

Физика горных пород

Лекция 3 – механические свойства горных пород

Лектор: Шульгин Павел Николаевич

<http://do.dstu.education>

<http://sggs-donstu.ucoz.ru/>

Удельный и объемный вес

- Удельным весом называется вес единицы объема абсолютно сухой породы без учета пор и трещин.
- **УДЕЛЬНЫЙ ВЕС** – отношение веса тела к занимаемому им объему. Он равен отношению массы твердой фазы к ее объему.

$$\gamma_0 = \rho_0 \cdot g$$

- **ОБЪЕМНЫЙ ВЕС** – отношение веса руды или породы (твердой, жидкой и газообразной фаз) к ее объему – вес единицы объема сухой породы в естественном пористом состоянии.

Механические свойства

- К механическим свойствам горных пород относятся все свойства, которые проявляются при **статическом и динамическом воздействии** твердых тел на породу. В зависимости от величины и длительности воздействия могут проявиться:
 - прочностные;
 - упругие;
 - реологические свойства горных пород.

Механические свойства

- Механические свойства горных пород характеризуются следующими параметрами.
- Предел прочности горных пород на **сжатие**
 $\sigma_{сж}$
- Он характеризуется максимальным значением напряжения, выдерживаемого породой.
- Другие показатели прочности намного ниже этой величины, а минимальное значение имеет предел прочности на

Упругие свойства

- Частые знакопеременные нагрузки на горную породу вызывают появление в ней упругих колебаний. К основным упругим характеристикам породы относятся:
 - модуль упругости - E , Па;
 - коэффициент Пуассона - ν ;
 - модуль сдвига G , Па.

Пластические свойства

- Коэффициент пластичности
- Модуль деформации

Реологические свойства

- Параметры ползучести
- Период релаксации
- Длительная прочность
- Предел длительной прочности

Механические свойства горных пород характеризуются следующими параметрами.

- **Предел прочности горных пород на сжатие $\sigma_{сж}$ и растяжение σ_p ;**
- **модуль упругости - E, Па;**
- **коэффициент Пуассона - ν ;**
- **модуль сдвига G, Па.**

Напряжения и деформации

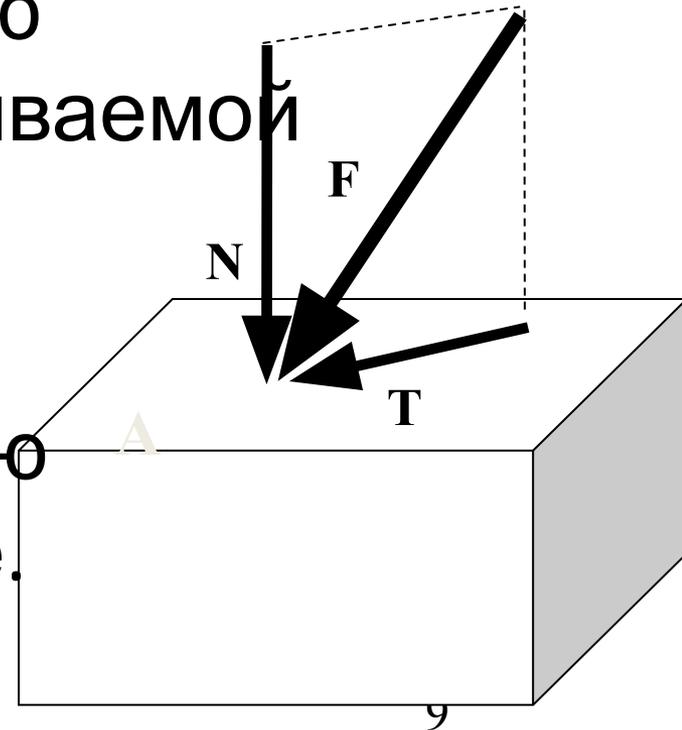
Напряжение - величина
векторная и зависит от
величины и направления
действия силы, формы
образца и внутренних свойств
породы

- Рассмотрим образец, на грань которого действует сила F . Ее можно разложить на две составляющие:

- нормальную N , направленную перпендикулярно рассматриваемой площадке

и

- касательную T , направленную параллельно этой площадке.



- **F** - сила действующая на образец горной породы, Н.
- **N** - нормальная составляющая силы **F**.
Направлена перпендикулярно рассматриваемой площадке, Н.
- **T** - касательная составляющая силы **F**.
Направлена вдоль рассматриваемой площадке, Н.
- **A** - площадь образца на которую действует сила **F**, м²

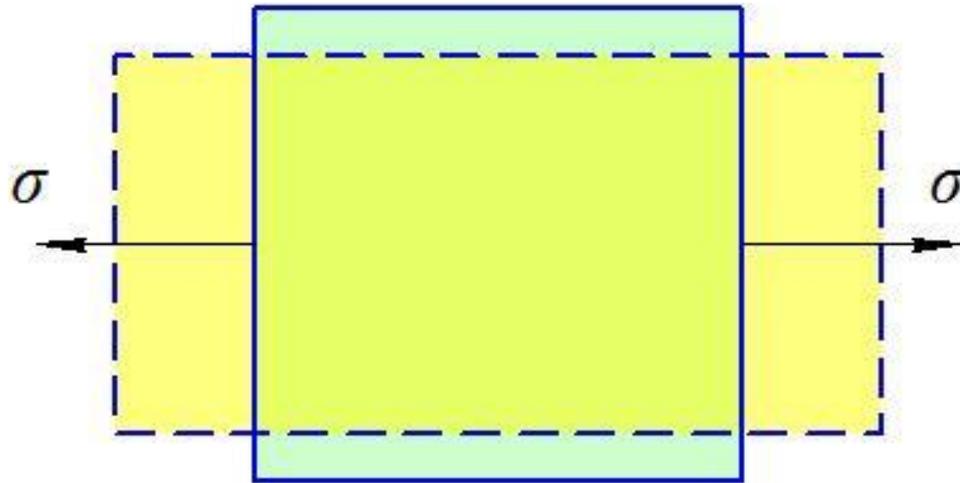
напряжение

- Это относительная величина равная по величине отношению действующей **силы** к **площади** образца, на которой она действует

