

Физика горных пород

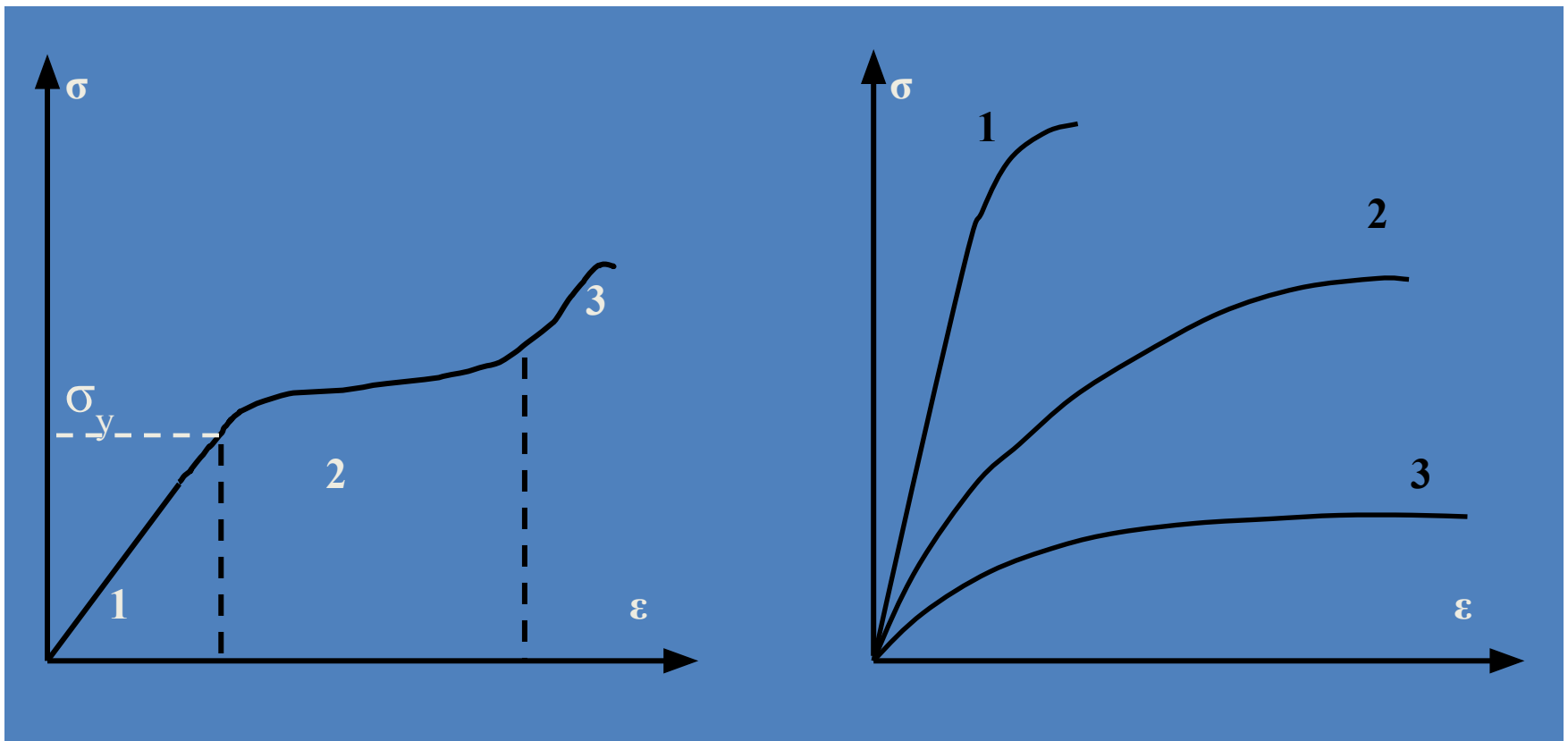
Лекция 4 – Механические свойства горных
пород.

Теории прочности

Лектор: Шульгин Павел Николаевич

<http://do.dstu.education>

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



Области деформации пород

1- упругая; 2 - пластическая;

(кварциты);

3 - разрушающая;

(роговики);

3 - пластические (мрамор).

Виды пород

1 - упруго-хрупкие

2 - упруго-пластичные

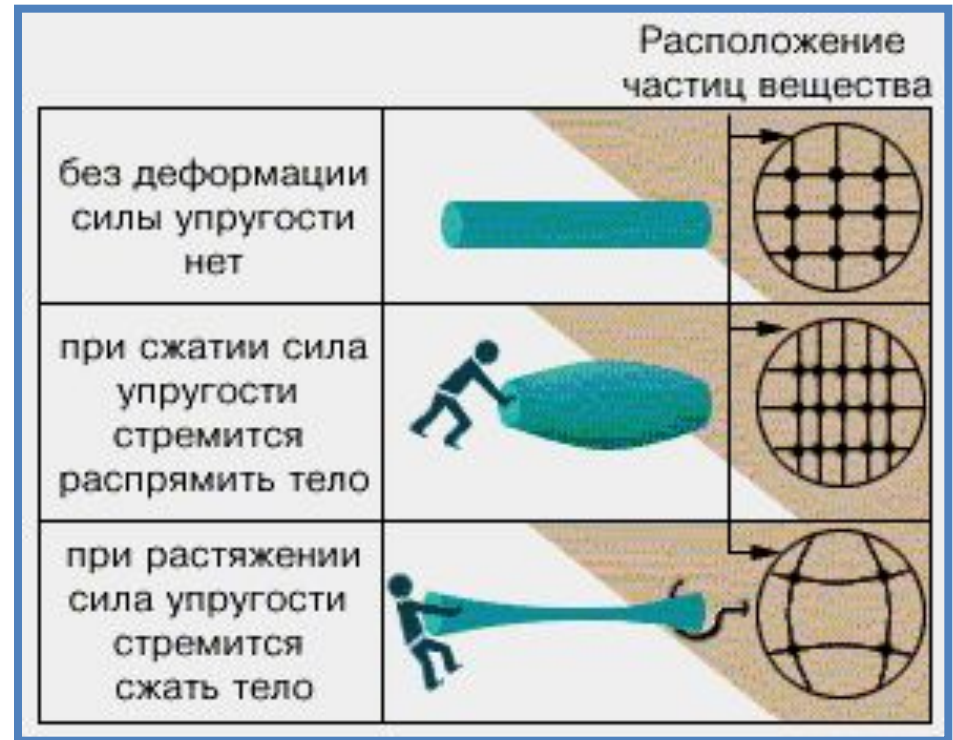
3 - пластические (мрамор).

- **Выделяются две группы неразрушающих деформаций:**
 - **пластические деформации.**
 - **упругие деформации;**

Характерной чертой **пластической деформации** является ее необратимость. После снятия нагрузки - форма и размеры образца полностью не восстанавливаются.

