Структурная геология и геологическое картирование

Лекция № 10

«Напряжения и деформации»

Напряжение

Тело находится под напряжением (т.е. в нем возникают **внутренние силы**) тогда, когда к нему приложена **сила внешняя**.

Сила – **величина векторная**, т.е. имеет две характеристики:

1 – скалярное значение; 2 – направление приложения.

Напряжение (по идее Коши) определяется как сила, приложенная к единице площади – равнодействующая всех сил делится на площадь, к которой они приложены.

$$\Sigma = (\boldsymbol{F}/\boldsymbol{S})$$

?

На какую формулу похожа эта?

Огюстен Луи Коши (1789-1857)

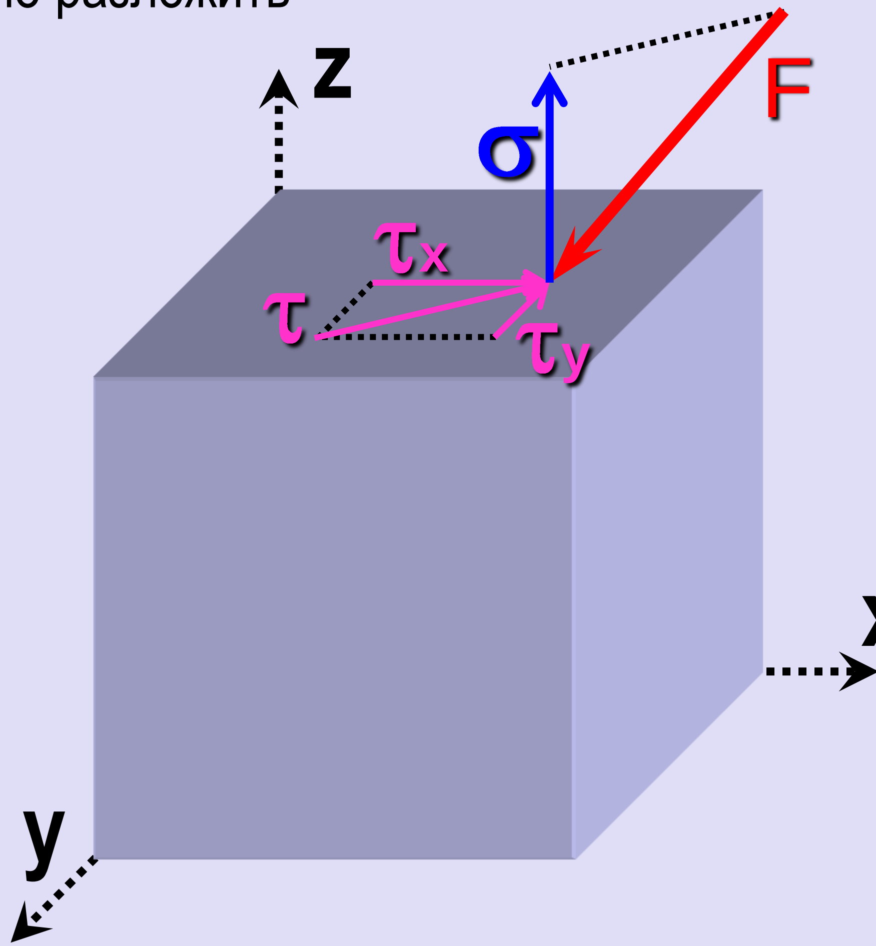
Сила, как таковая, приложена к конкретной площадке, однако она вызывает трехмерные напряжения и деформации, которые при неоднородном строении геологических тел очень сложно описывать, а тем более – рассчитывать.

Для «небольших» геологических тел обычно принимается допущение об «однородности напряжений», т.е. о том, что величина и направление напряжений равны во всех точках тела. Это допущение далеко не всегда приемлемо для крупных структур. Поэтому для анализа распределения напряжений используют бесконечно малый **виртуальный куб** породы, считая, что уж внутри-то этого маленького куба напряжение точно однородно. Напряжение рассчитывают для грани этого куба (для **бесконечно малой площадки**).

Виртуальный элементарный куб мысленно располагают в определенной **системе координат**. Очень удобно рассматривать напряжения относительно граней этого куба.
Действующая на тело (на площадку) **сила** (**F**) вызывает напряжение, которое по правилу параллелограмма можно разложить на этой площадке на две составляющие:

– **нормальное** (**σ**) напряжение перпендикулярно поверхности (грани куба)

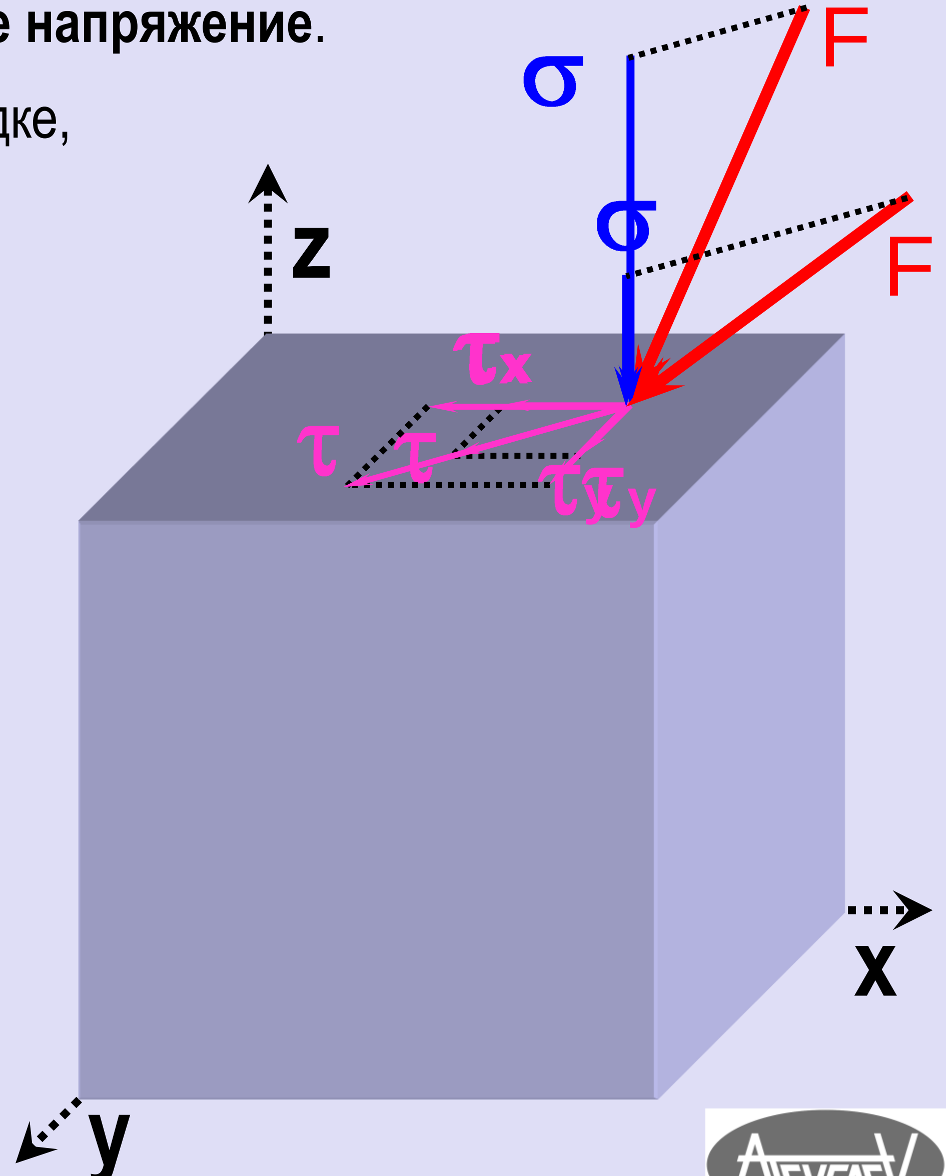
– **тангенциальное** (**τ**), или **касательное** напряжение выражено на поверхности (или на площадке). Тангенциальное напряжение в свою очередь тоже может быть **разложено** на составляющие τ_x и τ_y соответственно осям **x** и **y** виртуального куба.



Напряжения **уравновешивают** тело: оно **не движется** (**σ** уравновешивает нормальную составляющую силы) и **не вращается** (**τ** уравновешивает тангенциальную составляющую силы)

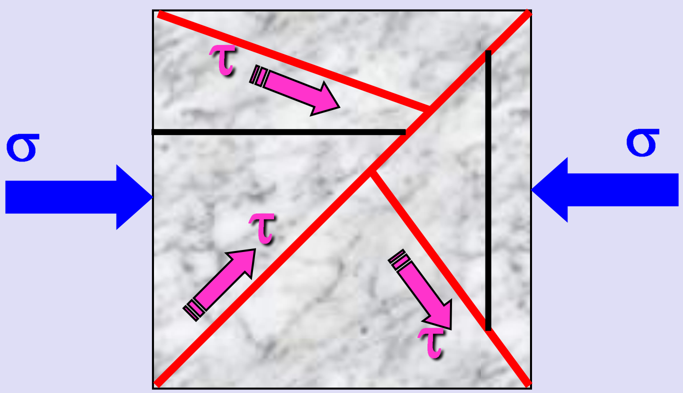
Чем **круче** к площадке действует сила, тем **больше нормальное напряжение** и **меньше тангенциальное напряжение**.

Чем **положе** к площадке действует сила, тем **меньше нормальное напряжение** и **больше тангенциальное напряжение**.

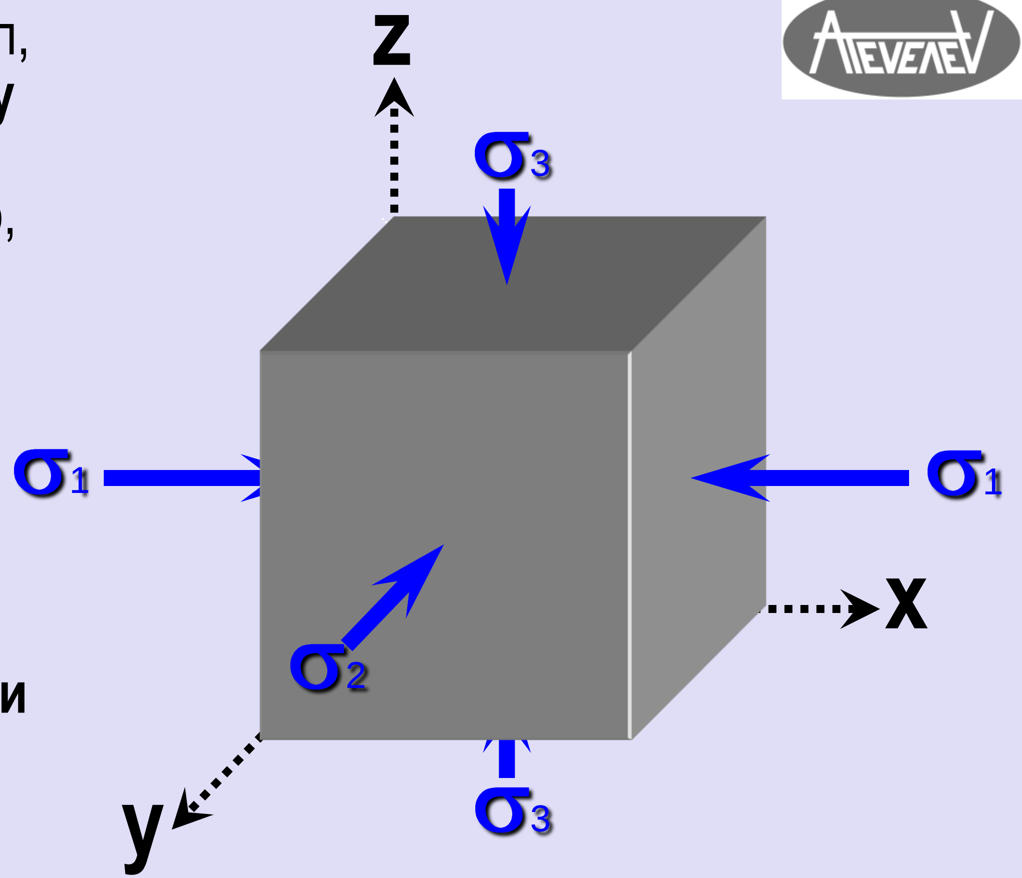


Если действие силы ортогонально площадке, на ней **нормальное напряжение** – **максимально**, **тангенциальное** – **равно нулю**.

