

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ В ИССЛЕДОВАНИИ КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

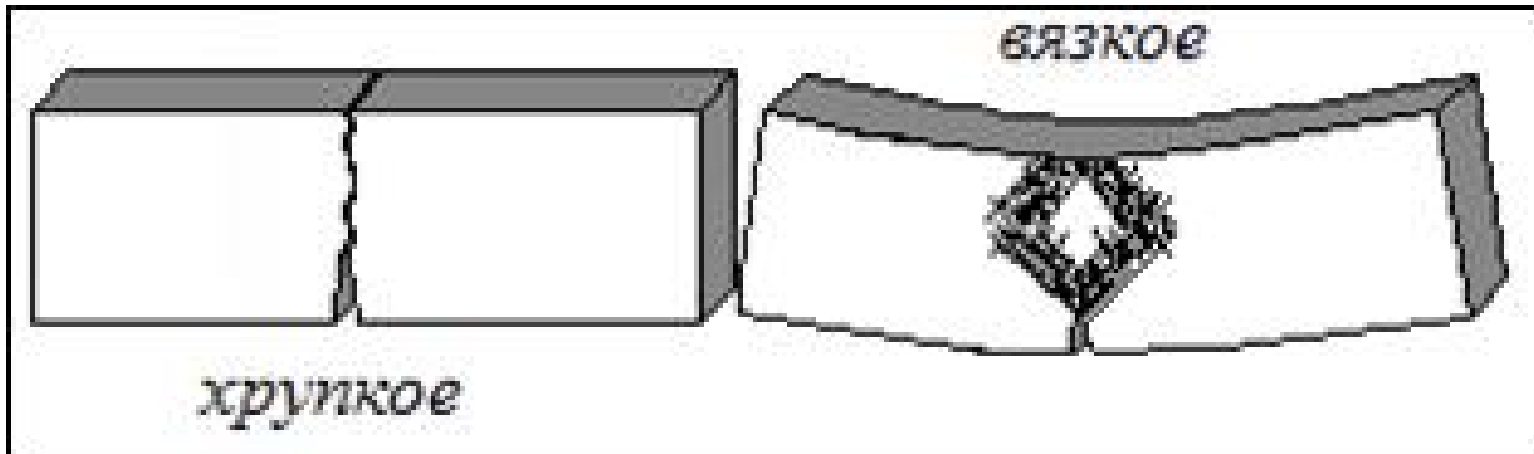
МОДУЛЬ 2. МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТВЕРДЫХ ТЕЛ

Лекция 13.

Кривая «напряжение-деформация». Упругие константы, пределы текучести и прочности, пластичность материалов. Хрупкое и вязкое разрушение твердых тел. Фрактография.

Испытательные машины

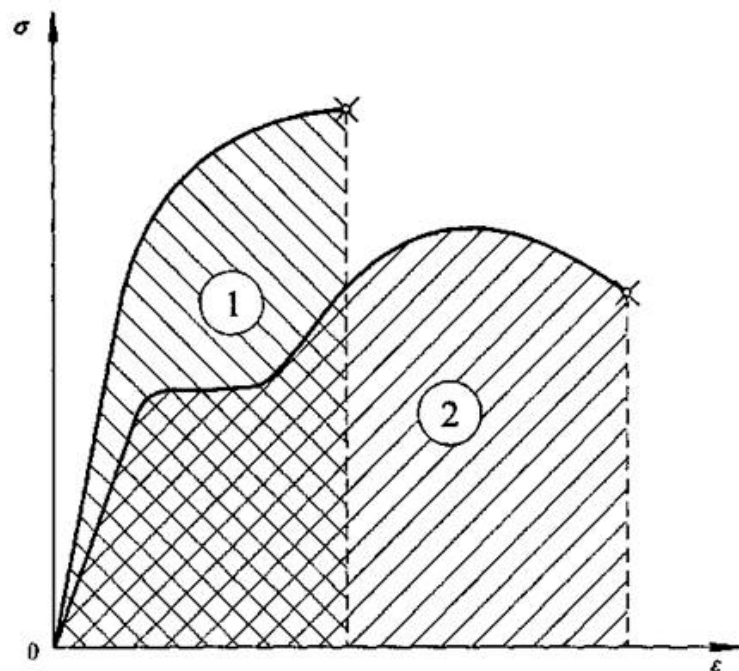




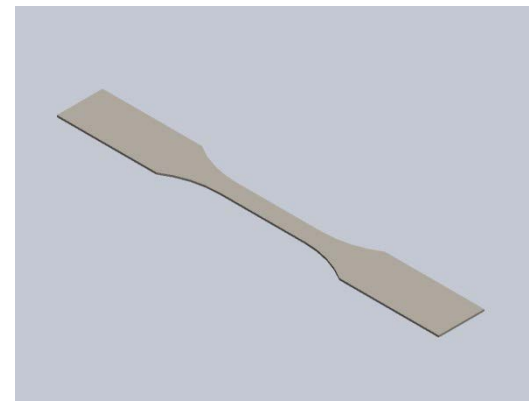
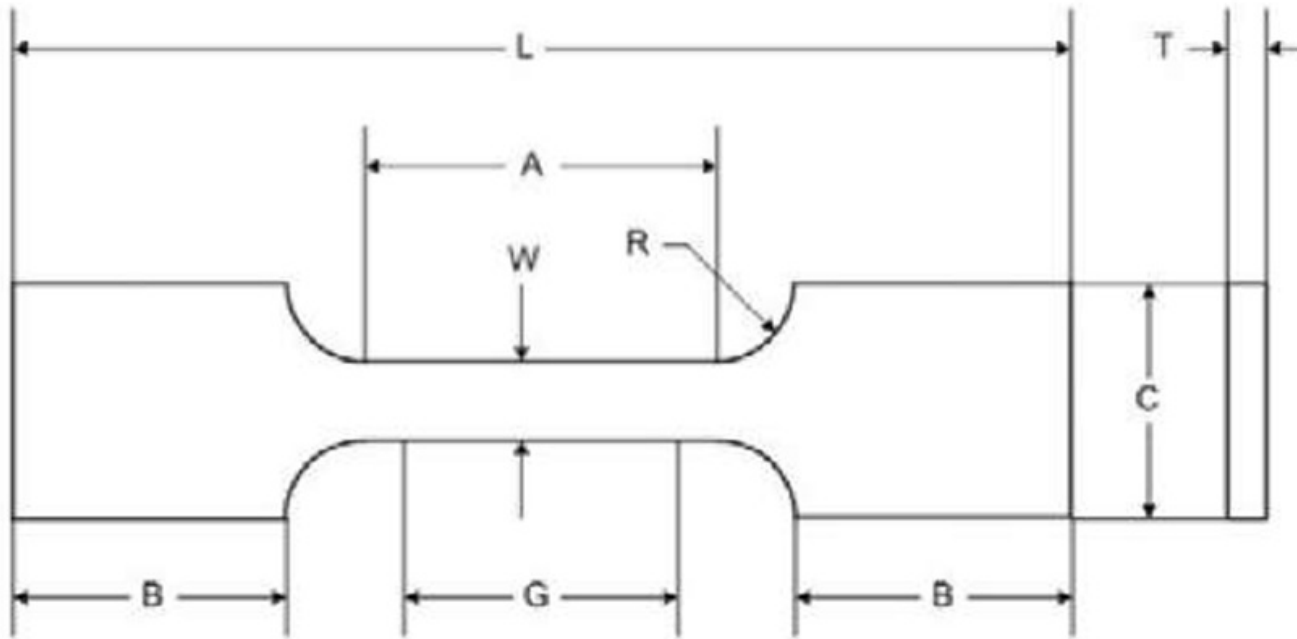
Термины «хрупкий» и «пластический» используются для различения типов разрушений или материалов, характеризующихся слабой или сильной вязкостью.