Причины деформации

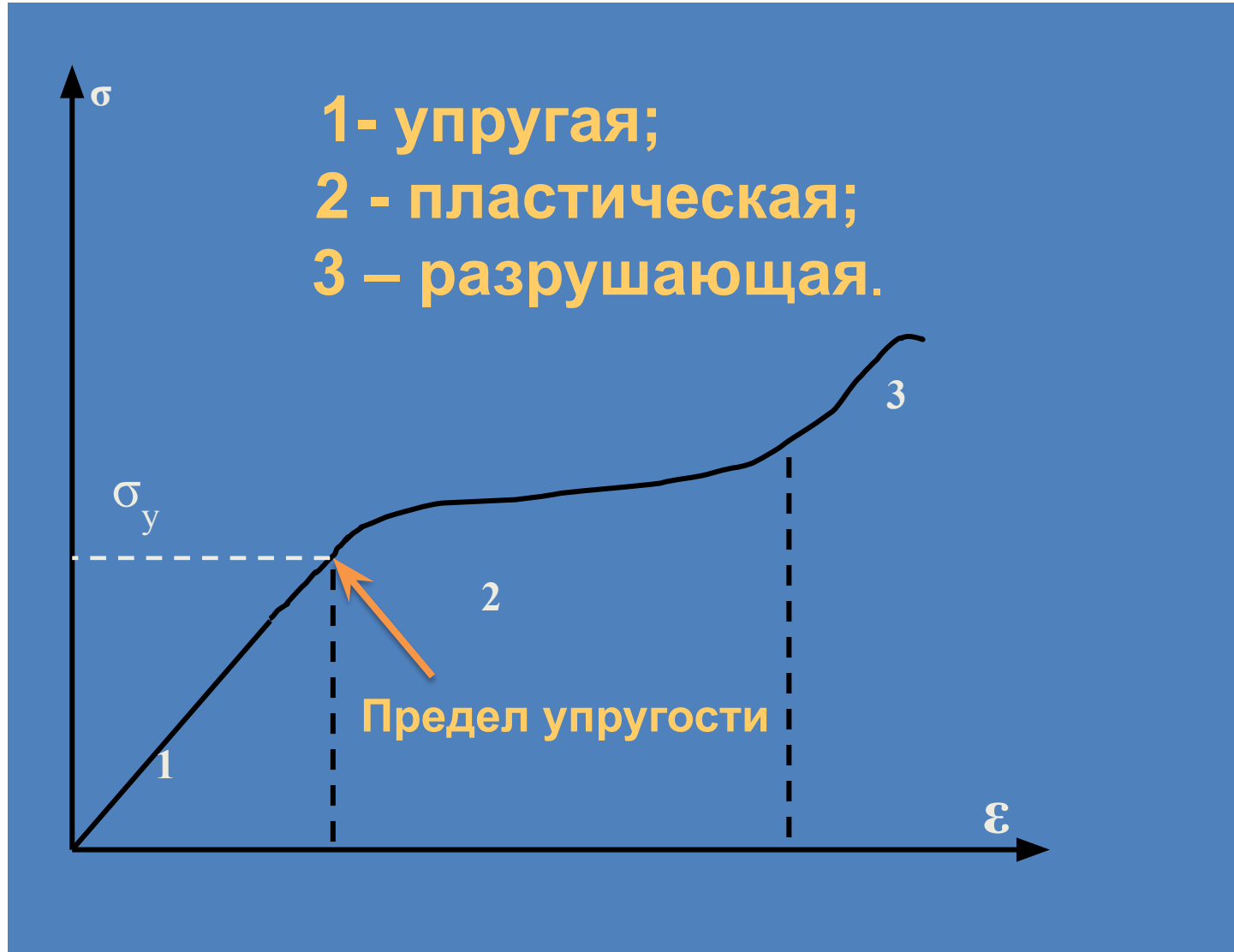
Причина возникновения силы упругости заключается в изменении расположения молекул при деформации.



При изменении расстояния между атомами изменяются силы взаимодействия между ними, которые стремятся вернуть тело в исходное состояние. Поэтому силы упругости имеют электромагнитную природу.

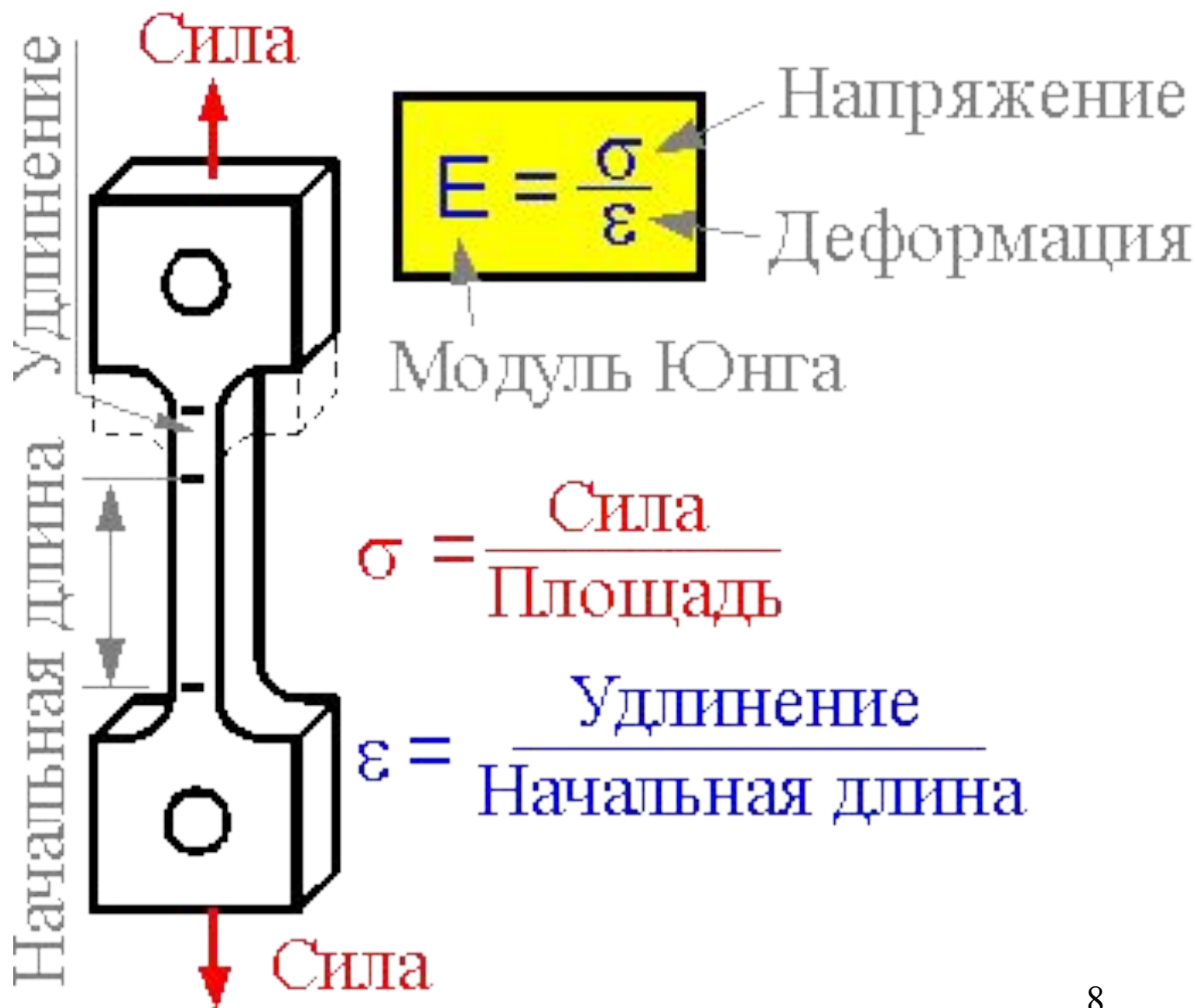
- В случае **упругих деформаций** наблюдается прямая зависимость между напряжением и соответствующей деформацией
- С ростом величины упругой деформации в образце накапливается потенциальная энергия, которая после прекращения действия внешних сил возвращает образец в исходное состояние.
- Максимальное напряжение, при котором еще не обнаруживаются остаточные деформации, называется **пределом упругости** данной породы.

