



# Структурная геология

Деформации горных пород

# Деформации и напряжения

Деформацией называется **изменение формы и объема тела, возникшее в результате приложения к нему внешних воздействий** (внешних сил, температуры и др.) и связанное с изменением относительного положения частиц тела вследствие их перемещения.

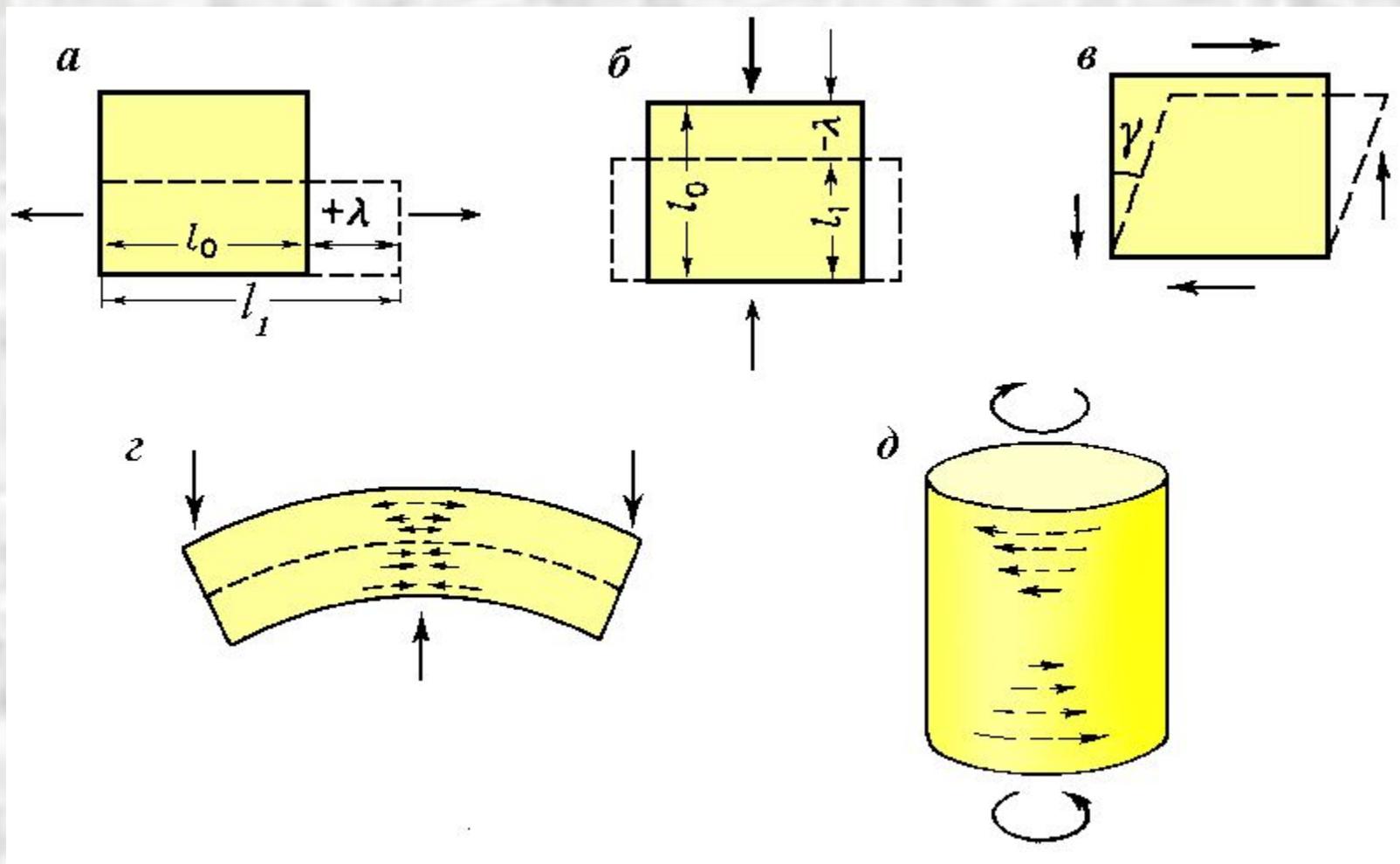
# Напряжение

**Деформация** представляет собой **результат изменения межатомных расстояний и перегруппировки блоков атомов** и обычно **сопровождается изменением величин межатомных сил**, мерой которого является **упругое напряжение**.

# Виды деформаций

Простейшими разновидностями нагрузок являются нагрузки сжимающие, растягивающие, сдвигающие (срезающие, скалывающие), изгибающие и скручивающие, которые вызывают соответственно **деформации: сжатия, растяжения, сдвига** (среза, скалывания), **изгиба, кручения**

# Простые виды нагрузок и деформаций



**а** — растяжение; **б** — сжатие; **в** — сдвиг; **г** — изгиб; **д** — кручение.

Любую сложную комбинацию деформирующих сил, приложенных к телу в любых направлениях, можно свести к действию только сжимающих или растягивающих сил разной величины, ориентированных по трем взаимно перпендикулярным направлениям, именуемым **главными осями напряжений**

Деформации разделяются на:

- ***упругие***,
- ***пластические*** и
- ***разрывные*** (разрушения)

**Упругими деформациями** называются такие изменения формы и объема тела, которые **исчезают после удаления вызвавших их сил.**

Эти деформации связаны лишь с упругими искажениями решетки атомов и наблюдаются, пока величина внешних сил не превзошла известного предела.

Если после удаления внешних сил **форма и объем тела не восстанавливаются** в первоначальном виде, то оставшиеся разности формы и объема тела представляют собой **остаточные деформации** и деформация тогда называется **пластической**.

# Внутризеренная пластическая деформация

Простейший способ пластической деформации в кристаллическом веществе — **трансляция** — **скольжение одного слоя кристаллической решетки относительно другого.**

# Внутризеренная пластическая деформация

*Частный случай трансляции* — образование в кристаллических зернах *двойников*.

В этих случаях говорят о *внутризеренной пластической деформации* (межатомной или межмолекулярной).

# Межзеренная пластическая деформация

Межзеренная пластическая деформация осуществляется путем перемещения (вращения) зерен или кристаллов, составляющих тело.

# Новообразование минералов

Другой путь пластической деформации — **массовое новообразование минералов** в теле, подвергающемся воздействию внешних сил.

**Разновидности** новообразования минералов:

# Новообразование минералов

## ***Ламинарное скольжение*** —

явление, близкое к трансляции, но только много более крупноразмерное. Вдоль плоскостей ламинарного скольжения развиваются новые минералы, часто имеющие пластинчатую или таблитчатую форму.

## Новообразование минералов

***Грануляция*** — распадение крупных кристаллов (например кварца) на агрегат более мелких, часто приобретающих при этом закономерную ориентировку.

# Разрывная деформация

*Если остаточные деформации сопровождаются разрушением тела (возникновение трещин, раздробление на части), имеет место **разрывная деформация.***

# Напряжения

В деформируемых телах под действием внешних сил возникают **внутренние силы**.

Внутренние силы стремятся восстановить прежнюю форму и объем деформированного тела.

Мерой этих сил является **напряжение**.

## Метод сечений

Чтобы численно охарактеризовать степень воздействия внешних сил на деформированное тело, необходимо определить величину внутренних межатомных сил, возникших в результате деформации.

# Метод сечений

Для этого пользуются так называемым **методом сечений**.

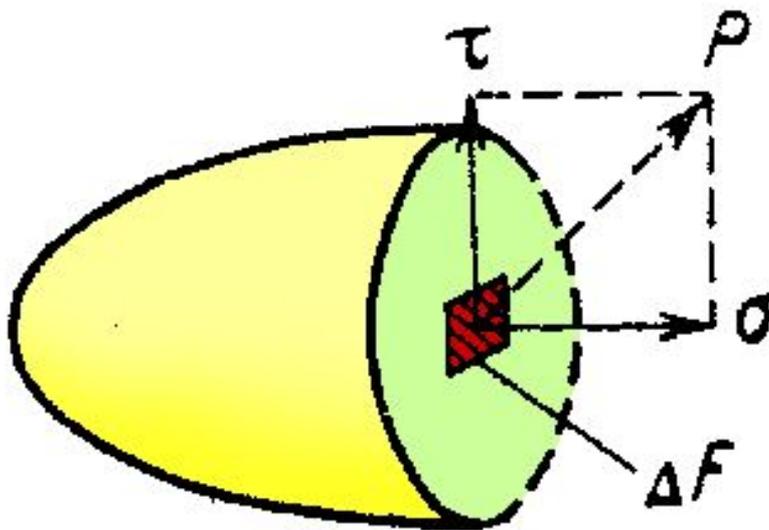
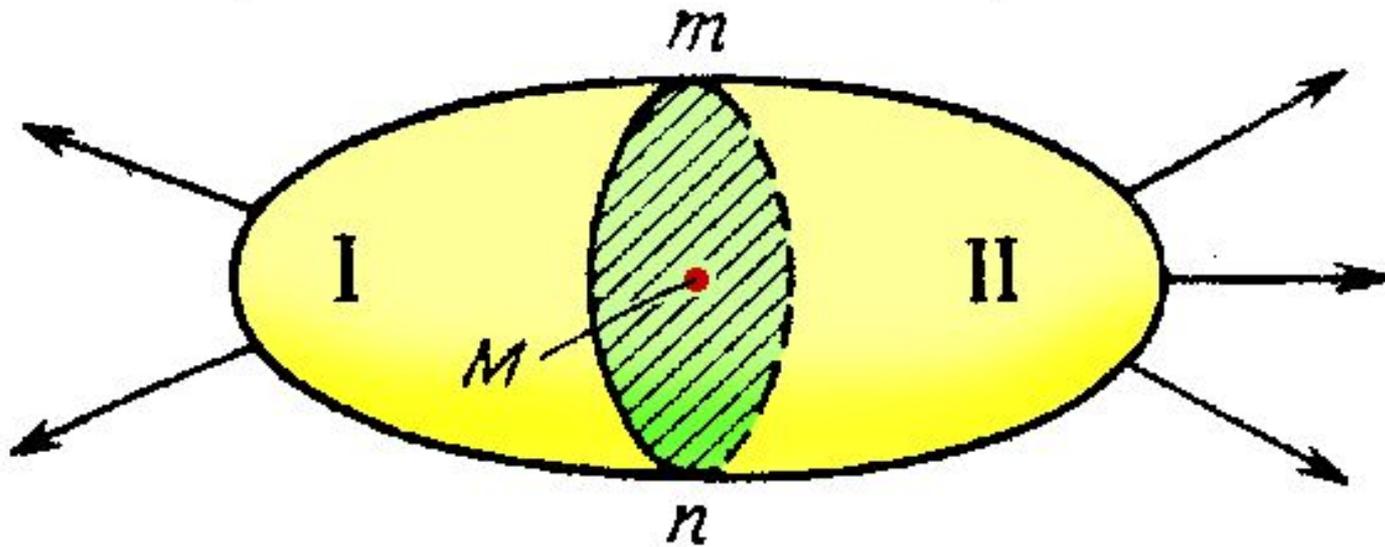
Через одну и ту же точку тела можно провести множество сечений.