Термин «вязкость» служит для обозначения способности материала испытывать пластические деформации и поглощать энергию до и во время разрушения.

$$A = \int_0^{\epsilon_n} \sigma d\epsilon$$



Работа разрушения хрупкой (1) и пластичной (2) сталей

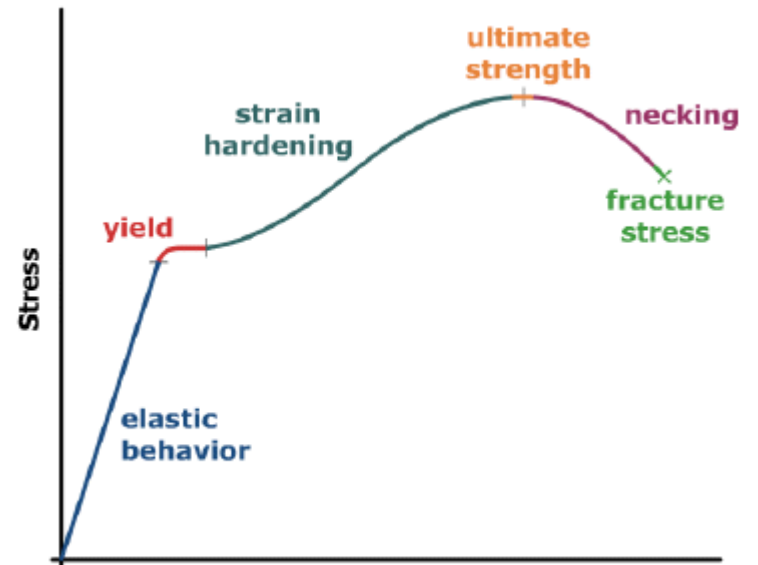
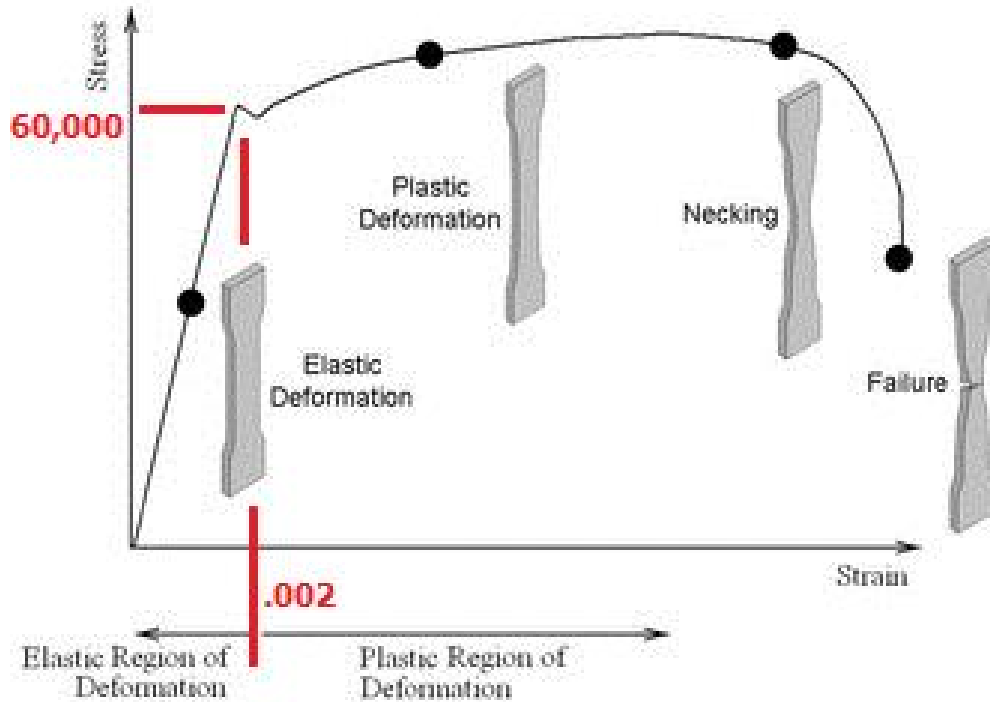


Dimension

	mm
G – Gage length	12.5 ± 0.025
W – Width	3.125 ± 0.0625
T – Thickness	0.254
R – Radius of fillet	5
L – Over-all length	50
A – Length of reduced section	15
B – Length of grip section	12.5
C – Width of grip section	12.5



Кривая «напряжение-деформация»



Испытания материалов **на растяжение** (сжатие) заключается в построении кривых зависимостей между величиной **удлинения** Δl (укорочения) и величиной **силы** P , которая вызвала данное удлинение (укорочение).

От диаграммы растяжения в координатах P и Δl можно, разделив все ординаты на площадь поперечного сечения образца F_0 , а абсциссы на первоначальную длину образца l_0 , перейти к диаграмме в координатах σ и ε , где:

$\sigma = \frac{P}{F_0}$ - нормальное напряжение в поперечном сечении образца;

$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0}$ - относительное удлинение

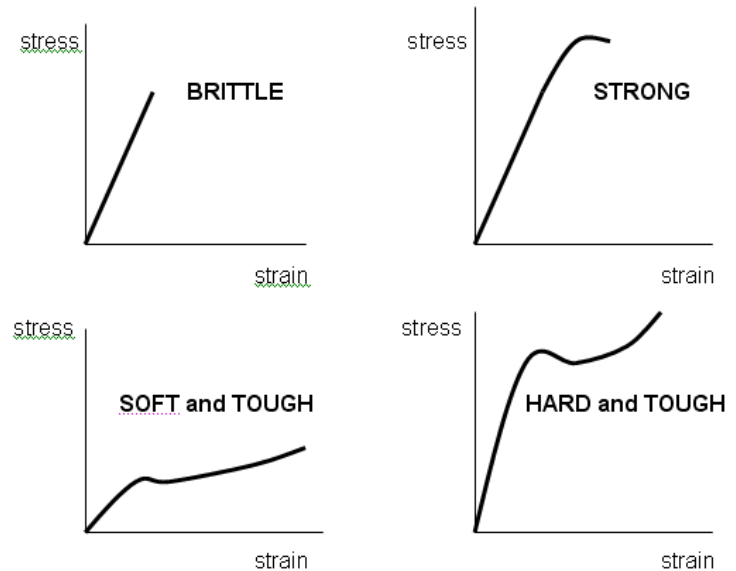
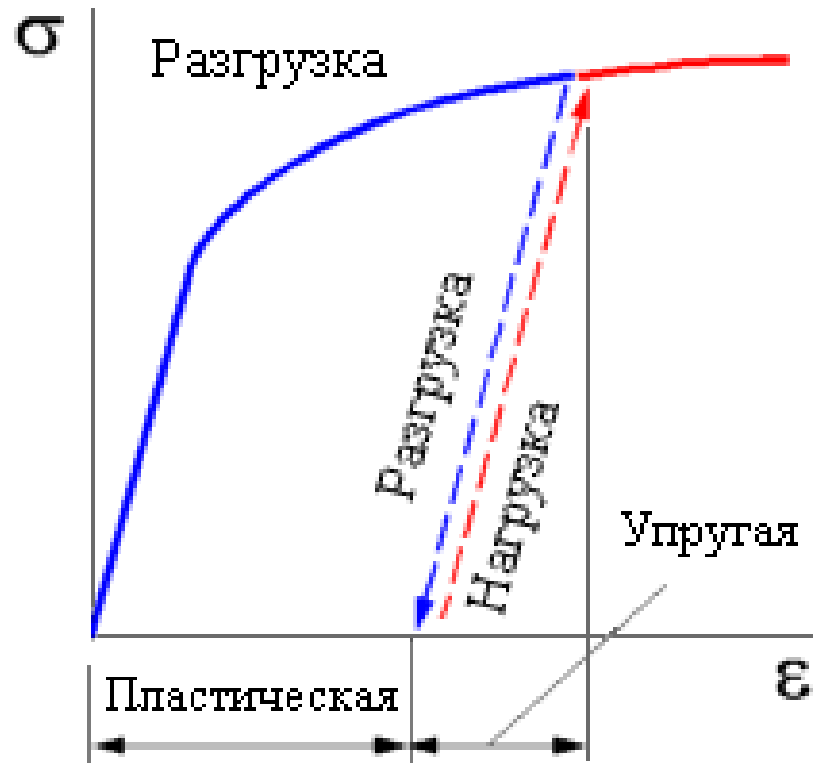


Диаграмма σ - ε более удобна и лучше отражает физические свойства материала, так как она не зависит от геометрических размеров испытываемого образца.



