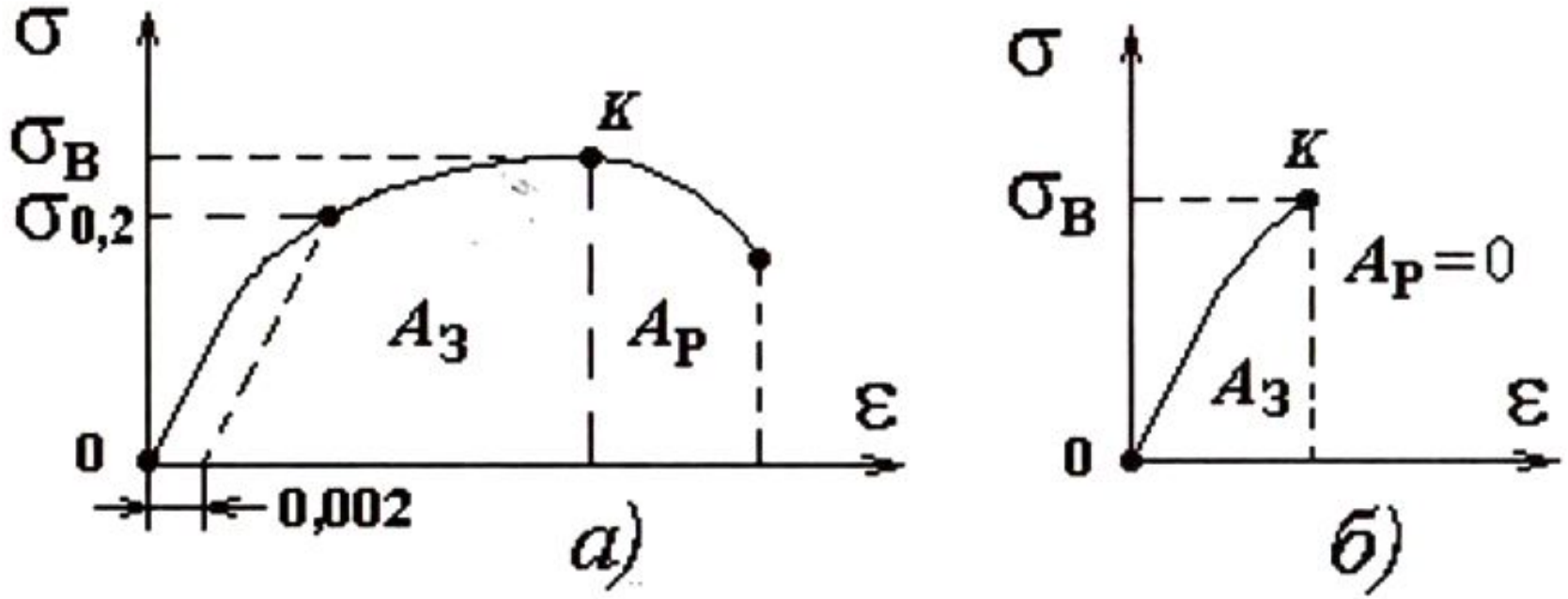


Диаграмма растяжения металлов, дающих площадку (а) и зуб (б) текучести

Схематическое изображение условной диаграммы растяжения (сплошная линия) и диаграммы истинных напряжений (пунктирная линия)