Области деформации пород



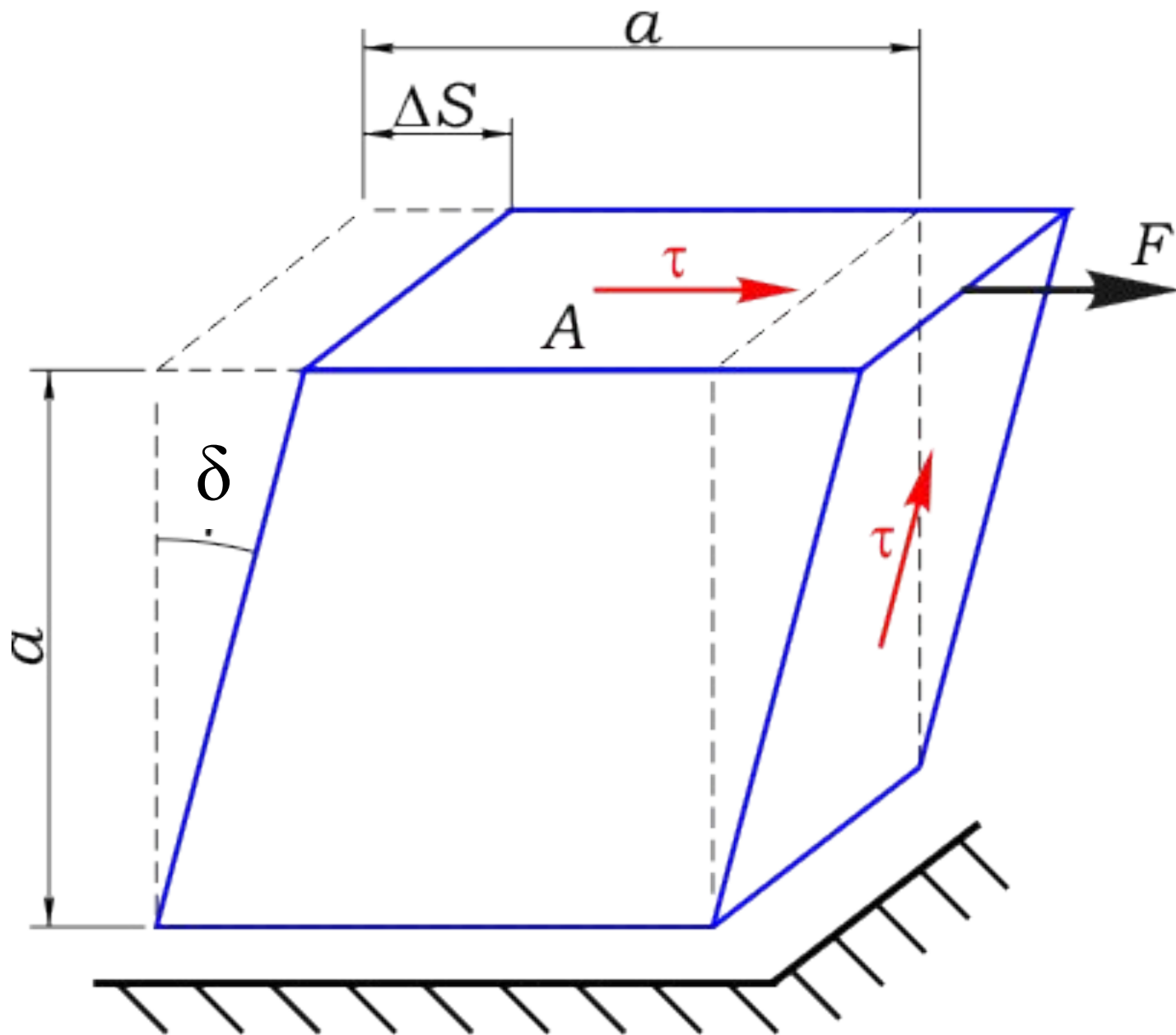
Коэффициент пропорциональности между действующим продольным напряжением (растягивающим или сжимающим) и соответствующей ему относительной деформацией называется модулем продольной упругости (модуль Юнга):

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad \text{Па (Н/м}^2\text{)}.$$



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

$$\tau = G \cdot \delta \quad \text{Па (Н/м}^2\text{)}.$$



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

- В отличие от всех предыдущих, упругих параметров, он является коэффициентом пропорциональности **только между деформациями** –

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

- **относительными продольными**
и
- **относительными поперечными:**

$$\nu = \frac{\varepsilon_{\text{пр}}}{\varepsilon_{\text{пр}}}$$

- 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:

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

Обобщенная зависимость изменения модуля Юнга пород от пористости может быть выражена формулой:

$$E = E_0 \cdot (1 - a \cdot P)^2$$

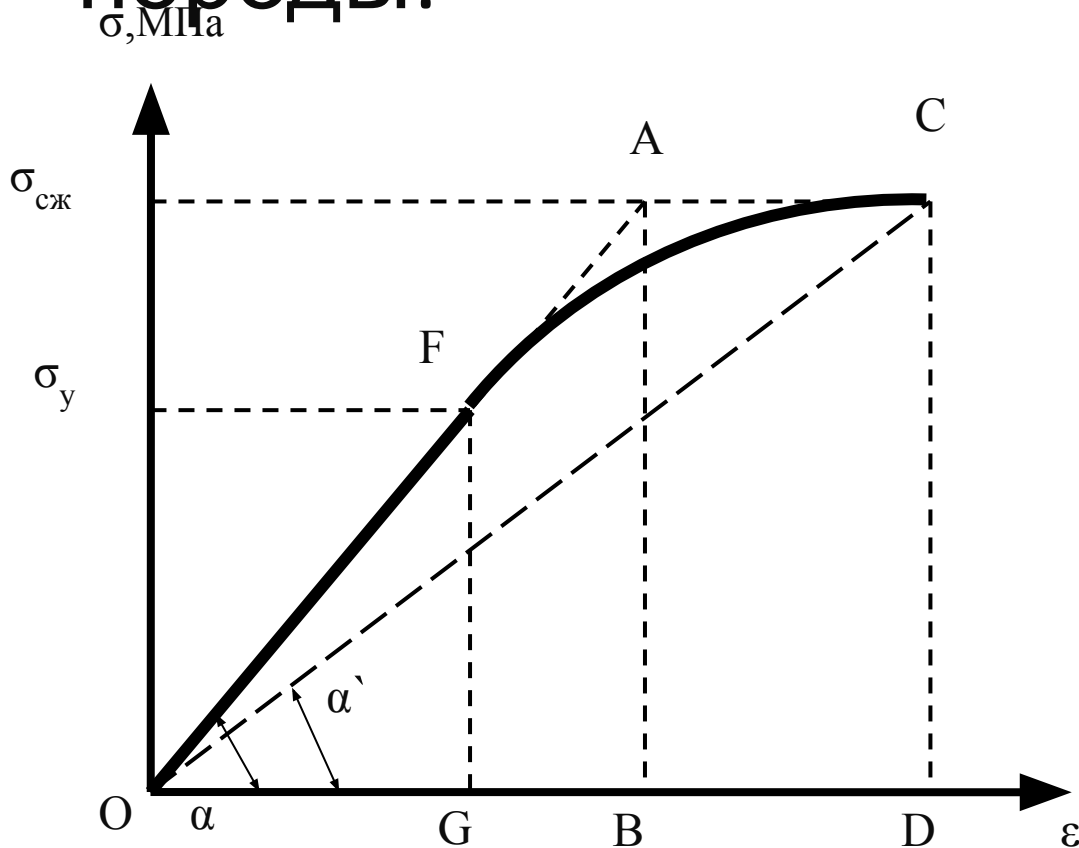
Пластичность

- - свойство горной породы в результате силового воздействия давать остаточные деформации без разруше





Коэффициент пластичности –
 отношение работы на разрушение
 образца реальной породы к работе на
 разрушение идеально упругой
 породы:



$$k_n = \frac{A_{OCD}}{A_{OAB}}$$

- Глинистые породы могут быть **хрупкими, пластичными и текучими** в зависимости от влажности.
- Эта зависимость от влажности характеризуется их пределами пластичности.
- **Пределы пластичности** - это значения влажности породы (в %), при которых происходит переход породы из хрупкого состояния в пластическое и из пластического в текучее.

- В первом случае, это значение влажности в %, при котором происходит переход породы из хрупкого состояния в пластическое называется **НИЖНИМ пределом пластичности** - W_p .
- Значения влажности в %, при которых происходит переход из пластического состояния в текучее называется **верхним пределом пластичности** - W_T .

- Разность верхнего и нижнего пределов пластичности называется числом пластичности.
- Оно характеризует диапазон влажности, в пределах которого порода находится в пластическом состоянии