Относительное удлинение - это отношение в процентах приращения расчетной длины образца после разрыва ($l_k - l_H$) к его первоначальной длине l_H

$$\epsilon = (l_k - l_H) / l_H \cdot 100\%$$

Относительное сужение – это отношение в процентах абсолютного уменьшения площади поперечного сечения в шейке $\Delta F_{\text{ср}}$ к первоначальной площади F_0 ,

$$\psi = \frac{\Delta F_{\text{ср}}}{F_0} \cdot 100\%$$

Предел текучести

До определенного значения напряжения имеет место линейная зависимость между величинами относительного удлинения ϵ и напряжения σ .

Материал в данном случае подчиняется закону Гука – закону пропорциональности нагрузки и деформации:

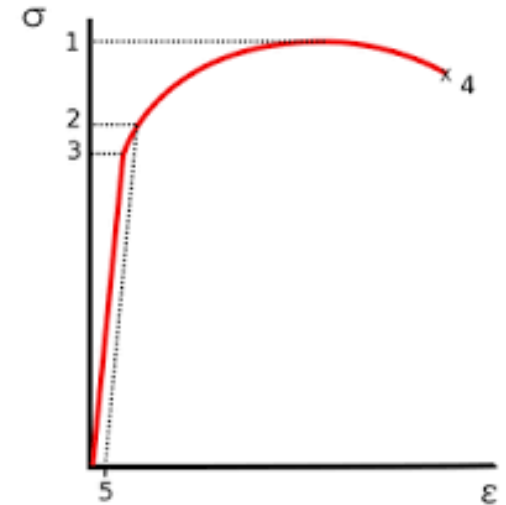
$$\sigma = E \cdot \epsilon$$

где коэффициент пропорциональности E - модуль продольной упругости (модуль Юнга), величина которого постоянна для каждого материала.

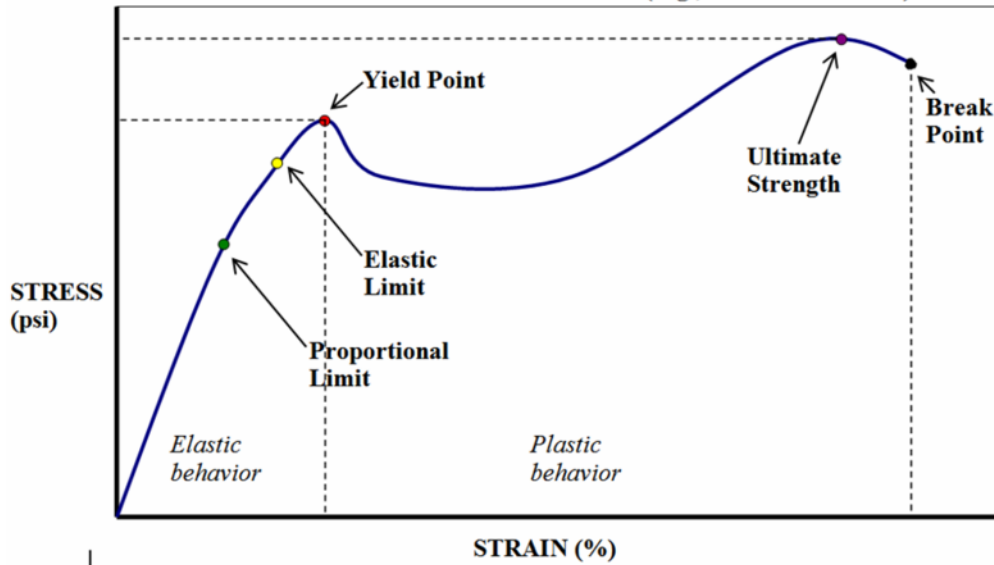
Предел текучести характеризует жесткость материала, т.е. способность сопротивляться деформированию под действием внешней нагрузки.

Для определения **предела текучести** материала по диаграмме напряжение-деформация необходимо:

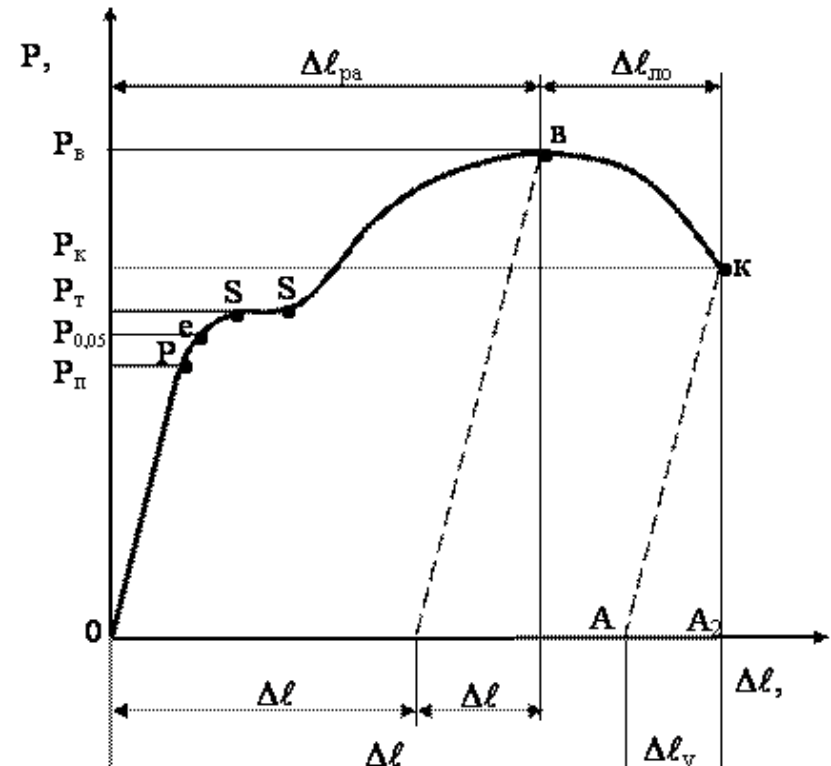
1. Найти точку $0.002 = 0.2 \%$ на оси деформаций
2. Нарисовать линию, параллельную участку упругого деформирования.
3. Значение напряжения, соответствующее пересечению данной линии и кривой напряжение-деформация, и есть **предел текучести** материала.