$$\sigma = \frac{N}{A} \quad \tau = \frac{T}{A}$$

Нормальные напряжения

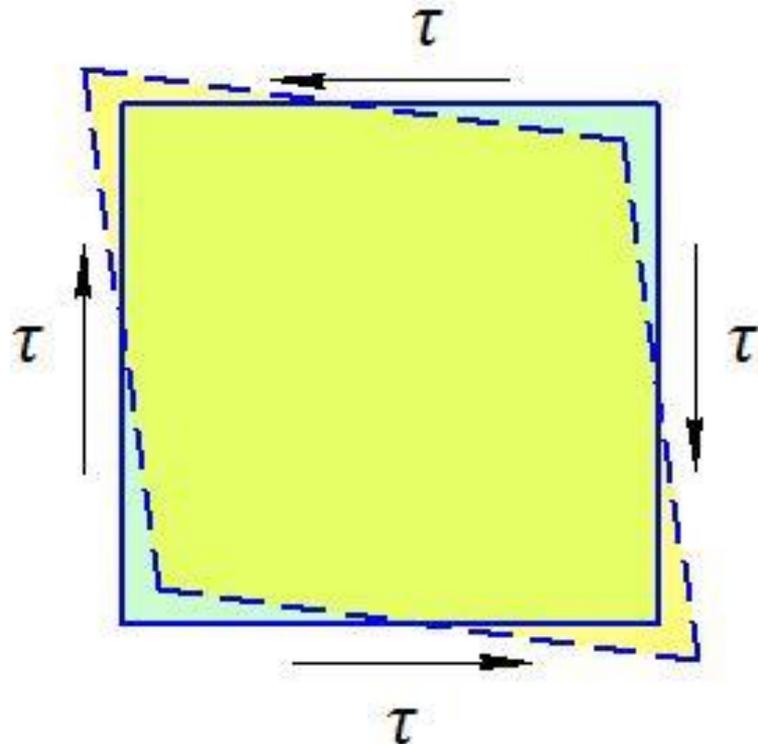
- Нормальные напряжения действуют перпендикулярно площадкам (сечению) и превращают куб (квадрат) в параллелепипед, т.е. не меняют прямых углов.



- ***Разрыв, растяжение, сжатие***

Касательные напряжения

- Касательные напряжения действуют в плоскости сечения и превращают куб в параллелограмм, т.е. изменяют прямые углы



- *Срез, сдвиг*

Напряжения в системе СИ выражаются в паскалях (Па).

$$1 \text{ Н/м}^2 = 1 \text{ Па}$$

Паска́ль (русское обозначение: **Па**, международное: **Pa**) — единица измерения давления (механического напряжения) в Международной системе единиц (СИ).

Паскаль равен давлению, вызываемому силой, равной одному ньютону, равномерно распределённой по нормальной к ней поверхности площадью один квадратный метр:

$$1 \text{ Па} = 1 \text{ Н} \cdot \text{м}^{-2}.$$

С основными единицами СИ паскаль связан следующим образом:

$$1 \text{ Па} = 1 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{с}^{-2}.$$

Единица названа в честь французского физика и математика Блеза Паскаля. Впервые наименование было введено во Франции декретом о единицах в 1961 году



- **а - одноосное напряженное состояние;**
- **б - плоское напряженное состояние;**
- **в - объемное напряженное состояние.**

Схема напряжений, отнесенная к произвольной системе координат

X, Y, Z

В общем случае на гранях бесконечно малого элемента могут действовать нормальные и касательные напряжения

Тензор напряжений

- Напряжения, действующие на гранях бесконечно малого параллелепипеда, можно записать в виде таблицы, называемой *тензором напряжений*:

$$[T_\sigma] = \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{yx} & \tau_{zx} \\ \tau_{xy} & \sigma_y & \tau_{zy} \\ \tau_{xz} & \tau_{yz} & \sigma_z \end{bmatrix} \cdot$$

- Нормальные напряжения снабжаются индексом, который указывает координатную ось, вдоль которой направлено напряжение.
- Из условия равновесия бесконечно малого параллелепипеда вытекает закон *парности касательных напряжений*: касательные напряжения на взаимно-перпендикулярных площадках, направленные перпендикулярно линии пересечения этих площадок, равны по величине.
- Поэтому $T_{yx} = T_{xy}$; $T_{zx} = T_{xz}$; $T_{yz} = T_{zy}$

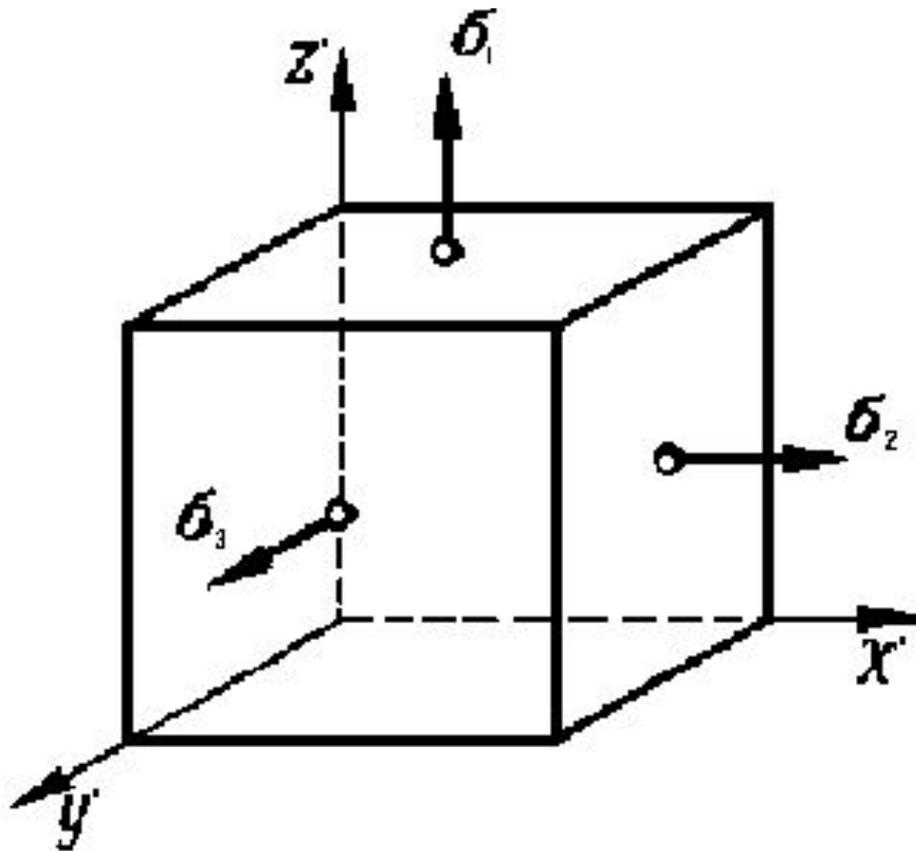
**В любом поле напряжений
можно найти такие
направления осей координат,
при которых все касательные
компоненты тензора
оказываются равными нулю.**

Тензор напряжений в главных осях имеет следующий вид:

$$[T_\sigma] = \begin{bmatrix} \sigma_x & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_y & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_z \end{bmatrix}.$$