Другими словами, тангенциальные (касательные) напряжения возникают только на площадках, **ориентированных косо** к нормальным напряжениям!



Мы не в силах менять направление сил, но мы можем выбрать **любую систему координат** относительно направления приложения силы. В том числе и такую, в которой на всех трех взаимно перпендикулярных плоскостях **тангенциальные напряжения** обращаются в **нуль**.
В этом случае поле напряжений можно будет описать **только нормальными напряжениями.**
Такие напряжения называют **главными нормальными напряжениями**

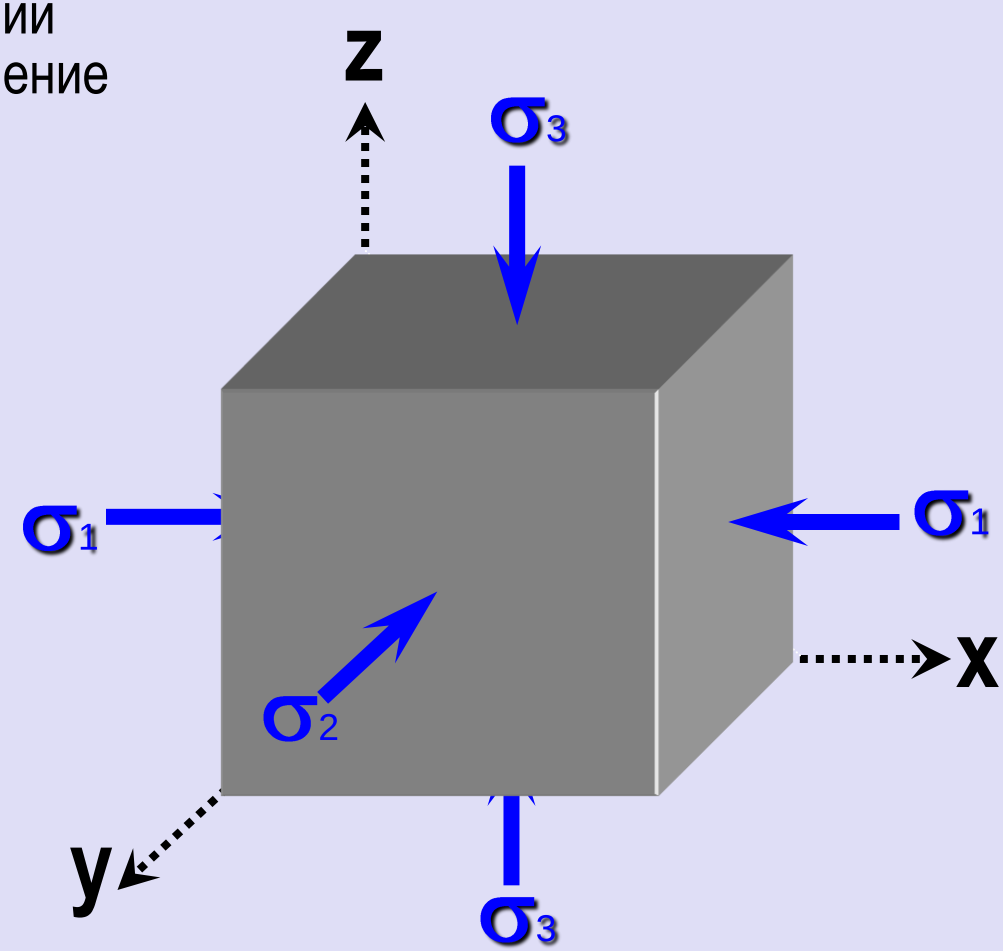


Главные нормальные напряжения обозначают буквами
$\boldsymbol{\sigma}_1$, $\boldsymbol{\sigma}_2$ и $\boldsymbol{\sigma}_3$, где
$\boldsymbol{\sigma}_1$ – максимальное,
$\boldsymbol{\sigma}_2$ – среднее,
$\boldsymbol{\sigma}_3$ – минимальное.

Направления действия главных напряжений называются **главными направлениями напряжения**, а плоскости, проходящие через две оси, и ортогональные третьей – **главными плоскостями напряжений.**

Условия, при которых $\boldsymbol{\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3}$, называются **литостатическими**. Такие условия возникают при погружении тела на глубину. Литостатическое давление просто равно **весу** колонны **вышележащих пород**.

Геологическое тело в литостатических условиях находится под равномерными всесторонними и одинаковыми напряжениями, а поэтому оно (в простом случае!) **не деформируется** и **не смещается**.



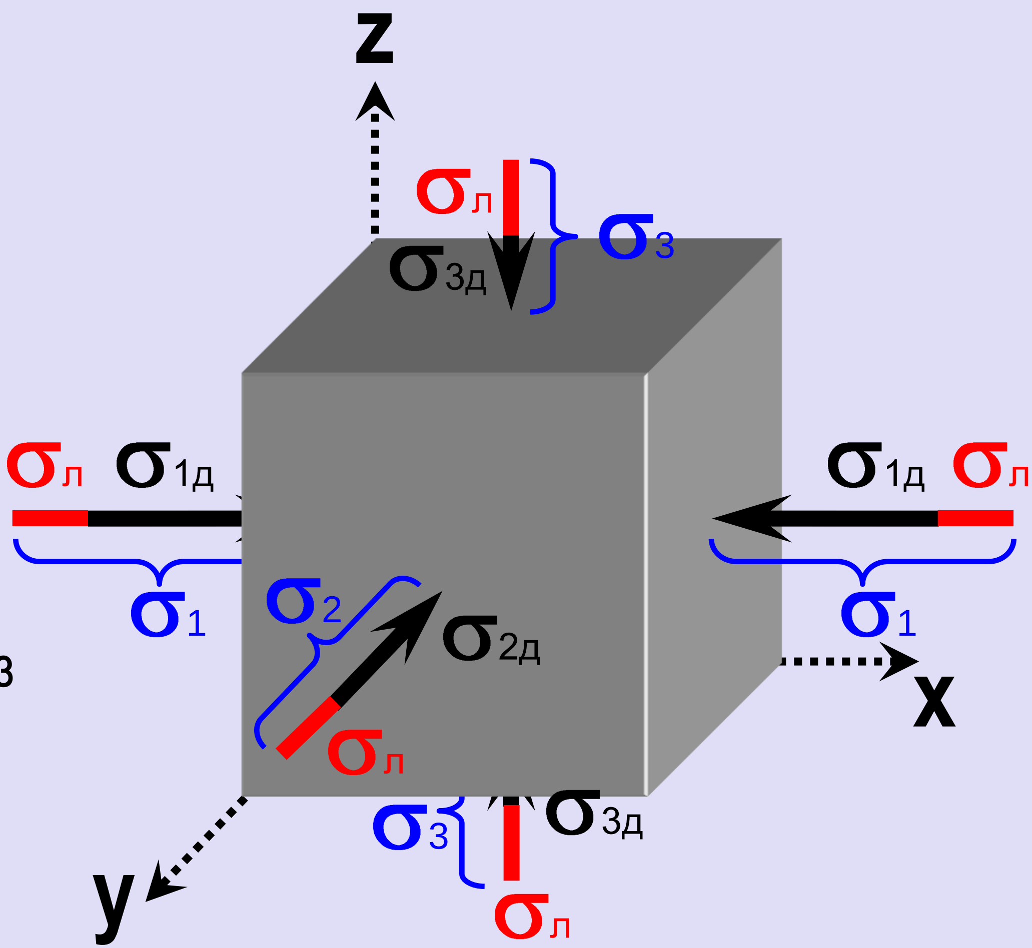
NB!
В литостатических условиях тангенциальные напряжения не возникают!

Среднее нормальное напряжение в литостатических условиях:

$$\sigma_{ср} = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) / 3 = 3\sigma_1 / 3 = \sigma_1$$

Если главные напряжения не равны друг другу, но литостатическая компонента присутствует, то ее принято вычитать. Остаток от вычитания называют **девиаторным**, или **дифференциальным напряжением**

$$\sigma_{1д} = (\sigma_1 - \sigma_л)$$
$$\sigma_{2д} = (\sigma_2 - \sigma_л)$$
$$\sigma_{3д} = (\sigma_3 - \sigma_л)$$



В тех случаях, когда, условия не вполне отвечают литостатическим, за литостатическую компоненту принимают усредненное значение напряжений. Поэтому **девиаторные** напряжения можно определить через **среднее арифметическое**:

$$\bar{\sigma} = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)/3$$
$$\sigma_{1д} = (\sigma_1 - \bar{\sigma})$$
$$\sigma_{2д} = (\sigma_2 - \bar{\sigma})$$
$$\sigma_{3д} = (\sigma_3 - \bar{\sigma})$$

В приповерхностных условиях (при малом литостатическом давлении) одни напряжения будут **растягивающими**, а другие – **сжимающими**, т.е. будут иметь разные знаки.

В глубине Земли все напряжения будут **сжимающими**, т.е. будут иметь одинаковый знак, но при условии их неравенства, одни из них окажутся относительно **растягивающими**, а другие – **сжимающими**.

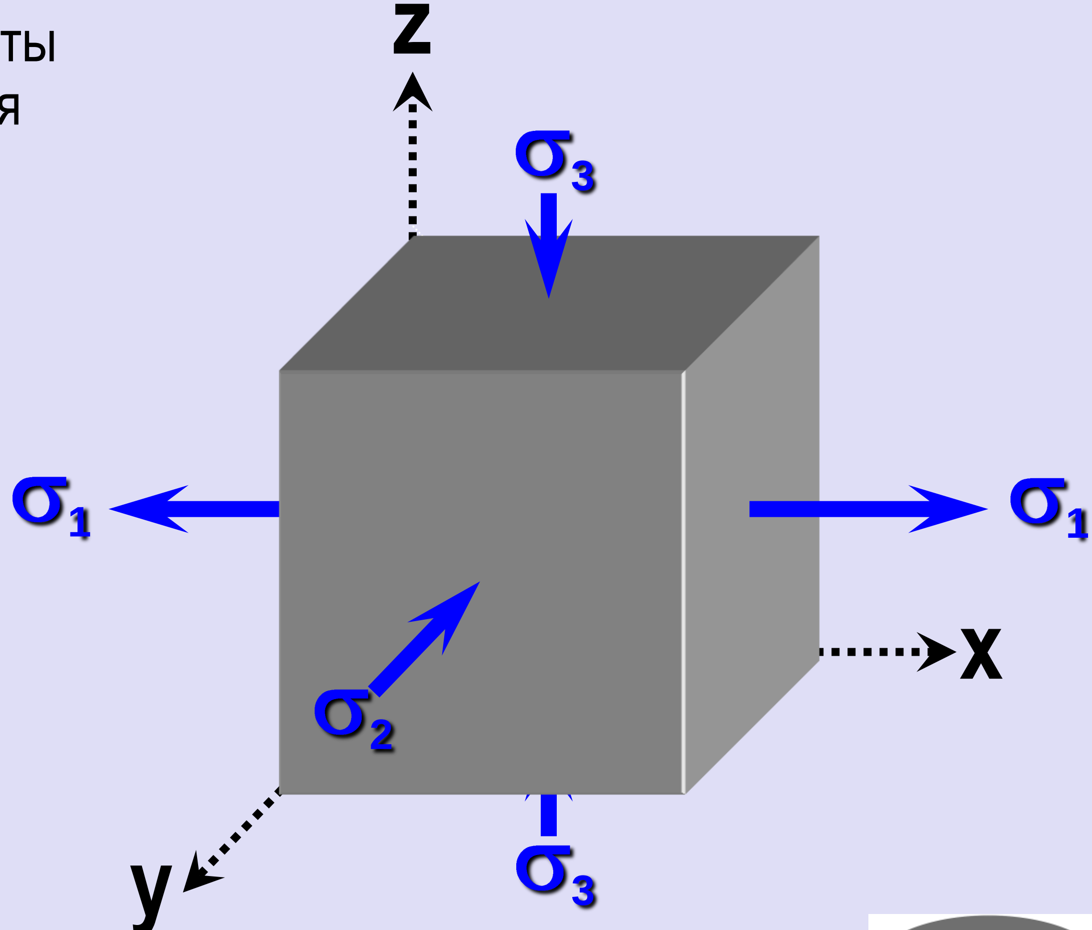
В отечественной литературе приняты следующие буквенные обозначения напряжений:

σ_1, σ_2 и σ_3, где

σ_1 – **растягивающее**,

σ_2 – среднее,

σ_3 – **сжимающее**.