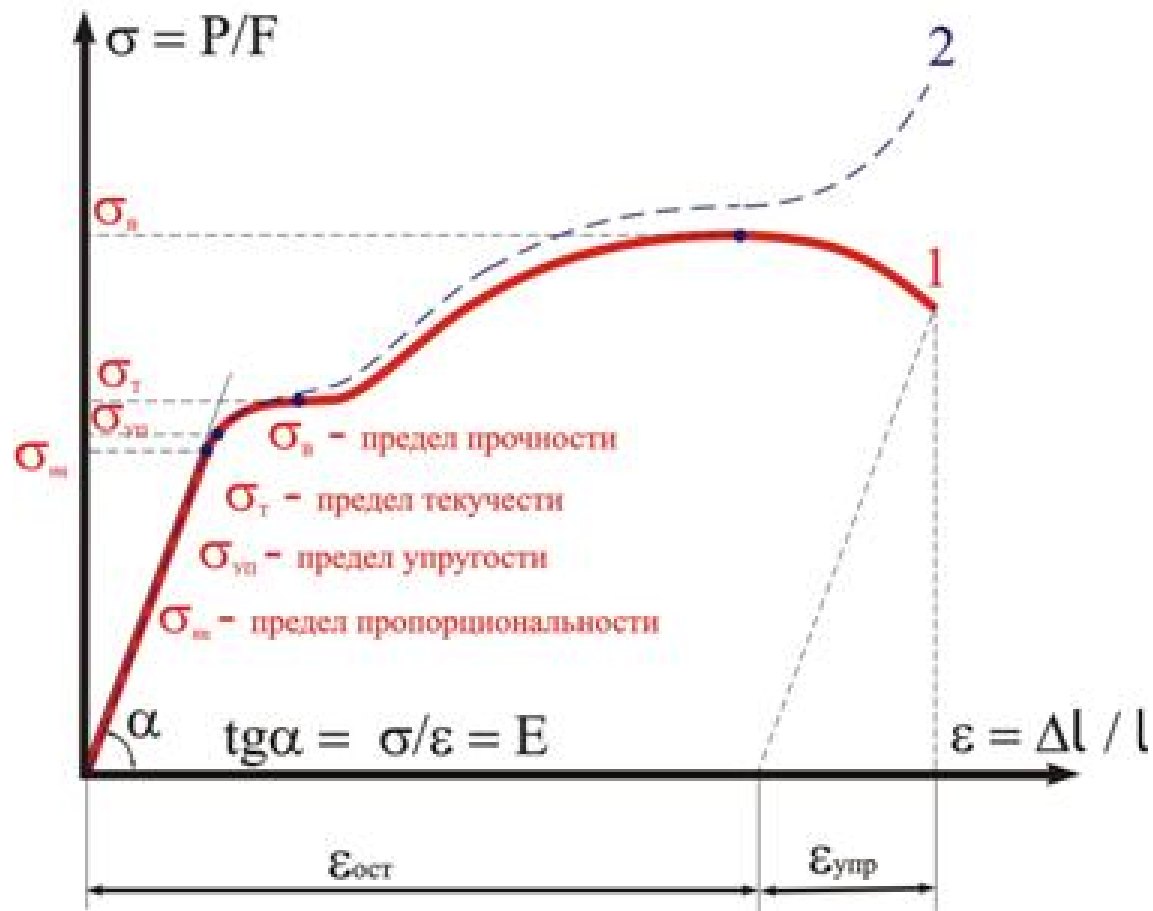


TYPICAL STRESS-STRAIN CURVE (e.g., Low Carbon Steel)



- предел пропорциональности
- предел упругости
- предел текучести
- предел прочности
- прочность при разрушении

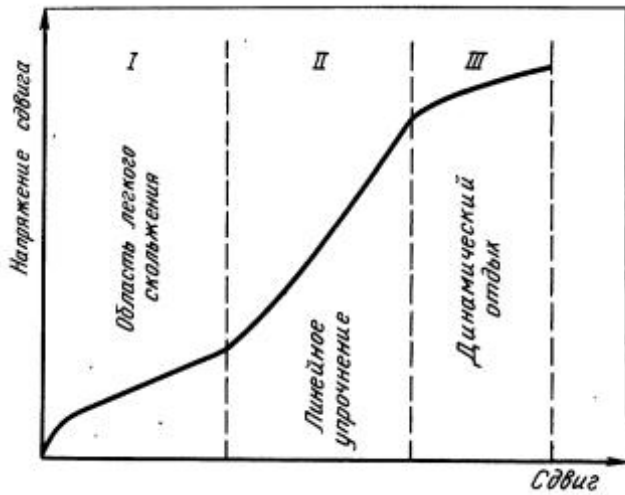




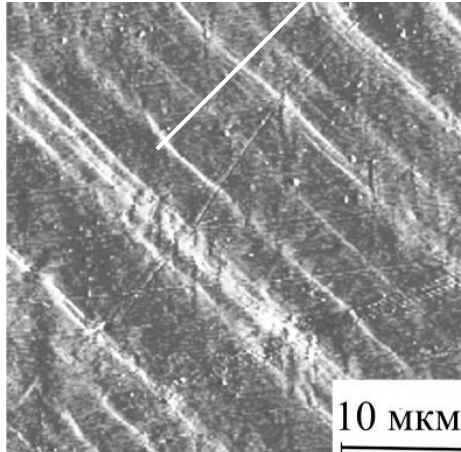
Кривая 1 - диаграмма условных напряжений, так как напряжения определяются отношением силы на первоначальную площадь поперечного сечения.

Кривая 2 - диаграмма истинных напряжений

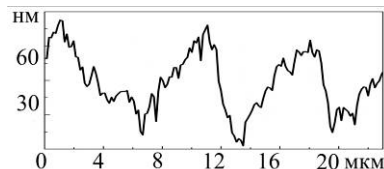
В диапазоне напряжений, соответствующих характеристикам прочности, диаграмма истинных напряжений мало отличается от диаграммы условных напряжений, поэтому на практике используют диаграммы условных напряжений.

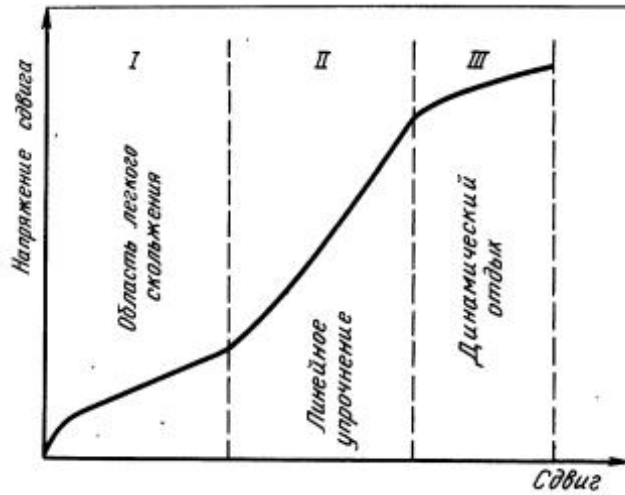


На начальной стадии (I) пластическая деформация монокристалла осуществляется движением дислокаций по одной системе плоскостей — **стадия легкого скольжения**.

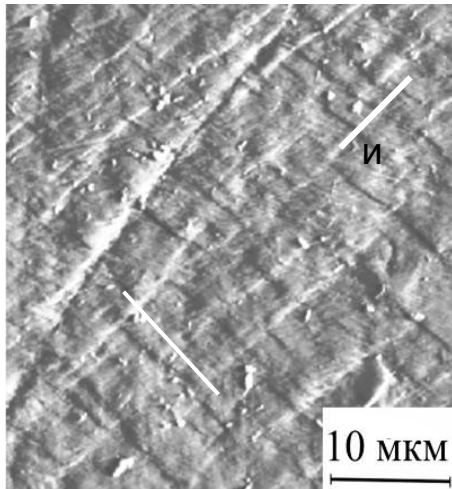


Дислокации на этой стадии перемещаются сравнительно беспрепятственно на большие расстояния, обеспечивая прогрессивную деформацию без значительного роста действующих напряжений.