- вокруг любой точки тела можно выделить такой бесконечно малый элемент, на гранях которого отсутствуют касательные напряжения, и могут действовать только нормальные напряжения. Грани такого элемента называются *главными площадками*, а нормальные напряжения на этих гранях – *главными напряжениями*. Главные напряжения обозначают $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$, причем индексы расставляют так, чтобы по алгебраическому значению первое главное напряжение было самым большим, а третье главное напряжение – самым маленьким:

$$\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$$



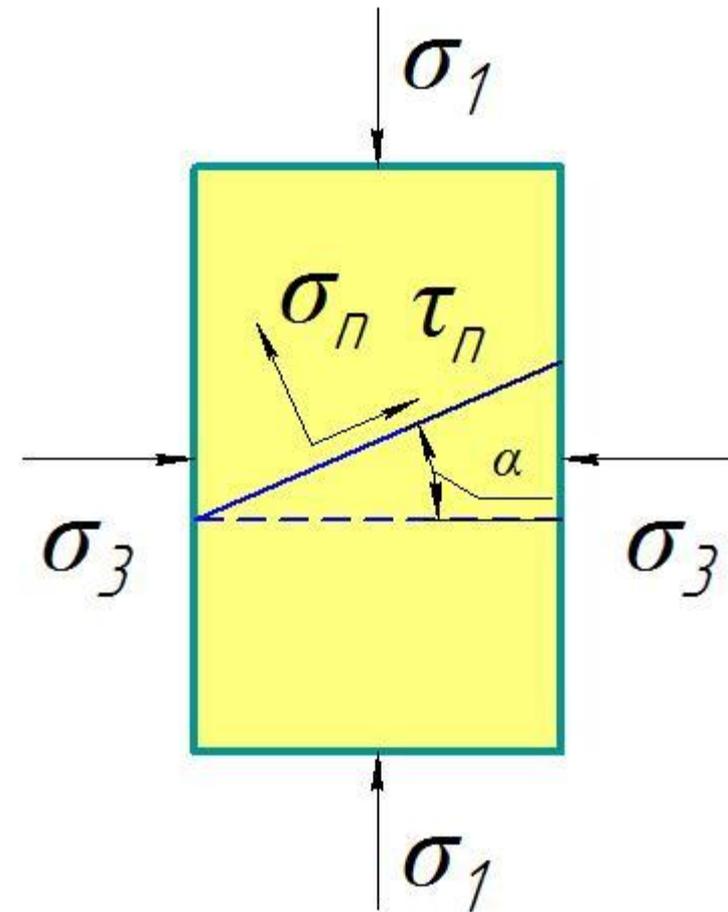
**Действующие на гранях
напряжения называются
главными напряжениями:**

Нормальные напряжения σ_1 , σ_2 , σ_3 являются **главными нормальными напряжениями**, направления их действия **главными осями напряжений**, а площадки, на которых они действуют, называются **главными площадками напряжений**.

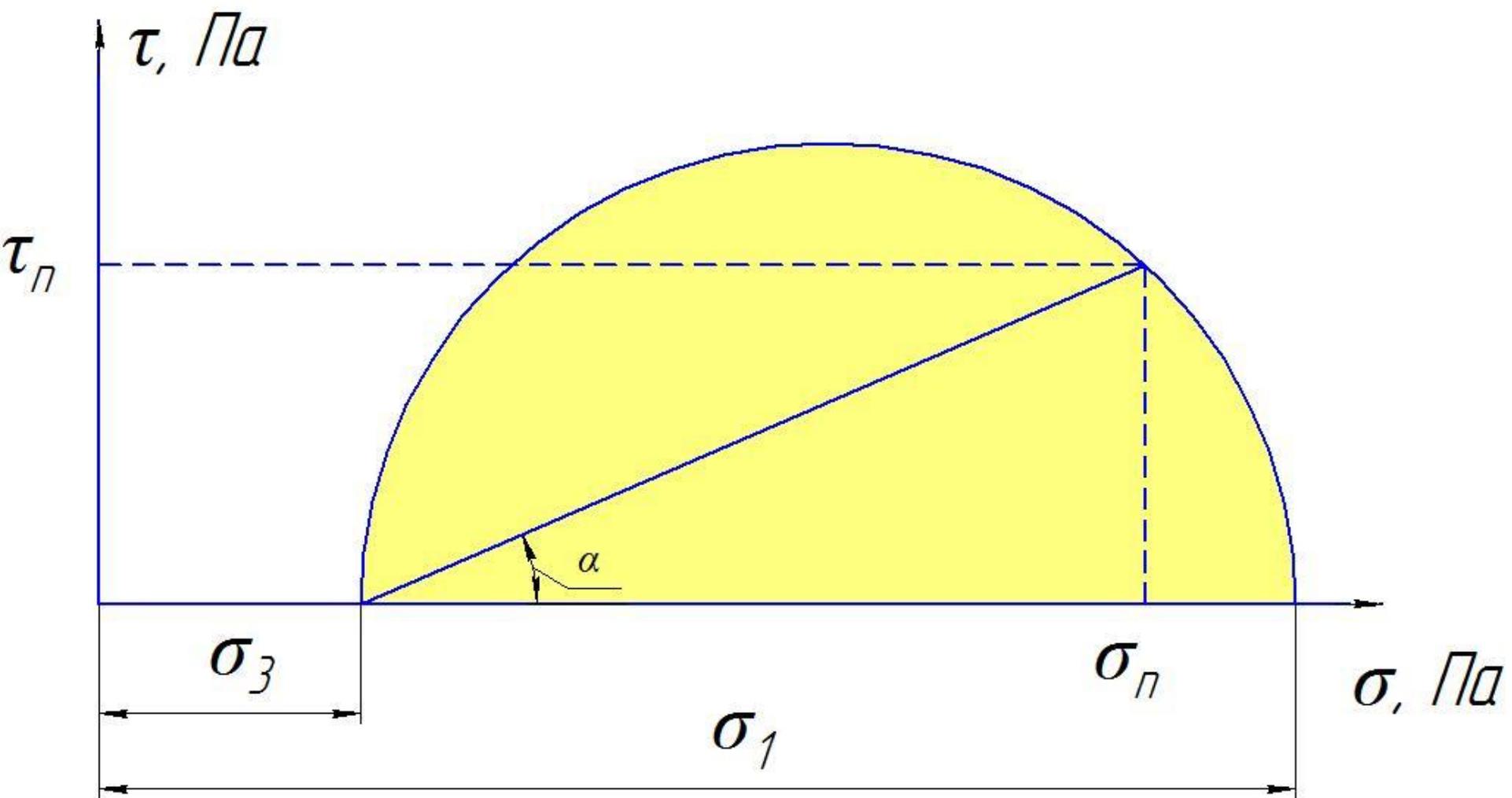
Плоское напряженное состояние

Если все векторы напряжений параллельны одной и той же плоскости, напряженное состояние называется плоским.

