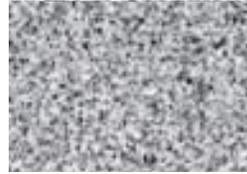
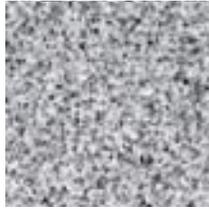
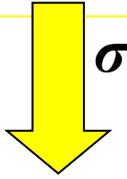


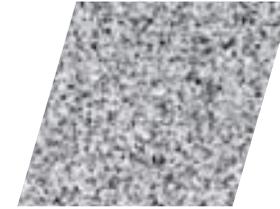
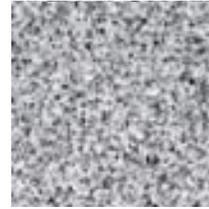
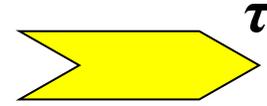
# Прочностные свойства горных пород

# ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ

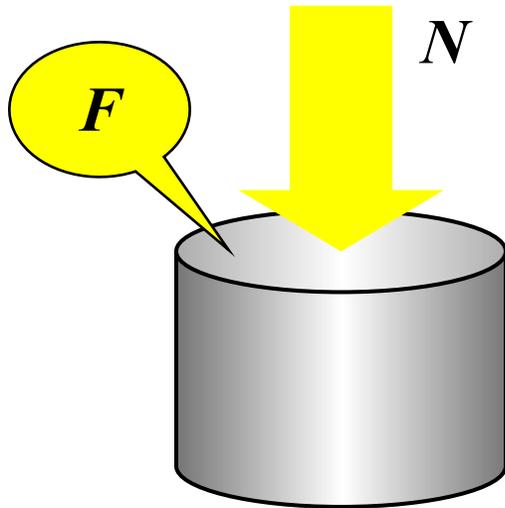
*Напряжения*



*нормальные напряжения  $\sigma$   
изменяют размеры и объем тела*



*касательные напряжения  $\tau$   
изменяют форму тела*



*Размерность напряжений:*

$$\sigma = N / F = \text{сила} / \text{площадь}$$

$$\sigma = [ \text{Н/м}^2; \text{кг/см}^2; \text{т/м}^2 ]$$

$$1 \text{ Н/м}^2 = 1 \text{ Па}$$

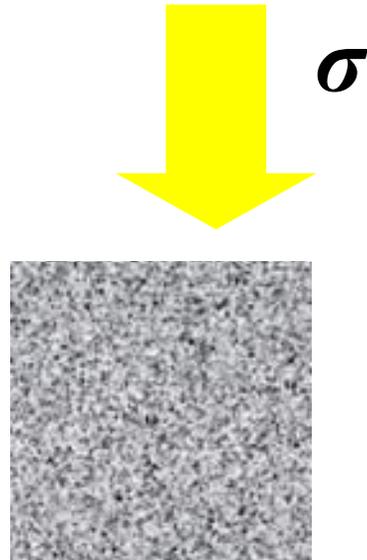
$$1 \text{ МПа} = 10^6 \text{ Па}$$

$$1 \text{ МПа} = 10 \text{ кг/см}^2 = 100 \text{ т/м}^2$$

# ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ

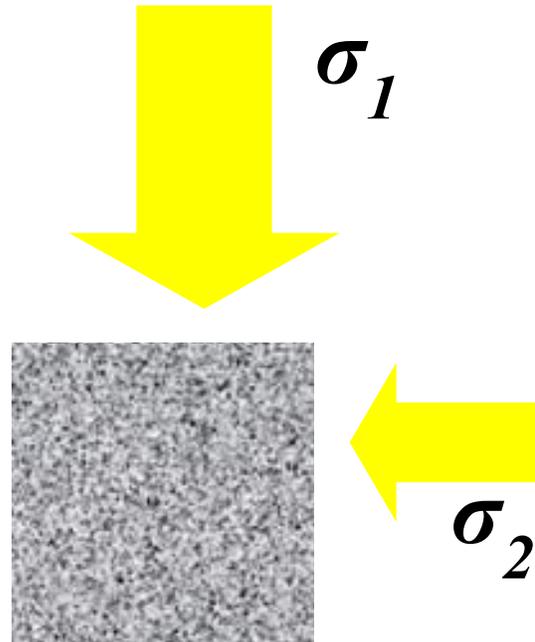
*Виды напряженных состояний:*

*одноосное (1D)*



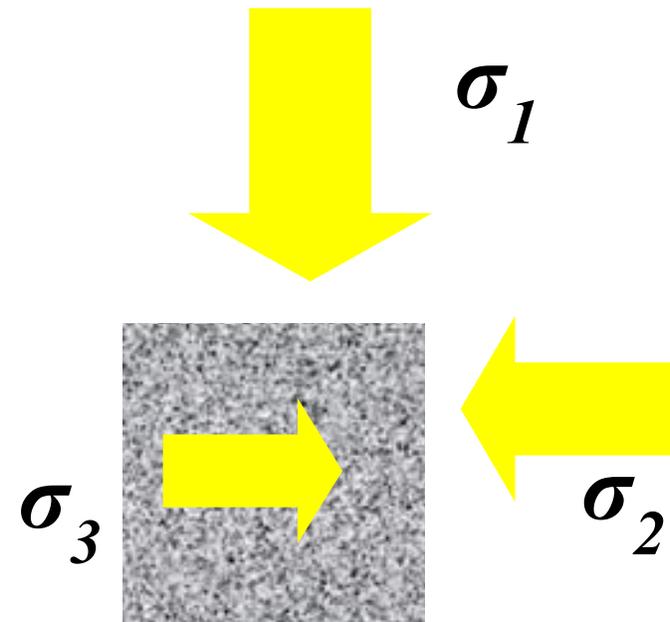
*в высоких целиках*

*двухосное  
(плоское, 2D)*



*на контуре выработок*

*трехосное  
(объемное, 3D)*



*в массиве*

*Всегда будем обозначать:*

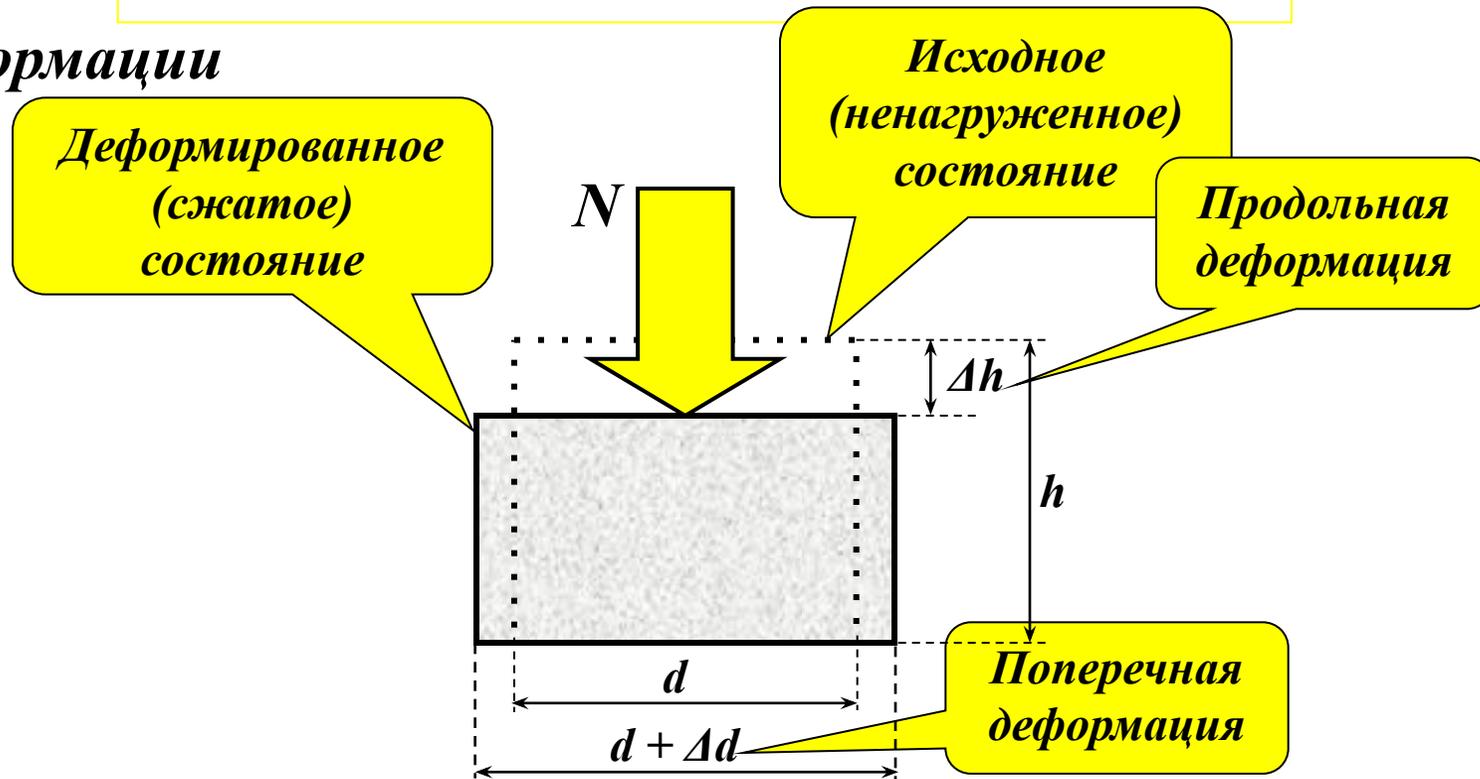
$$\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$$

*max*  *min*

*по величине*

# ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ

## Деформации



$$\Delta h / h = \varepsilon_{\text{прод}} \quad - \text{продольная относительная деформация}$$

$$\Delta d / d = \varepsilon_{\text{попер}} \quad - \text{поперечная относительная деформация}$$

$$\varepsilon_{\text{попер}} / \varepsilon_{\text{прод}} = \nu \quad - \text{коэффициент поперечных деформаций (Пуассона)}$$