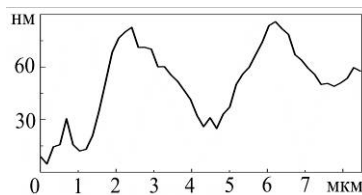
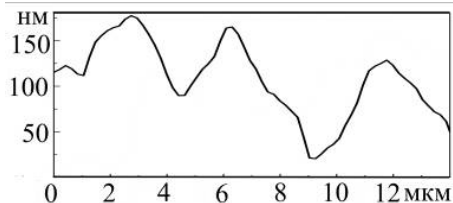


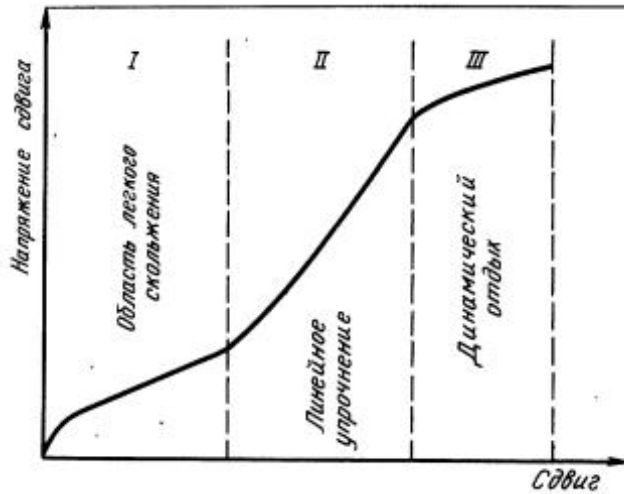


После этого начинается **стадия множественного скольжения** — движение дислокации в двух и более системах. На этой стадии после значительной деформации дислокационная структура металла сильно усложняется и плотность дислокаций возрастает по сравнению с исходным состоянием на четыре — шесть порядков, достигая 10^{-10} см^{-2} .



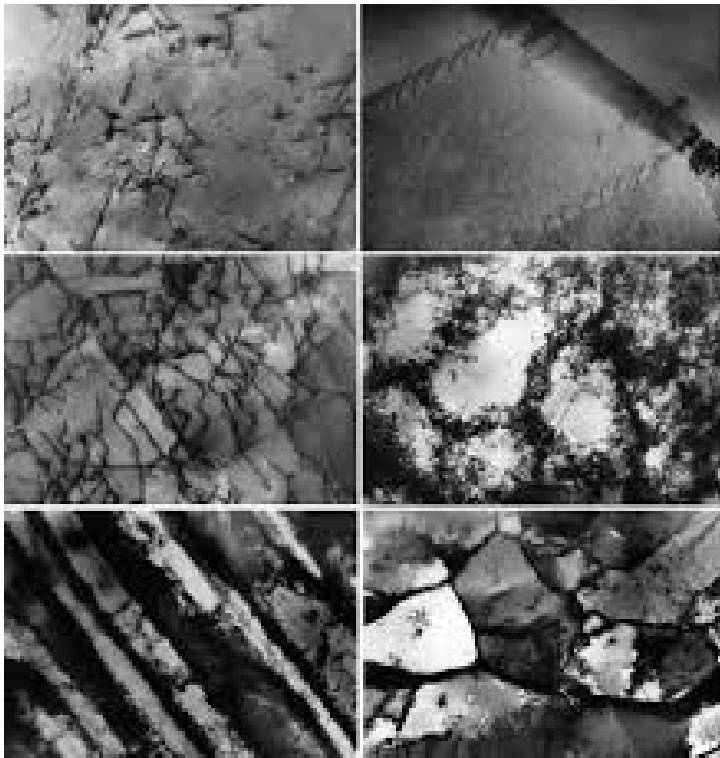
Вследствие упругого взаимодействия между дислокациями сопротивление их движению сильно возрастает и для их продвижения внешнее напряжение должно резко возрасти.

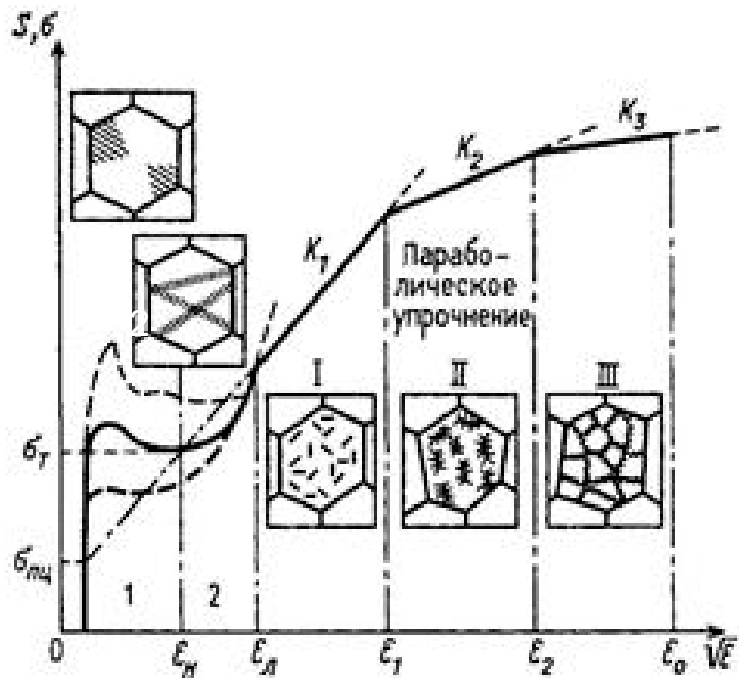




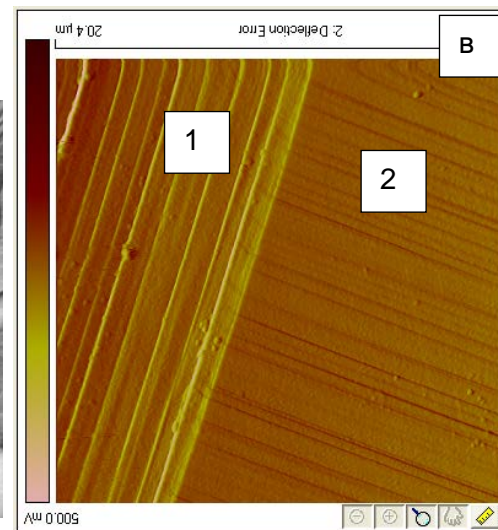
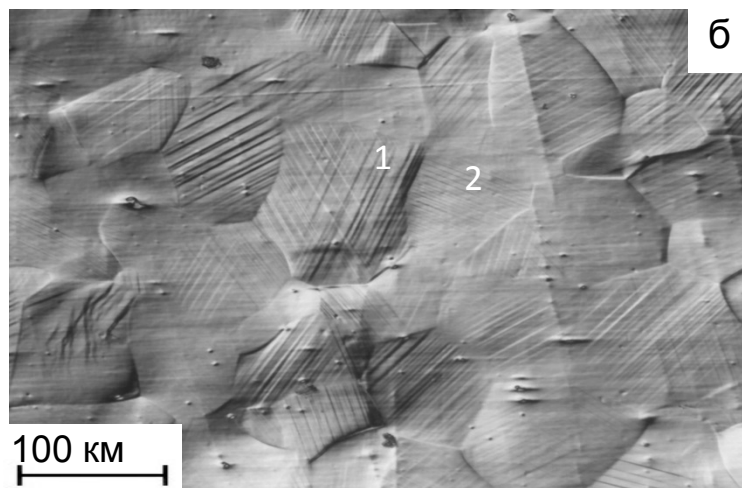
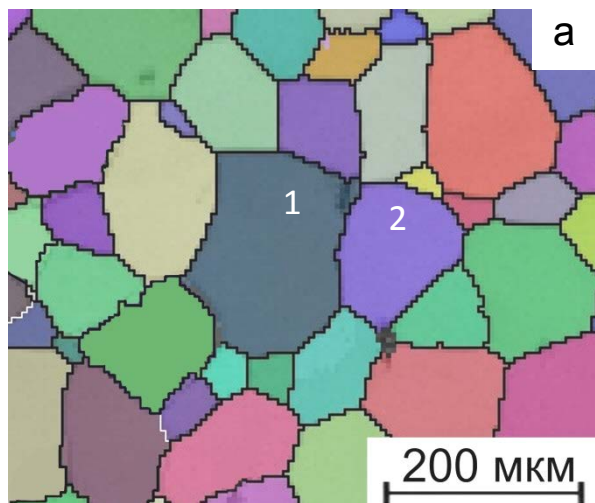
Под влиянием все возрастающего напряжения развивается поперечное скольжение винтовых дислокаций, т. е. скольжение с переходом из одной разрешенной плоскости скольжения в другую.