Иначе: напряженное состояние является плоским, если одно из трех главных напряжений равно нулю



- Напряженное состояние на любой площадке образца породы можно охарактеризовать действующими на ней нормальным и касательным напряжениями.
- Они взаимосвязаны и могут быть представлены графически с помощью кругов Мора.



- Значения касательного и нормального напряжений в любой точке образца могут быть найдены, если задан угол наклона плоскости, по которой определяются напряжения. Под этим углом из точки пересечения круга с абсциссой проводится прямая линия до пересечения с окружностью.
- Координаты точки пересечения окружности с прямой линией численно равны значениям отыскиваемых напряжений.

**В плоскости под углом α к
главным осям будут
действовать напряжения:**

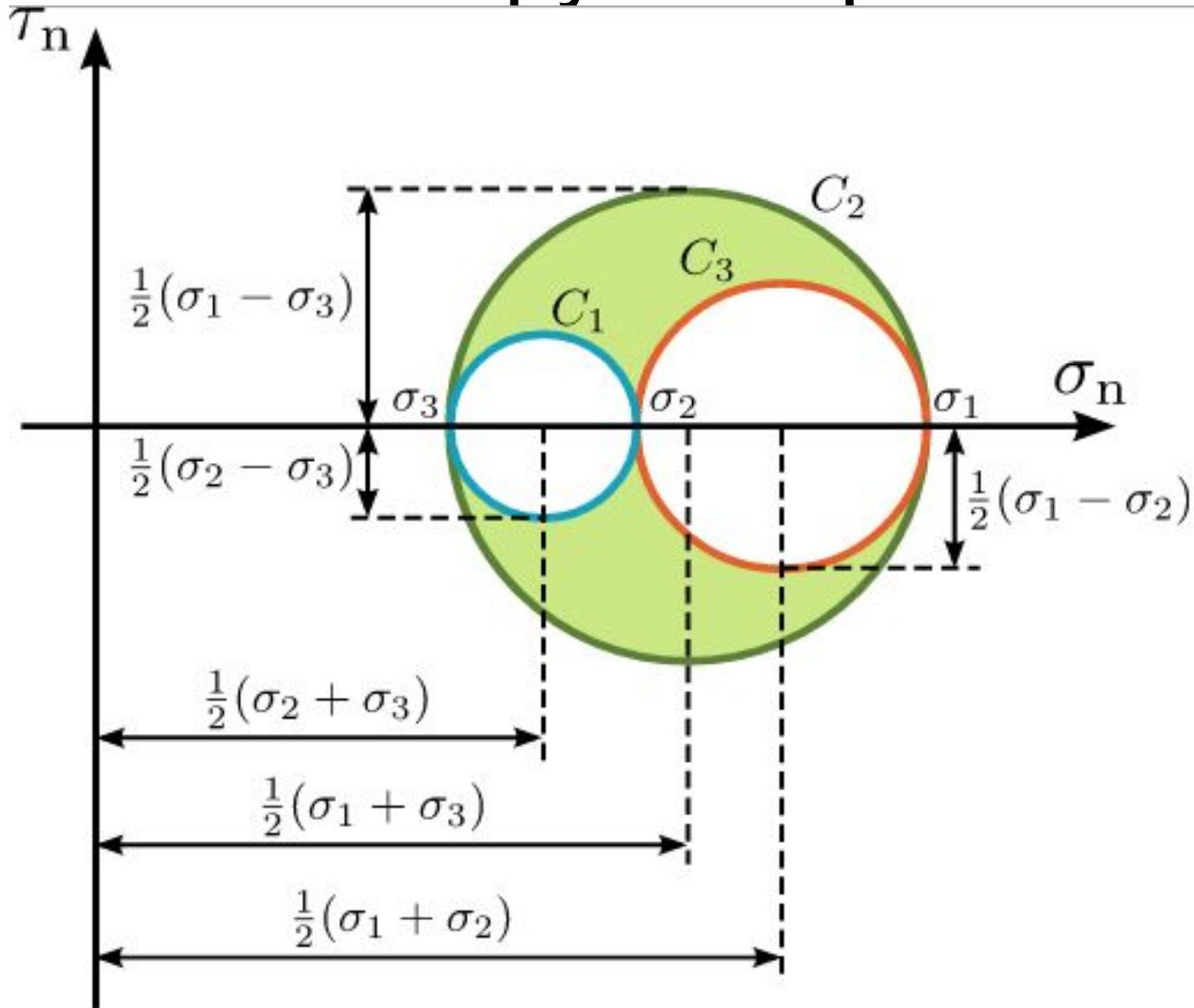
- **нормальные**

$$\sigma_n = \sigma_1 \cos^2 \alpha + \sigma_3 \sin^2 \alpha$$

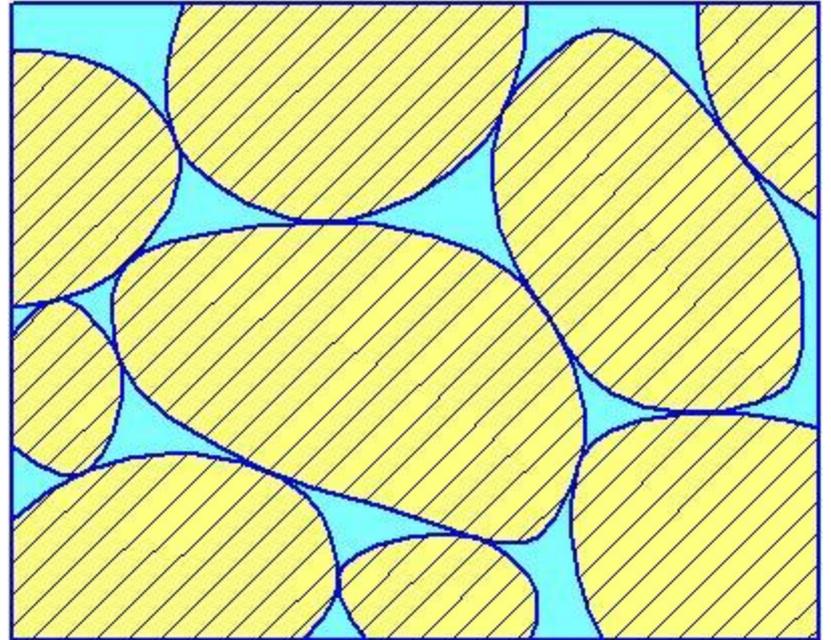
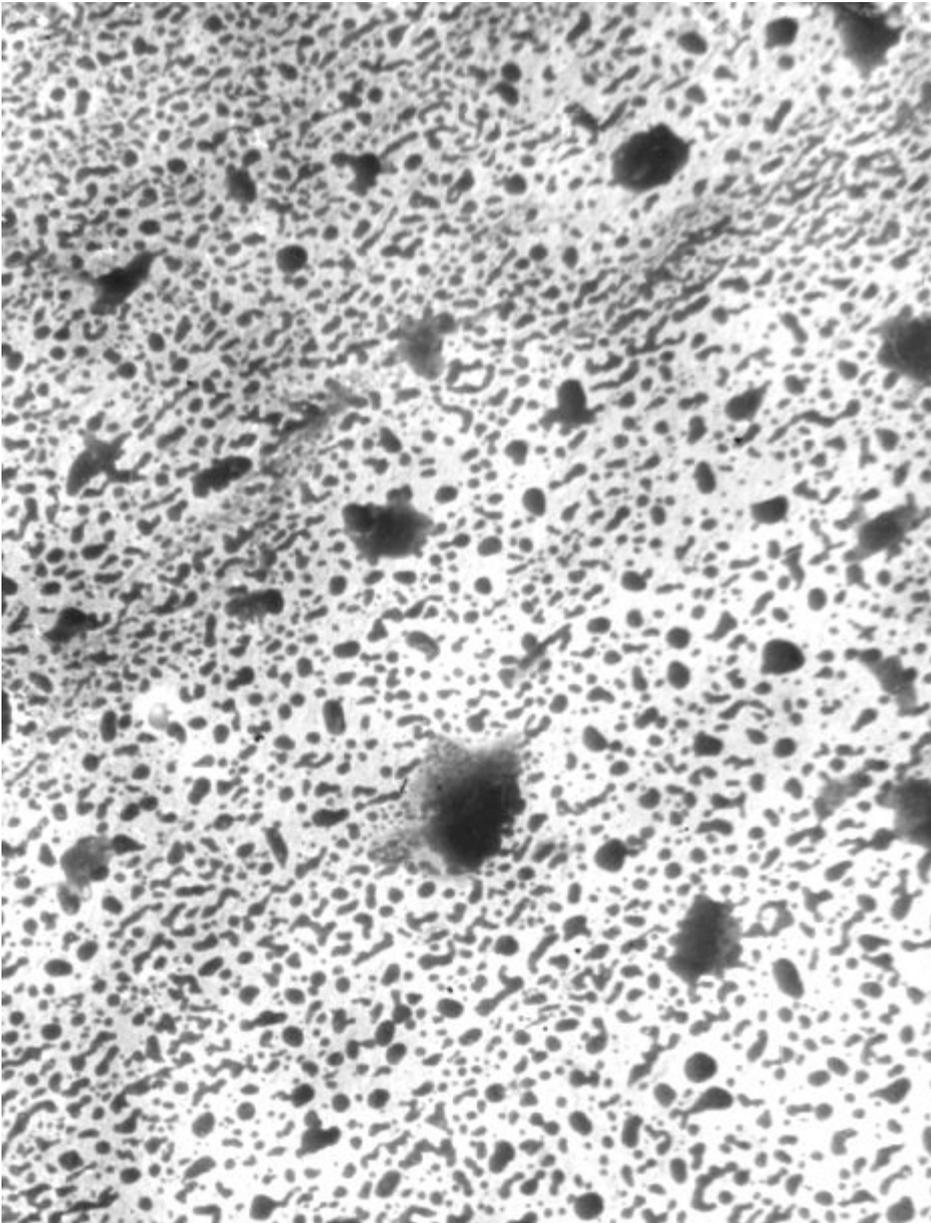
- **касательные**

$$\tau_n = 0,5 (\sigma_1 - \sigma_3) \sin 2\alpha$$