$$W_T - W_P = \Phi$$

Реология

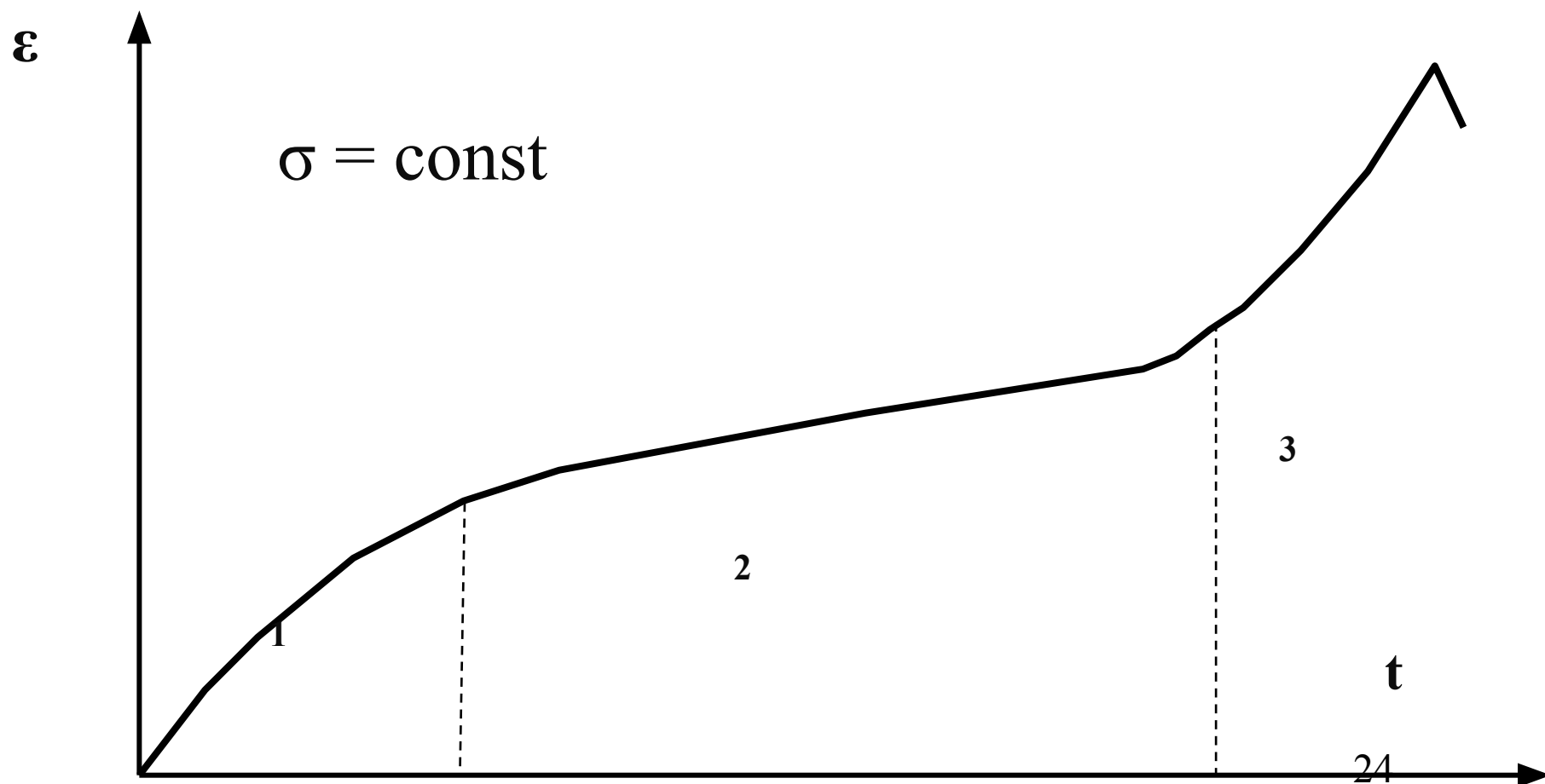
- наука о течении вещества

(«рео» в переводе означает «теку»)

- Под **реологическими параметрами** понимают параметры, характеризующие изменение всех механических характеристик породы при длительном воздействии на нее нагрузок, в том числе и не превышающих предела упругости.

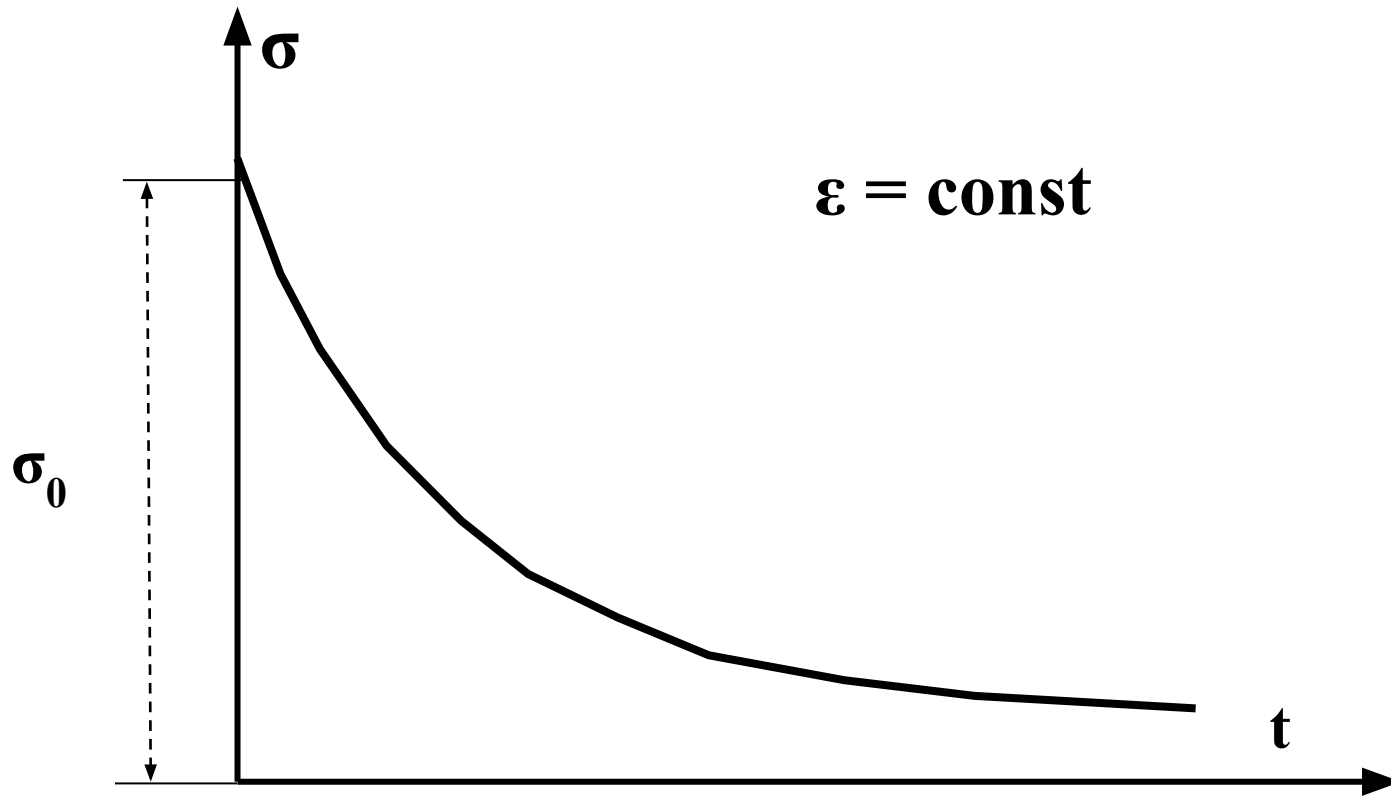
- **Реология** устанавливает общие законы образования и развития деформаций во времени.
- К основным реологическим параметрам относятся:
 - Ползучесть
 - Релаксация напряжений
 - Длительная прочность

Ползучесть - это явление постепенного роста деформаций породы во времени при постоянном напряжении.



- **Релаксацией напряжений** - называется постепенное снижение напряжений в породе во времени при постоянной деформации.

Релаксация напряжений



Время, в течение которого напряжение убывает в e раз (2,7) называется **временем релаксации**.

$$\sigma_t = \sigma_0 \cdot e^{-\frac{t}{t_0}}$$

- где, σ_t - напряжения во времени;
- σ_0 - начальное напряжение;
- t - время (текущая координата);
- t_0 - время релаксации, постоянное для данной породы.
- Кривые релаксации напряжения описываются экспоненциальной зависимостью

Для характеристики релаксационной стойкости горной породы вводят **относительный показатель падения напряжений** за определенный промежуток времени

$$R = \frac{\sigma_0 - \sigma_t}{\sigma_0} \cdot 100, \%$$

- где: σ_0 - напряжение в образце в момент деформации;
- σ_t - напряжение в образце по истечении определенного периода времени (сутки, неделю, месяц).

- Опыт показывает, что при воздействии длительных напряжений происходит постепенное снижение прочности горных пород.
- Прочность соответствующая той или иной длительности воздействия нагрузки, называется **длительной прочностью**.