Это приводит к частичной релаксации напряжений, аннигиляции отдельных дислокаций разного знака и группировке дислокаций в объемные ячейки, внутри которых плотность дислокаций меньше, чем в стенках ячеек. Наступает III стадия деформации, когда происходит так называемый **динамический отдых**.



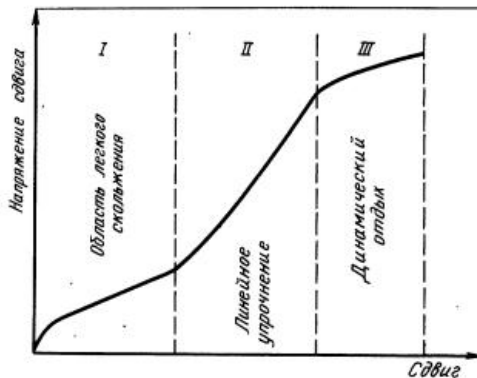
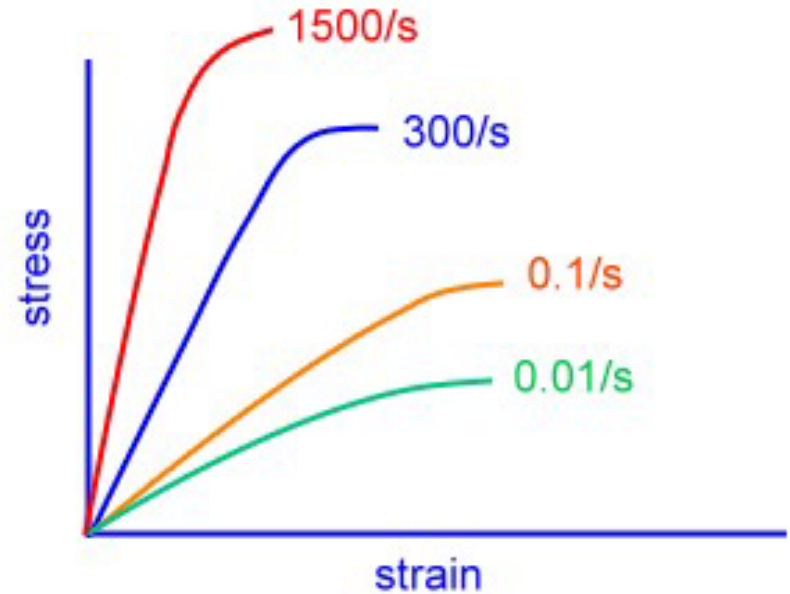
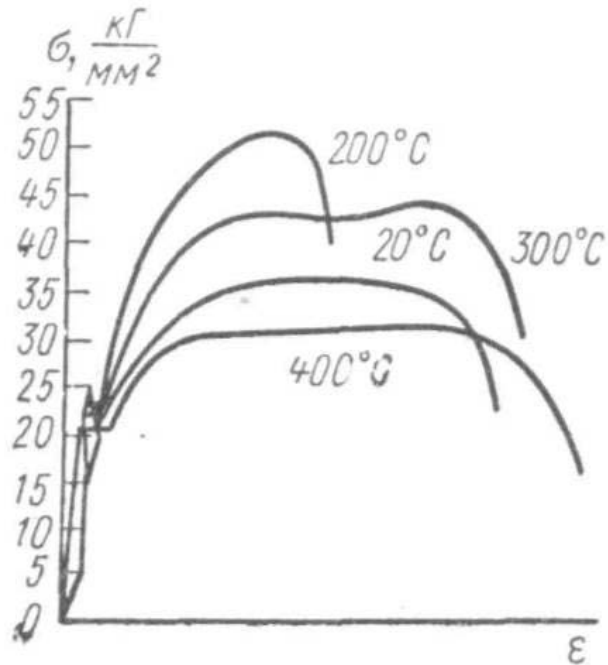


Трехстадийная кривая «напряжение-деформация» поликристаллов
 : I – стадия легкого скольжения;
 II – стадия линейного упрочнения;
 III – стадия параболического упрочнения



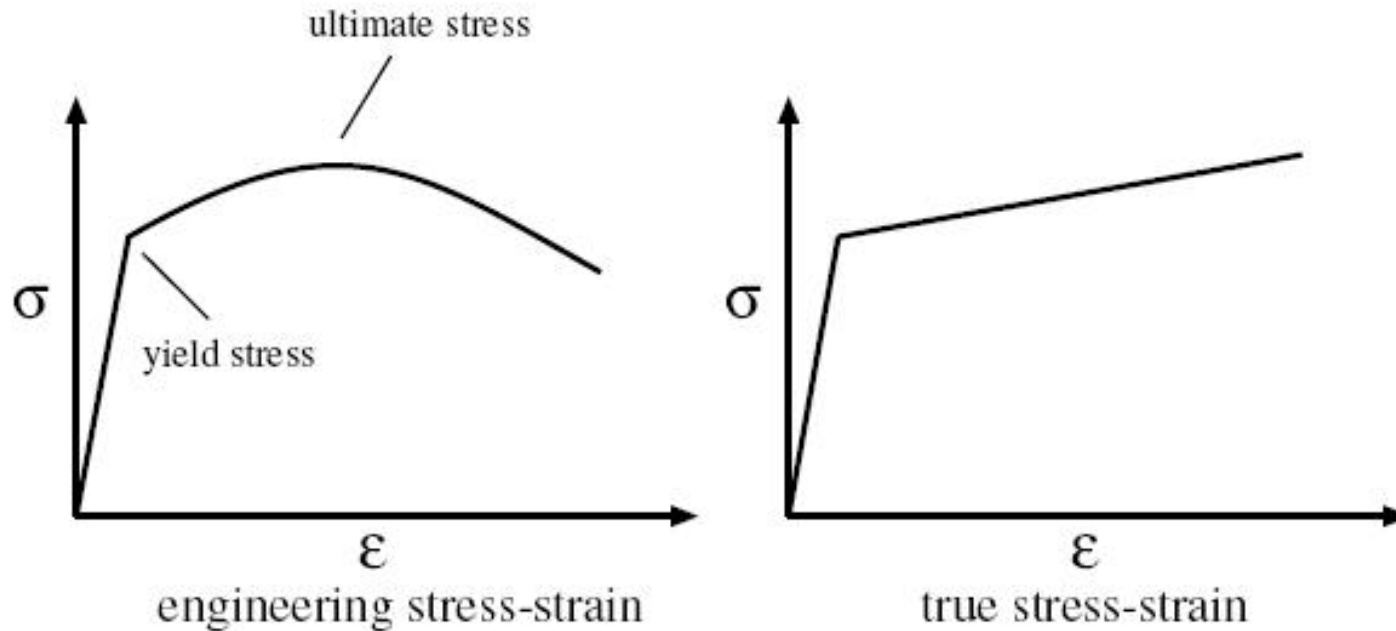
Карта разориентировок зерен (а), оптическое (б) и АСМ-изображения (в) образца титана ВТ1-0, одноосное растяжение, $\varepsilon = 5\%$

Влияние температуры и скорости деформации



В случае монокристаллов при увеличении температуры стадия II (линейного упрочнения) продолжается до более высоких напряжений, и увеличивается *наклон кривой* на стадии III (динамического отдыха).