Круги Мора



- Практически же площадь, на которую воздействуют силы, представляет собой площадь минеральных зерен и площадь, занятую порами. На площади, занятой порами, напряжения не возникают, в результате чего напряжения концентрируются только в области контакта минеральных зерен.
- Поэтому **с увеличением пористости - в равных условиях напряжения в породе возрастают.**



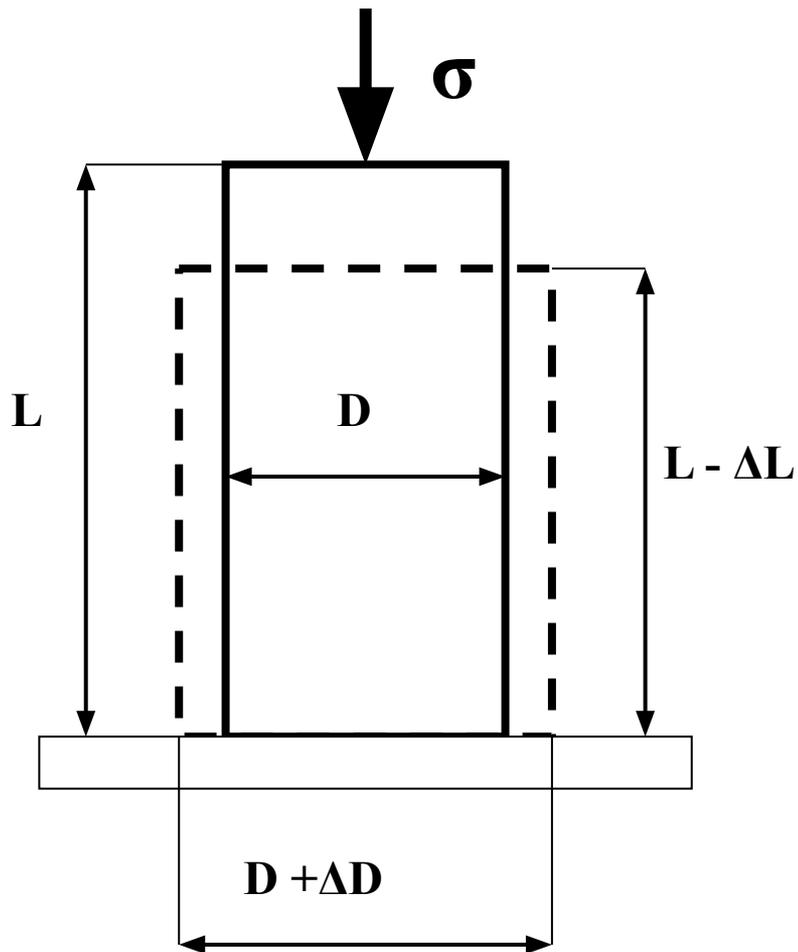
$$\sigma = \frac{N}{A}$$

- Напряжения в породах могут возникать не только под действием внешних сил, но и под действием различных физических полей.
 - **Термические напряжения**, возникают в результате неравномерного распределения температуры при нагреве породы.
 - **Усадочные напряжения** - при неравномерном охлаждении объема.
 - **Остаточные напряжения** - при неравномерном распределении напряжений из за текучести материала.
- Эти напряжения носят названия **собственных напряжений**.
- Собственные напряжения накладываются на внешние напряжения и могут либо увеличивать, либо уменьшать их.