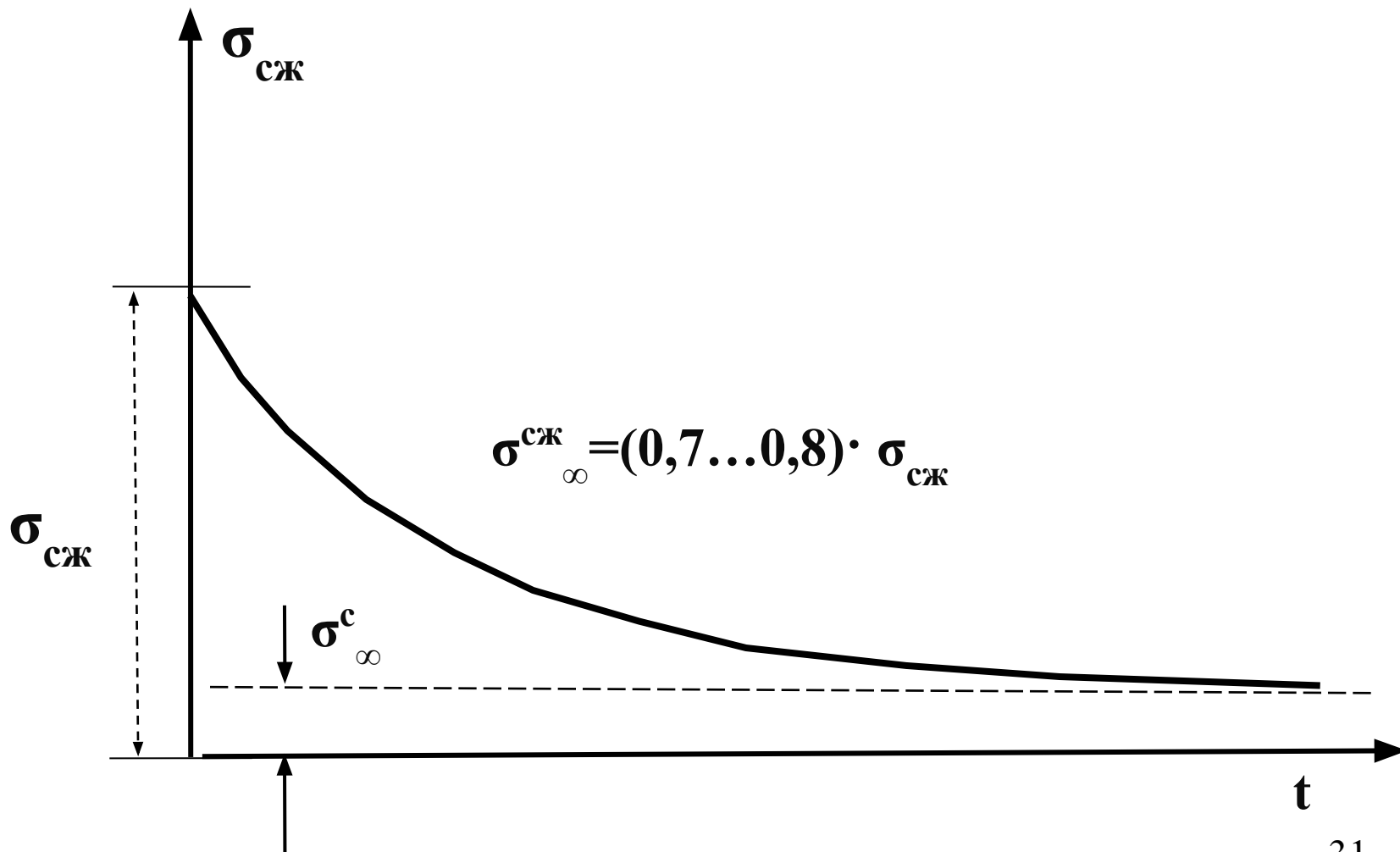
- Длительная прочность пород с увеличением времени действия нагрузки падает по определенной кривой, асимптотически приближаясь к некоторому определенному значению, называемому **пределом длительной прочности**.

- Как правило для большинства горных пород предел длительной прочности равен:

$$\sigma_{\infty} = (0,7 \dots 0,8) \cdot \sigma_{сж}$$

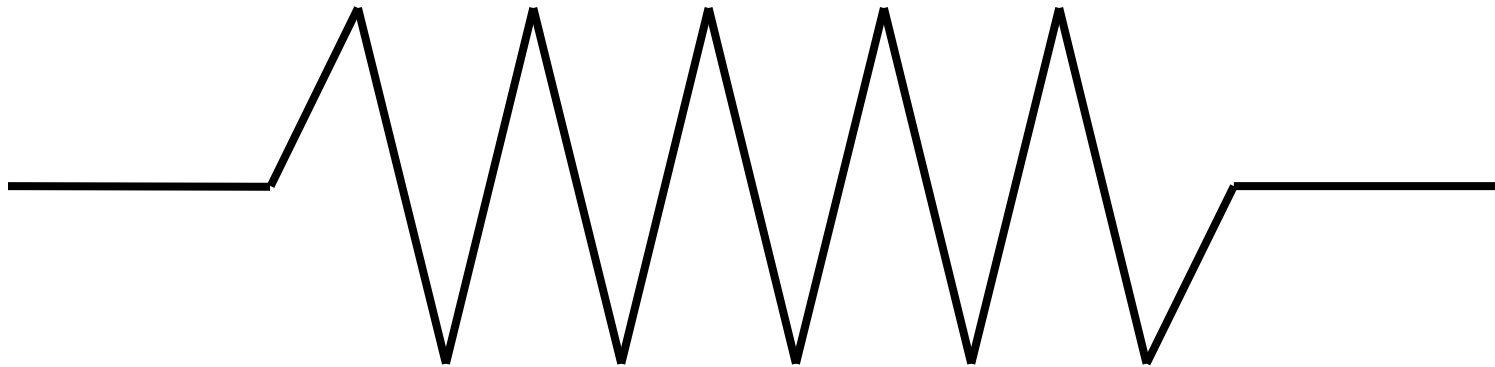
- где, $\sigma_{сж}$ - прочность породы при мгновенном нагружении.

Предел длительной прочности - это максимальное напряжение, при котором порода никогда не разрушается.



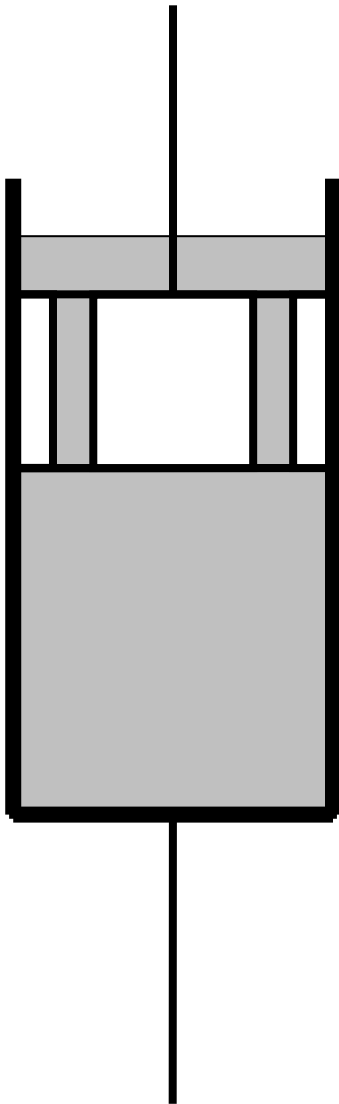
- Все реологические уравнения состояния пород моделируют с помощью идеальных тел, которые служат довольно хорошим приближением к реальным телам. Они изучаются в классической механике.

твёрдое тело Гука ($\sigma = E \cdot \varepsilon$)



- - идеально упругое тело (пружина).