Влияние температуры на упрочнение металлов на стадии I (легкого скольжения) невелико.

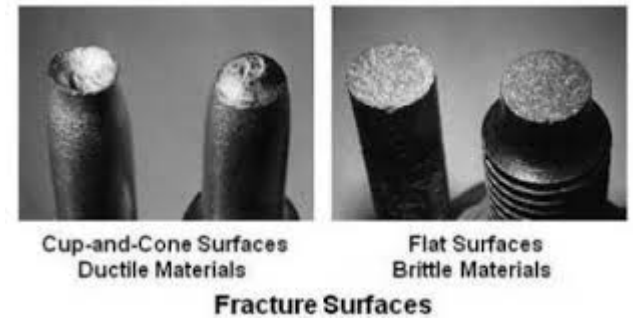
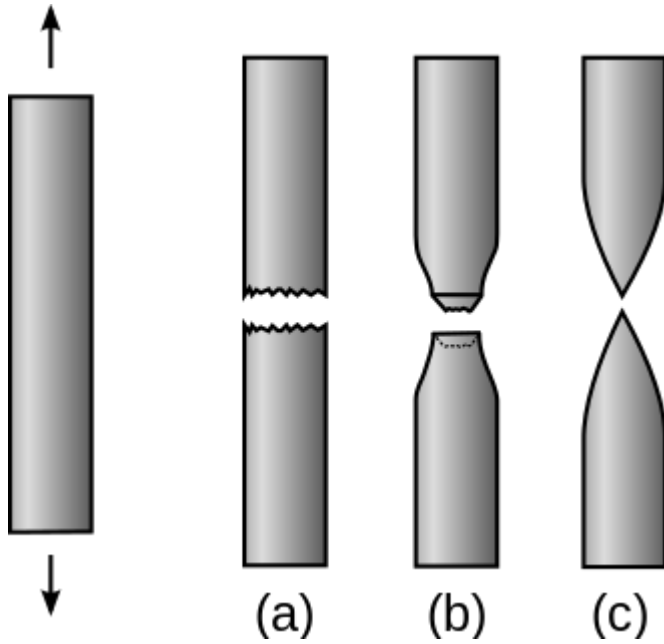


Relationship between **true** and **engineering stresses**: $\sigma_t = (1 + \epsilon_e)\sigma_e$

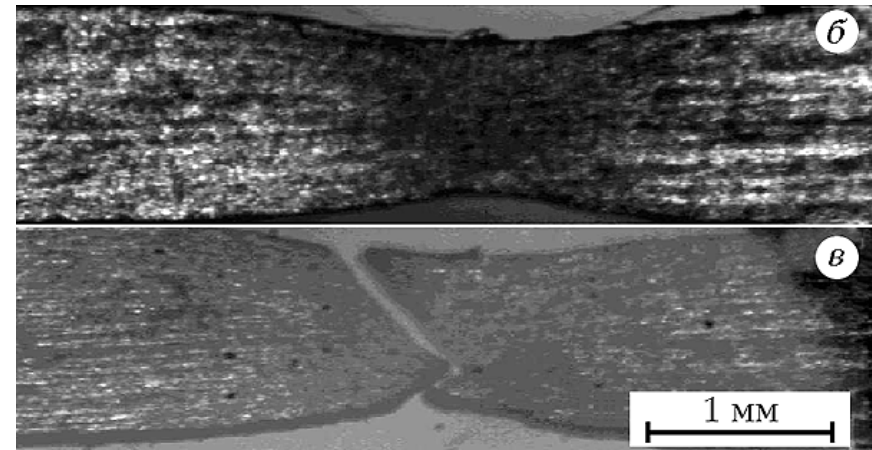
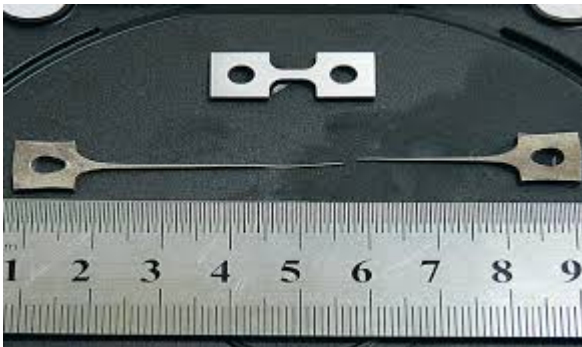
Relationship between **true** and **engineering strain**: $\epsilon_t = \ln(1 + \epsilon_e)$

$$\epsilon_e = (l_k - l_H) / l_H \cdot 100\%$$

Вязкое и хрупкое разрушение



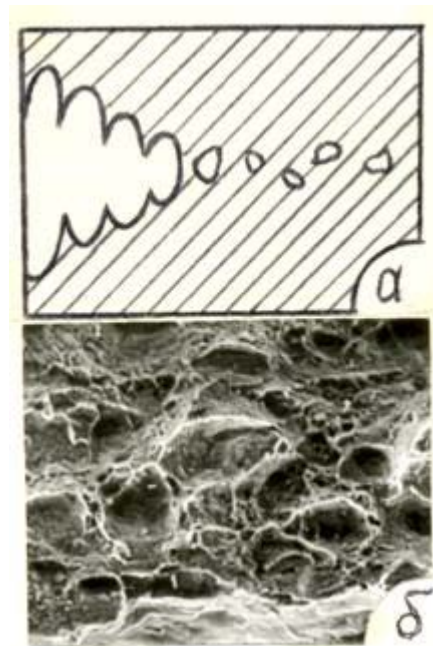
- (a) Brittle fracture
- (b) Ductile fracture
- (c) Completely ductile fracture



Шейка образуется в самом слабом месте образца. Это обусловлено случайной неоднородностью материала.