Под действием внешних сил горная порода испытывает изменения **линейных размеров, объема или формы.**

Все эти изменения носят название **деформации**

Деформация образца породы под действием нормальных (σ) напряжений

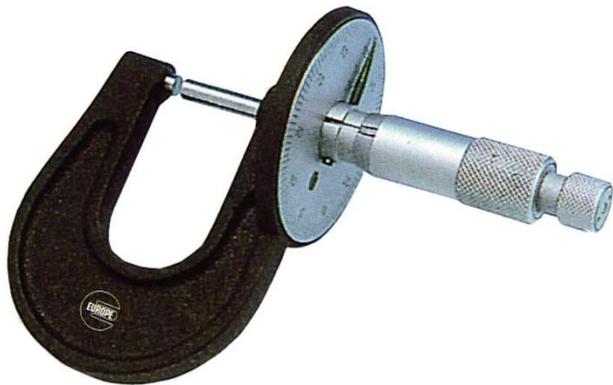


Линейные деформации

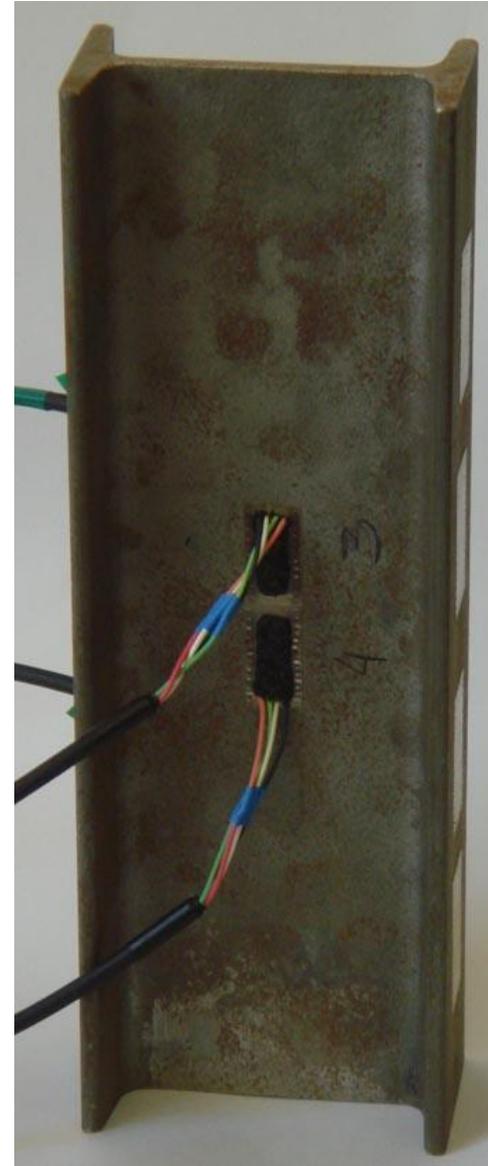
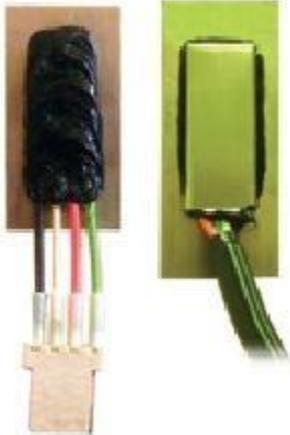
- По направлению действующей силы деформации называются продольными, перпендикулярно ей - поперечными.
- ΔL - изменение продольного размера образца (абсолютная продольная деформация).
- ΔD - изменение поперечного размера образца (абсолютная поперечная деформация).

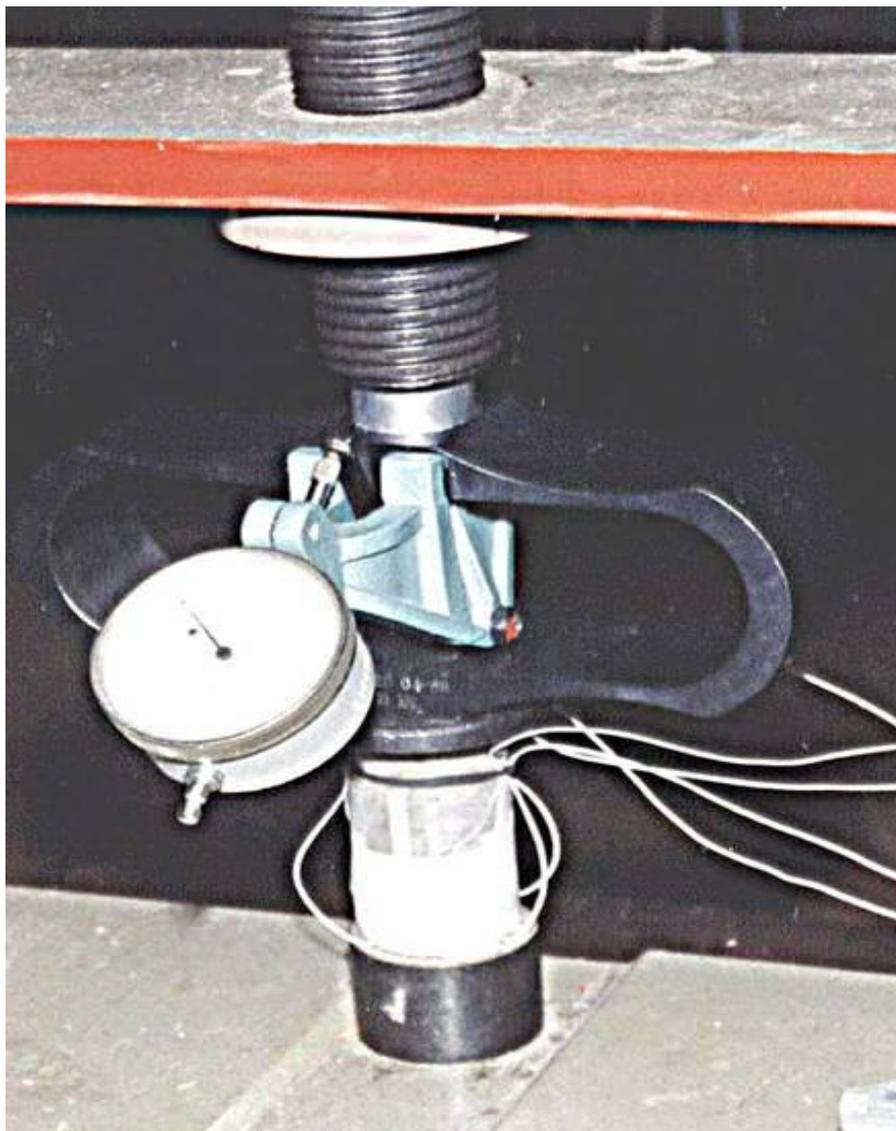
- Эти деформации измеряются непосредственно в лабораторных опытах и называются **абсолютными деформациями.**
- Измеряют их с помощью: линейки, микрометра, специальных измерителей деформаций и тензорезисторов.