Тело Ньютона



- - идеально вязкое тело (поршень с отверстиями в цилиндре заполненном вязкой жидкостью)
- ньютоновская вязкая жидкость
$$\tau = \eta \cdot \dot{\epsilon} = \eta \cdot (d\epsilon/dt)$$
 η – вязкость
(коэффициент внутреннего трения - который является коэффициентом пропорциональности между приложенными касательными напряжением и скоростью деформирования)

Тело Сен-Венана

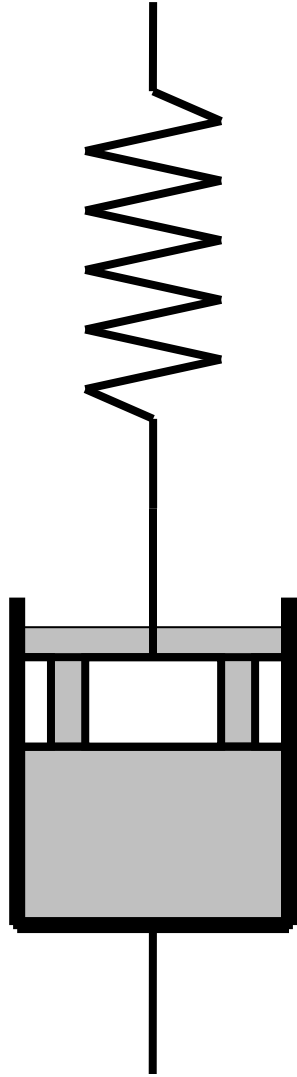
$(\sigma > \sigma^*)$



- абсолютно пластичное тело (модель сухого трения тяжелого тела, лежащего на горизонтальном основании и сдвигаемого внешними силами).
Смещение возможно лишь при достижении внешними силами определенной величины

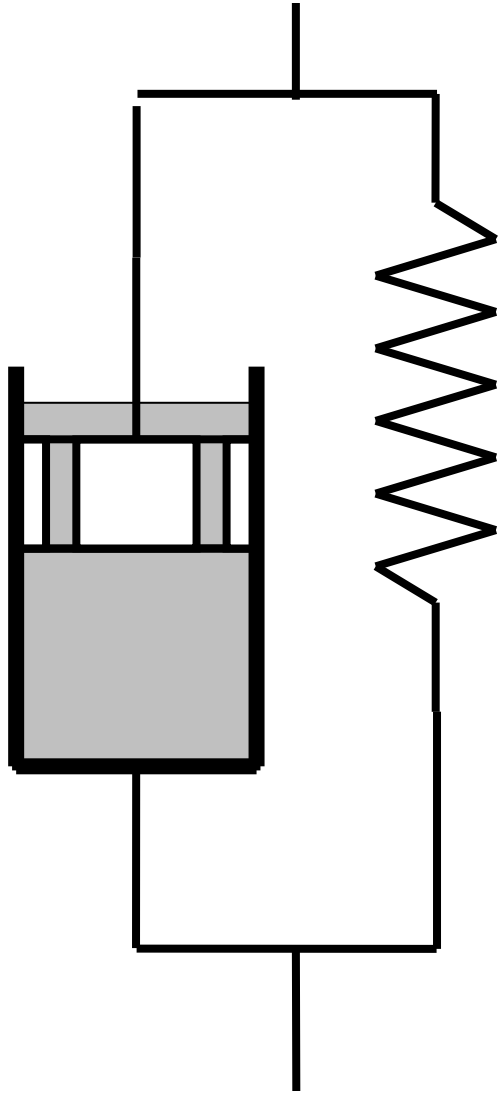
- Путем соответствующих комбинаций этих простых тел могут быть получены сложные модели для описания сложных деформаций
- упруго-пластичных,
- вязко-пластичных горных пород.

Модель Максвелла



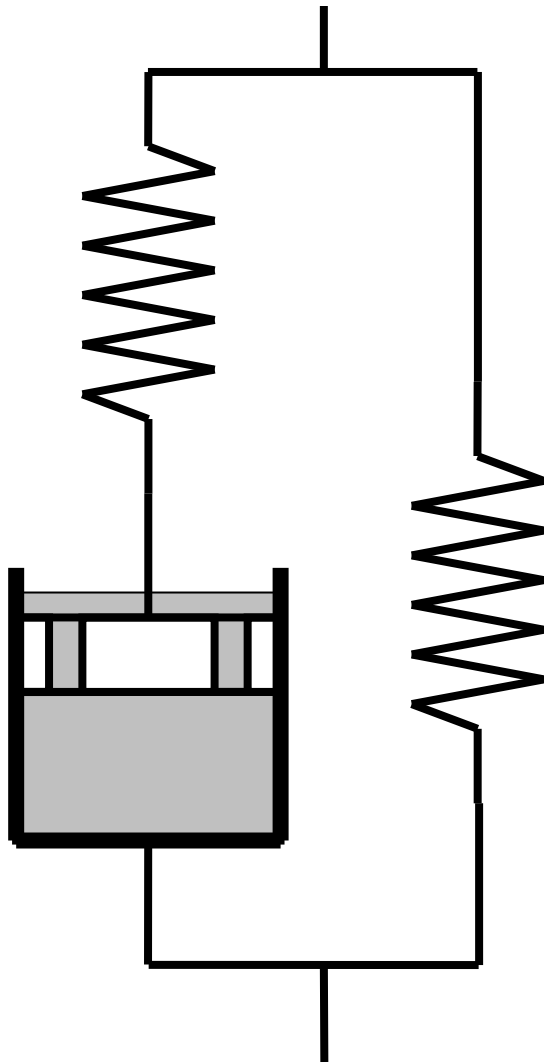
- поведение глин хорошо описывается реологической моделью "тела Максвелла", представляющего собой последовательное соединение "тела Гука" и "тела Ньютона"

Модель Кольвина-Фойта



Модель Кельвина-Фойгта -
это модель вязко-упругих
материалов,
характеризующихся
свойствами упругости и
вязкости

Модель Пойтинга-Томпсона



Рассмотренные нами ранее кривые ползучести для твердых тел довольно хорошо описываются реологической моделью "линейного стандартного тела".

Такая модель представляет собой сочетание "тела Гука" и "ньютоновской вязкой жидкости", соединенных следующим образом ": тело Гука" и "ньютоновская жидкость" соединены последовательно и к ним еще раз параллельно присоединено "тело Гука".

- Со всеми **реологическими** **свойствами** в горных породах мы встречаемся при строительстве и эксплуатации различных подземных сооружений, при ведении открытых горных работ, строительстве фундаментов, зданий и др. сооружений -там где наблюдается **длительное** **воздействие** **нагрузок.**

ПРОЧНОСТЬ ГОРНЫХ ПОРОД

- Под термином "прочность породы" понимают ее способность сопротивляться различным по интенсивности и характеру силовым воздействиям, не разрушаясь.
- Различают пределы прочности на
- сжатие,
- растяжение,
- сдвиг,
- изгиб,
- кручение и т.д.

За величину предела прочности породы принимают величину напряжений, при которых происходит ее разрушение.

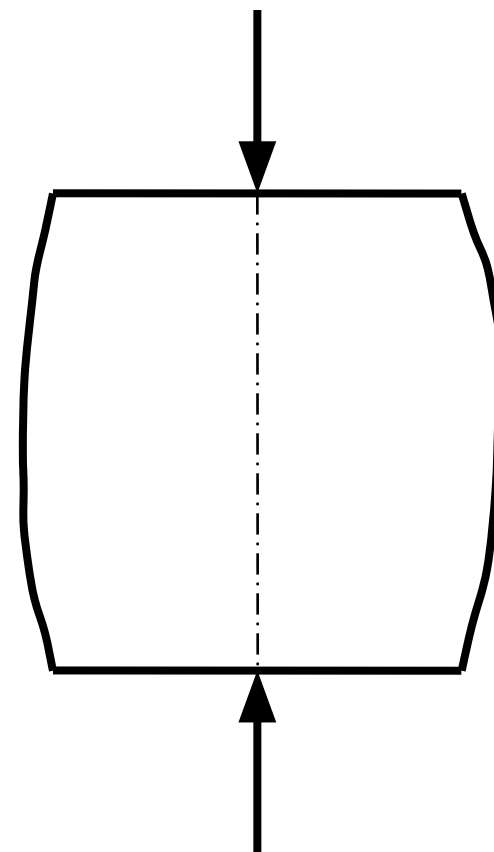
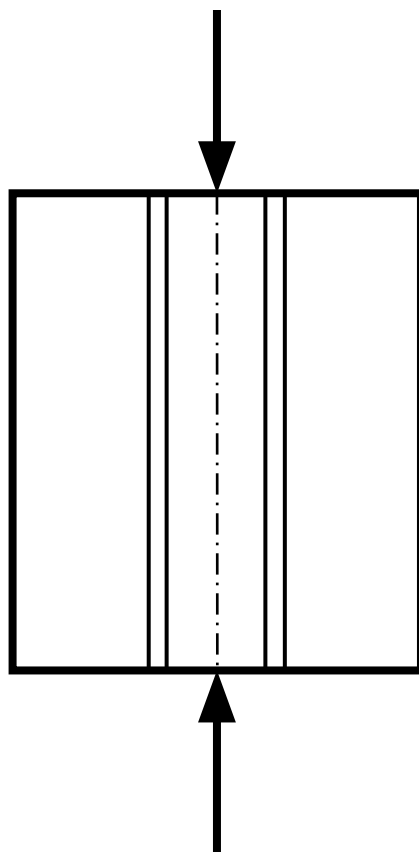
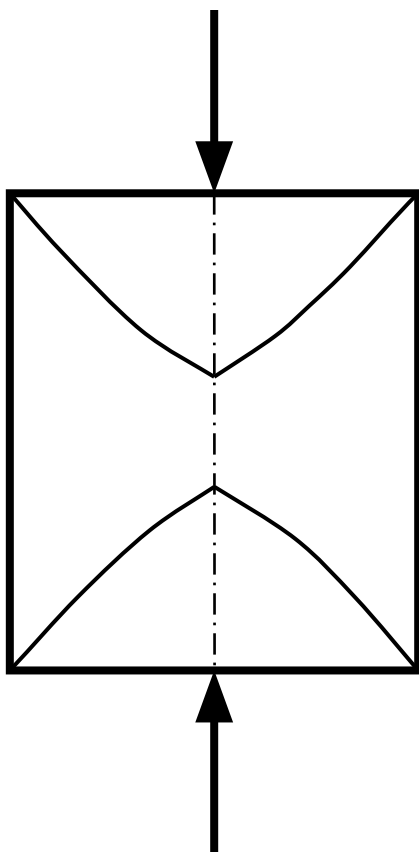
$$\sigma_c = \frac{N_c}{A_0}$$