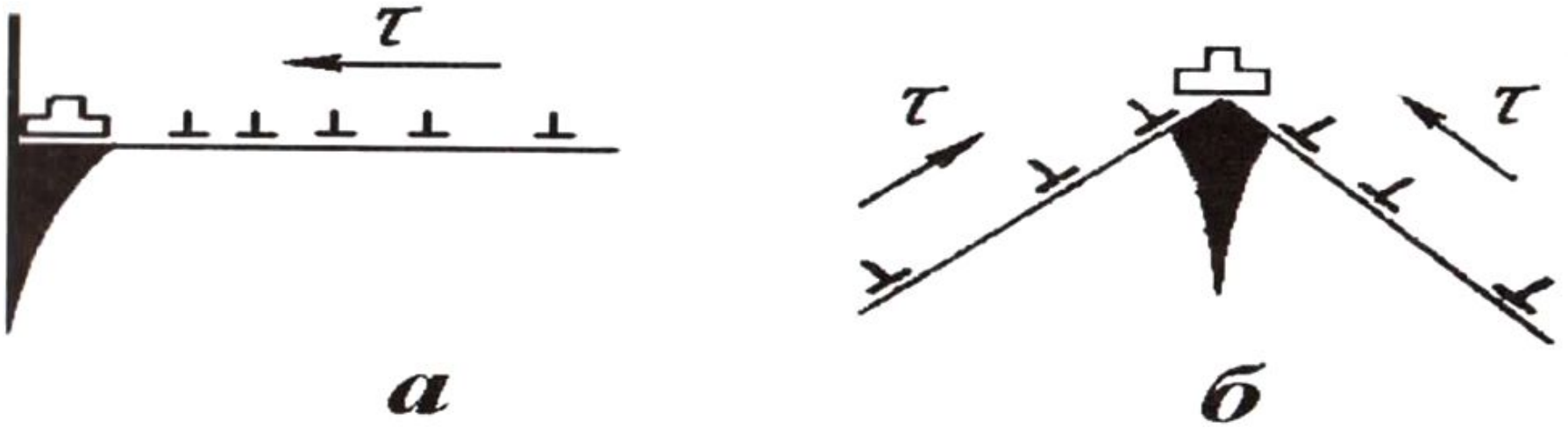
Упрочнение металла в результате пластической деформации называют *наклепом* или *нагартовкой*

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

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!



Образование трещины в результате слияния дислокаций

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

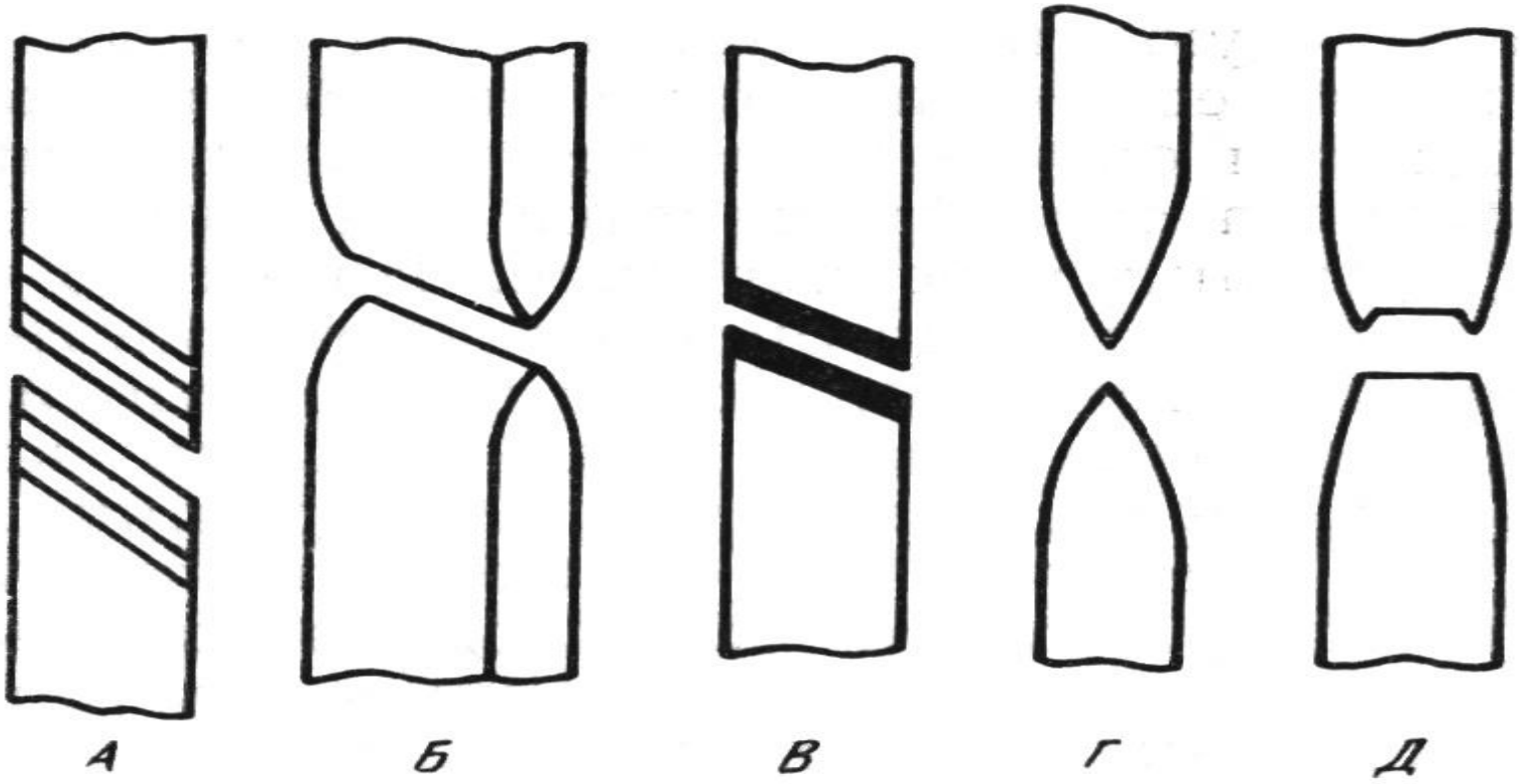
$$\sigma_G = \left(\frac{\gamma_p E}{C} \right)^{1/2}.$$