NB!
В западной литературе принятые обратные обозначения напряжений:
σ_1 – *сжимающее*
σ_3 – *растягивающее*!

Кристиан Отто Мор
(1835-1918)

Графический расчет напряжений

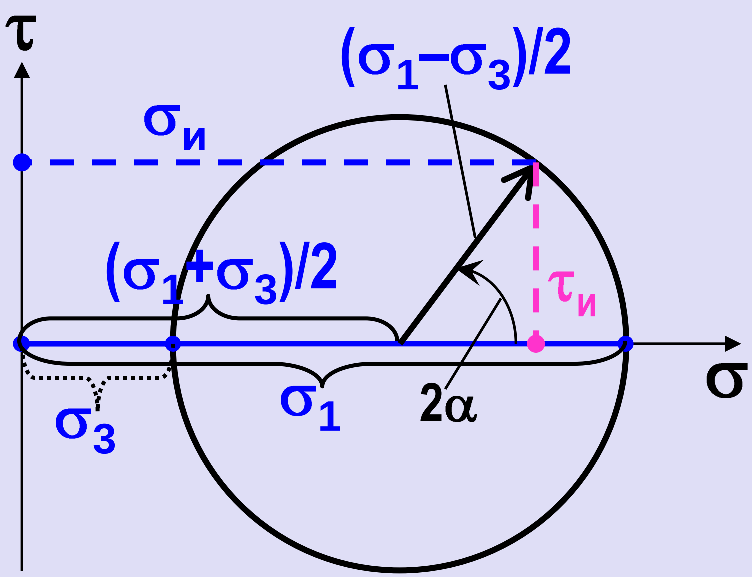
При известных максимальном и минимальном главных напряжениях для определения величины нормального и тангенциального напряжений в любой плоскости сечения удобно использовать диаграмму Мора (1882), или "**Круг Мора**", где:

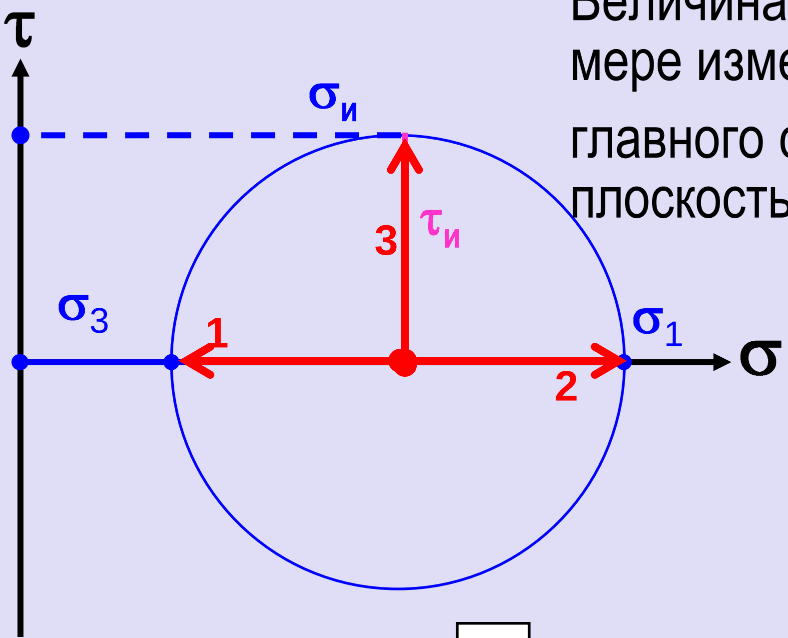
σ – ось абсцисс (нормальное напряжение)
τ – ось ординат (тангенциальное напряжение)

σ_1 – главное максимальное напряжение
σ_3 – главное минимальное напряжение
$(\sigma_1+\sigma_3)/2$ – начало радиуса-вектора
$(\sigma_1-\sigma_3)/2$ – длина радиуса-вектора

α – угол между заданной плоскостью и вектором минимального (сжимающего!) главного напряжения (σ_3)

$\sigma_и$ – искомое нормальное напряжение
$\tau_и$ – искомое тангенциальное напряжение

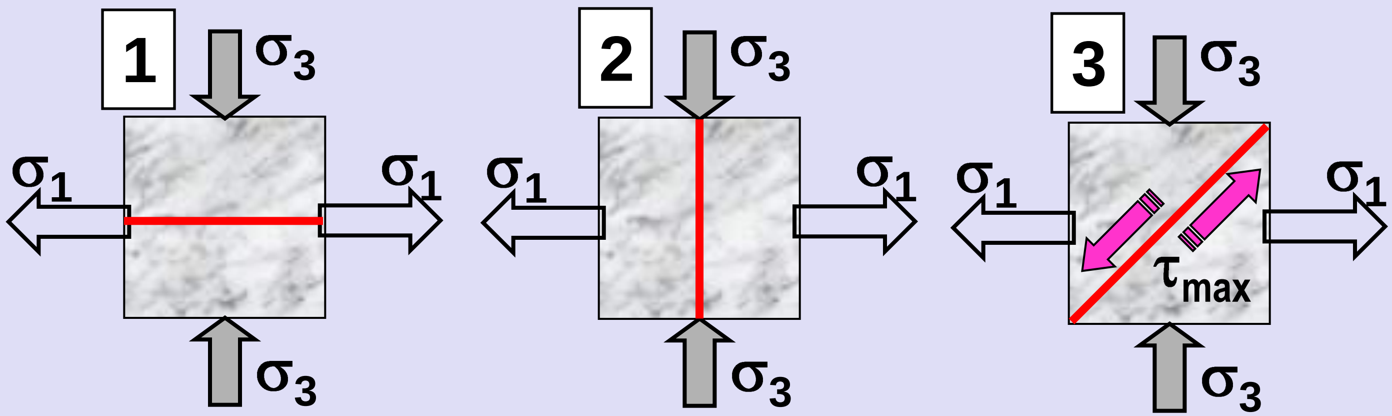




Величина напряжения плавно меняется по мере изменения угла между вектором главного сжимающего напряжения и искомой плоскостью

NB!
Максимальные тангенциальные напряжения возникают на площадках, ориентированных под ∠45° к нормальным напряжениям!

Крайние случаи:



1) если α = 90° (2α = 180°), то $\sigma_и = \sigma_3$, а $\tau_и = 0$;

2) если $\alpha = 2\alpha$ = 0°, то $\sigma_и = \sigma_1$, а $\tau_и = 0$;

3) если α = 45° (2α = 90°), то $\tau_и = (\sigma_1 - \sigma_3)/2$ (max!), а $\sigma_и = (\sigma_1 + \sigma_3)/2$

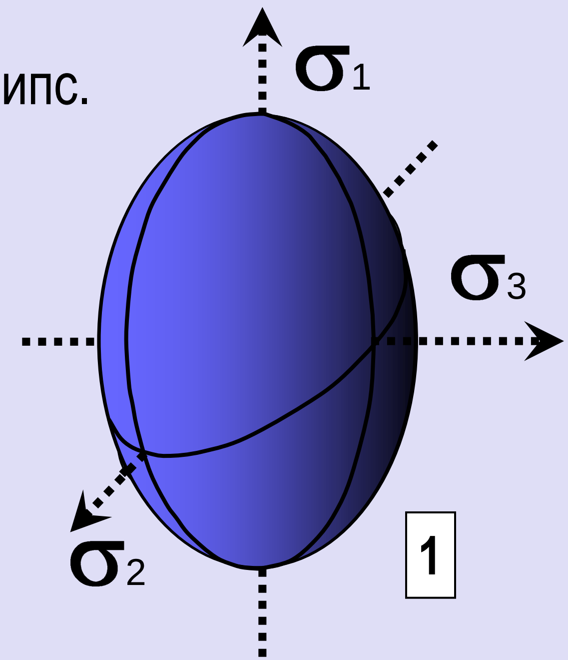
?
Как изобразить круг Мора при условии $\sigma_1 = \sigma_3$

Эллипсоид напряжений

Для геометрического описания плавно изменяющегося трехмерного напряжения используют **эллипсоид напряжений**.

Эллипсоид напряжений однозначно определяется положением его **главных осей**. Плоскости, проходящие через две оси, и ортогональные третьей – **главные плоскости напряжений**

Двухмерный разрез эллипсоида представляет собой эллипс.



1

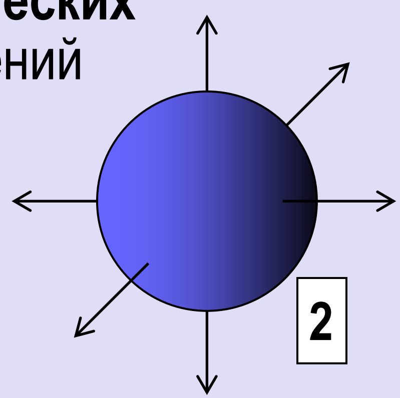
Трехмерное напряженное состояние определяется неравенством всех главных нормальных напряжений, поэтому в общем случае эллипсоид напряжений представляется **трехосным** (**1**).

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

При равенстве всех трех главных напряжений, т.е. в **литостатических условиях,** эллипсоид напряжений представляет собой **шар** (**2**).

.

$$\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$$

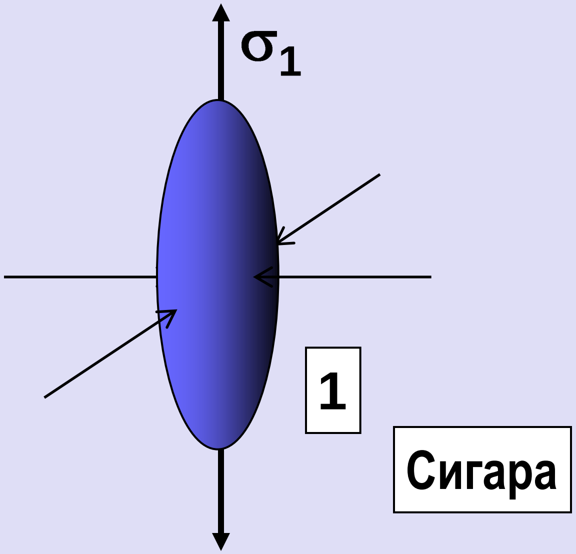


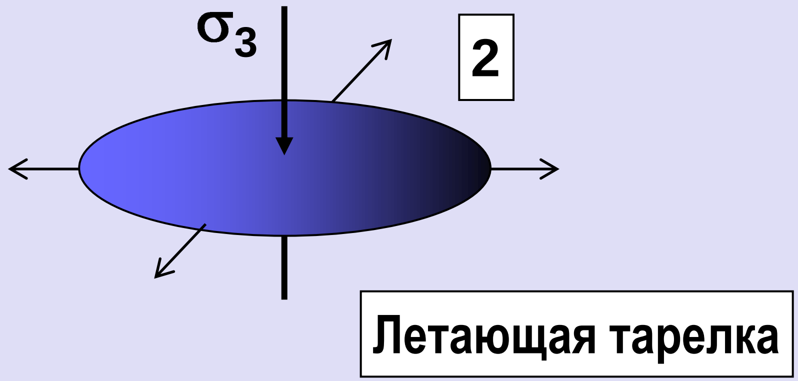
2

?