Микрометры



Тензорезисторы





Испытания образца породы на винтовом прессе

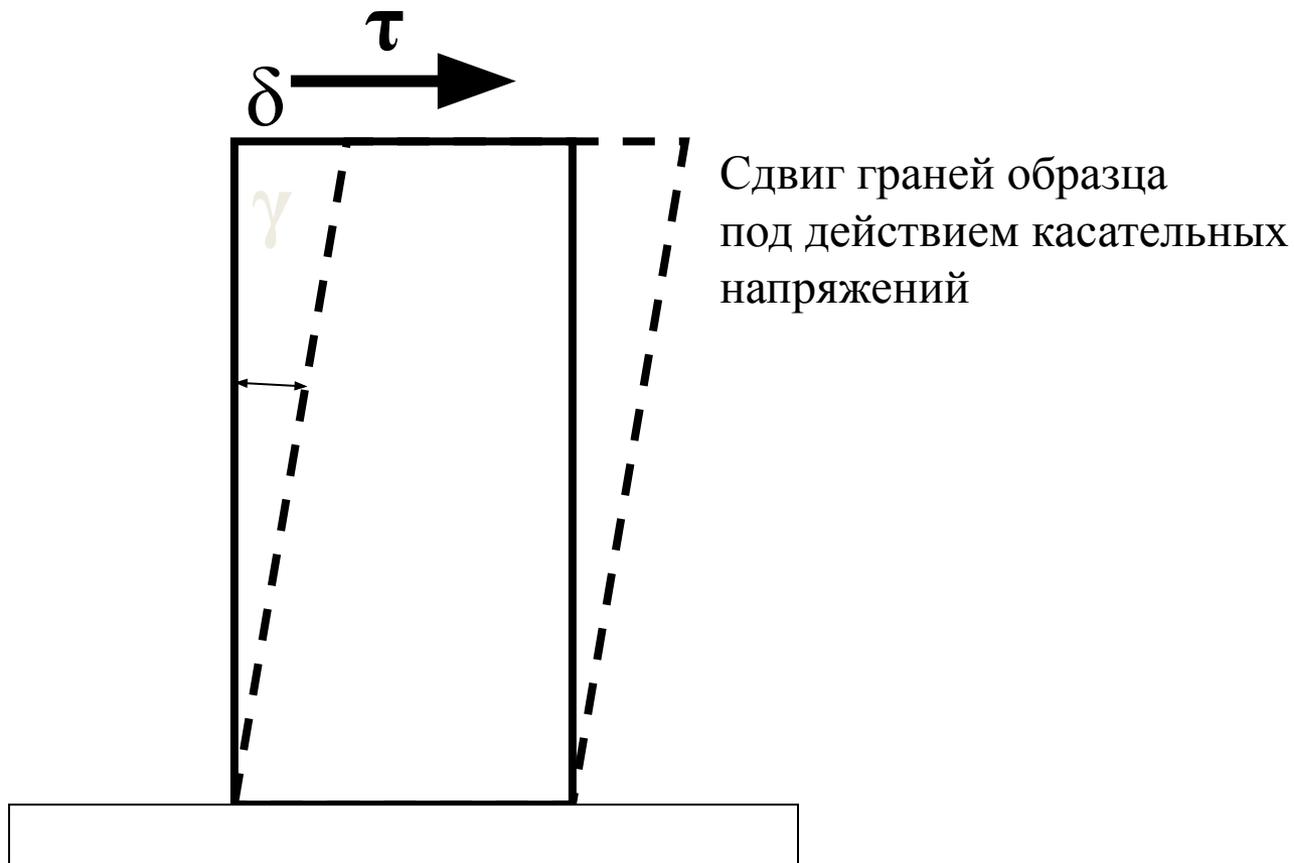


Относительные линейные деформации

$$\varepsilon_{np} = \frac{\Delta L}{L}$$

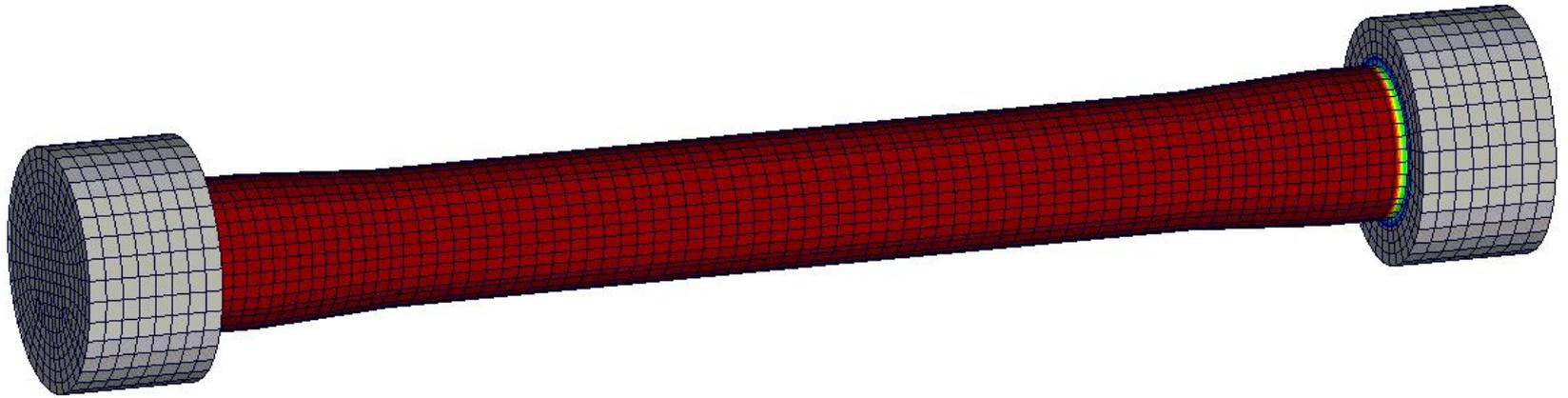
$$\varepsilon_{non} = \frac{\Delta D}{D}$$