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

Скорость распространения трещины в некоторых материалах (х 10^5см/сек)

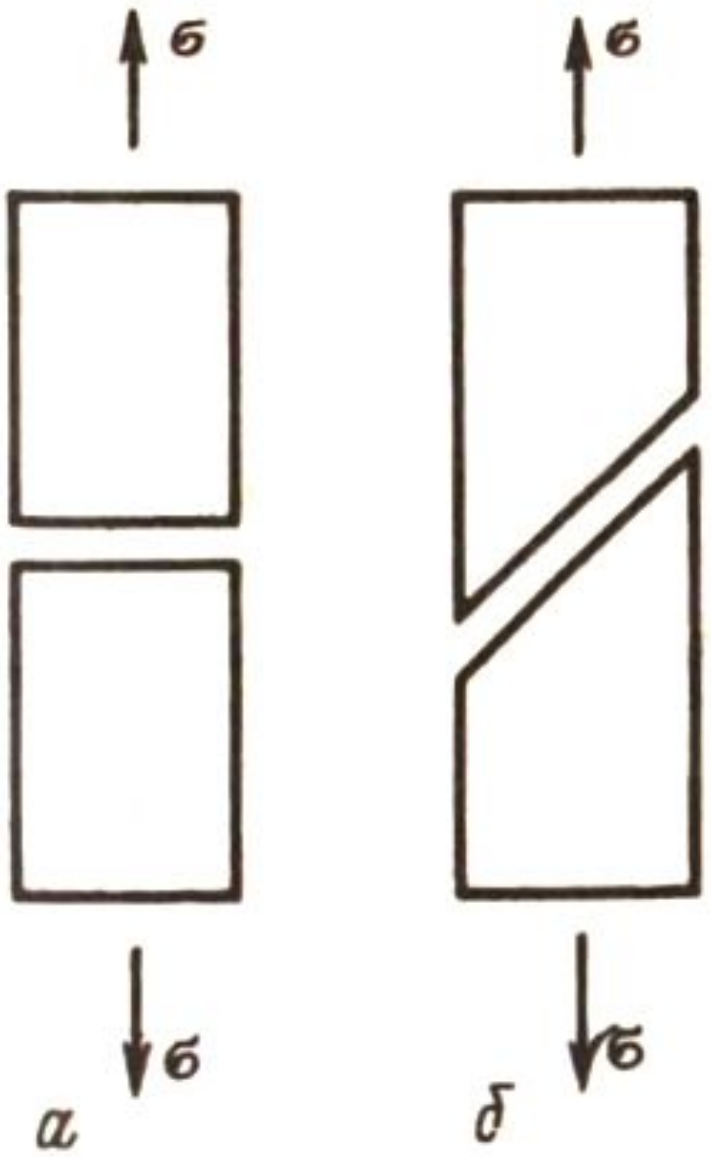
в скобках – расчётные значения

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)