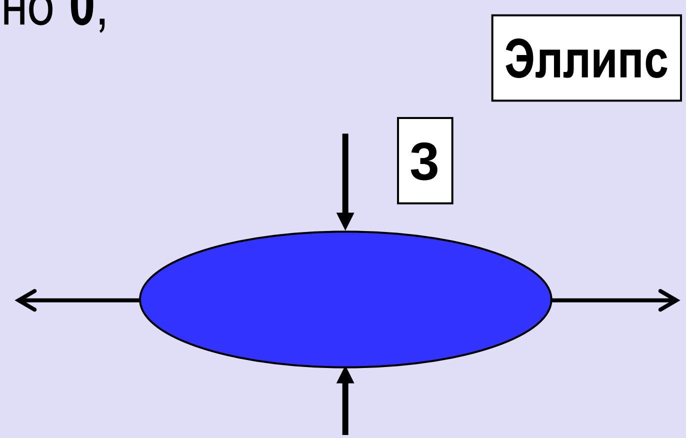
Что представляет собой эллипсоид напряжений при условии $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 = 0$?

При равенстве двух из трех напряжений трехосный эллипсоид превращается в одноосный, или **эллипсоид вращения**. Такой эллипсоид фактически описывает **одноосное напряженное состояние**, которое может либо вытягивать его при условии $\boldsymbol{\sigma_3 = \sigma_2}$ (**1**), либо расплющивать при условии $\boldsymbol{\sigma_1 = \sigma_2}$ (**2**).





Если одно из главных нормальных напряжений равно **0**, то принято говорить о **двухосном напряженном состоянии**. В этом случае эллипсоид напряжений будет представлен **сечением** в одной из главных плоскостей напряжений, т.е. – **эллипсом** (**3**).

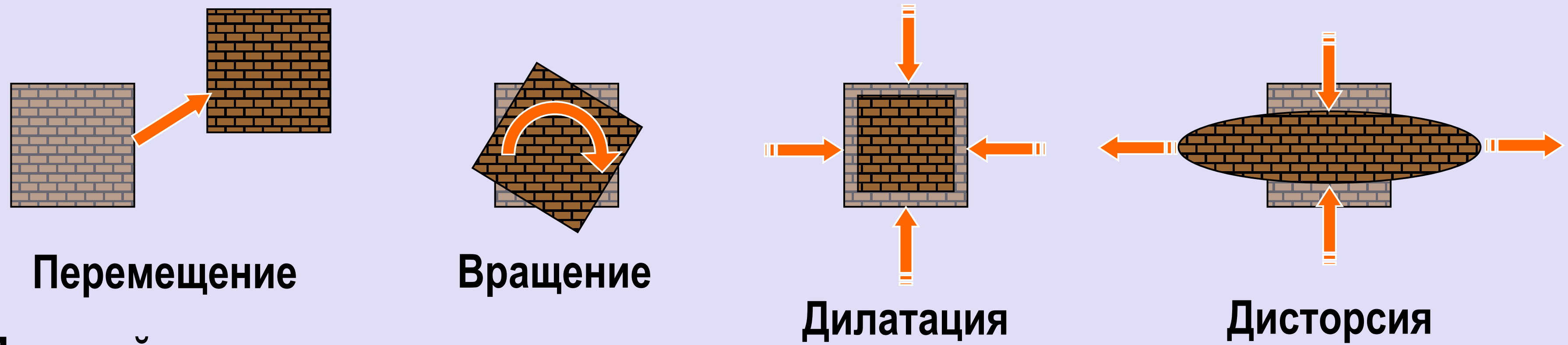


Стрелки всегда показывают правильное направление.
Важно только знать, о чем, собственно, речь идет!

Деформации

Общая деформация геологических объектов это изменение:
во-первых – ***местоположения*** (перемещение, перенос, трансляция);
во-вторых – ***ориентировки*** (вращение);
в-третьих – ***объема*** и ***формы***:

дилатация – изменение объема при сохранении формы
дисторсия – искажение формы



Простейшие примеры:
перемещения – смещения блоков по разрывам;
вращения – поворот крыльев складки при изгибе;
дилатации – уплотнение нелитифицированных осадков;
дисторсии – раздавливание, складчатость, рассланцевание и пр.

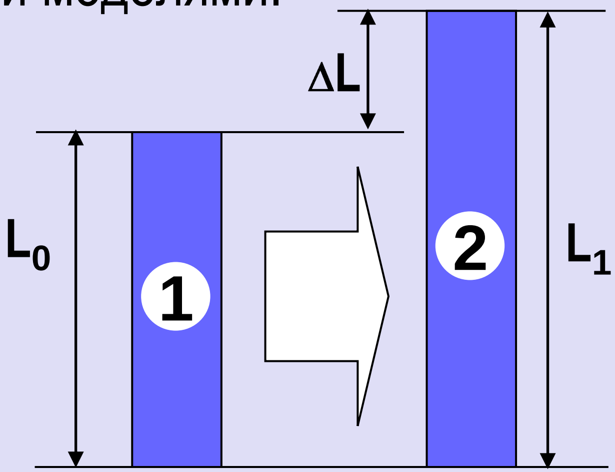
Общая деформация геологических объектов происходит в результате приложения самых разных напряжений, что чаще всего приводит к изменению и формы, и положения объектов.

Меры деформаций

Для описания количественных характеристик деформаций различают **три** их типа:
линейная – изменение формы в одном направлении;
плоская – изменение формы в двух направлениях;
объемная – изменение формы в трех направлениях.
Реальные деформации геологических тел практически **всегда объемны**, а линейные и плоские деформации являются удобными моделями.

Линейная деформация

L_0 – начальная длина тонкого стержня;
L_1 – конечная длина тонкого стержня;
ΔL – абсолютное удлинение



Меры линейной деформации:

– растяжение $\boxed{S = L_1 / L_0 = (1 + \varepsilon)}$

– относительное удлинение $\boxed{\varepsilon = (L_1 - L_0) / L_0 = \Delta L / L_0}$

Плоская деформация

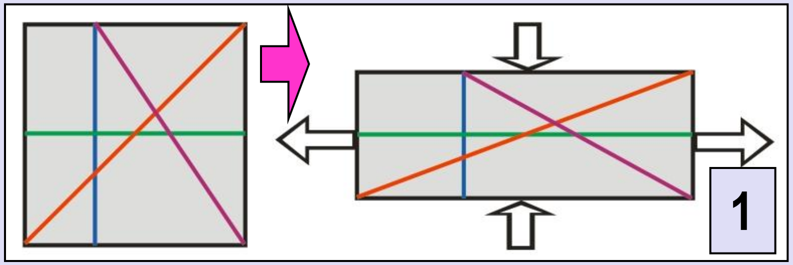
Общая ситуация заключается в том, линейной деформации в чистом виде в природе не существует, при растяжении физического тела в одном направлении, оно неизбежно сжимается в другом. И наоборот, при сжатии в одном направлении, оно растягивается в другом. Поэтому гораздо удобнее рассматривать особенности деформации тел в плоскости, которую легко представить как сечение тела.

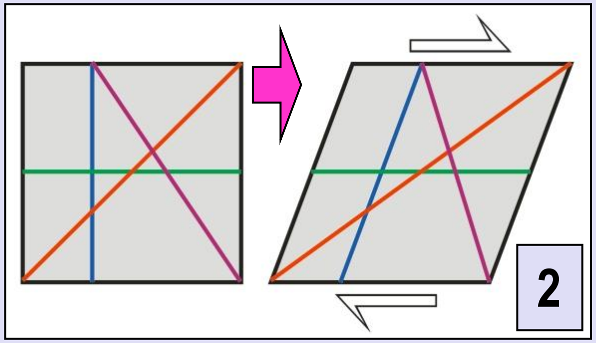
Плоские деформации принято делить на **однородные** и **неоднородные**. Бóльшая часть деформаций в природе относится к неоднородным, которые очень разнообразны.

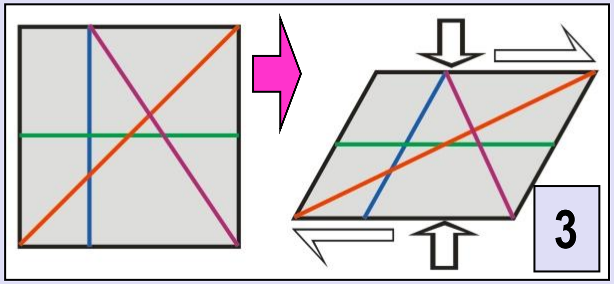
Однородной называется деформация, при которой все материальные **прямые** линии в объекте и после деформации **остаются прямыми**.

К однородным деформациям относятся:

1 – **чистый сдвиг** (удлинение – укорочение); **2** – **простой сдвиг** (скашивание).







В природе оба типа однородных деформаций часто встречаются в сочетании (**3**).

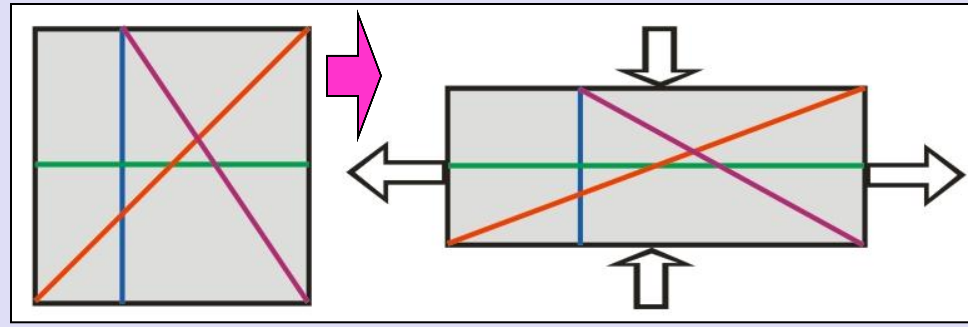
"Чистый сдвиг" и "простой сдвиг" не являются "сдвигами" в геологическом смысле слова! Это только обстановки деформаций.

NB!
Далее речь пойдет об однородных деформациях!

Для упрощения интерпретации характера деформаций часто принимается допущение об ***однородности деформаций*** во всем объеме геологического тела.

Чистый сдвиг

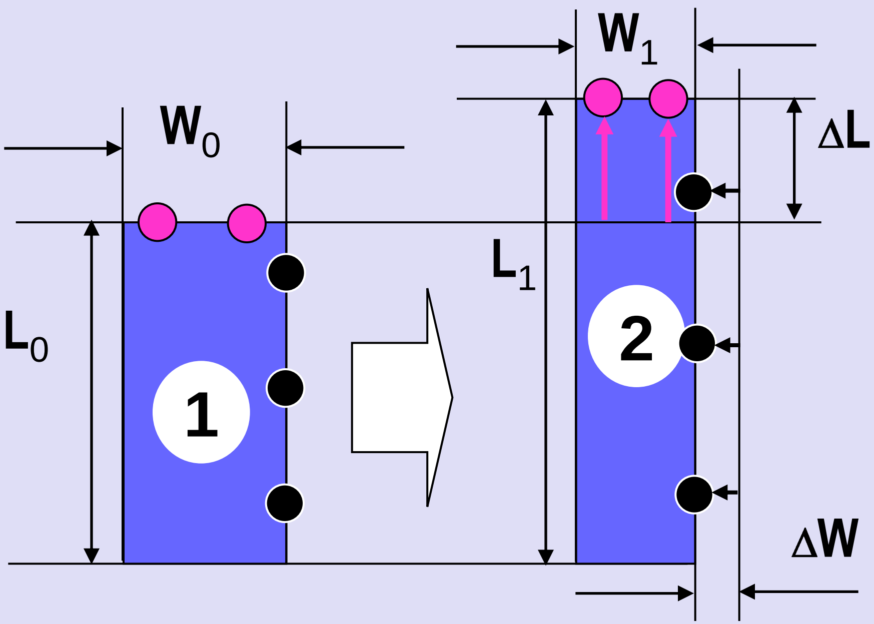
Чистый сдвиг (удлинение – укорочение) есть деформация под действием **нормальных напряжений**.