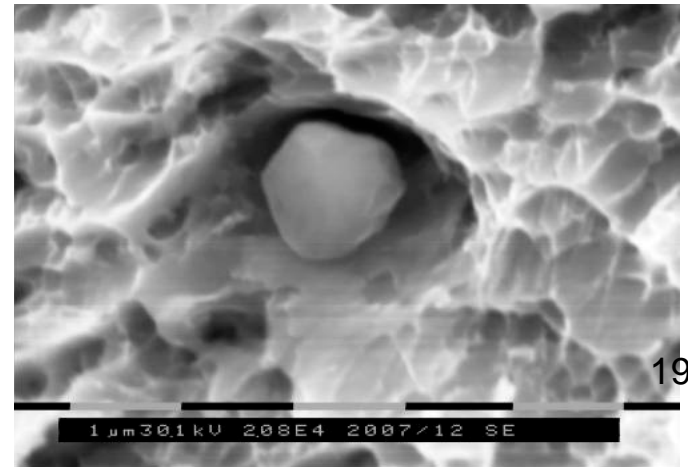
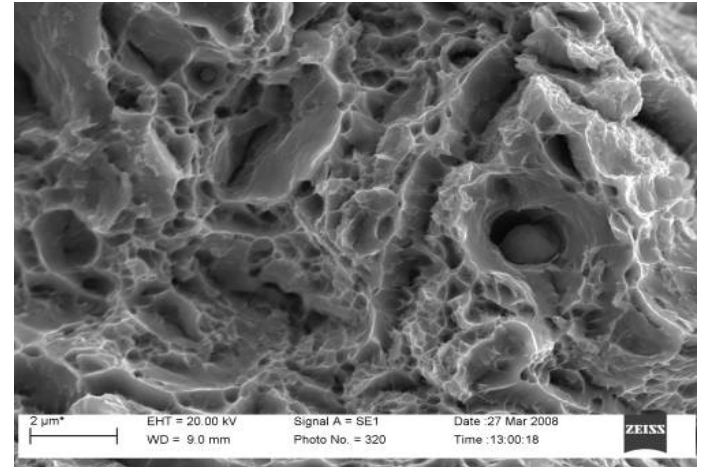
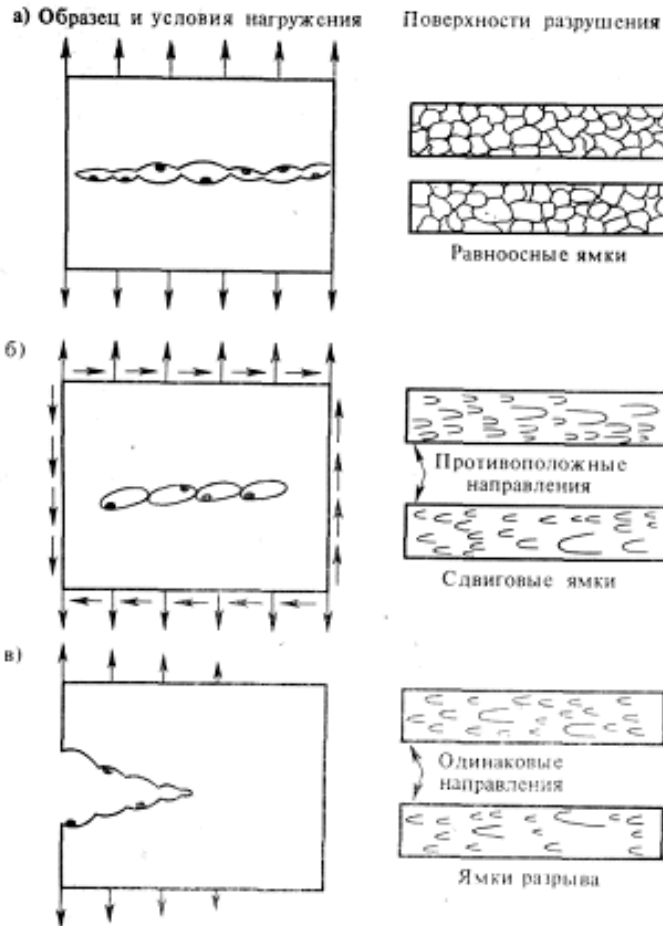
Первоначальное напряженное состояние - одноосное. Внутри шейки напряженное состояние - трехосное растяжение.

Механизм разрушения начинается в области шейки с образования мелких пустот-пор,. Под действием растягивающих напряжений материал перемычек между порами разрушается, поры сливаются, образуя характерный ямочный микрорельеф



В конструкционных материалах всегда содержится большое количество частиц.

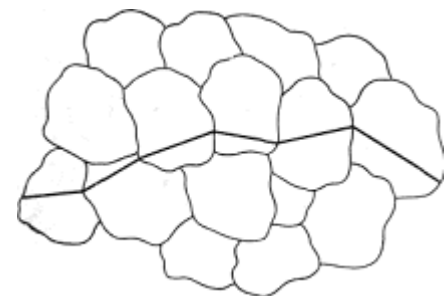
Поскольку эти частицы не могут деформироваться так же легко, как кристаллическая решетка, то при возникновении в их окрестности обширной пластической зоны они теряют сцепление с кристаллической решеткой. Таким образом образуются микроскопические пустоты, которые растут за счет скольжения: в материале между пустотами образуется шейка.



Разрушение **сколом** — наиболее хрупкая форма разрушения, которое может произойти в кристаллических материалах

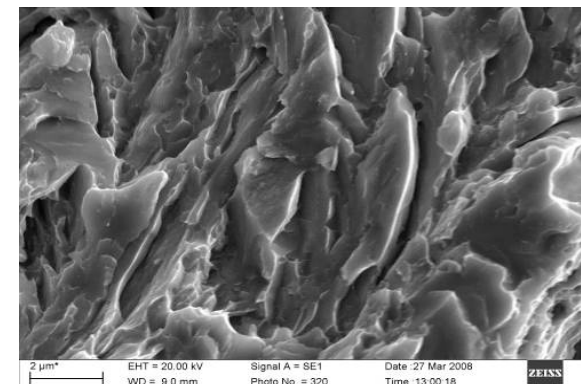


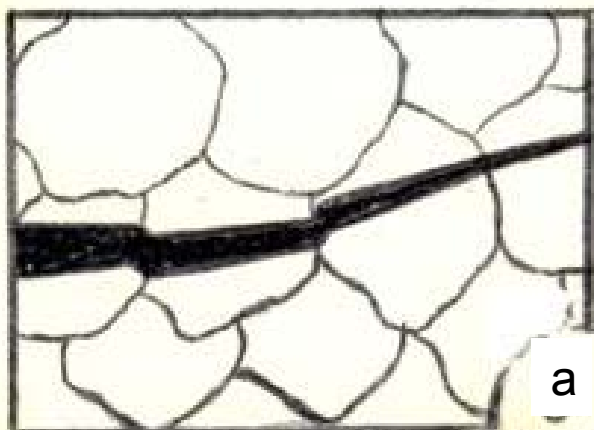
Разрушение **сколом** происходит благодаря простому разрыву атомных связей при непосредственном отделении кристаллографических плоскостей. Его главной **отличительной особенностью** является то, что он связан с определенной кристаллографической плоскостью.



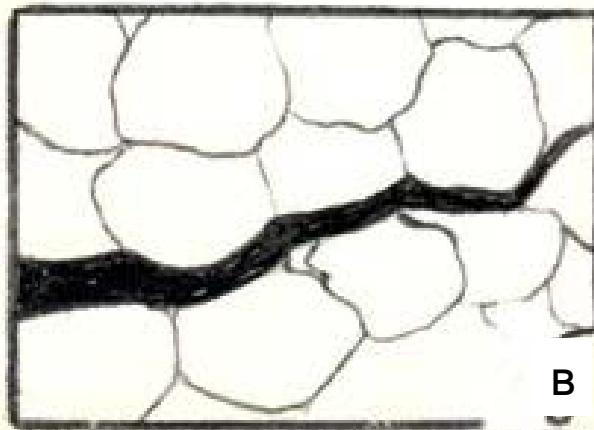
Железо, например, разрушается сколом вдоль кубических плоскостей своей элементарной ячейки.

Поскольку соседние кристаллические зерна имеют различную ориентацию, хрупкое разрушение на границе кристаллического зерна меняет свое направление и продолжает распространяться в наиболее выгодной поверхности скола.





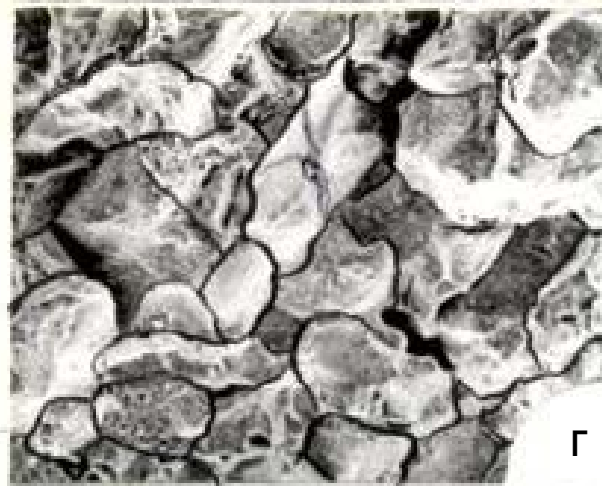
а



в



б



г

а, б- транскристаллитное хрупкое разрушение;
в, г- интеркристаллитное (межзеренное) хрупкое разрушение