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)



Типы хрупкого разрушения:

а) отрывом,

б) срезом

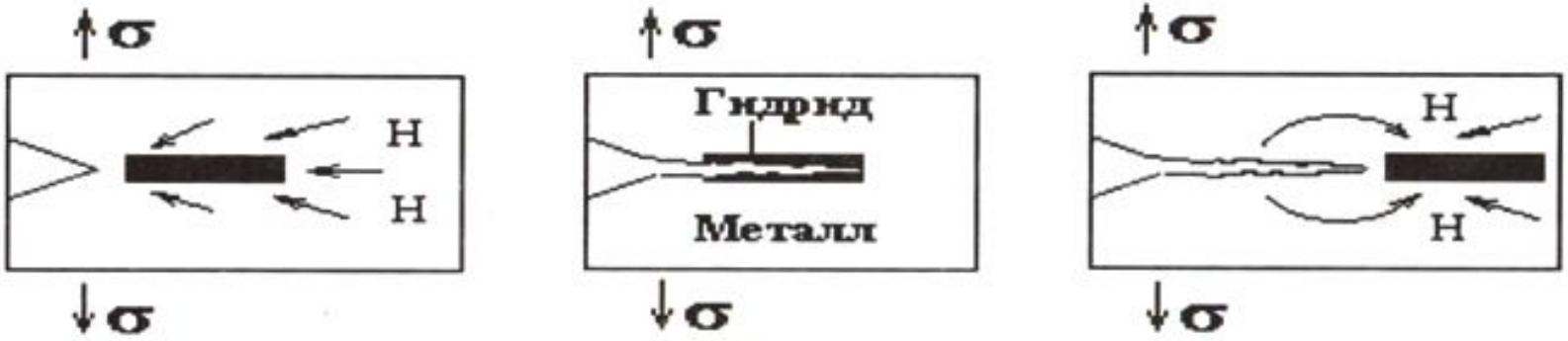
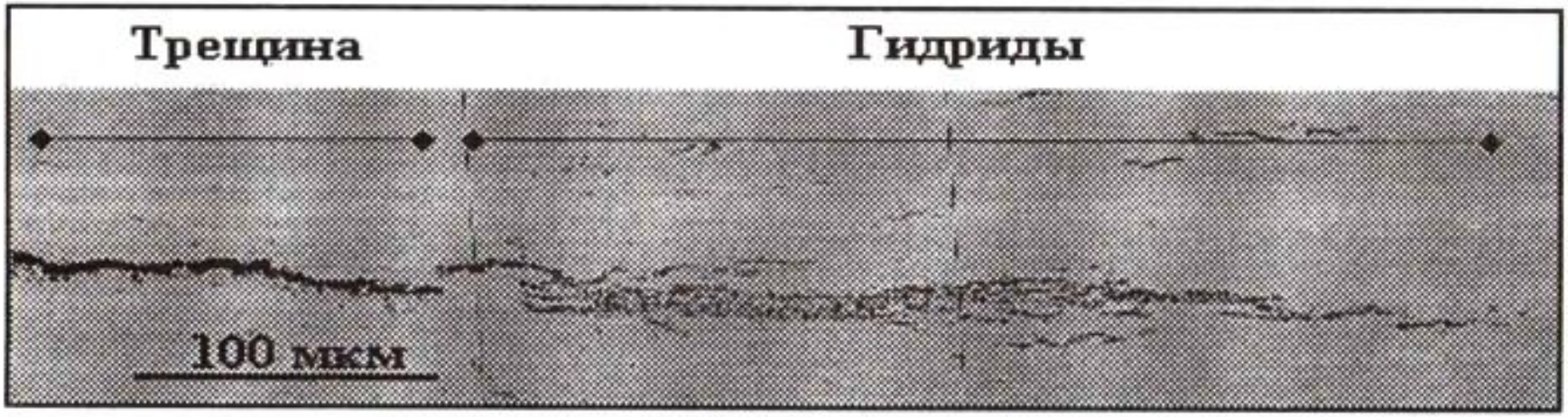


Схема замедленного гидридного растрескивания



Гидриды у вершины трещины в наводороженном циркониевом сплаве

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 (~ 10^4) и многоцикловую (~ 10^6) усталость.