Мерами деформации могут служить два коэффициента:

– продольное относительное удлинение $\varepsilon_{\text{пр}} = (L_1 - L_0) / L_0 = \Delta L / L_0$

– поперечное относительное удлинение $\varepsilon_{\text{поп}} = (W_1 - W_0) / W_0 = \Delta W / W_0$

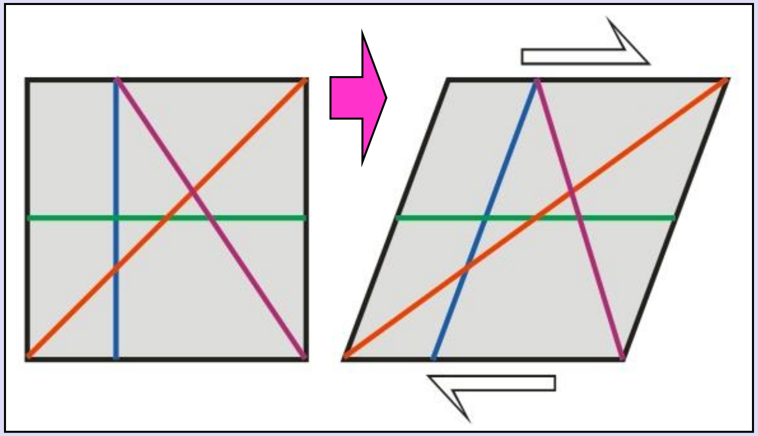


При деформации чистого сдвига равны площади прямоугольников 1 и 2, а также скорости смещения точек на их сторонах.

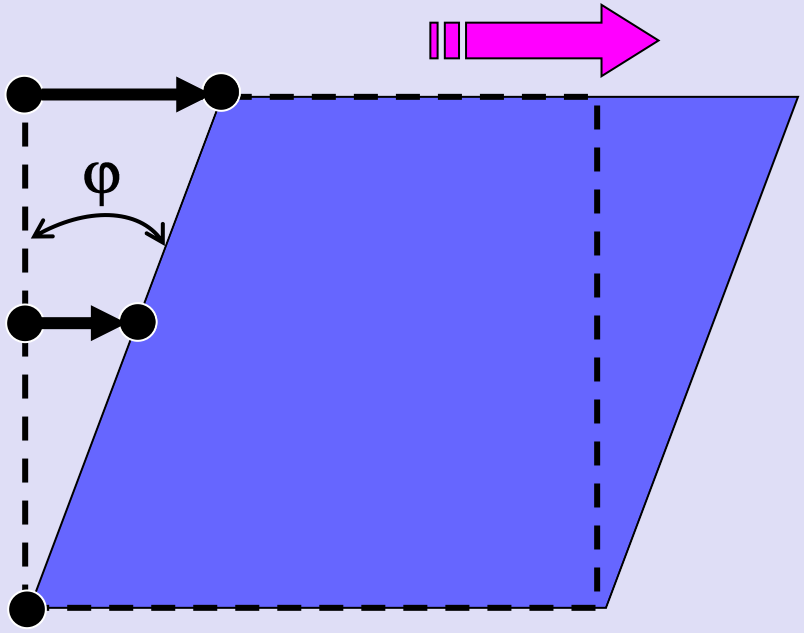
NB!
Деформация ε положительна при растяжении и отрицательно при сжатии!

Простой сдвиг

Простой сдвиг (скол) есть деформация под действием **тангенциальных (касательных) напряжений**.



Мерами деформации служат:
– **угол φ**, на который отклоняется при сдвиге сторона мысленного квадрата
– **tg φ**.



При деформации простого сдвига площадь первичного прямоугольника равна площади полученного параллелограмма.
Скорости смещения точек на скосах изменяются от нулевой до максимальной, из-за чего возникает **градиент скоростей**.

NB!
Мнемоническое правило:
"Простой сдвиг не так прост, как кажется!"

Реакция материалов на напряжение

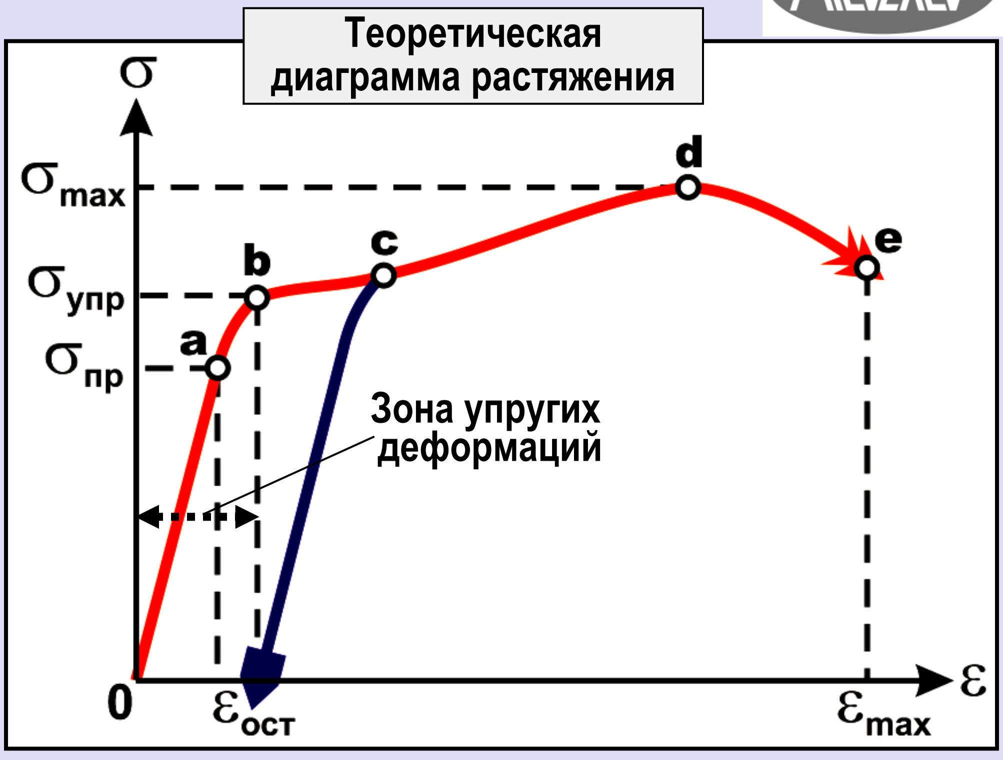
Выделяют три "идеальных модели" реакции материалов на напряжение:

1 – упругая, **2 – пластическая**, **3 – разрушение**. Графически связь напряжений и деформаций изображают в виде "**Диаграммы растяжения**".

Упругая деформация обратима, т.е. после снятия нагрузки она исчезает, но свойством упругости материалы обладают только до определенного значения напряжения, который называют ***пределом упругости*** (точка «**b**»), причем до ***предела пропорциональности*** (точка «**a**») напряжение и деформация связаны **линейно**, а на отрезке "**a** – **b**" эта связь становится **нелинейной**.

NB! Идеально упругое тело после снятия нагрузки полностью восстанавливает форму!

После достижения предела упругости даже небольшие приращения нагрузки вызовут значительные деформации тела, которые хотя бы частично будут необратимыми. После снятия нагрузки форма тела восстановится только на упругую часть деформации, остальное – **остаточная деформация**.



Упругая деформация

Бытовым аналогом упругого тела является пружина, которая деформируется пропорционально приложенной силе (значит – напряжению!), а после снятия нагрузки возвращается в исходное положение.

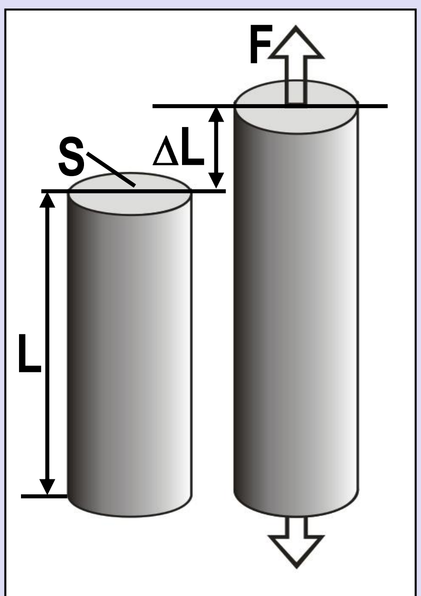
Роберт Гук (1635-1703)

Закон Р. Гука (для тонкого стержня):
"***Сила упругости**, возникающая в теле при деформации, прямо пропорциональна величине этой деформации*"

$$\boxed{F = k\Delta L}$$

***F* – сила натяжения стержня; ΔL – абсолютное удлинение стержня; *k* – коэффициент упругости.**

Пример. Высота звука струны зависит от ее натяжения (напряжения). Чем выше нужен звук (напряжение!), тем больше надо струну деформировать (вытянуть).



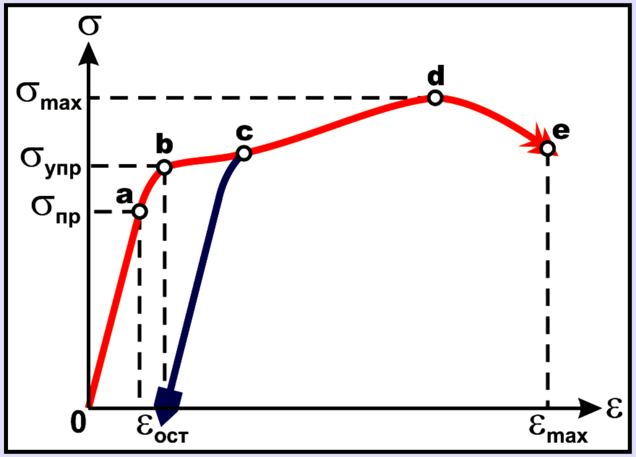
Закон Р. Гука (для толстого стержня):
"*Упругая деформация стержня прямо пропорциональна первоначальной длине (**L**) и приложенной силе (**F**) и обратно пропорциональна площади его сечения (**S**)*".

$$\boxed{\Delta L = \alpha_{упр}(LF/S)}$$

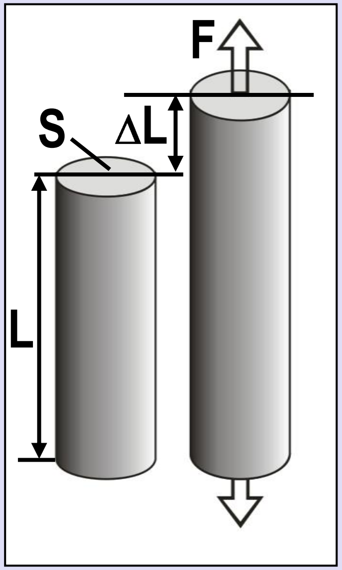
$\alpha_{упр}$ – коэффициент упругости

Пример. При одной и той же длине гитарных струн и одном и том же материале первую струну (тонкую) тянуть (деформировать!) гораздо проще, чем шестую (толстую).

Модули упругости



Закон Гука справедлив только для **малых** упругих деформаций, до достижения ими предела пропорциональности (точка "**а**")! Далее связь становится нелинейной.