**Величина и направление напряжений различны в зависимости от того, как проведено сечение.**

Нельзя говорить о напряжении, не указывая сечения, через которое происходит передача этого напряжения.

***Внутренняя сила взаимодействия, приходящаяся на единицу площади, выделенную у какой либо точки сечения  $mn$ , и является напряжением в этой точке по проведенному сечению.***

# Нормальное и касательное напряжения



$P$  – полное напряжение

$\sigma$  – нормальное напряжение

$\tau$  – касательное напряжение

$\Delta F$  – элементарная площадка

Стрелками показано направление деформирующих сил

# Размерность напряжения

Напряжение представляет собой **силу, приходящуюся на единицу площади.**

Измеряется в  **$\text{кг}/\text{см}^2$ ,  $\text{кг}/\text{мм}^2$ ,  $\text{т}/\text{см}^2$ ,  $\text{т}/\text{м}^2$**  и т. д.

# Напряженное состояние деформируемых тел

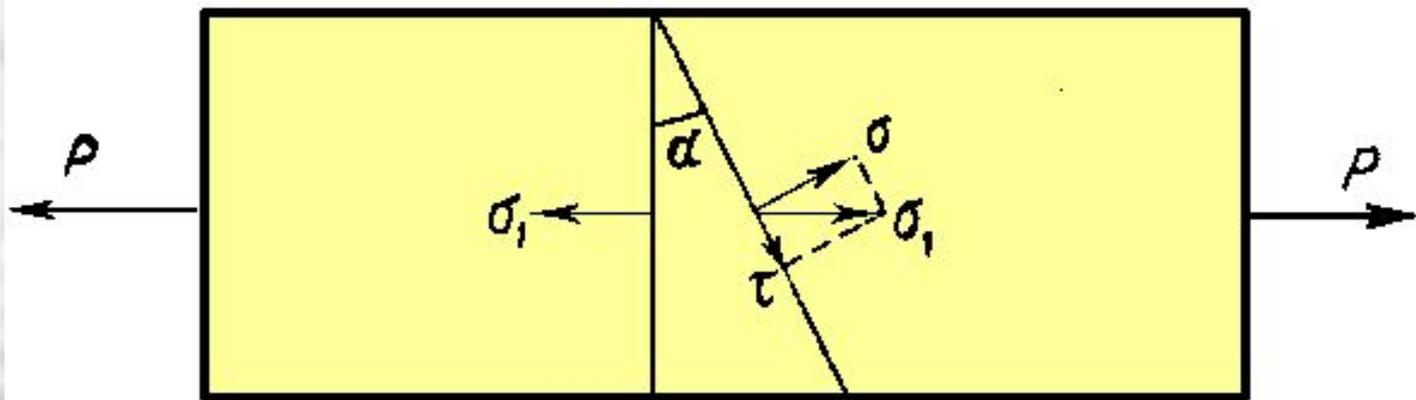
Когда тело находится под действием уравновешенных внешних сил, при установившемся упругом равновесии всех его частиц, говорят о **напряженном состоянии тела**.

## Линейное напряженное состояние

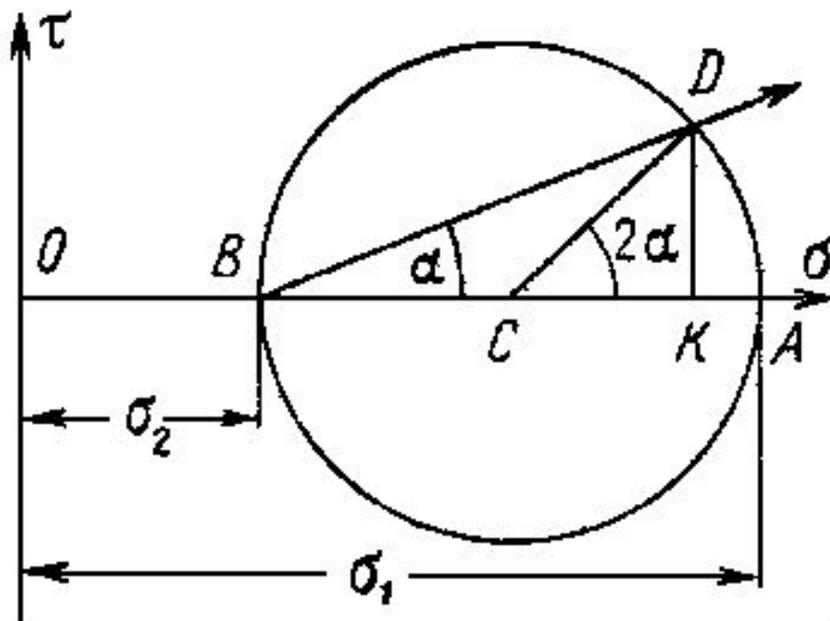
В стержне, к концам которого приложены две противоположно направленные вдоль оси силы, устанавливается напряженное состояние, называемое **линейным или одноосным**.

## **Плоское напряженное состояние**

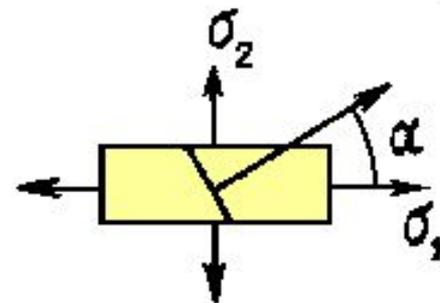
При действии на тело сил, вызывающих растяжение (или сжатие) в двух взаимно перпендикулярных направлениях, возникает ***плоское напряженное состояние***.



а



б



### Напряженное состояние:

а – линейное (одноосное); б – плоскостное (двухосное)

## **Пространственное напряженное состояние**

При действии на тело произвольно направленных сил возникает **трехосное, или пространственное напряженное состояние.**

### **Однородное напряженное состояние**

Если напряжения во всех взаимно-параллельных площадках, проведенных через различные точки тела, одинаковы, то напряженное состояние называется **однородным.**

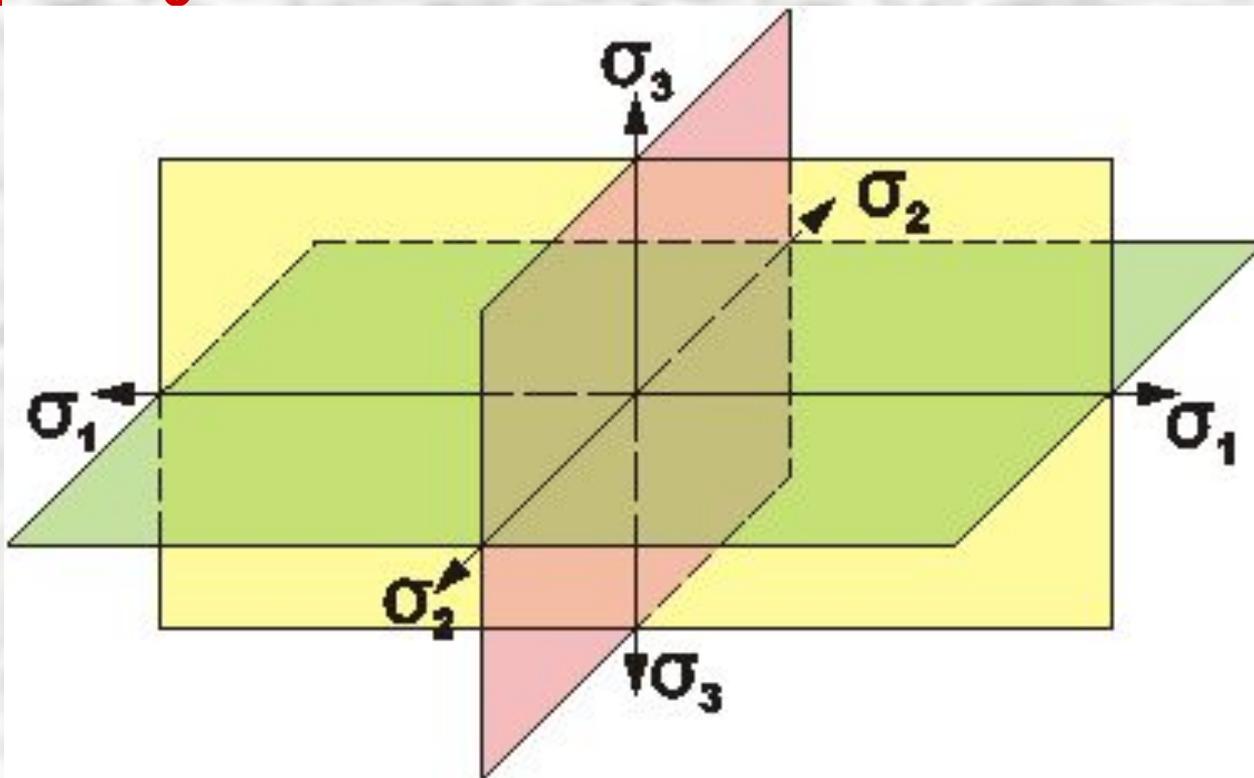
## Главные напряжения

Через любую точку тела можно провести три взаимно перпендикулярные площадки, в которых отсутствуют касательные напряжения.