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

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).***

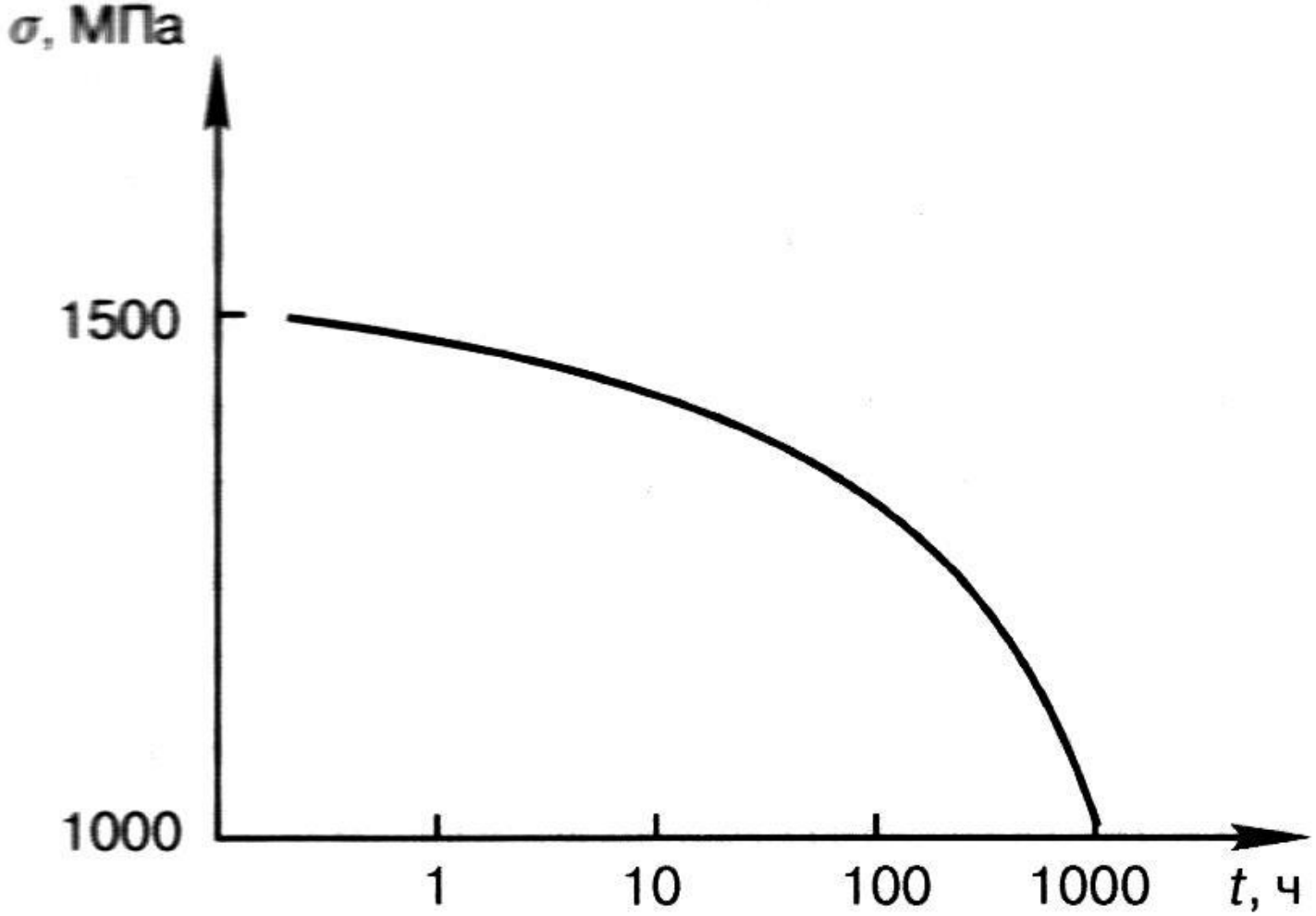
Предел выносливости или усталости – максимальное напряжение, при котором материал может выдержать, не разрушаясь, неограниченное число циклов нагружения.