Для расчета **линейной** упругой деформации используют **модуль Юнга** – коэффициент, характеризующий сопротивление материала растяжению / сжатию: отношение **нормального напряжения** (σ) к **относительному удлинению** (ε).

$$E = (F/S)/(\Delta L/L) = \sigma/\varepsilon$$

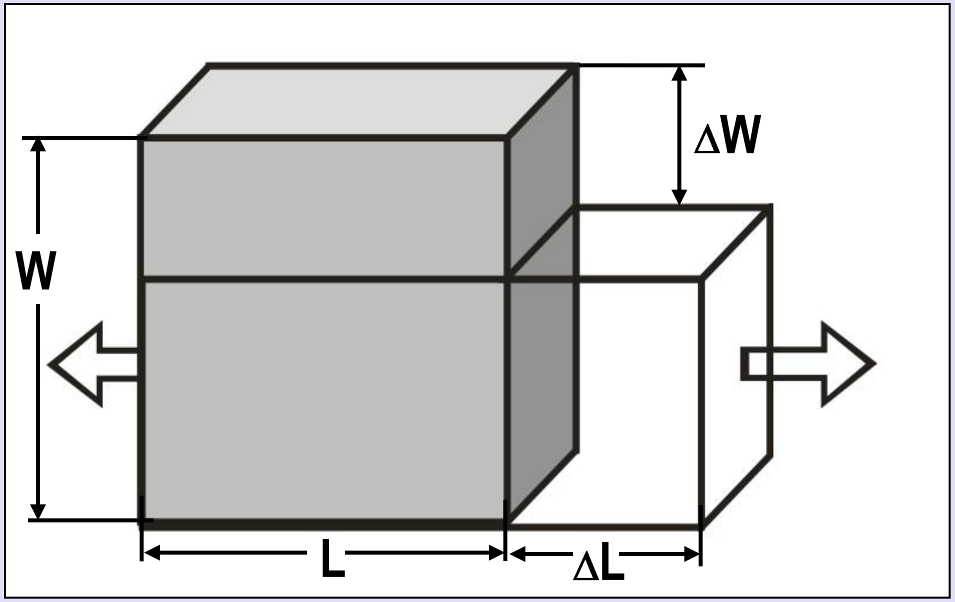
Томас Юнг (1773-1829)

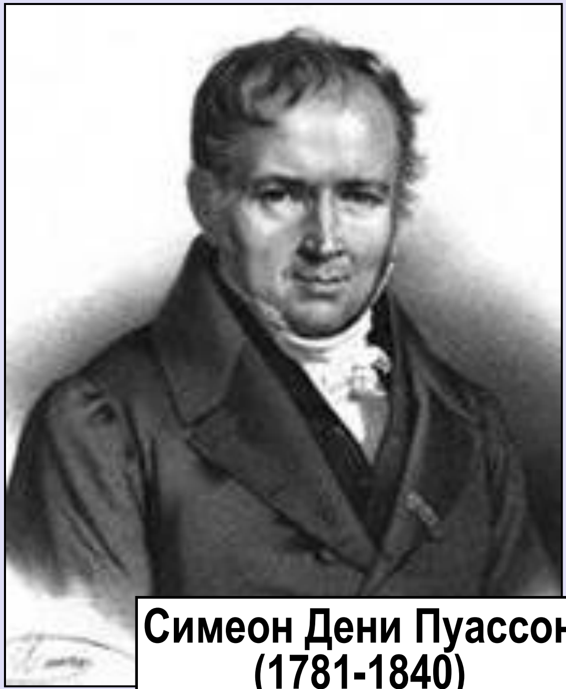
Чем больше модуль Юнга, тем большая нагрузка требуется для получения нужной деформации, и наоборот, тем меньшая деформация требуется для получения нужного напряжения

$$\varepsilon = \sigma/E$$

$$\sigma = \varepsilon E$$

Пример. Модуль Юнга для стали больше чем для нейлона, поэтому стальная струна натягивается (деформируется) труднее, но тянуть ее приходится меньше для нужной высоты звука!





Симеон Дени Пуассон
(1781-1840)

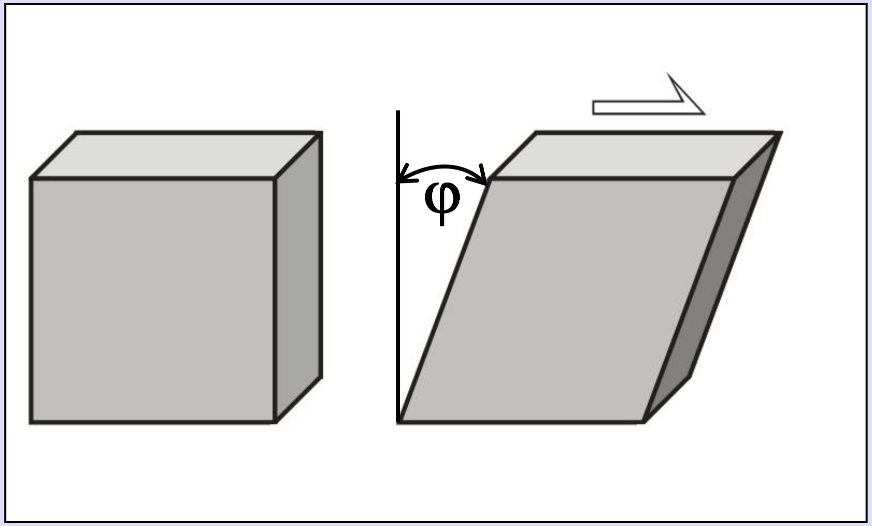
Для расчета **плоской** упругой деформации используют **коэффициент Пуассона**, который отражает соотношение поперечной ($\varepsilon_{поп}$) и продольной ($\varepsilon_{пр}$) деформации (имеется в виду **относительное удлинение**) при **растяжении / сжатии**, т.е. показывает, насколько сжимается тело поперёк при растяжении вдоль. И наоборот. Коэффициент Пуассона зависит только от материала

$$\nu = (\Delta W / W) / (|\Delta L / L|) = \varepsilon_{поп} / |\varepsilon_{пр}|$$

Для **абсолютно упругого тела** $\nu = 0{,}5$

?

А чему равен коэффициент Пуассона для абсолютно хрупкого тела, т.е. тела с пределом упругости = 0?



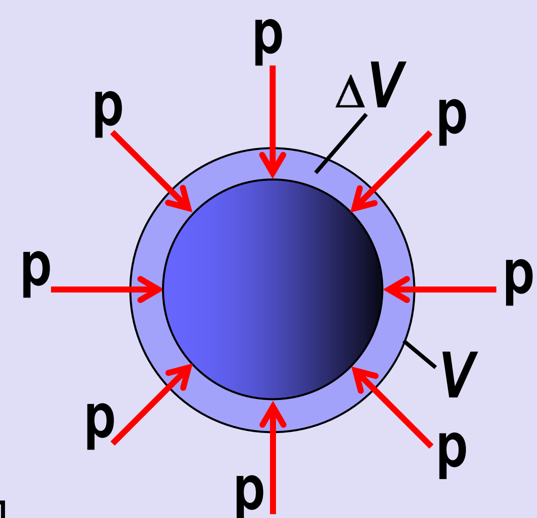
Модуль сдвига – характеризует сопротивление материала **простому сдвигу** для **плоской** упругой деформации. Фактически это отношение **касательного напряжения** (τ) к **величине смещения** (тангенсу угла φ).

$$\boxed{G = \tau / \mathrm{tg}\varphi}$$

NB!

$$G = E/(2\times(1+\nu))$$

Т.е. модуль сдвига для твердых тел в 2-3 раза меньше модуля Юнга!



Модуль объемного сжатия – показатель **относительного сжатия**, т.е. относительного уменьшения объема ($-\Delta V/V$) при увеличении литостатического давления (**p**)

$$\boxed{K = -p / (\Delta V / V)}$$

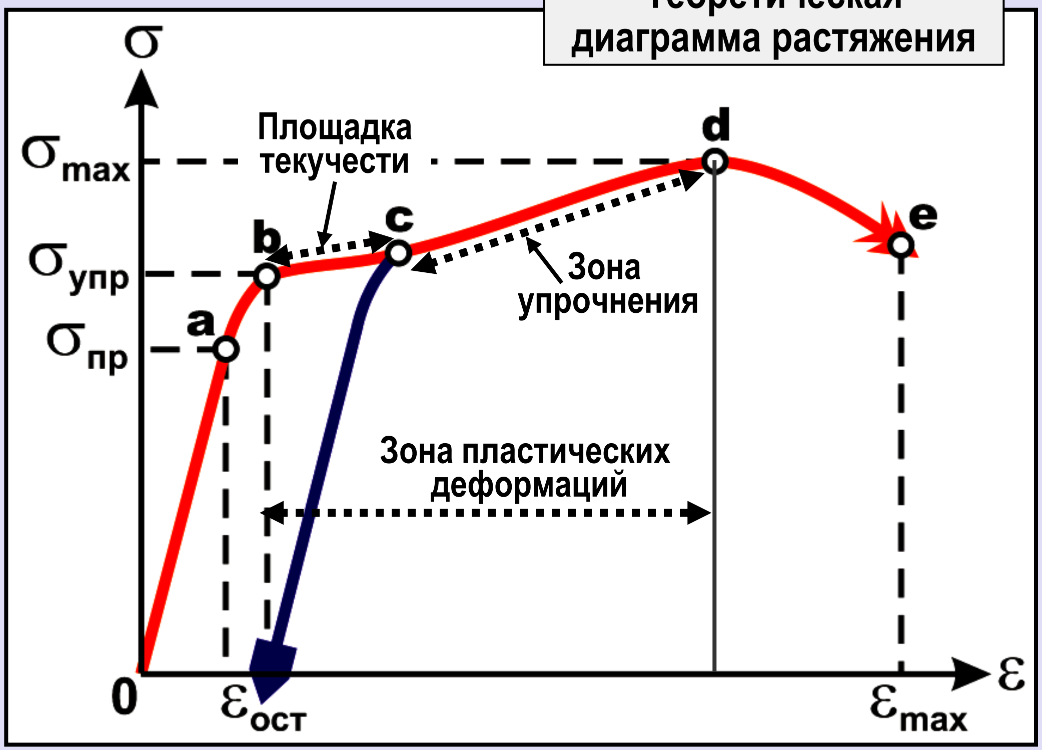
Пластическая деформация

Пластическая деформация – это деформация без разрушения, которая не исчезает после прекращения действия внешних сил. **Идеально пластичное тело** после достижения **предела упругости** (точка «**b**») деформируется без увеличения нагрузки, оно просто течет до достижения **предела текучести** (точка «**c**»). Отрезок "**b–c**" называют "*площадкой текучести*". До предела текучести возможно частичное восстановление формы при снятии нагрузки, хотя остается "остаточная деформация" ($\varepsilon_{ост}$).

Далее сопротивление (и напряжение!) опять медленно возрастает до предела прочности (точка «**d**»). Отрезок "**c–d**" – "*зона упрочнения*".

Но в природе "идеально пластичные тела" практически не встречаются. Характер протекания пластической деформации зависит от **свойств материала** и **времени**.

Теоретическая диаграмма растяжения



Немного терминологии

Релаксация – явление самопроизвольного уменьшения напряжения с течением времени при неизменной деформации. Например, в растянутой проволоке при неизменном удлинении растягивающая сила со временем уменьшается, стремясь к некоторому предельному значению. При этом упругая деформация как бы "рассасывается", превращаясь в пластическую *(Физич. энциклопед. словарь, 1983).*

Пример. Натянутая гитарная струна (деформация постоянна!) со временем ослабевает, т.е. уменьшается напряжение! Новая струна релаксирует быстрее, чем старая, которая уже растянулась почти до предельного значения.

Ползучесть – медленная непрерывная деформация материала, долгое время находящегося под воздействием напряжения **ниже предела упругости**. Фактически, это пластическая деформация в зоне упругой деформации.

Пример. Провода воздушных линий постепенно провисают (деформируются!) под собственным весом (при постоянной нагрузке ниже предела упругости!).