# Главные напряжения

Эти площадки называются главными, а действующие на них нормальные напряжения — **главными напряжениями**:

$$\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3.$$



# Главные оси деформации

Нормали к главным площадкам называются главными осями напряженного состояния.

Главную ось деформации, совпадающую с направлением минимального сжимающего или максимального растягивающего напряжения, называют осью деформации **A**.

Соответственно главную ось деформации, совпадающую с максимальным сжимающим напряжением, называют осью деформации **C**.

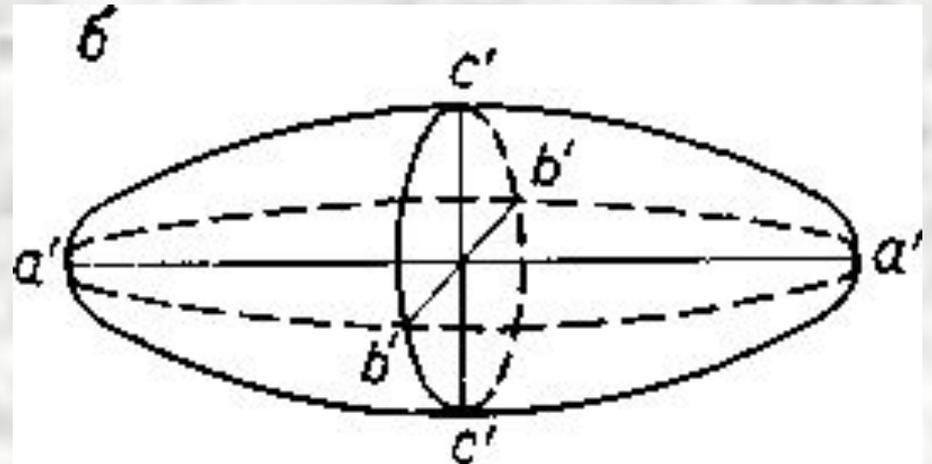
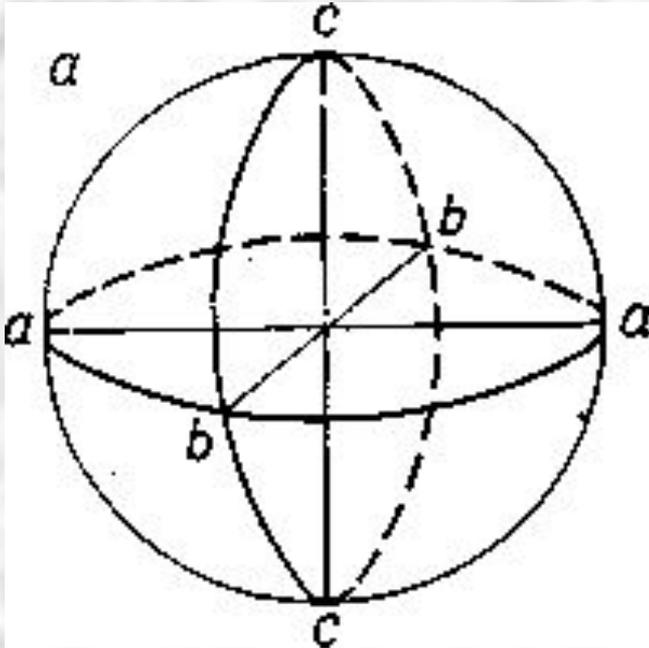
Ось деформации **B** занимает

# Эллипсоид деформации

Представление об эллипсоиде деформаций введено Г. Беккером в 1893 г.

Представим себе шар, изображающий первичное, недеформированное состояние тела. Если к шару будут приложены силы сжатия или растяжения разной величины по трем взаимно перпендикулярным направлениям, то шар превратится в трехосный эллипсоид.

# Эллипсоид деформации



В направлении максимального сжатия расположится наименьшая ось эллипсоида, а в направлении максимального растяжения — наибольшая.

# Эллипсоид деформации



Схема напряжений в изгибаемом слое, представленная с помощью эллипсоидов, образовавшихся вследствие деформации шаров, вписанных в слой до изгиба.  $mn$  — нейтральная поверхность.

# Неоднородные деформации

Во всех рассмотренных случаях предполагалось, что мы имеем дело с однородной деформацией в изотропном теле.

# Неоднородные деформации

В геологической обстановке мы встречаемся всегда с анизотропными средами и с неоднородной деформацией. Главные напряжения здесь распределены сложно и от места к месту меняются как по величине, так и по направлению.

# Неоднородные деформации

С течением времени расположение напряжений также меняется, меняются и механические свойства пород, испытывающих значительные деформации.

## Неоднородные деформации

Приведенные выше рассуждения становятся справедливыми только **для отдельных малых объемов породы, в пределах которых деформацию можно считать однородной.**

Для полного механического анализа необходимо было бы определить положение главных осей напряжения для каждого небольшого объема горной породы отдельно и учитывать изменение положения тех же осей во времени в процессе деформации.

# Общий процесс деформации и ее формы.

При возрастании приложенных к телу внешних сил (нагрузок) оно вначале реагирует на это **упругой деформацией**.

При дальнейшем повышении нагрузки **упругая деформация переходит в пластическую**, а последняя сменяется разрушением тела — **разрывной деформацией**.

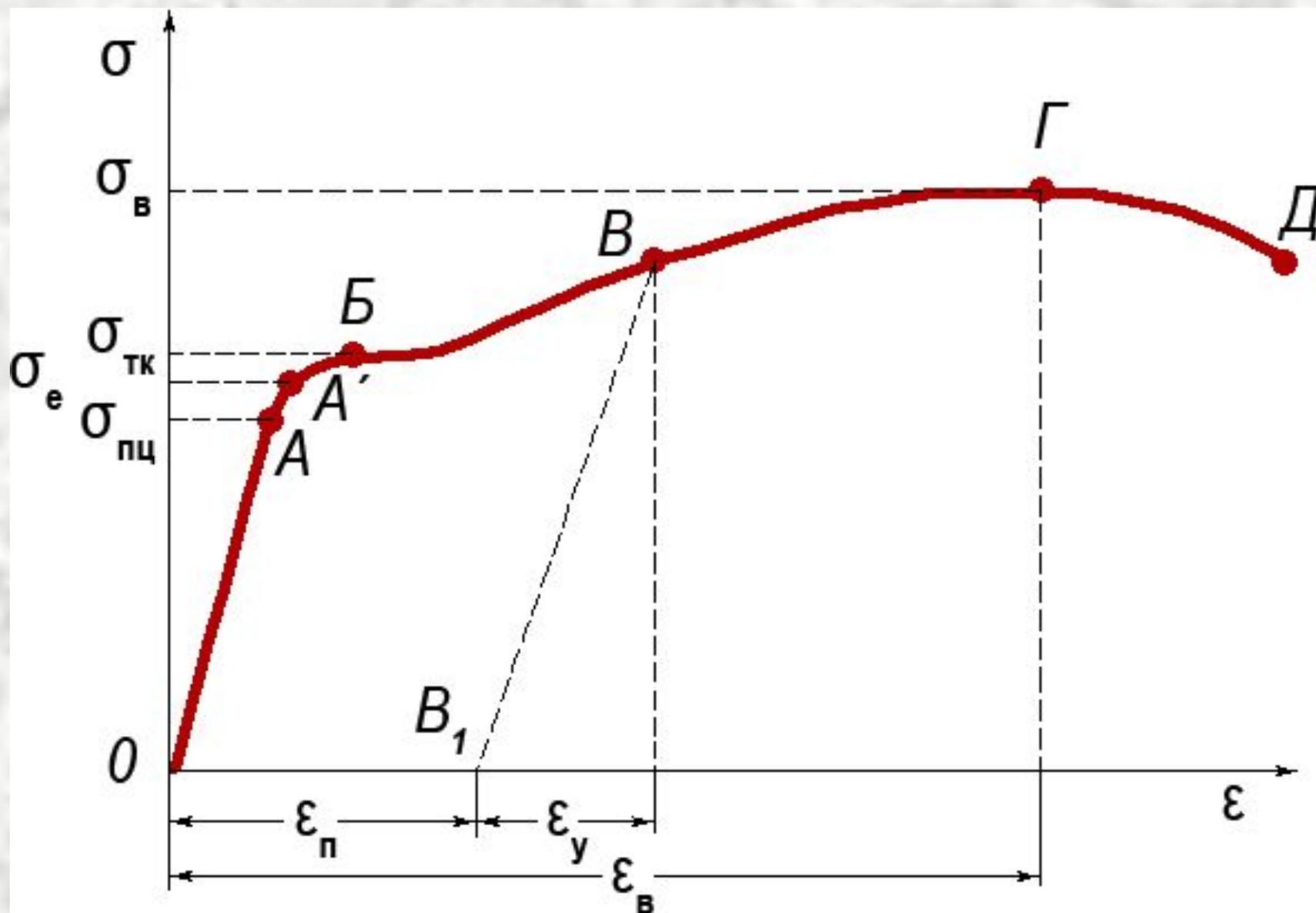
Эти три вида деформации в природе обычно не встречаются самостоятельно.