для крепких скальных пород  $\nu = 0,16 \div 0,26 \sim 0,2$

## ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ

*Упругое деформирование (до разрушения)*

*Robert Hook, 1676:*

***UT TENSIO SIC VIS***

***КАКОВО РАСТЯЖЕНИЕ ТАКОВА И СИЛА (Lat.)***

***Закон Гука:***

$$\sigma = E \cdot \varepsilon$$

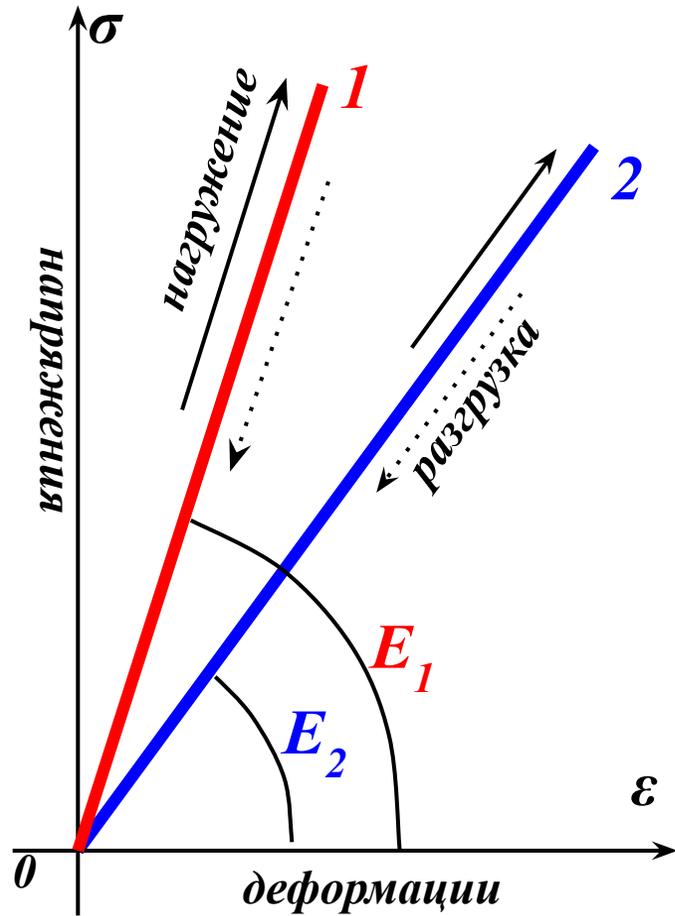
*E – модуль упругости (модуль Юнга)*

$$E = [ \text{т} / \text{м}^2; \text{кг} / \text{см}^2; \text{МПа} ]$$

*при одноосном  
напряженном  
состоянии*

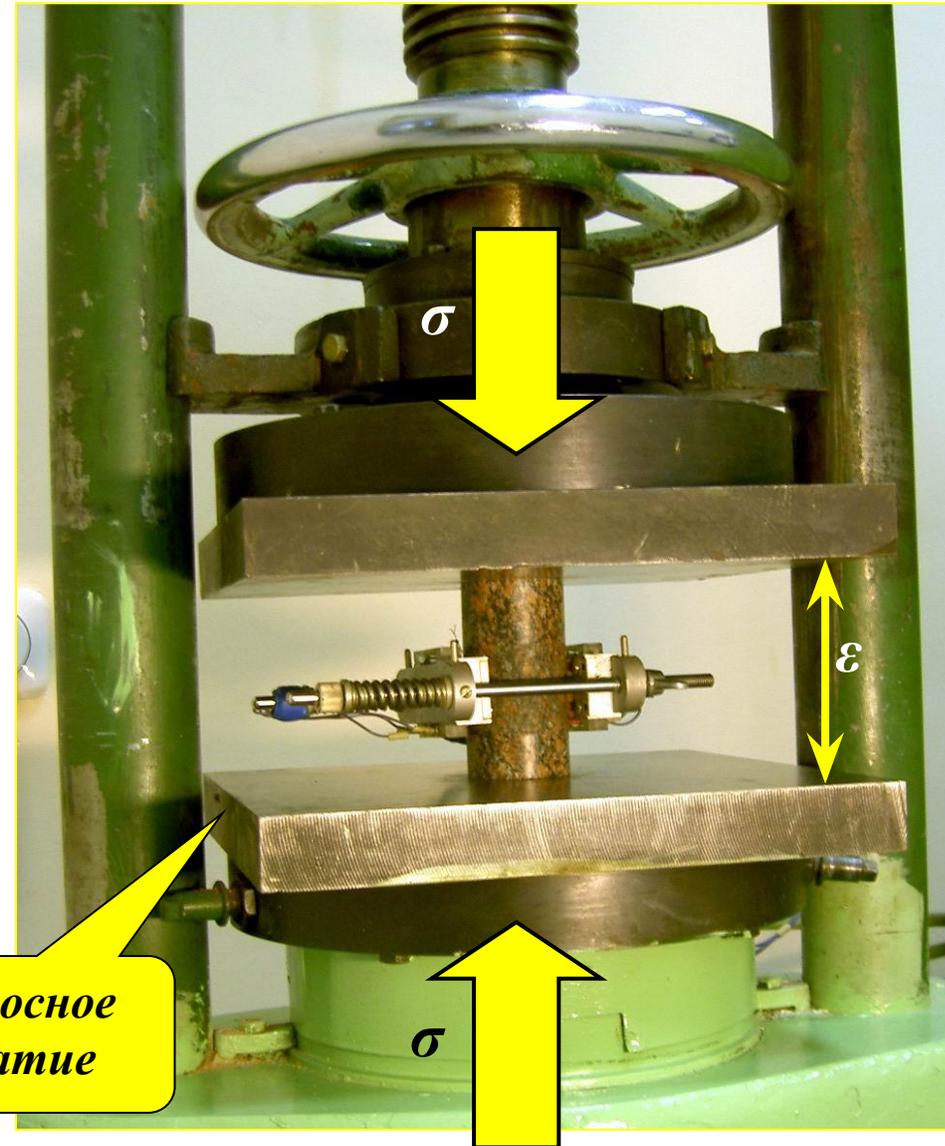
# ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ

## Упругое деформирование (до разрушения)



$$E_1 > E_2$$

одноосное сжатие



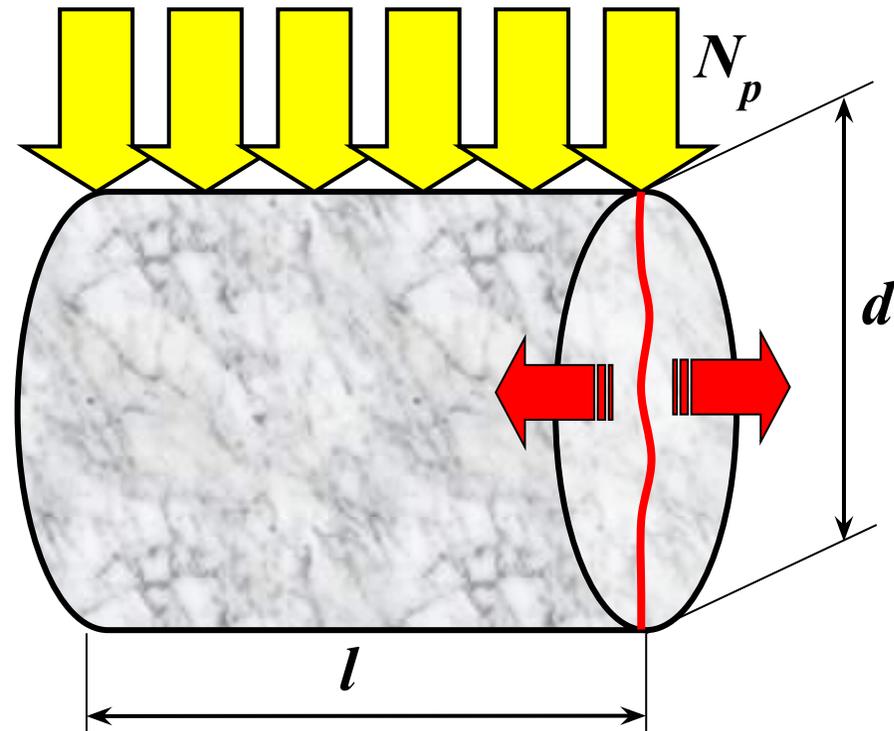
# ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ

*Прочность (разрушение при достижении предельного состояния)*



*на одноосное сжатие:*

$$\sigma_0 = N_p / F$$

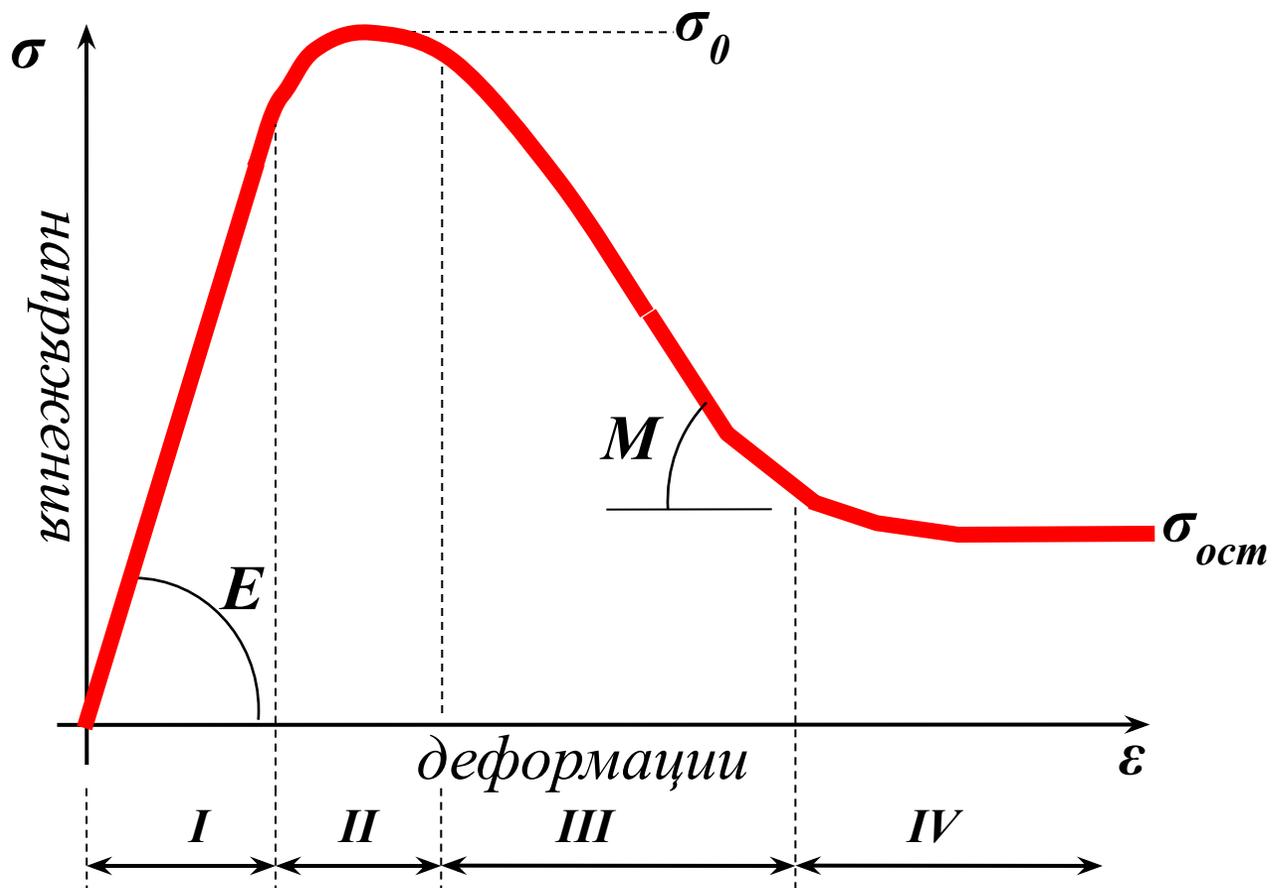


*на одноосное растяжение:*

$$\sigma_p = 2 N_p / (\pi d l) = 0,637 N_p / F_p$$

## ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ

Полная диаграмма деформирования (до и после разрушения)



Режимы деформирования:

*I* - упругое; *II* - неупругое (пластическое); *III* - запредельное (развитие разрушения);  
*IV* - с остаточной прочностью

*Модуль деформаций  $E$*  — отношение прироста напряжений к вызываемому им соответствующему приросту относительных линейных деформаций, МПа:

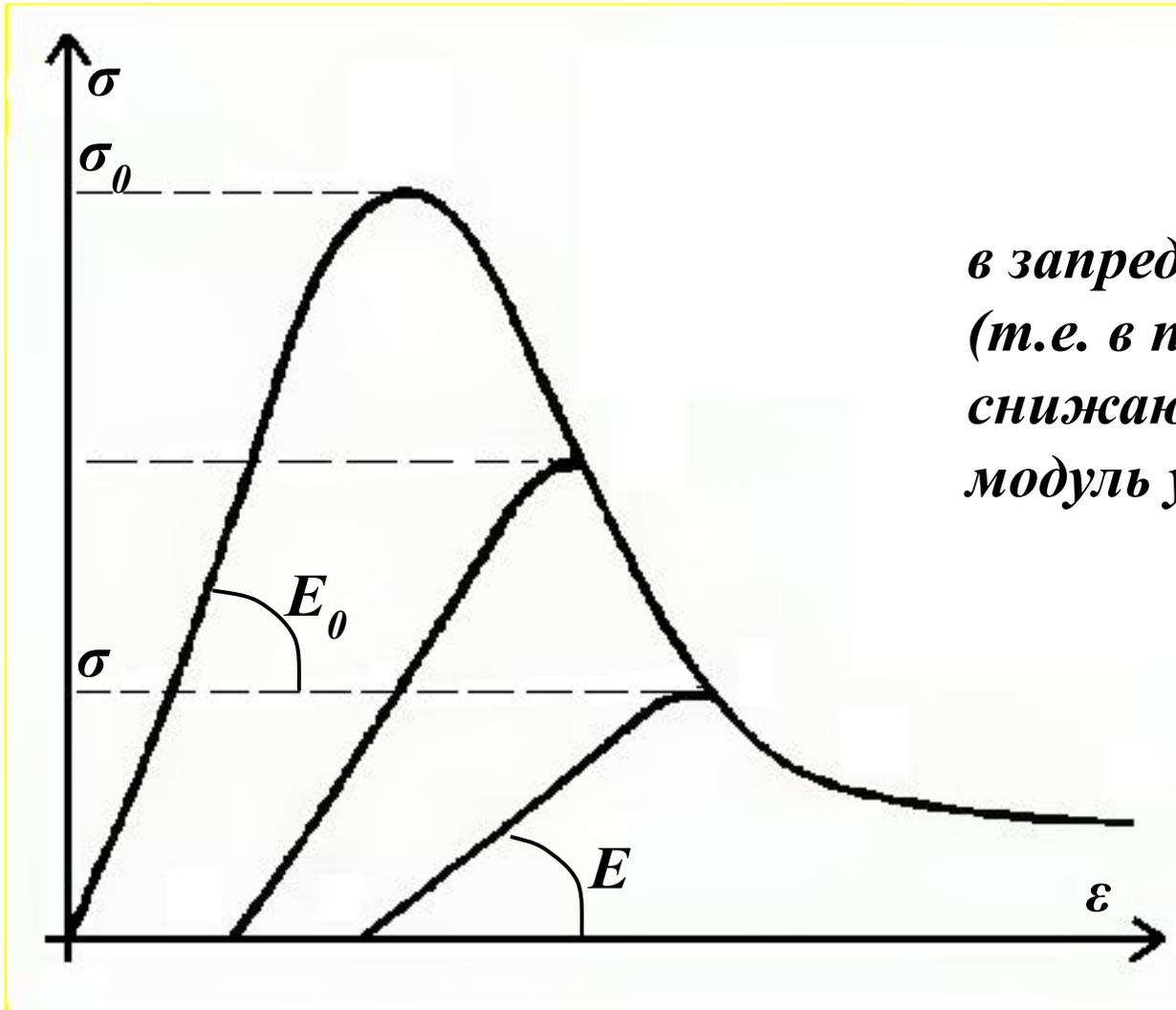
$$E = \Delta\sigma / \Delta\varepsilon.$$