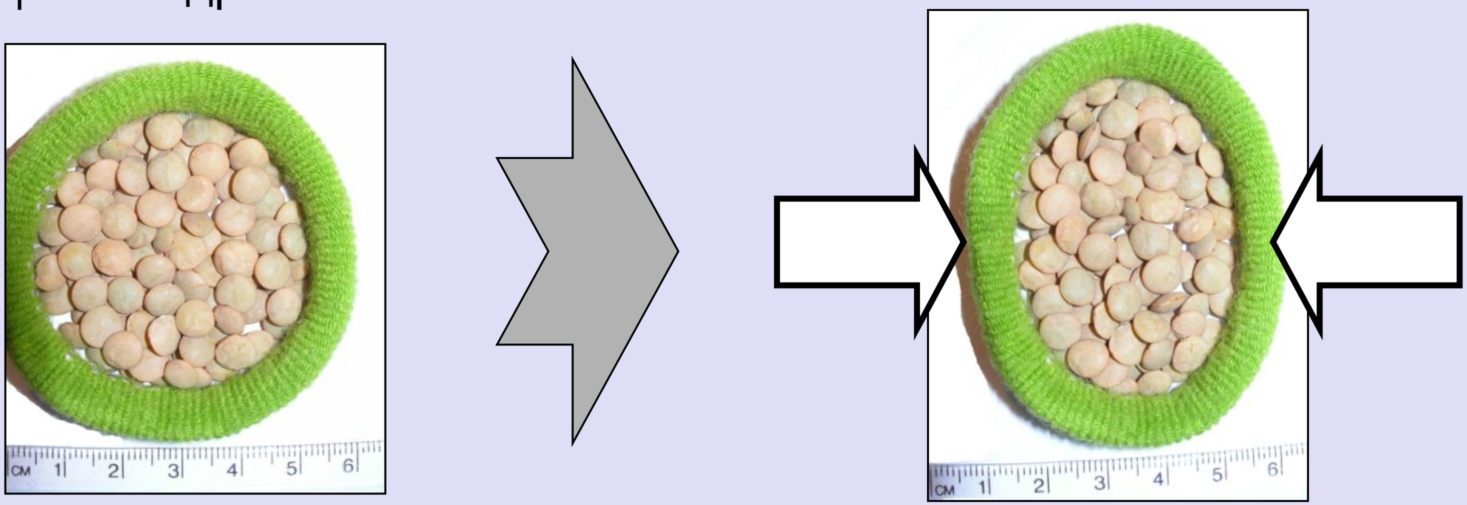
Вязкость – внутреннее трение, свойство "текучих" тел оказывать сопротивление перемещению одной их части относительно другой, т.е. – **касательным напряжениям**. От вязкости зависит скорость пластической деформации, которая вызывается касательным напряжением.

Деформация (ε) прямо пропорциональна касательному напряжению (τ) и времени его действия (**t**) и обратно пропорциональна коэффициенту вязкости (η).

$$\boxed{\varepsilon = \tau \mathbf{t} / \eta}$$

Механизмы пластической деформации

1. Межзерновое скольжение – перемещение отдельных зерен породы относительно друг друга. Такой механизм легко работает в обломочных породах, а в большинстве других проявляется только после грануляции или дробления.



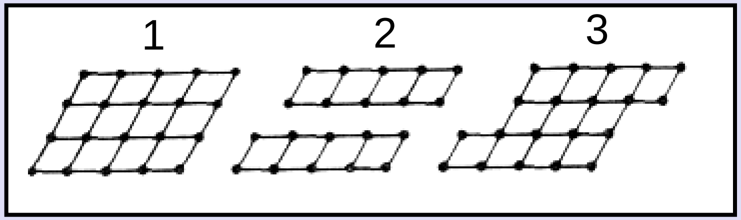
2. Перекристаллизация – образование новых минеральных зерен в твердой породе:

1) увеличение размеров существующих зерен в направлении растяжения,

2) зарождение новых зерен в направлении растяжения за счет уменьшения размеров других зерен.

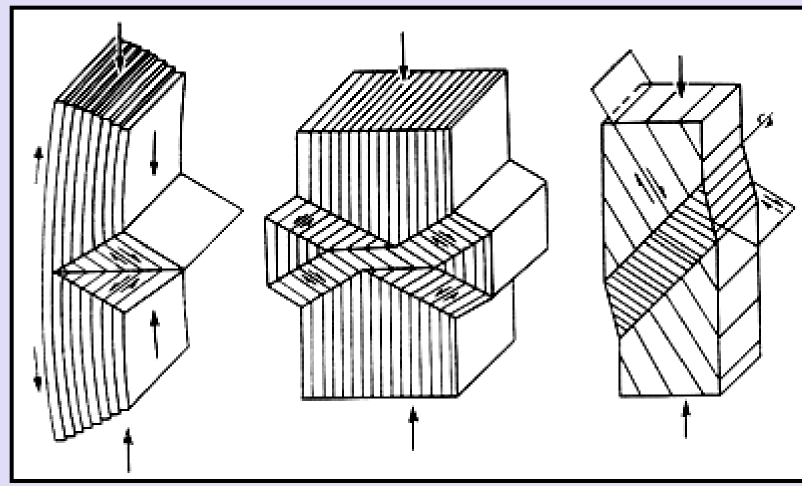
При трехосном сжатии происходит переориентация кристаллографических осей минералов, возникает сланцеватость или линейность.

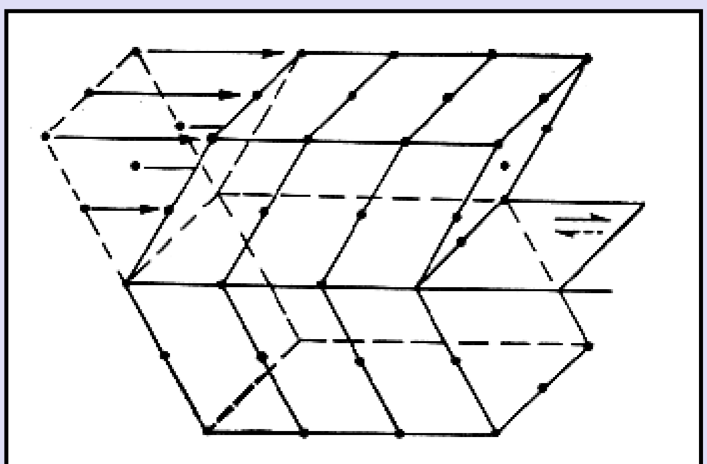
3. Внутризерновое скольжение – перемещение относительно друг друга некоторых участков в отдельных кристаллах. Различают несколько способов внутризернового скольжения, наиболее распространенные:



– **трансляционное скольжение** – перемещение атомных поверхностей на расстояние, кратное наименьшему межатомному расстоянию в данной кристаллической решетке

– **кингинг** – поворот кристаллической решетки с ее разрывом и образованием изгибов и кинкбандов

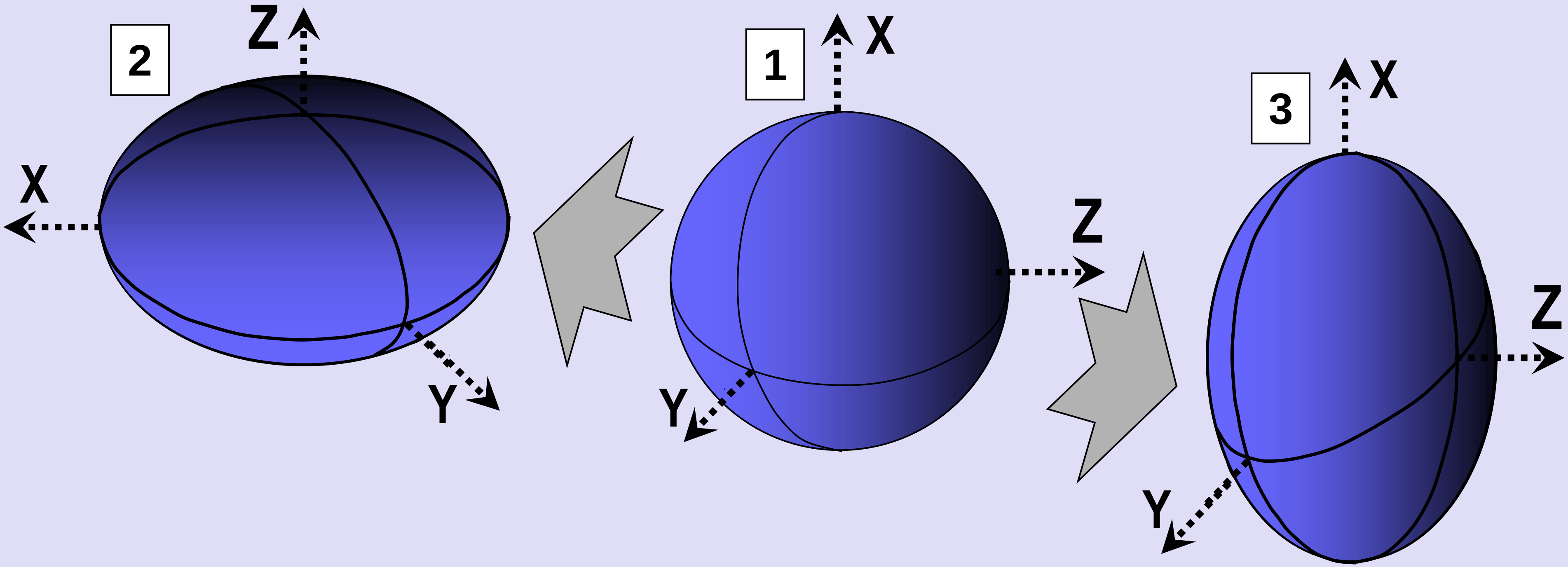




– **двойниковое скольжение** – формирование механических двойников за счет простого сдвига внутри кристаллов

Эллипсоид деформаций

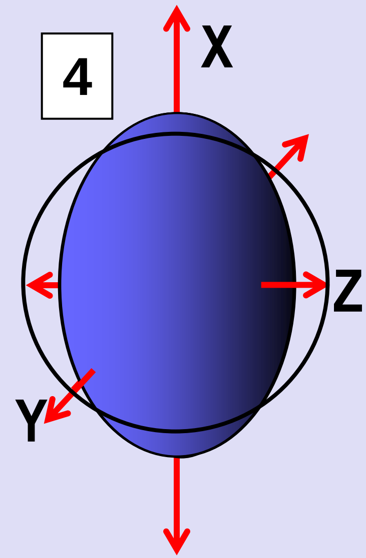
Для геометрического описания трехмерных деформаций используют понятие "**эллипсоид деформаций**", который показывает как деформировано тело, первоначально условно представленное шаром (1). Поэтому его часто называют "эллипсоидом конечных деформаций". При деформации шар может сплющиваться (2) или вытягиваться (3), что определяет конечные размеры полуосей эллипсоида.

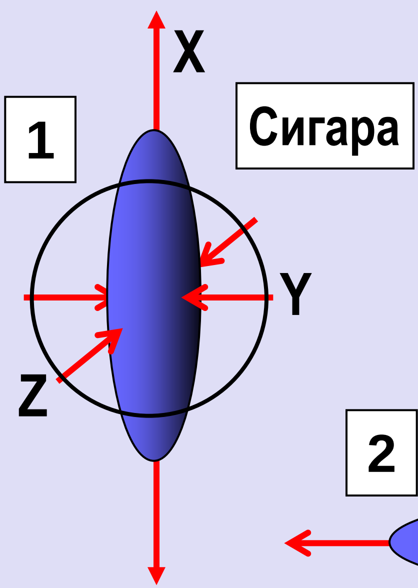


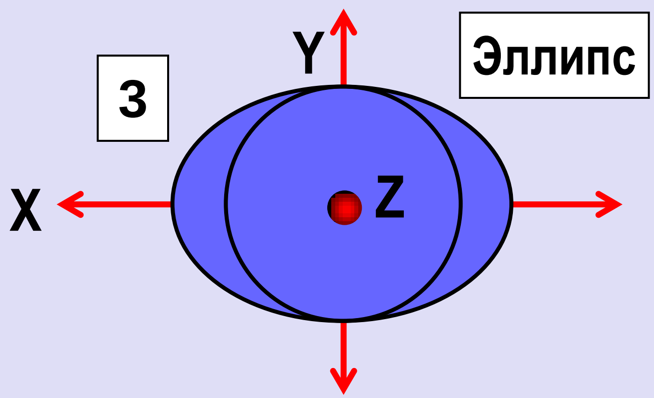
Длины главных осей (точнее – полуосей!) равны **главным деформациям** и обозначаются буквами **X**, **Y**, **Z**, при условии **X** ≥ **Y** ≥ **Z**.
Плоскости, проходящие через две оси, и ортогональные третьей – **главные плоскости деформаций**.