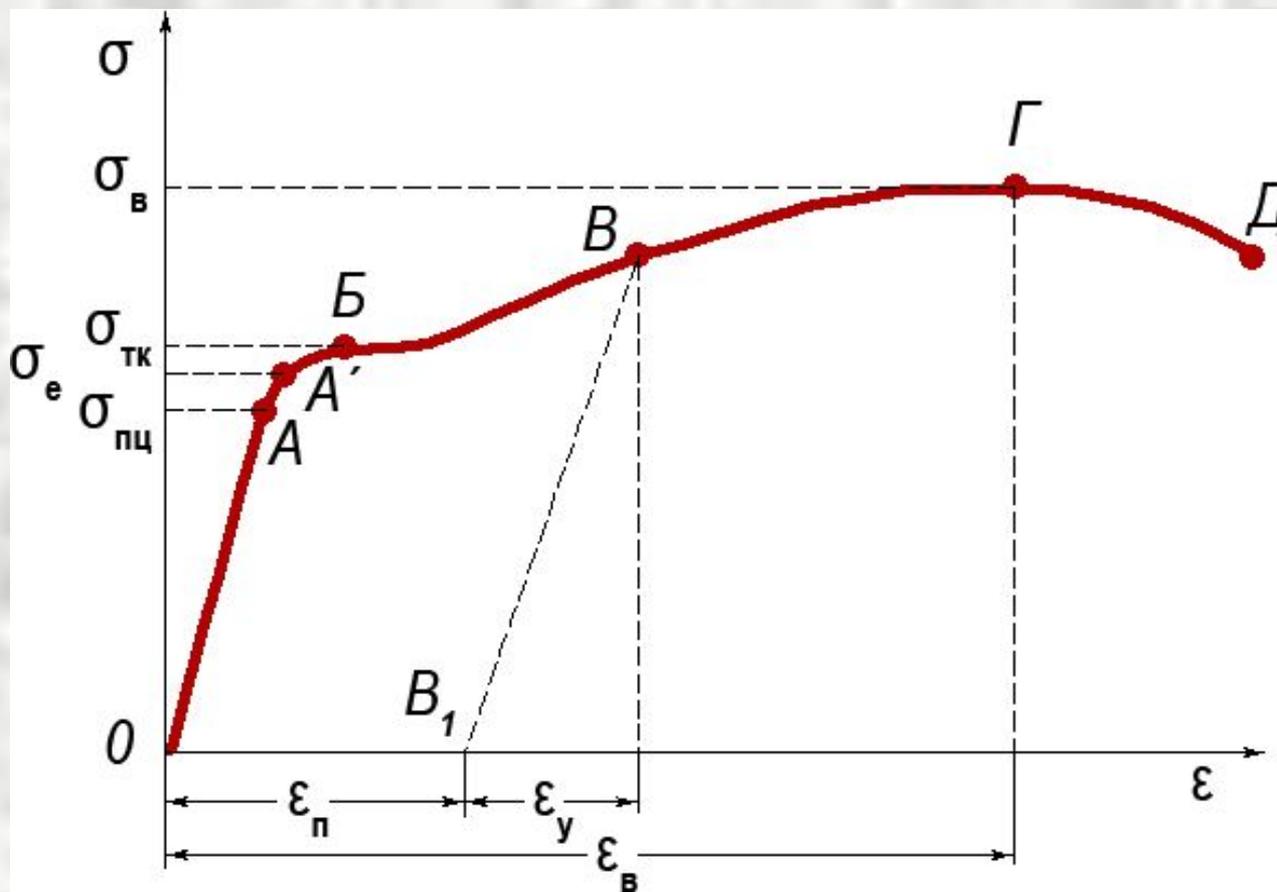
## **Критические состояния вещества**

Состояния вещества тел при переходах от одного вида деформации к другому называют критическими или предельными.

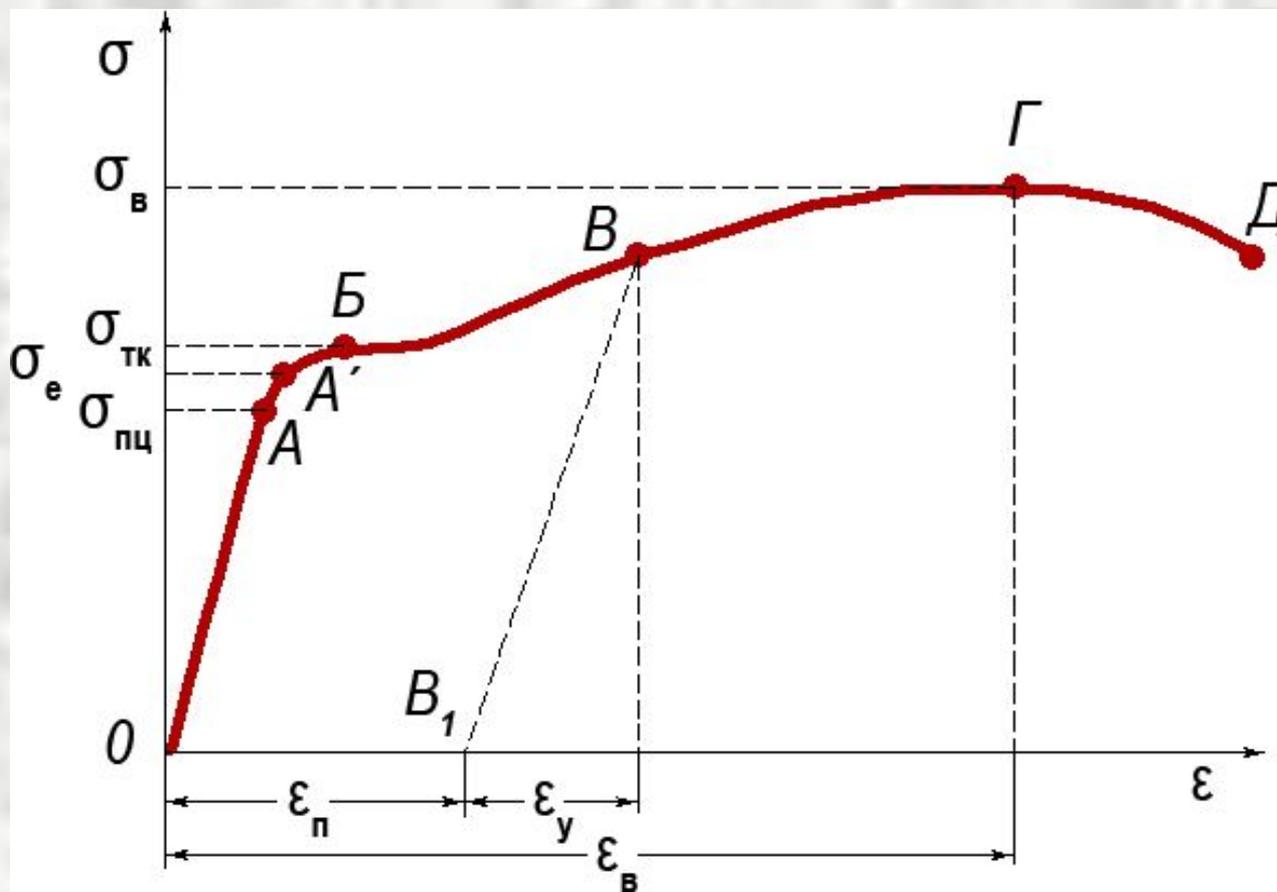
Этим состояниям соответствуют перегибы или характерные точки на диаграммах зависимости между напряжениями и деформациями.