*Модуль полных деформаций  $E_{\text{полн}}$*  — отношение предела прочности горных пород на сжатие к полным относительным линейным деформациям образца, предшествующим разрушению, МПа:

$$E_{\text{полн}} = [\sigma_{\text{сж}}] / \varepsilon_{\text{полн}}.$$

# ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ

## Полная диаграмма деформирования

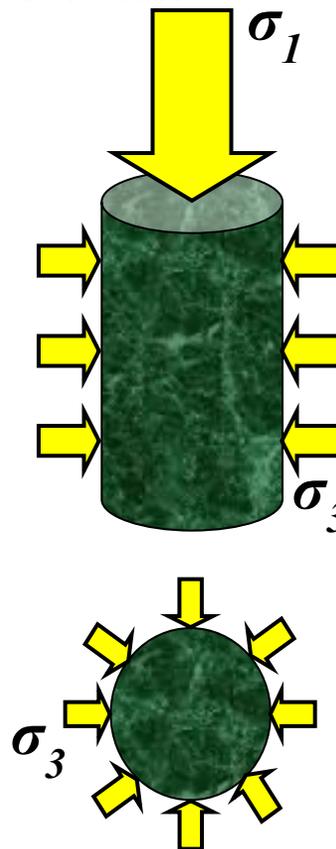
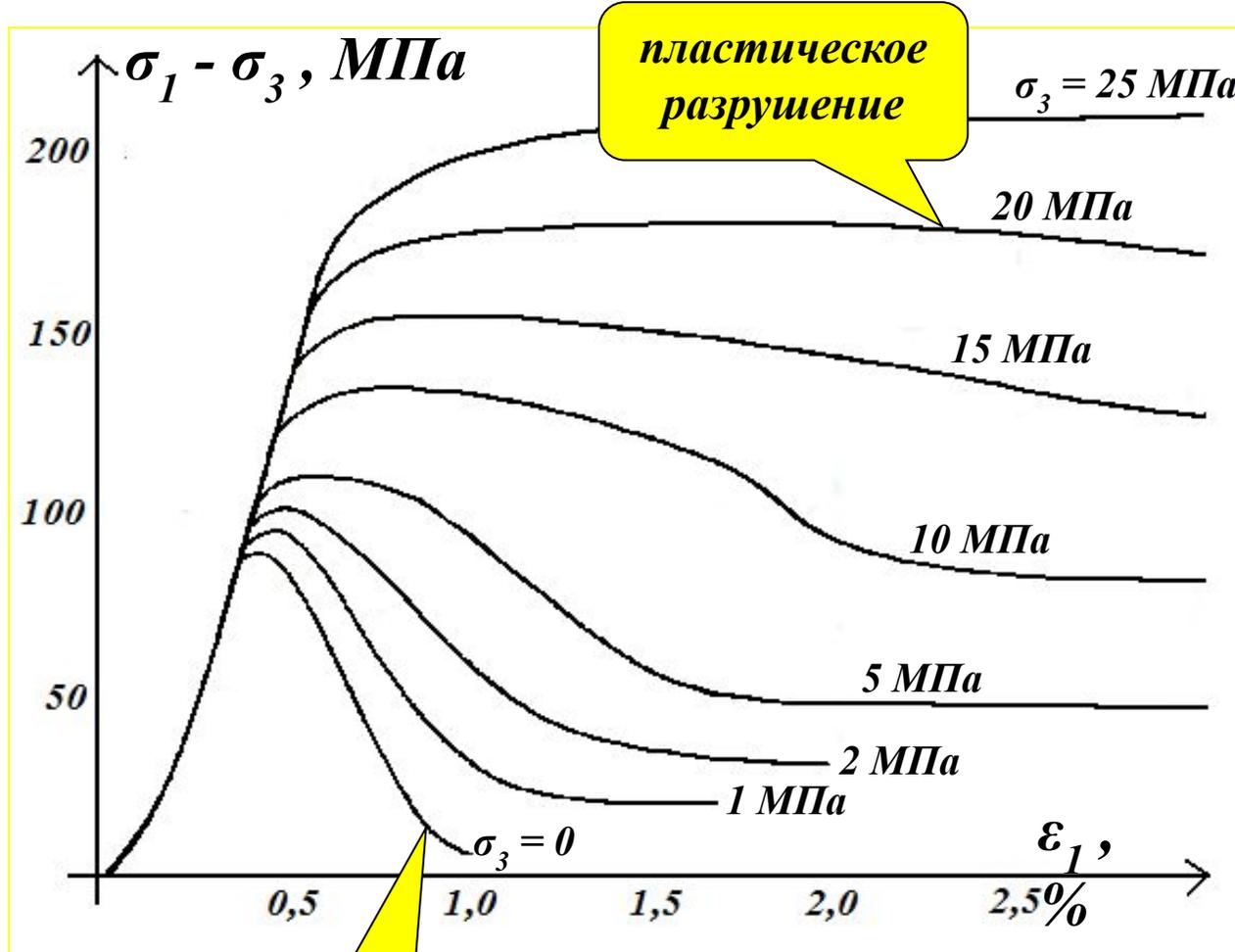


*в предельном состоянии  
(т.е. в процессе разрушения)  
снижаются и прочность, и  
модуль упругости массива:*

$$\left(\frac{E}{E_0}\right)^2 = \frac{\sigma}{\sigma_0}$$

# ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ

## Деформирование в объемном напряженном состоянии



в объемном напряженном состоянии увеличивается прочность массива и изменяется характер его разрушения

# Модуль объемного сжатия

Модуль объемного сжатия равен отношению равномерного всестороннего напряжения к относительному упругому изменению объема образца:

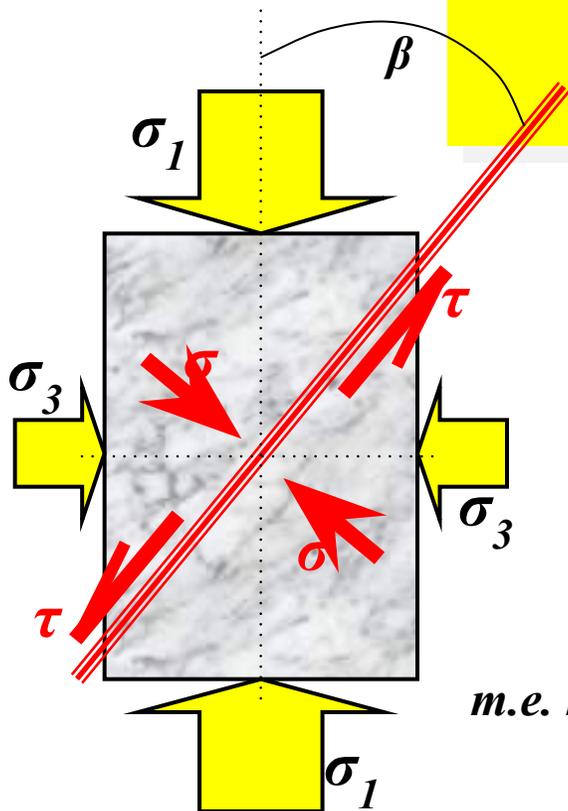
$$K = \sigma_v / \Delta V / V, \text{ или: } K = \frac{E}{3(1 - 2\nu)}$$

## РАЗРУШЕНИЕ МАССИВА

*Прочность в объемном напряженном состоянии  
(критерий Ш. Кулона):*

*При сжатии разрушение пород происходит  
сдвигом по наклонным площадкам, на которых  
сопротивление сдвигу минимально.*