Деформация образца породы под действием касательных (τ) напряжений

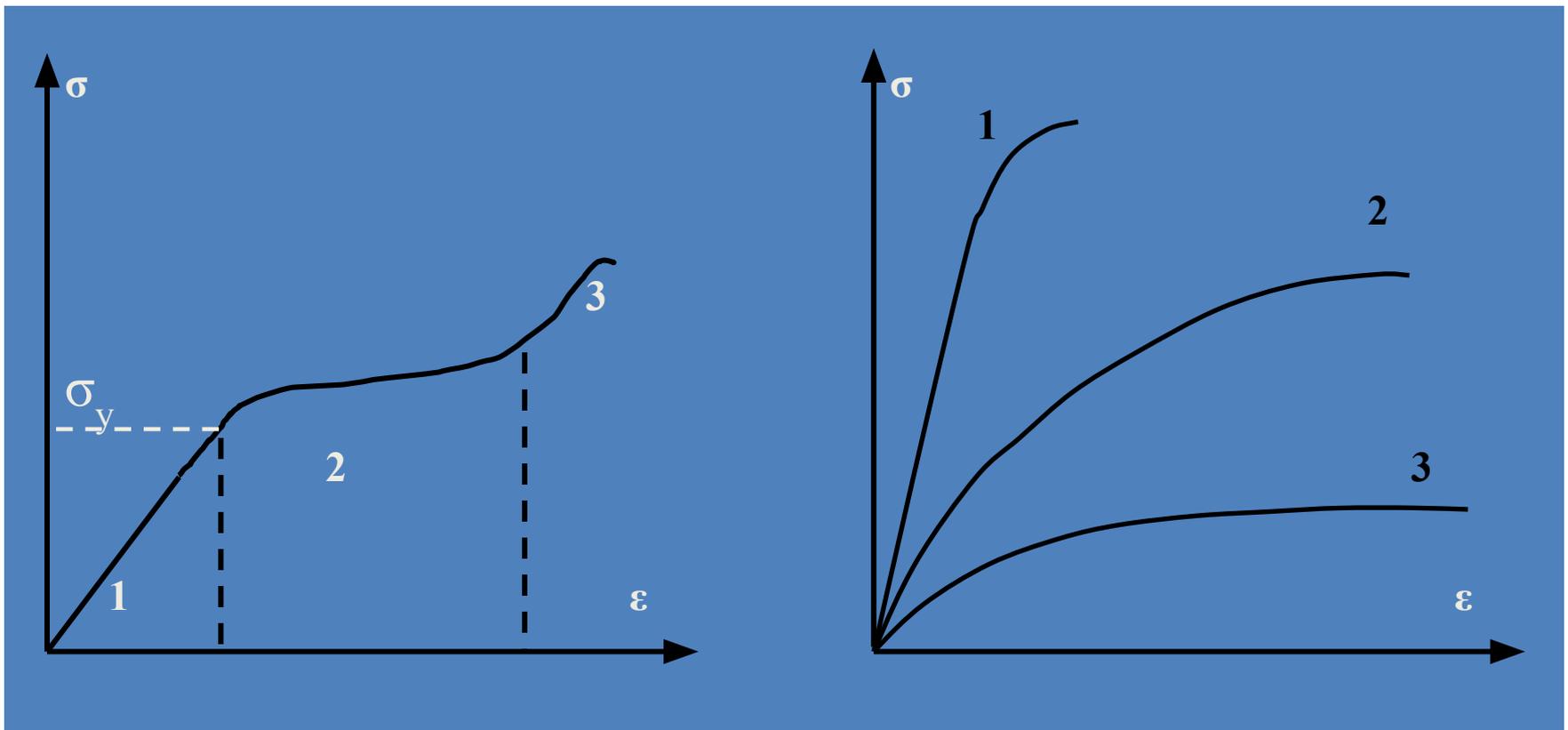


- Деформация сдвига δ определяется по величине $\text{tg } \gamma$ где γ - угол сдвига.
- Так как угол γ очень мал, то можно принять $\text{tg } \gamma \sim \gamma$.

- Деформации, по действию, могут быть **разрушающие** и **неразрушающие**.
- **Разрушающие деформации** вызывают разделение породы на отдельные части.
- **Неразрушающие** – вызывают изменение размеров и формы образца породы без нарушения ее сплошности и могут быть **пластическими** или **упругими**.



- В случае **упругих деформаций** наблюдается прямая зависимость между напряжением и соответствующей деформацией
- Максимальное напряжение, при котором еще не обнаруживаются остаточные деформации, называется **пределом упругости** данной породы.



Области деформации пород

1- упругая; 2 - пластическая;

(кварциты);

3 - разрушающая;

(роговики);

3 - пластические (мрамор).

Виды пород

1 - упруго-хрупкие

2 - упруго-пластичные

3 - пластические (мрамор).

Коэффициент пропорциональности между действующим продольным напряжением (растягивающим или сжимающим) и соответствующей ему относительной деформацией называется модулем продольной упругости (модуль Юнга):

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad \text{Па (Н/м)}.$$

Коэффициент пропорциональности между касательным напряжением и соответствующей ему относительной деформацией сдвига носит название модуля сдвига:

$$\tau = G \cdot \delta \quad \text{Па (Н/м)}.$$

На практике часто пользуются еще одним упругим показателем пород - **коэффициентом Пуассона**.

- В отличие от всех предыдущих, упругих параметров, он является коэффициентом пропорциональности **только между деформациями** - относительными продольными и относительными поперечными:

$$\frac{\Delta L}{L} = -\nu \cdot \frac{\Delta D}{D_0}$$

- В случае **идеально упругих тел** достаточно знать лишь модуль Юнга и модуль сдвига, так как другие параметры могут быть вычислены по определенным соотношениям теории упругости. Например, модуль сдвига:

$$G = \frac{E}{2 \cdot (1 + \nu)}$$

В условиях **равномерного упругого**
трехосного сжатия породы
наблюдается **прямая**
пропорциональная зависимость
между действующим давлением и
относительным изменением объема
породы:

$$P = K \cdot \frac{\Delta V}{V}$$

- Соответствующий коэффициент пропорциональности (K) называется **модулем объемного (всестороннего) сжатия**. Он так же связан с модулем продольной упругости и коэффициентом Пуассона зависимостью:

$$K = \frac{E}{3(1 - 2 \cdot \nu)}$$