# Зависимость между напряжениями и деформациями при растяжении

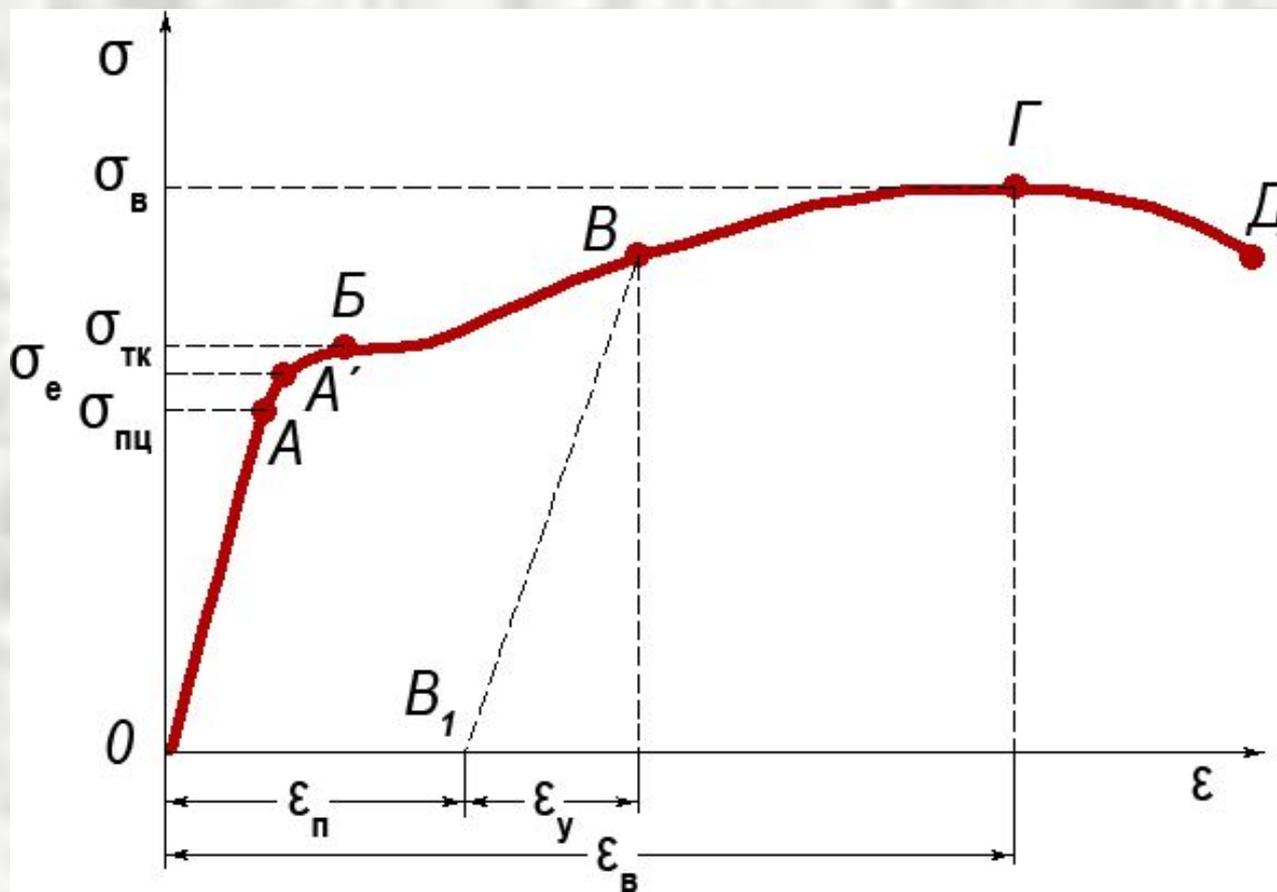




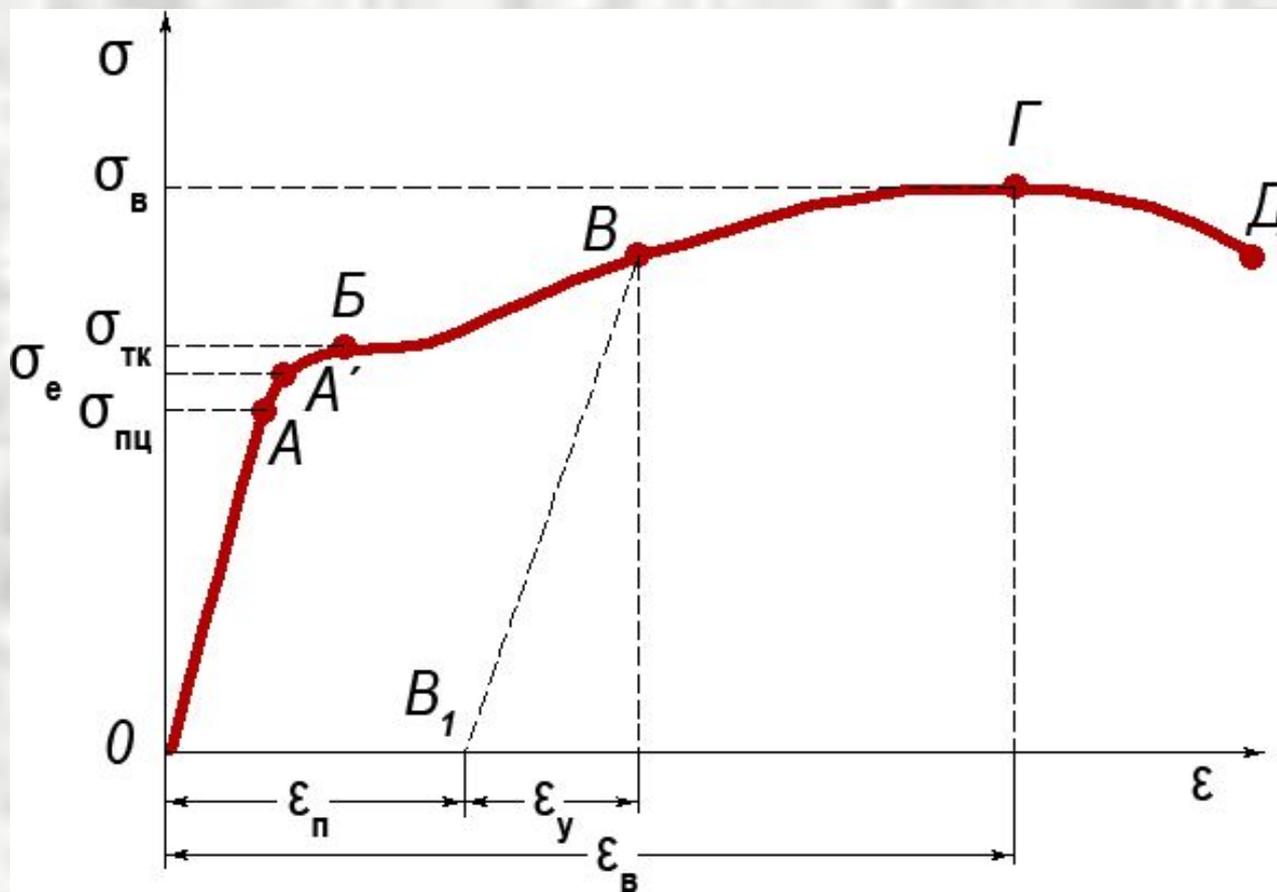
На участке от  $O$  до  $A$  действует упругая деформация, ее величина выражается **законом Гука**:  $\sigma = \epsilon \xi$ , где  $\sigma$  — напряжение;  $\xi$  — деформация;  $\epsilon$  — константа — постоянный для данного материала коэффициент пропорциональности — модуль упругости, или модуль Юнга.



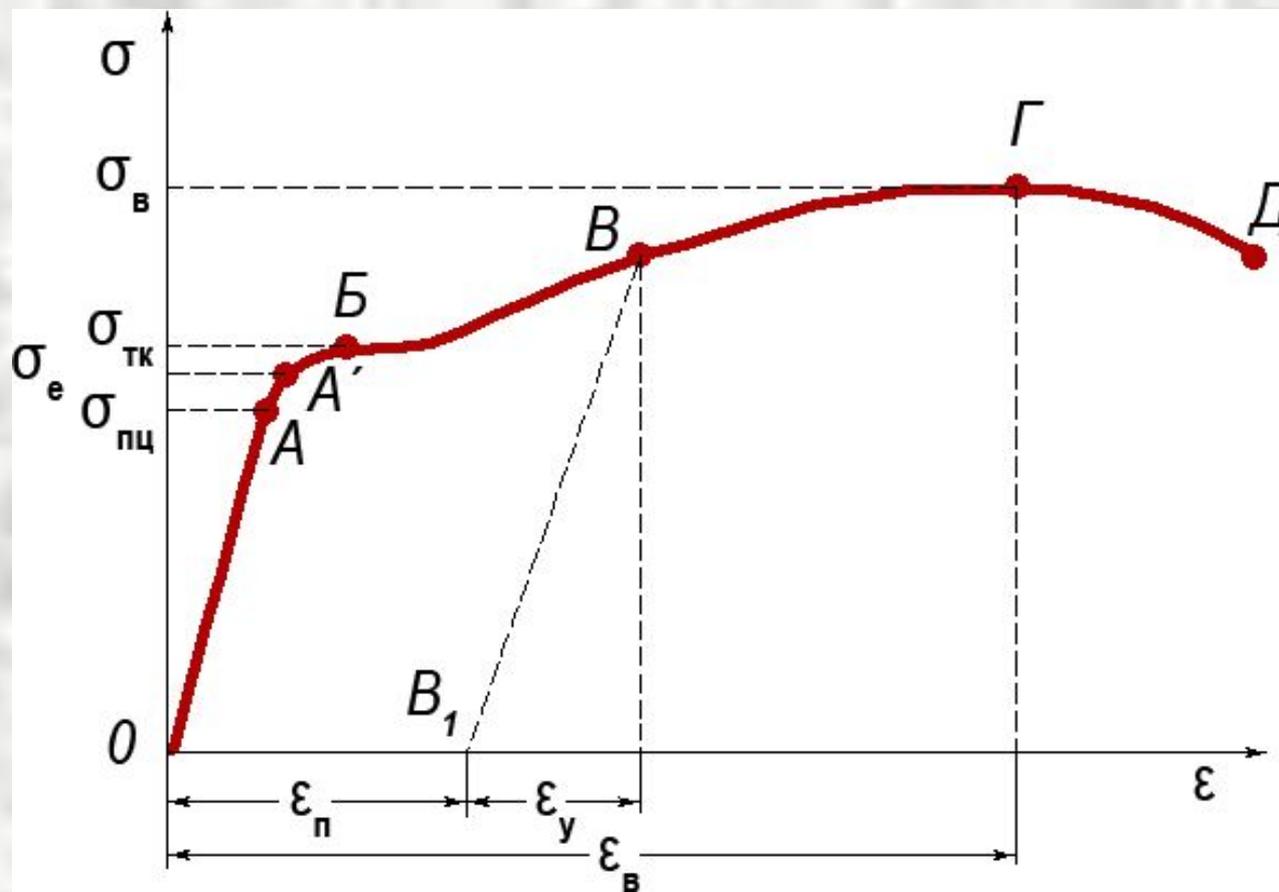
Закон Гука справедлив до некоторого напряжения  $\sigma_{пц}$ , называемого **пределом пропорциональности**. При увеличении напряжений до величины **предела упругости**  $\sigma_e$  (точка A') деформации еще остаются упругими, хотя для ряда материалов и не пропорциональными напряжениям.