*Сопротивление сдвигу определяется силами  
сцепления и внутреннего трения*



$$\tau = C + \sigma \cdot \operatorname{tg} \phi$$

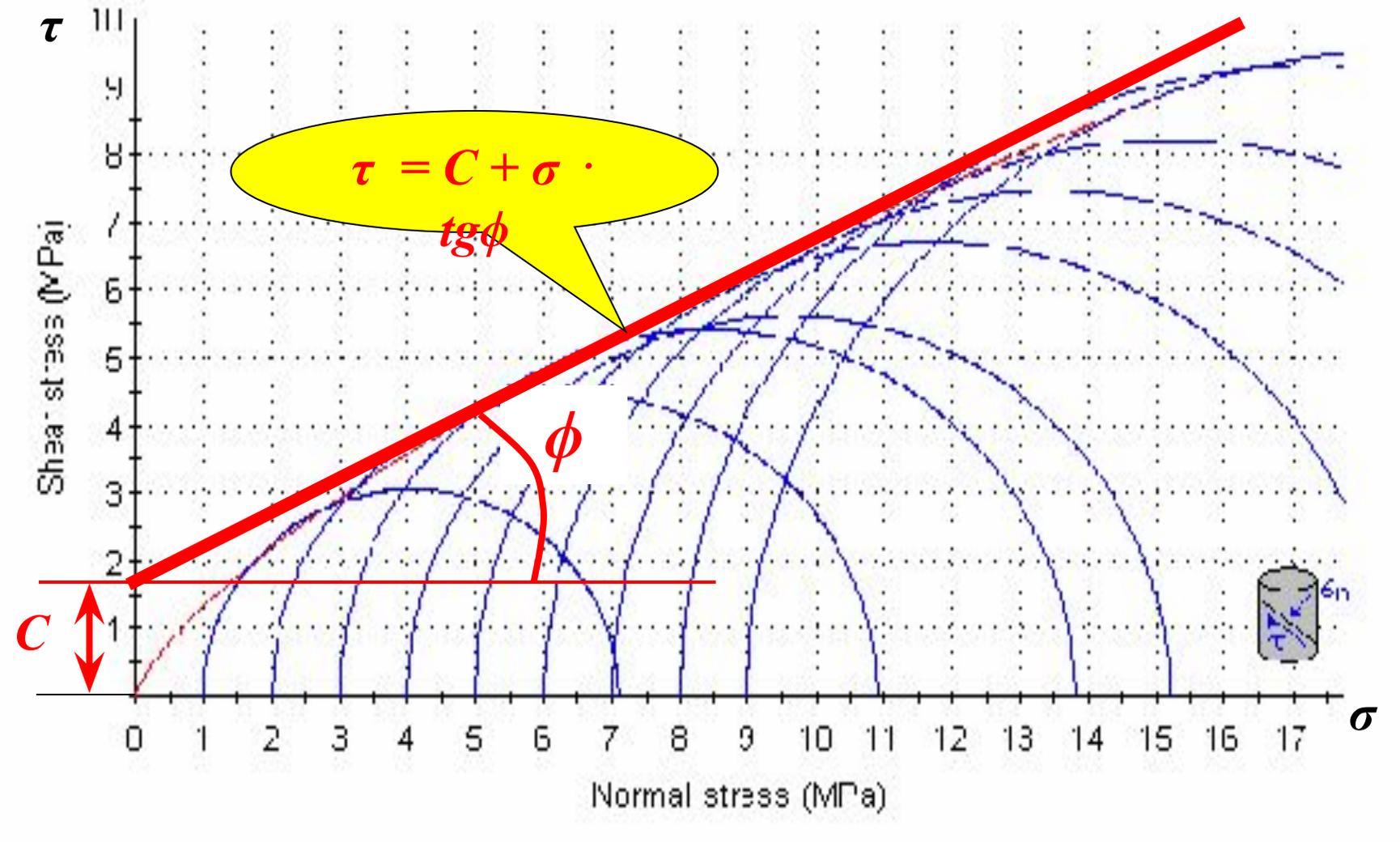
$$\sigma = \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3) + \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3) \cos 2\beta$$

$$\tau = \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3) \sin 2\beta$$

*т.е. промежуточное главное напряжение  $\sigma_2$  не учитывается !!!*

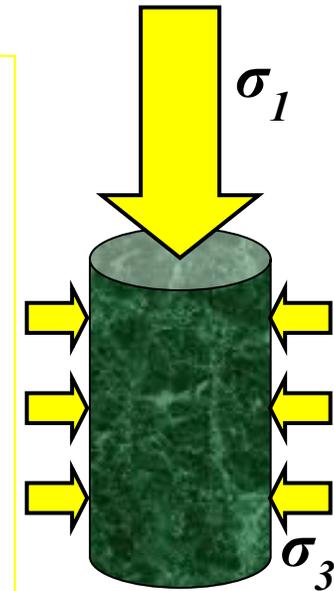
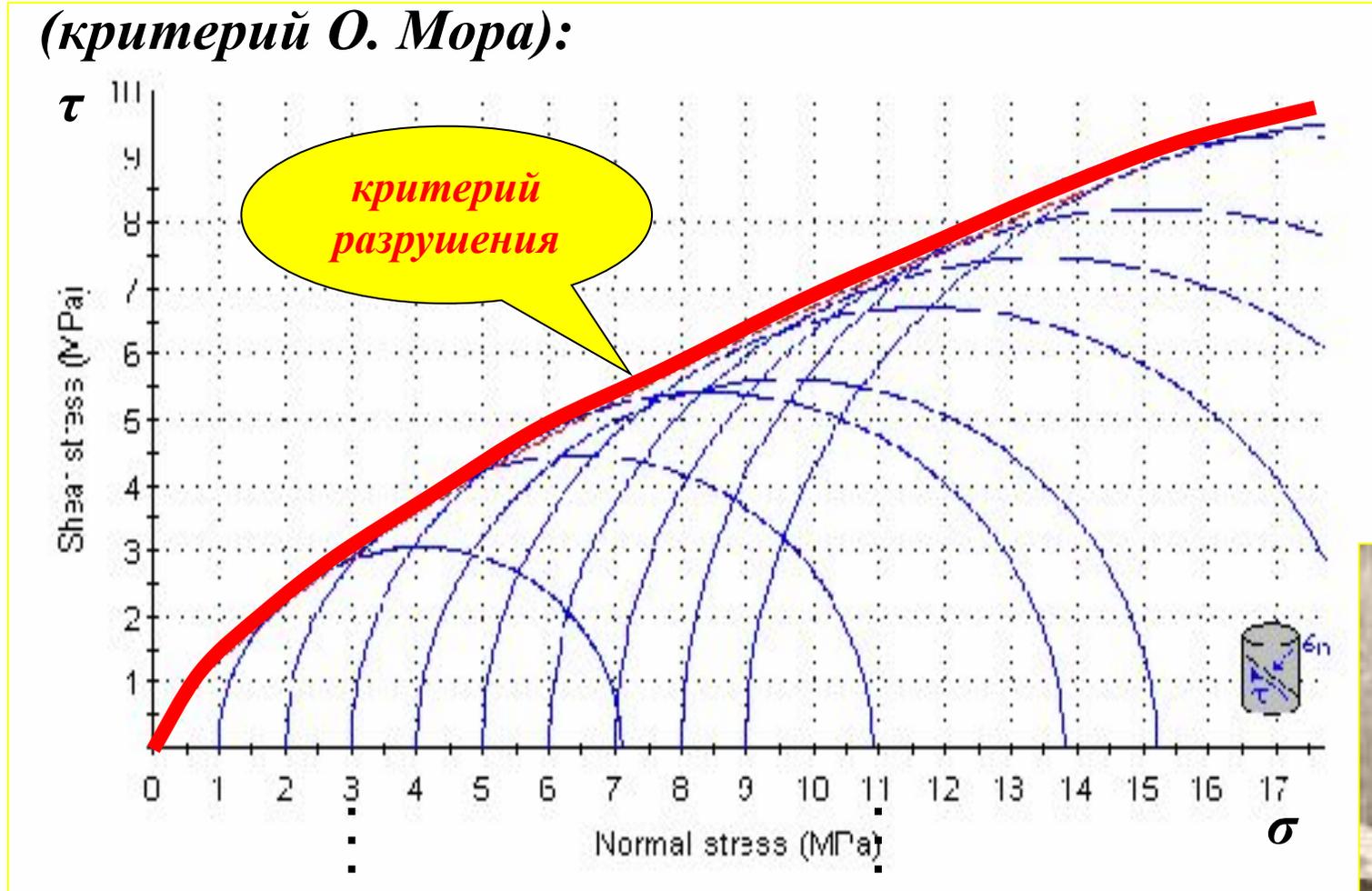
# РАЗРУШЕНИЕ МАССИВА