$$\sigma_p = \frac{N_p}{A_0}$$

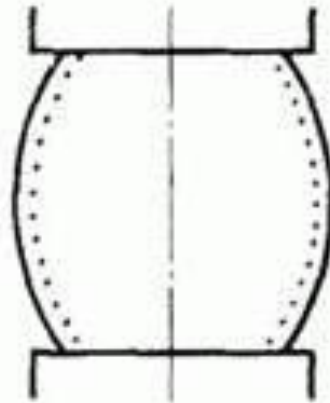
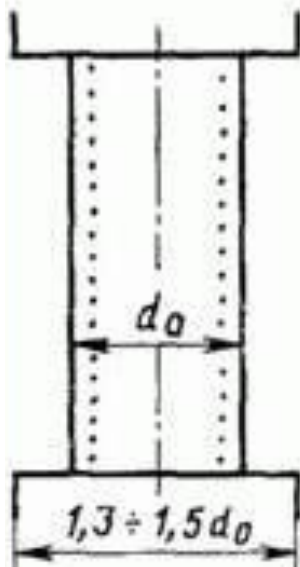
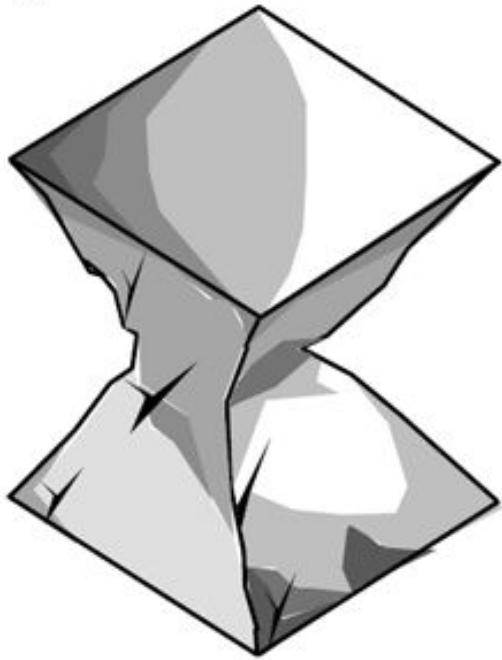
- N_c , - величина разрушающей сжимающей силы при которой происходит разрушение породы, Н;
- N_p , - величина разрушающей растягивающей силы при которой происходит разрушение породы, Н;
- A_0 - исходное поперечное сечение испытуемого образца, м².

- Пределы прочности имеют размерность напряжений - Н/м^2 (Па, МПа).
- В зависимости от типа породы возможны следующие виды разрушения испытываемых образцов:
 - Сдвиг
 - Продольный разрыв
 - Пластическая «бочка»

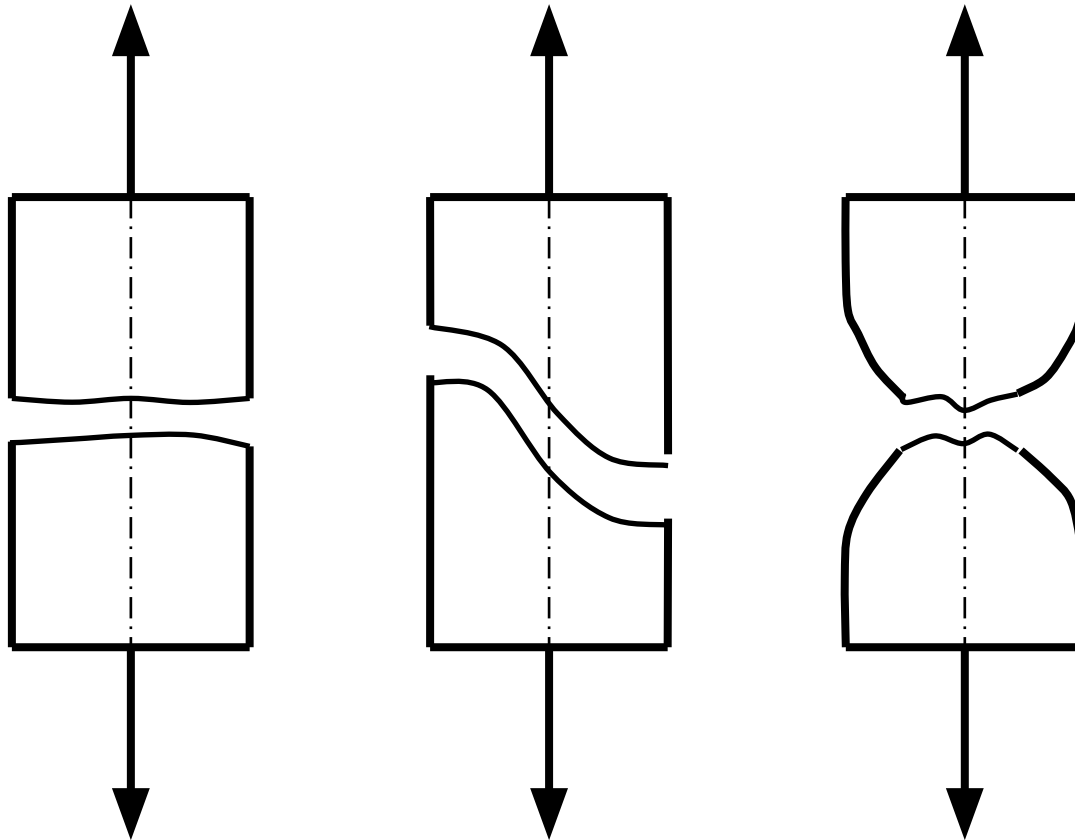
- При сжатии (сдвиг; продольный разрыв; пластическая "бочка").