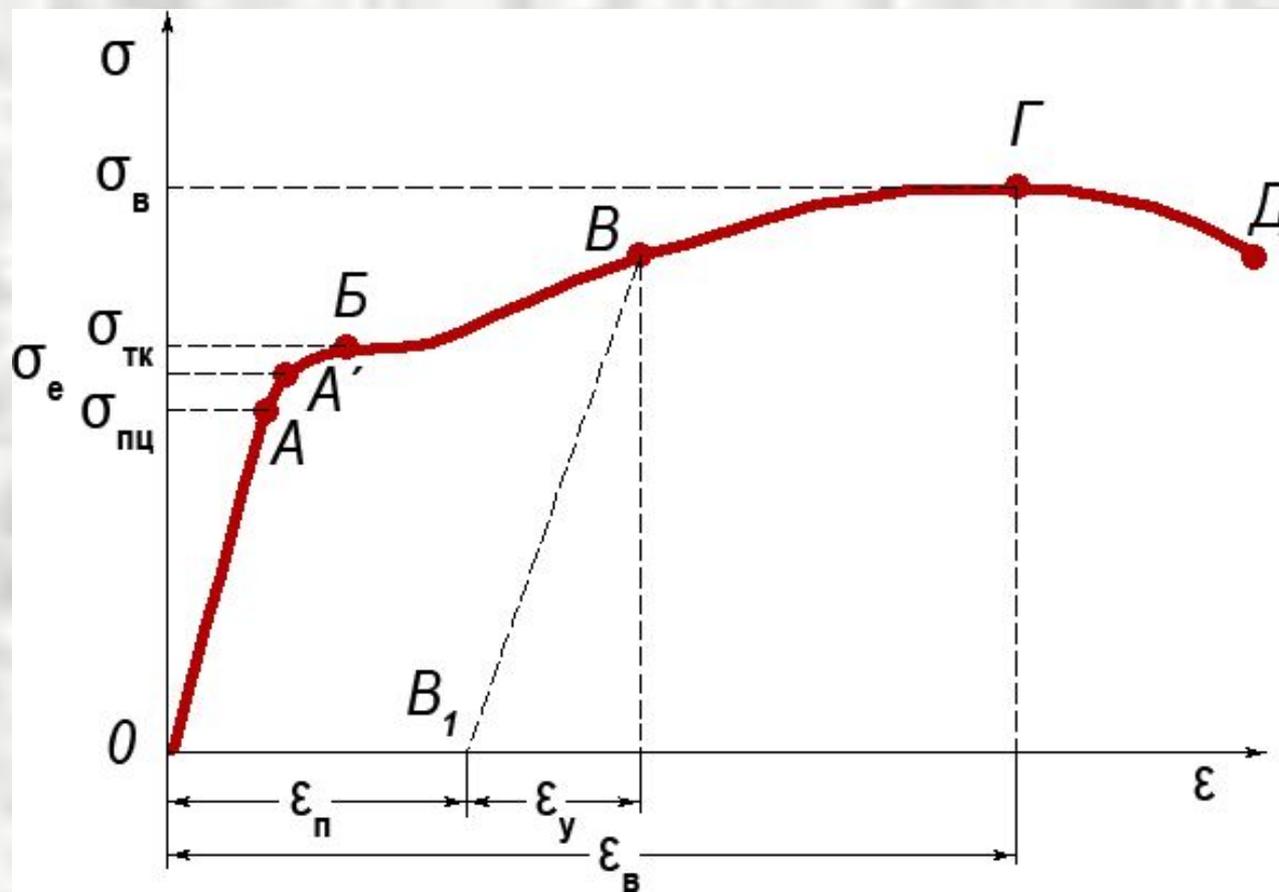
При дальнейшем возрастании нагрузки деформации становятся **упруго-пластическими**, т. е. при удалении внешних сил часть полученной под нагрузкой деформации оказывается остаточной.



По достижении напряжениями величины  $\sigma_{тк}$ , называемой **пределом текучести** (точка Б на диаграмме), пластические деформации некоторых материалов начинают резко возрастать при почти неизменной величине напряжений (так называемая площадка текучести).



За пределом текучести растет сопротивление деформированию; максимум сопротивления находится в точке  $\Gamma$  при напряжении  $\sigma_{в}$ , называемом **пределом прочности** (временным сопротивлением разрыву).



При дальнейшем растяжении на стержне обычно появляется местное сужение в форме шейки; здесь сосредотачивается дальнейшая деформация вплоть до разрыва (точка  $D$ ).

## Пластичные и хрупкие материалы

Одни материалы дают при растяжении образцов перед разрушением значительные пластические деформации; такие материалы характеризуются как ***пластичные***.

Другие материалы почти не дают пластических деформаций в обычных условиях; они характеризуются как ***хрупкие***.

# Релаксация и ползучесть

Механизм пластической деформации состоит в том, что упругая деформация постепенно закрепляется путем перераспределения частиц в теле и принятия ими нового равновесного расположения.

При этом напряжения постепенно падают до величины, отвечающей пределу упругости.

# Релаксация и ползучесть

Это «рассасывание» напряжений называется *релаксацией*.

Скорость релаксации зависит от вязкости тела. При малой вязкости релаксация развивается быстрее, чем при большой.

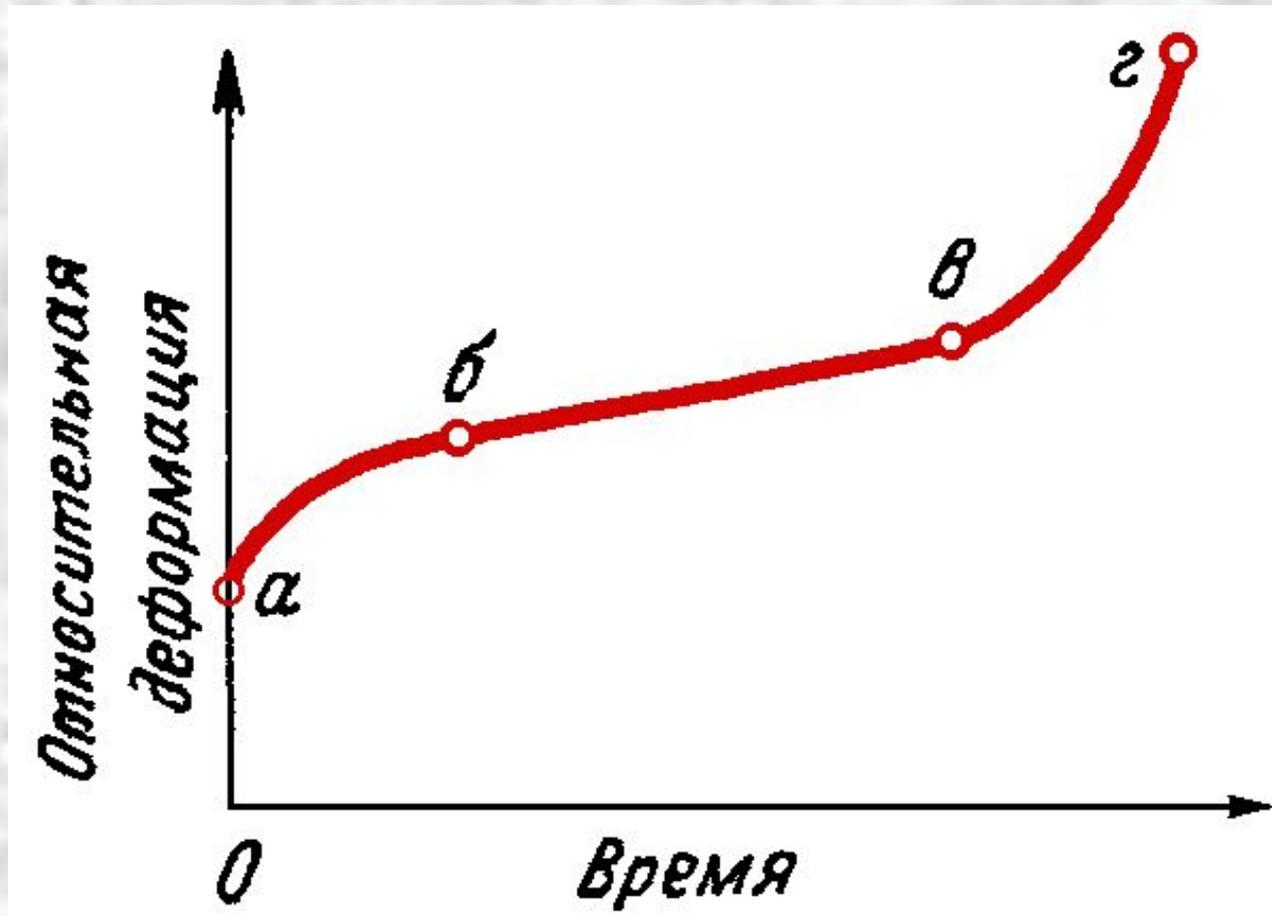
# Релаксация и ползучесть

С релаксацией связано явление, называемое **ползучестью**, которое заключается в том, что тело получает способность деформироваться непрерывно (увеличивать свою пластическую деформацию) после того как внешние силы превысили некоторый минимум и остались постоянными.

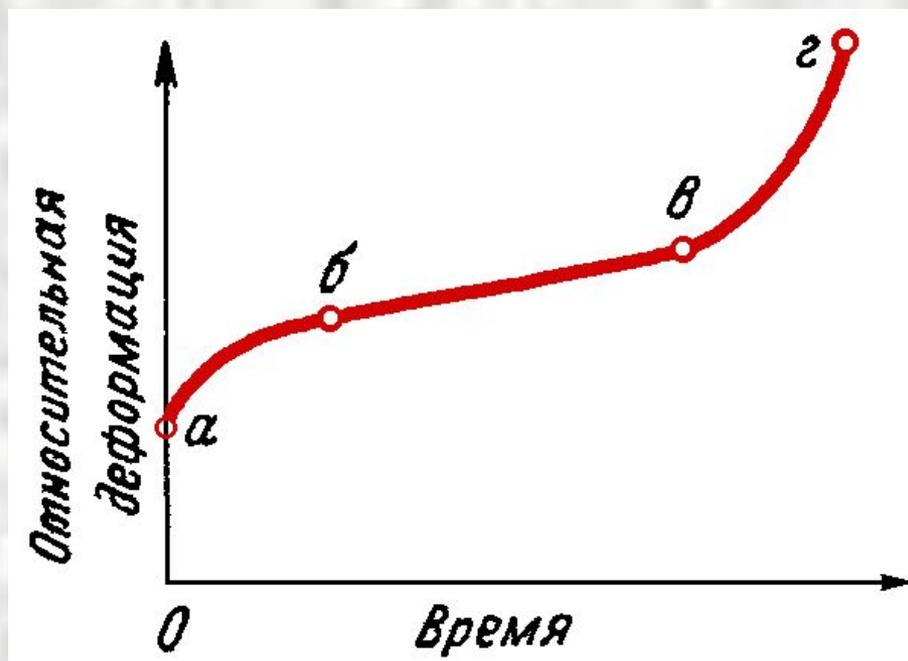
# Релаксация и ползучесть

Ползучесть представляет собой пластическую деформацию при постоянном напряжении при достаточно длительном времени и достаточно высокой температуре.