## Критерий Кулона-Мора:



# РАЗРУШЕНИЕ МАССИВА

Прочность в объемном напряженном состоянии  
(критерий О. Мора):



Prof. Otto Mohr

# РАЗРУШЕНИЕ МАССИВА

## Обобщенный критерий Кулона-Мора:

параметры  
обобщенного критерия  
Кулона-Мора:

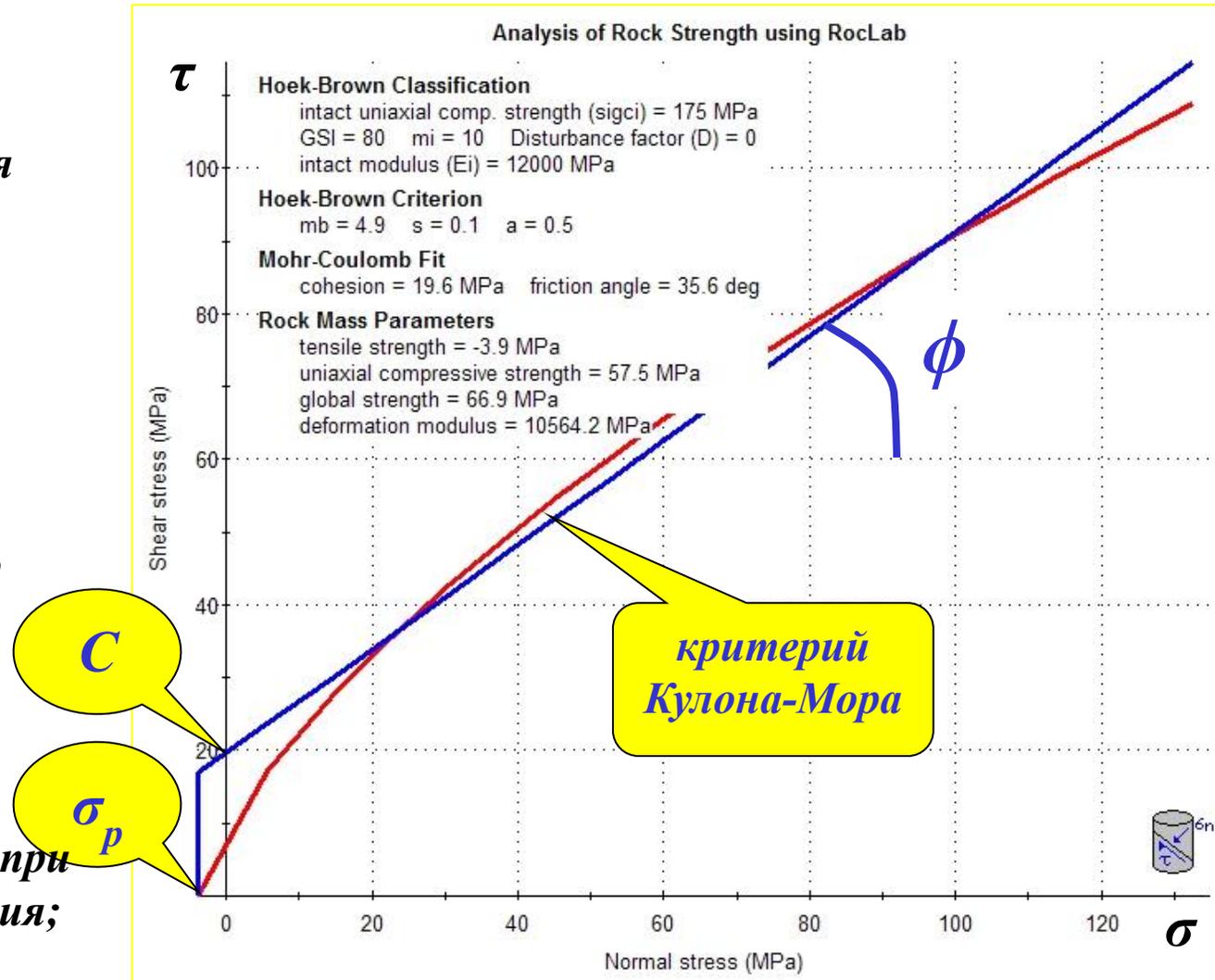
$\sigma_p$  — прочность на  
растяжение, МПа;

$C$  — сцепление, МПа

$\phi$  — угол внутреннего  
трения, град.