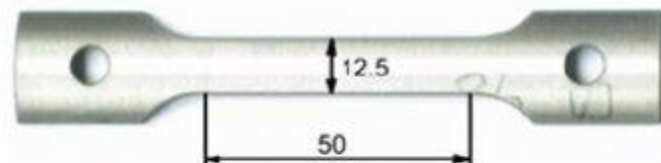
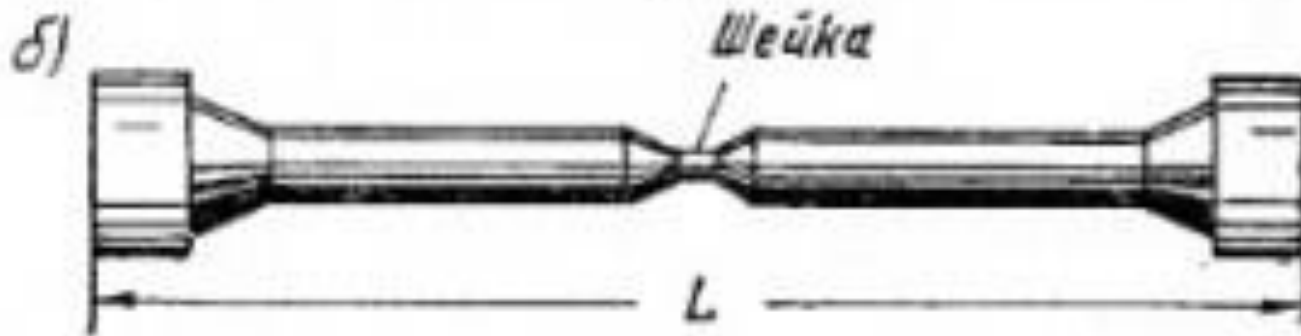


6)



- При растяжении (разрыв; разрыв со сдвигом; пластическая "шейка")





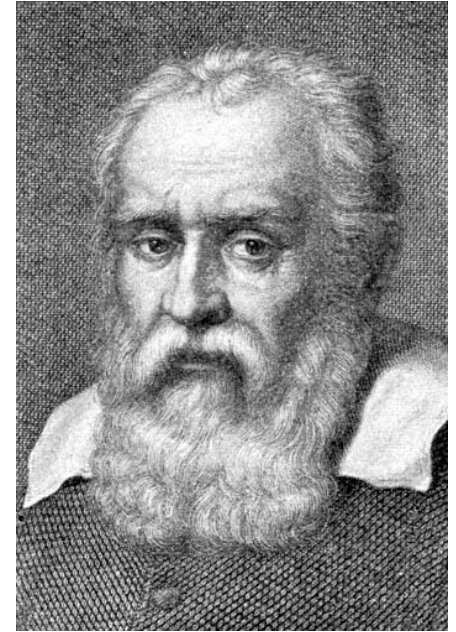
- Однако определенные таким способом характеристики не являются истинными для данного типа породы.
- Число факторов, влияющих на абсолютную величину этих характеристик так велико, что последние могут рассматриваться только как относительные показатели, позволяющие производить сопоставление различных типов пород по их прочности.

Существует несколько теорий
прочности.

В основе каждой теории лежит
свой критерий прочности

Теория нормальных напряжений

Согласно теории, предложенной Галилеем, разрушение материала наступает тогда, когда наибольшее нормальное напряжение достигнет некоторого предельного значения, (предела прочности либо одноосному сжатию, либо одноосному растяжению).



$$\sigma_{\max} = \sigma_0$$

- Однако экспериментальные данные плохо согласуются с этой теорией, так как она не учитывает касательных напряжений.
- Если в образце развиваются и **касательные напряжения**, то образец разрушается раньше, чем нормальные напряжения достигнут максимальной величины.

Теория максимальных деформаций

В 17 веке Сен-Венаном была сформулирована теория прочности, согласно которой, разрушение материала произойдет тогда, когда наибольшие **относительные деформации** станут равными некоторому предельному значению ϵ_0 .

$$\epsilon_{\max} = \epsilon_0$$



- Эта теория также не учитывает роли **касательных напряжений** в процессах разрушения материала, и поэтому в ряде случаев она не согласовывалась с данными экспериментов.
- Она более подходит при описании **хрупкого** разрушения породы

Теория максимальных касательных напряжений

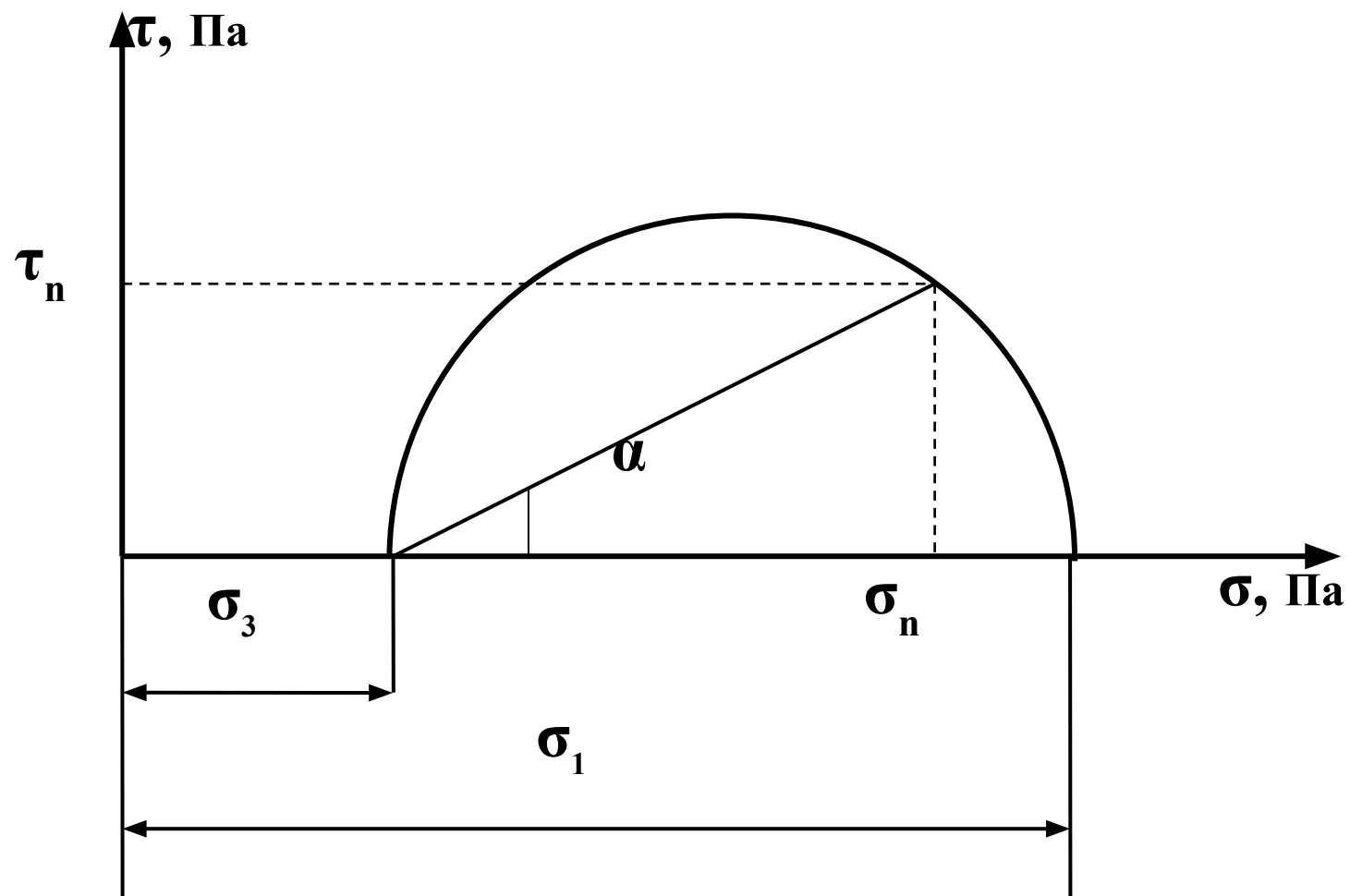
создана Кулоном.

в качестве критерия разрушаемости материала он принял максимальные касательные напряжения:

$$\tau_{\max} = \tau_0$$



Шарль Огюстен де Кулон



- Так как максимальные касательные напряжений при сложном напряженном состоянии равны:

$$\tau_{\max} = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2}$$

- то условие разрушения по этой теории будет следующим:

$$\sigma_{\max} - \sigma_{\min} = 2 \cdot \tau_0$$

- Эта теория прочности **согласуется** с экспериментальными данными для материалов, разрушение которых происходит **в зоне пластического течения.**

- Ни одна из указанных теорий не учитывает комплексного влияния всех видов напряжений на процесс разрушения.
- **Максвелл** предложил теорию прочности, в основу которой положил **величину работы по изменению формы образца при его деформировании без изменения объема.**
- Была разработана **энергетическая теория прочности.**
- Условие разрушения в ней выражается через нормальные напряжения:

$$\sigma_0 = \frac{\sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2}}{2}$$

- где $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ - напряжения по соответствующим осям координат, причем

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

- Эта теория более приемлема при хрупком разрушении материала.