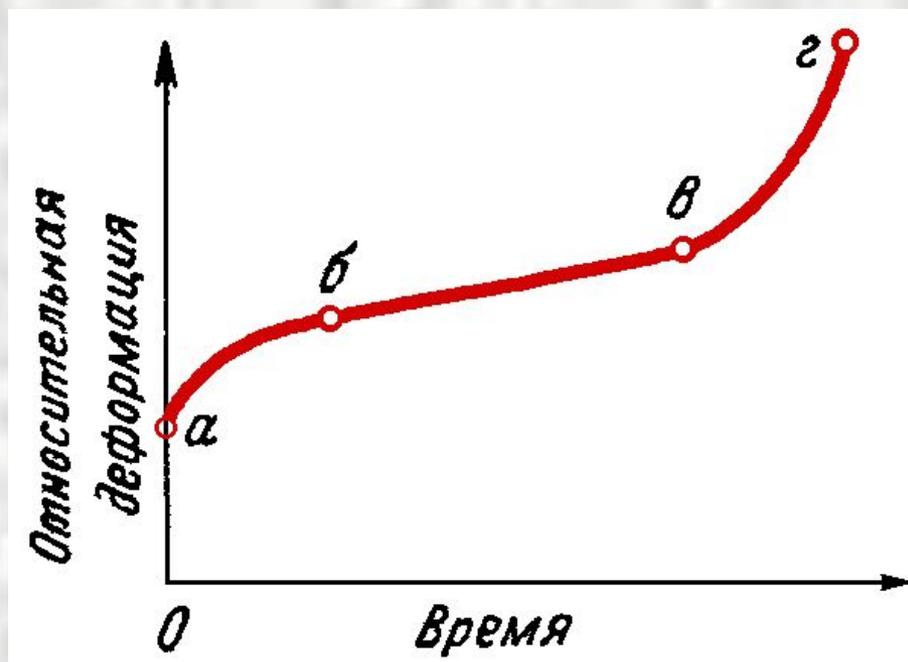
# Кривая ползучести



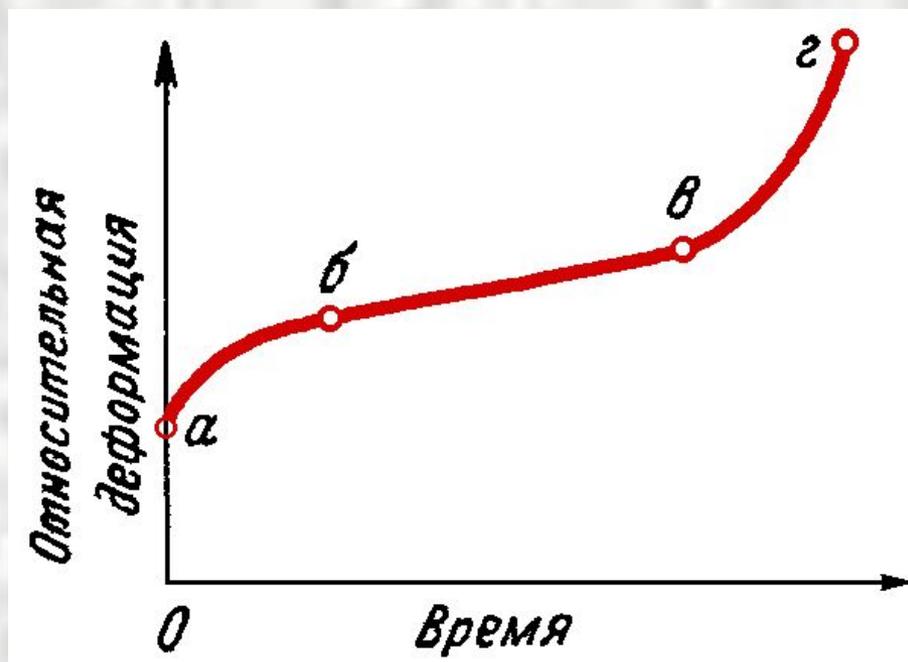
Зависимость между нарастающей пластической деформацией и временем характеризуется «первичной кривой ползучести».



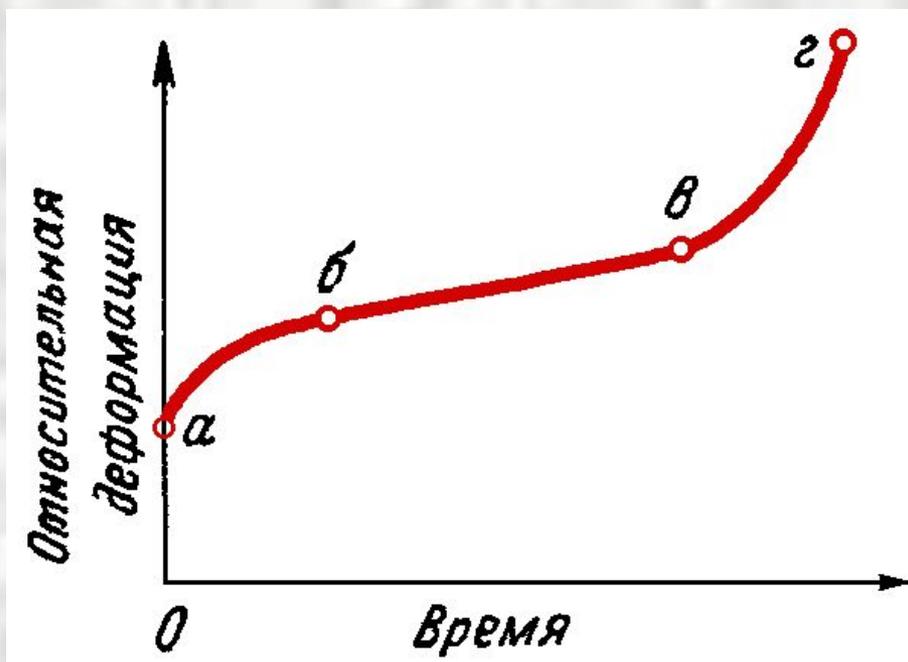
Кривая делится на три участка: **аб** — затухающей скорости ползучести; **бв** — установившейся (равномерной) скорости и **вг** — нарастающей скорости; последний участок заканчивается разрушением материала в точке **г**.



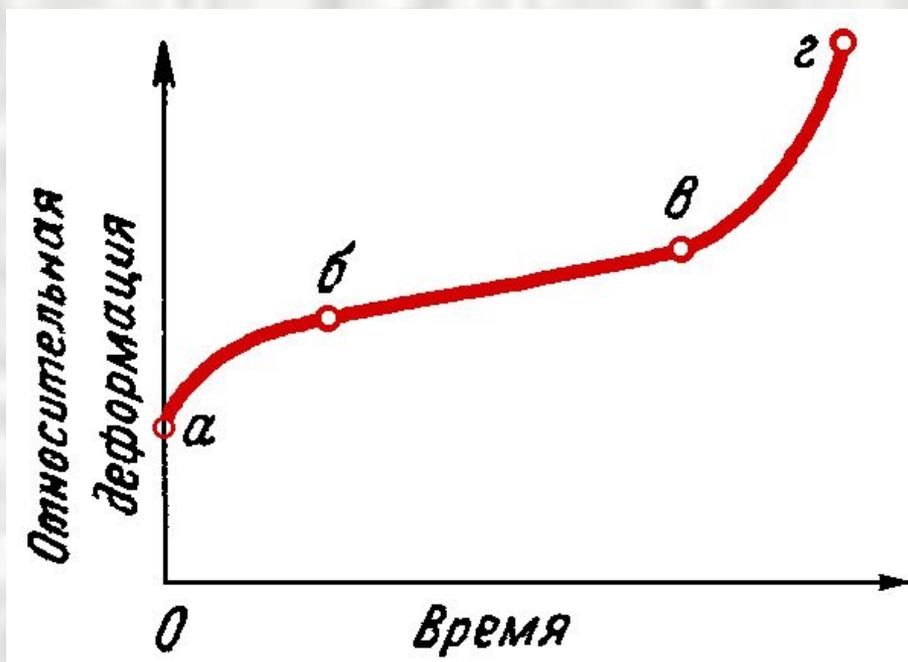
Участок ***Oa*** представляет деформацию (в основном упругую) в момент нагружения.



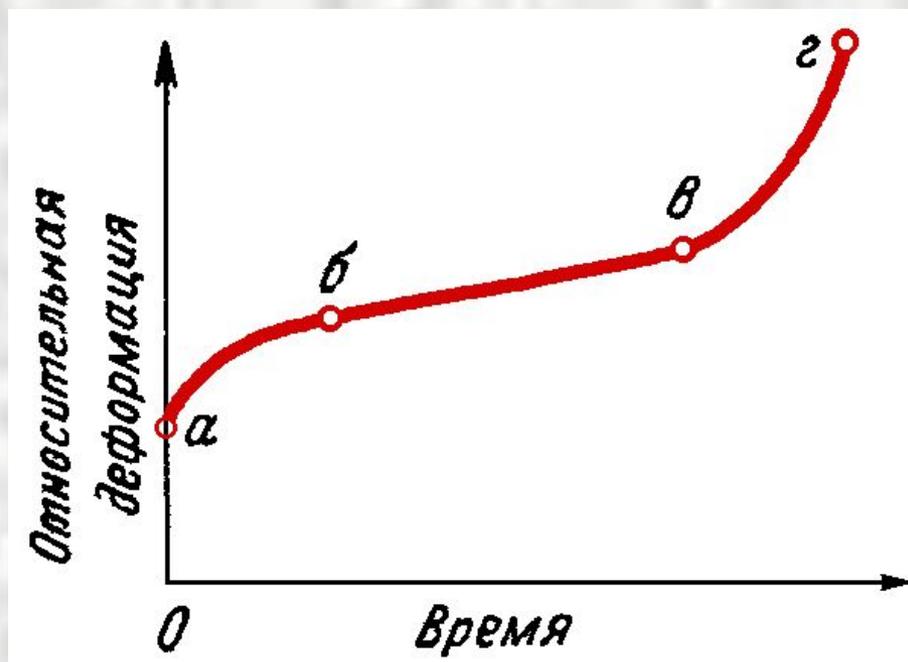
Участки **аб**, **бв** и **вг**, соответствующие пластической деформации, носят название **первого, второго и третьего этапов ползучести.**



На первом этапе упрочнение преобладает над разупрочнением.