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

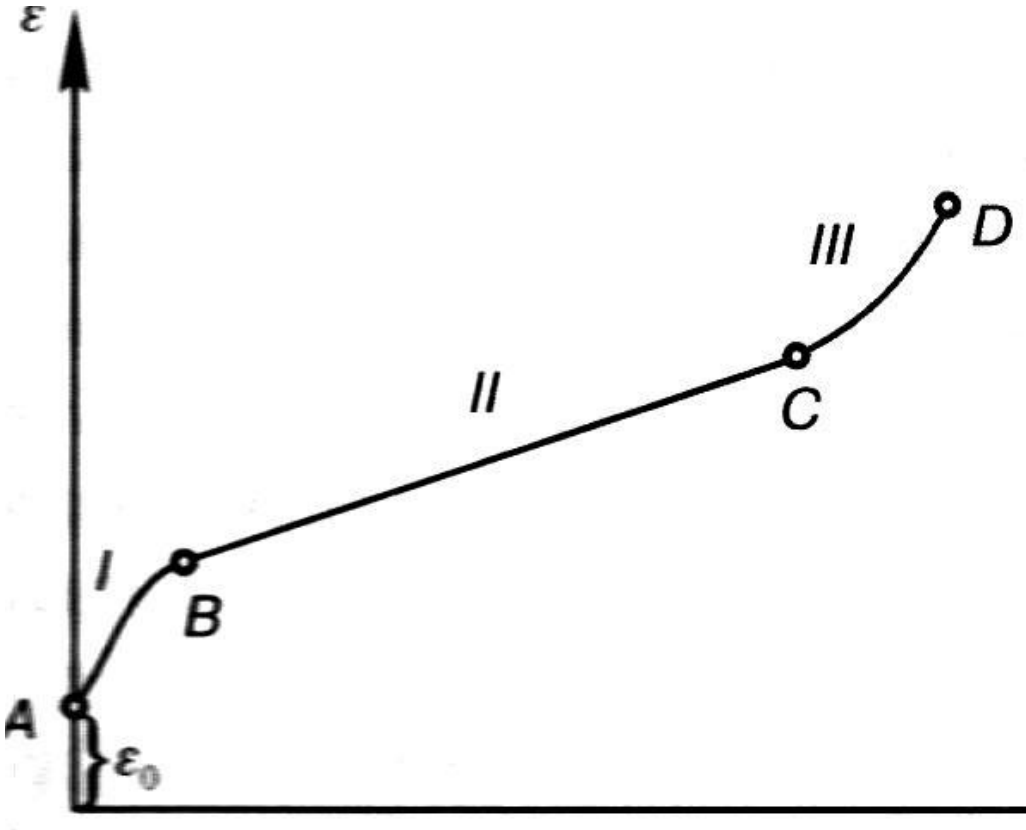
Красноломкость – охрупчивание сплавов при высоких температурах или горячем деформировании, вызванное оплавлением границ зёрен.

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.

Усталость
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



Зависимость разрушающего напряжения при растяжении от продолжительности нагружения твёрдого материала



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.

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	$10^{-5}...10^{-3}$	Рабочие органы сельскохозяйственных машин; зубчатые передачи, работающие без смазки в запыленной среде; узлы дробильного оборудования	Стали, чугуны
Усталостное	В присутствии смазочного материала без абразива	$10^{-12}...10^{-9}$	Подшипники качения опоры скольжения, зубчатые передачи	То же
Эрозионное	При взаимодействии металлических деталей с потоком жидкости или газа	$10^{-10}...10^{-6}$	Детали энергетического оборудования, насосов, воздуходувок	Стали, чугуны, сплавы меди, титана и алюминия
Коррозионно-механическое	При колебательном движении в присутствии коррозионной среды	$10^{-8}...10^{-5}$	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.

Таблица 7.1. **Характеристика методов измерения твердости металлов и сплавов**

Метод измерения	Вид индентора	Диапазон нагрузок, Н	Измеряемый параметр	Объект измерения	ГОСТ
По Бринеллю: HB	Стальной шарик ∅, 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?