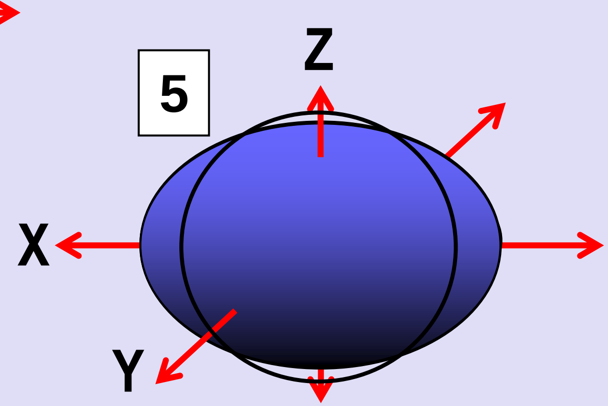
Эллипсоиды деформаций бывают одноосными, двухосными (плоскими) и трехосными. Мерой деформаций при описании эллипсоида служат деформации по осям, обозначаемые λ при условии $\lambda_X \geq \lambda_Y \geq \lambda_Z$.
В общем случае $\lambda \neq r$, где **r** – первоначальный радиус сферы.

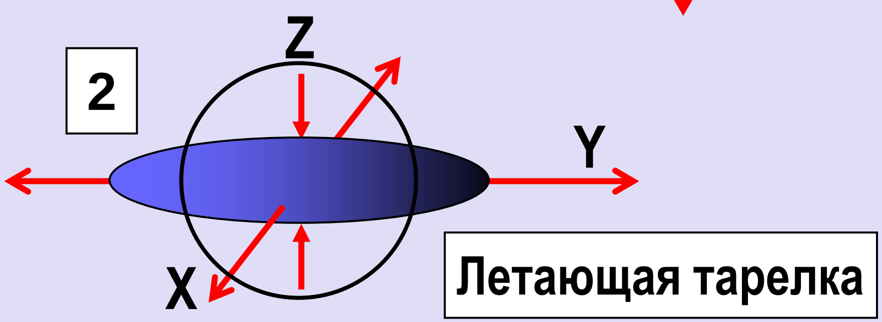
Выделяют пять характерных эллипсоидов деформаций:
1) одноосного вытягивания – X > (Y = Z); $(\lambda_Y = \lambda_Z) < r$;
2) одноосного сплющивания – (X = Y) > Z; $(\lambda_X = \lambda_Y) > r$;
3) плоское вытягивание и сплющивание – X > Y > Z; $\lambda_Y = r$;
4) трехосного вытягивания – X > Y > Z; $\lambda_Y < \lambda_Z < r$;
5) трехосного сплющивания – X > Y > Z; $\lambda_X > \lambda_Y > r$.











Разрушение пород

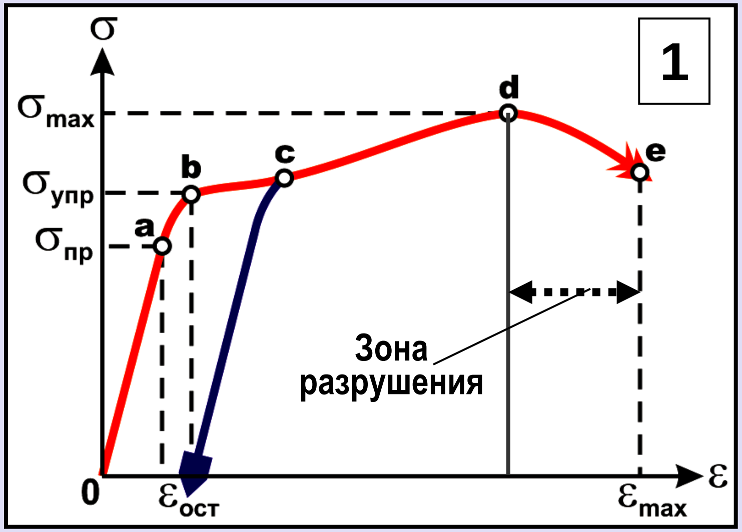
Разрушение пород происходит после преодоления предела прочности (точка «**d**»), когда исчерпываются возможности пластической деформации. Чем выше скорость деформации, тем ближе друг к другу пределы упругости и прочности, тем уже зона пластических деформаций.

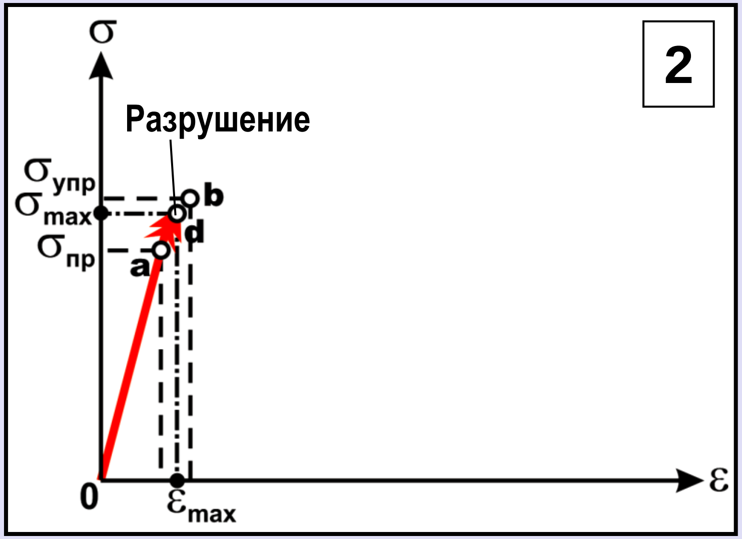
В реальных породах различают два вида разрушения:

1 – **вязкое**, при котором остаточные деформации присутствуют, поскольку предел прочности ("**d**") оказывается выше предела упругости ("**b**");

2 – **хрупкое**, при котором отсутствуют остаточные деформации, поскольку предел прочности оказывается ниже предела упругости.

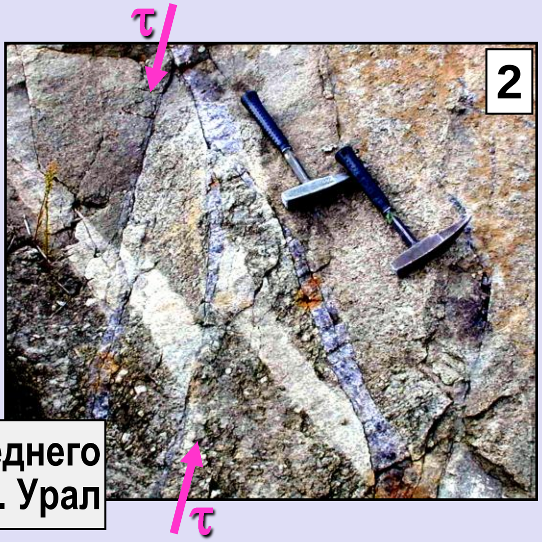
Соотношение пределов прочности и упругости может меняться в зависимости от литостатического давления, времени, скорости воздействия, температуры и т.д. Поэтому одно и то же тело в разных условиях может вести себя по-разному: то как хрупкое, то как вязкое.





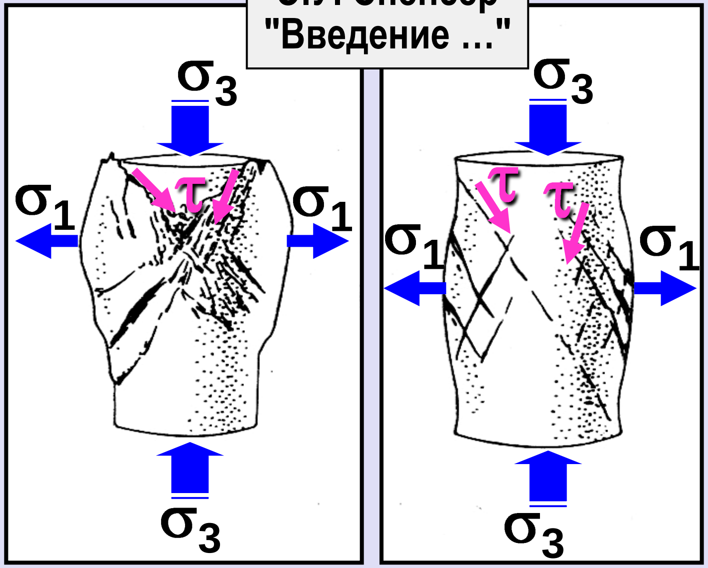
Как правило, разрушение пород происходит путем образования **трещин** скалывания и отрыва, поэтому принято различать пределы прочности пород на **отрыв** – под действием **нормального растягивающего напряжения** (**1**) и на **скалывание –** под действием **касательных напряжений** (**2**), которые для одной и той же породы могут различаться в зависимости от условий разрушения.

Известняки нижнего карбона. Ю. Урал



Дайка в гранитах среднего карбона. Ю. Урал

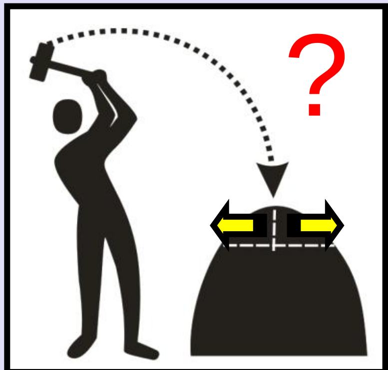
Э.У. Спенсер "Введение ..."

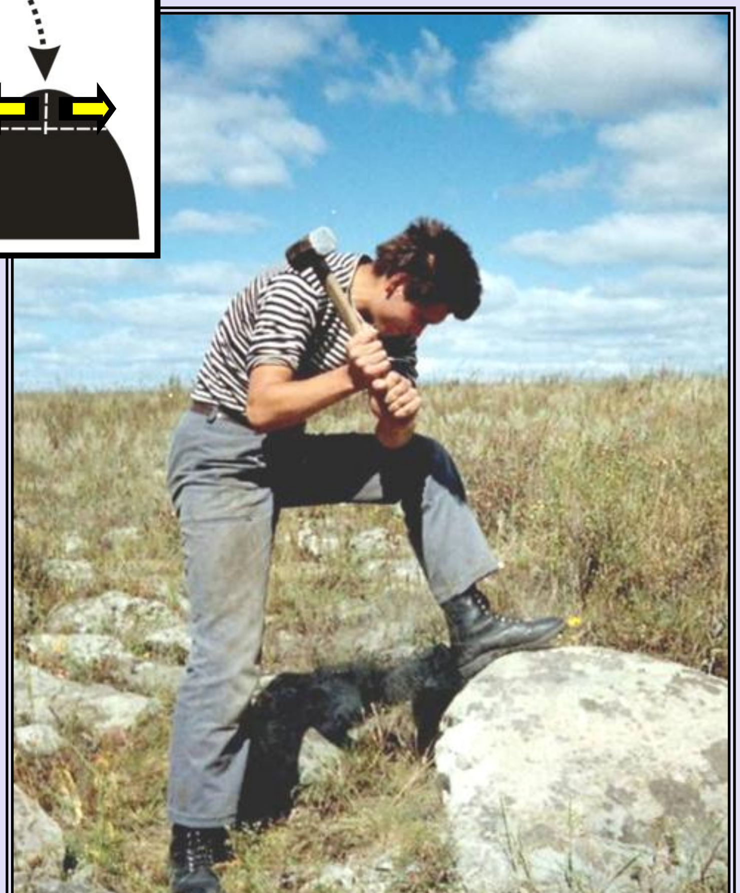


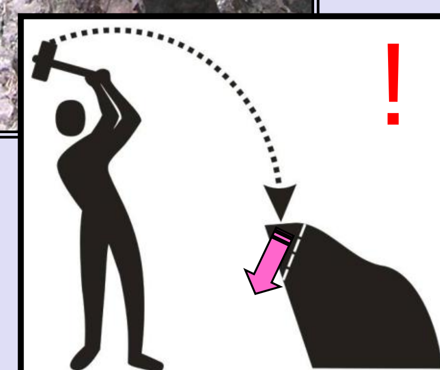
При преодолении предела прочности в первую очередь за счет **касательных напряжений (τ)** образуются **трещины скалывания**, косые по отношению к приложенным силам, поскольку их формирование **наиболее выгодно энергетически**. При этом образец укорачивается по направлению сжатия (σ_3) и удлиняется по направлению растяжения (σ_1).

Для формирования разрыва со смещением надо преодолеть не только силу сцепления между зернами породы, но и **силу трения** между образовавшимися блоками.

NB!
Помните про модули и пределы прочности! Отбить камень проще косым ударом (скалыванием), чем лобовым (отрывом)







Образование трещин отрыва требует серьезных напряжений!