На втором этапе скорости упрочнения и разупрочнения становятся равными, и деформация протекает с приблизительно постоянной скоростью.



На третьем этапе напряжение в соответственных местах быстро увеличивается, что приводит к ускорению деформации и разрушению.

Релаксация и ползучесть играют в геологической обстановке исключительно важную роль, обеспечивая **возможность медленного развития в течение миллионов лет крупных пластических деформаций в земной коре** под воздействием не слишком больших усилий.

Повышение температуры ведет к увеличению пластичности твердых тел.

С **высокой температурой** связана ползучесть.

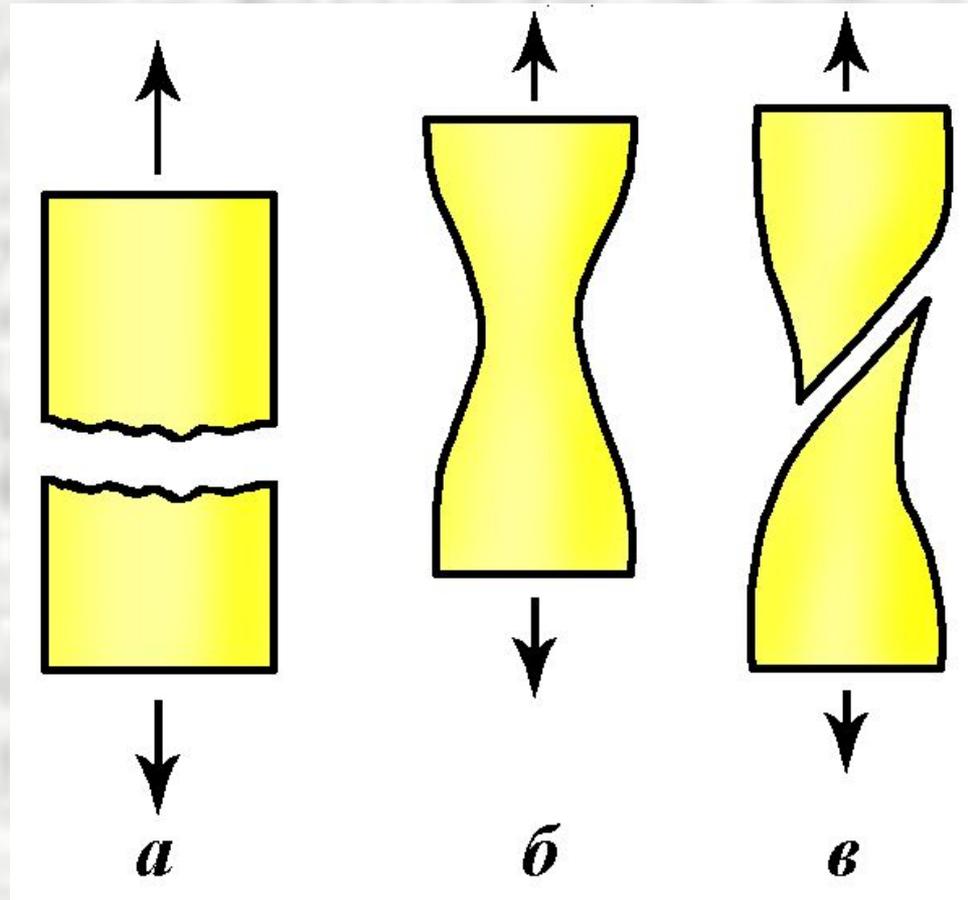
**Действие растворов и водяных паров** также повышает пластичность горных пород. В присутствии жидкой или газожидкой фазы в деформируемых породах особенно энергично происходит перекристаллизация или растворение одних минералов и образование новых.

**Высокое гидростатическое давление** также способствует ползучести.

# Формы разрывных деформаций.

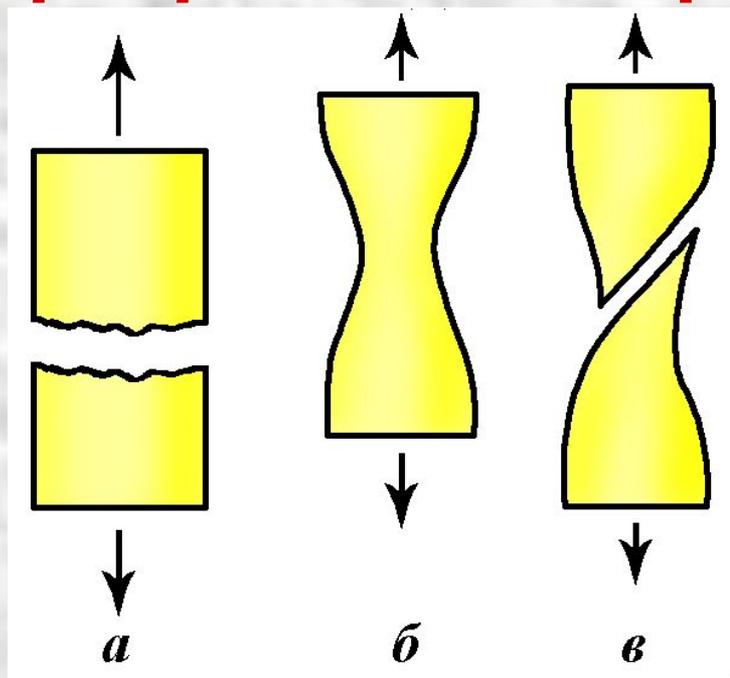
Всякая деформация, если напряжения достигли величины, отвечающей пределу прочности данного тела, завершается разрушением тела, т. е. последним этапом деформации — *разрывной деформацией.*

## Формы разрывных деформаций.



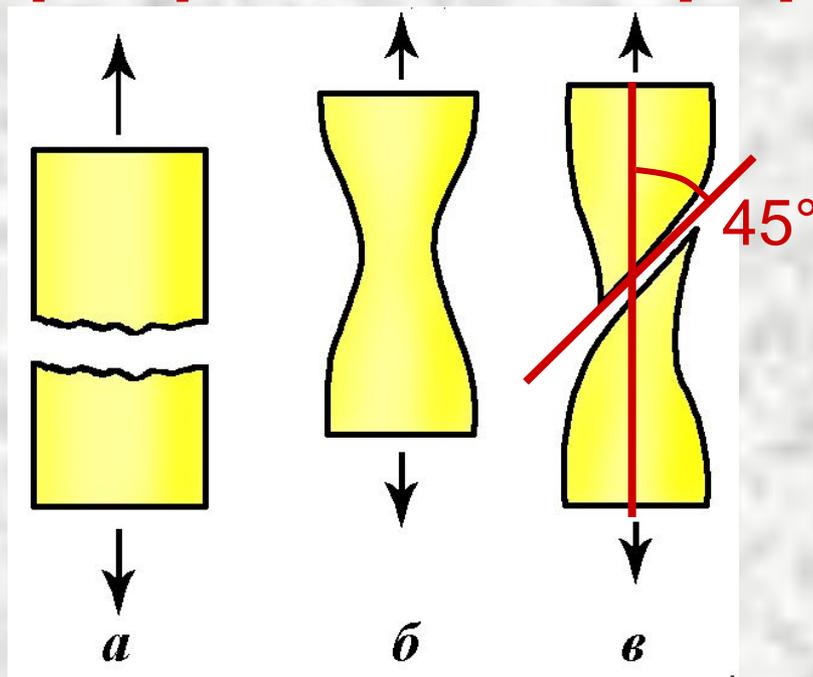
Выделяются два основных типа разрушения:  
**отрыв и скалывание** (срез).

## Формы разрывных деформаций.



**Отрыв** вызывается **нормальными растягивающими напряжениями**, когда эти напряжения достигли предела прочности. Он выражается в образовании трещины, перпендикулярной к главной оси растяжения (рис. ***a***).

## Формы разрывных деформаций.



**Скалывание** определяется **касательными напряжениями**. Выражается в образовании трещин, ориентированных в направлении максимальных касательных напряжений (под углом  $\sim 45^\circ$  к оси растяжения — сжатия).

## Формы разрывных деформаций.

Обычно угол между трещинами скалывания и осью главных сжимающих напряжений бывает меньше.

Это отклонение связано с различием теоретически идеального состава и строения горных пород и их реального выражения.

## Формы разрывных деформаций.

Отрыв не связан непосредственно с пластической деформацией; он часто происходит непосредственно вслед за упругой деформацией ниже предела текучести, представляя в этом случае ***хрупкий отрыв***.

Большое значение для характера отрыва имеет фактор времени.

## Формы разрывных деформаций.

Для пластичных материалов сопротивление отрыву оказывается выше предела текучести.

**Вязкий отрыв**, сопровождаемый значительной остаточной деформацией, должен особенно широкое распространение иметь в глубинных условиях земной коры.

## Формы разрывных деформаций.

Для трещин отрыва характерны **неровные зазубренные** стенки.

В момент образования они открыты (зияют), в это время по ним не происходит перемещений.

## Формы разрывных деформаций.

Скалыванию почти всегда предшествует более или менее значительная пластическая деформация.

## Формы разрывных деформаций.

В противоположность отрыву при скалывании редко происходит хрупкий разрыв; обычно имеет место вязкий разрыв, часто с образованием шейки.

Края трещин скалывания обычно **ровные, притертые** в результате некоторых перемещений вдоль трещин.

## **Формы разрывных деформаций.**

Следует иметь в виду, что часто строгого разграничения между явлениями отрыва и скалывания провести нельзя.

## Формы разрывных деформаций.

В плоскости действия наибольших касательных напряжений перед разрушением появляются трещины, направление которых указывает на участие в их образовании нормальных напряжений.

## Формы разрывных деформаций.

В одном и том же сечении часто комбинируются участки отрыва и участки скалывания.

Это характерно для случаев сложно-напряженного состояния.