Сцепление –  
сопротивление сдвигу при  
отсутствии сил трения;

$\text{tg}\phi$  – коэффициент  
трения



# РАЗРУШЕНИЕ МАССИВА

## Критерий Кулона-Мора в главных напряжениях

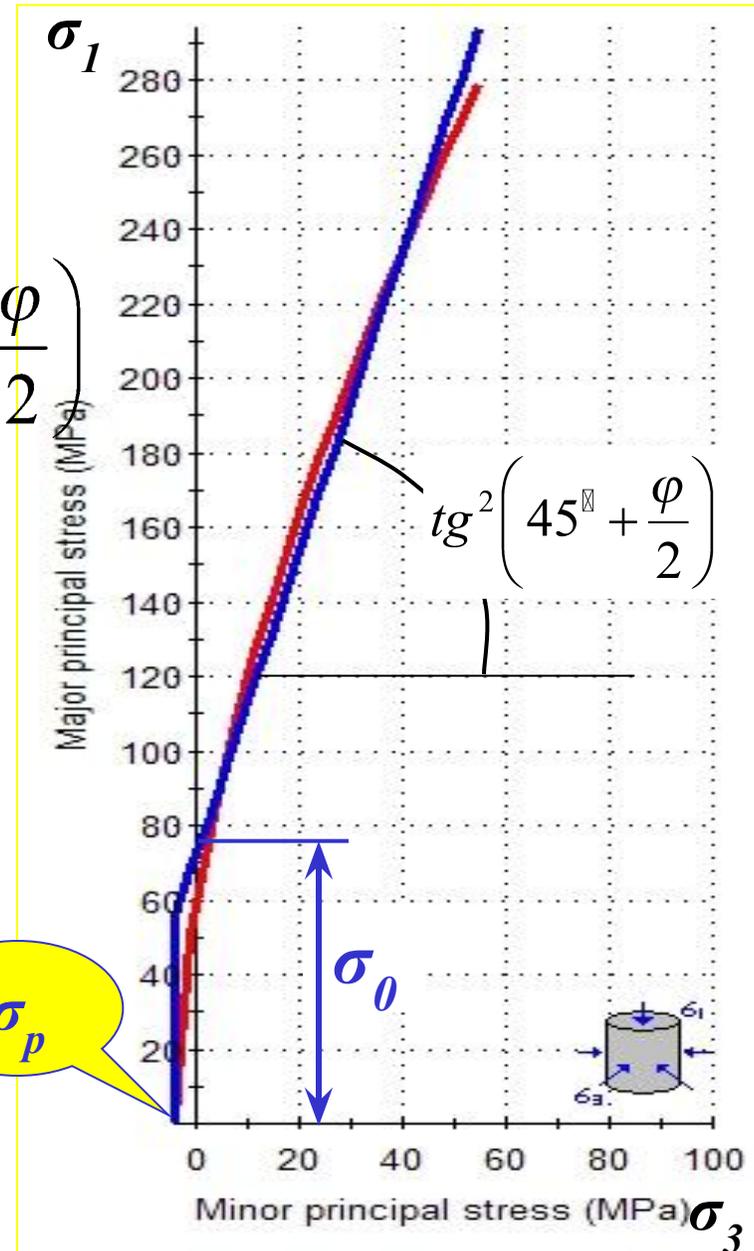
предельная величина максимальных напряжений:

$$\sigma_1 = 2C \cdot \operatorname{ctg} \left( 45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right) + \sigma_3 \cdot \operatorname{tg}^2 \left( 45^\circ + \frac{\varphi}{2} \right)$$

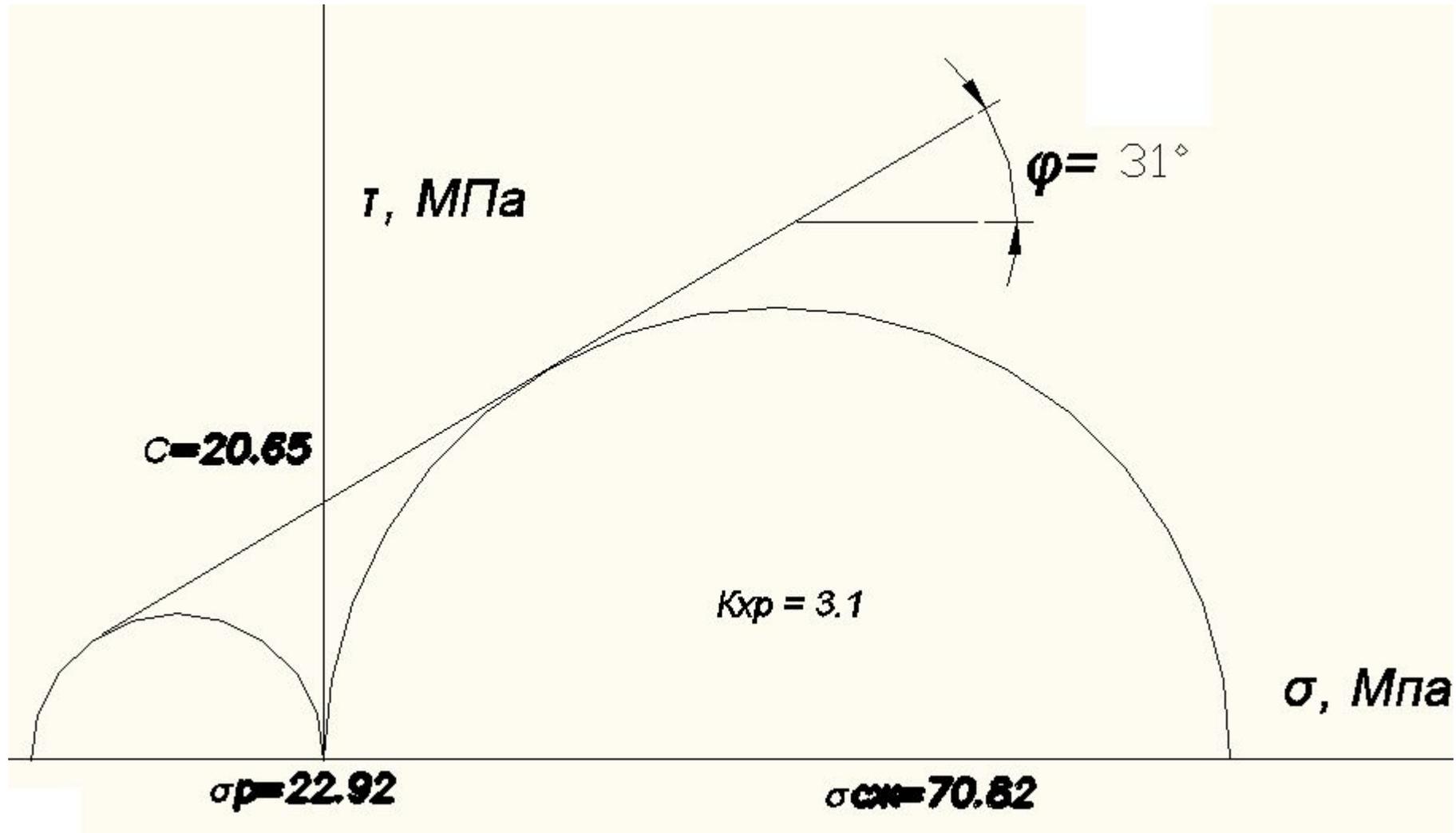
$\sigma_0$  — прочность на одноосное сжатие

$$\sigma_1 = \sigma_0 + \sigma_3 \cdot \operatorname{tg}^2 \left( 45^\circ + \frac{\varphi}{2} \right)$$

Если  $\varphi = 36^\circ$ , то  $\operatorname{tg}^2(45^\circ + \varphi/2) = 3,85$

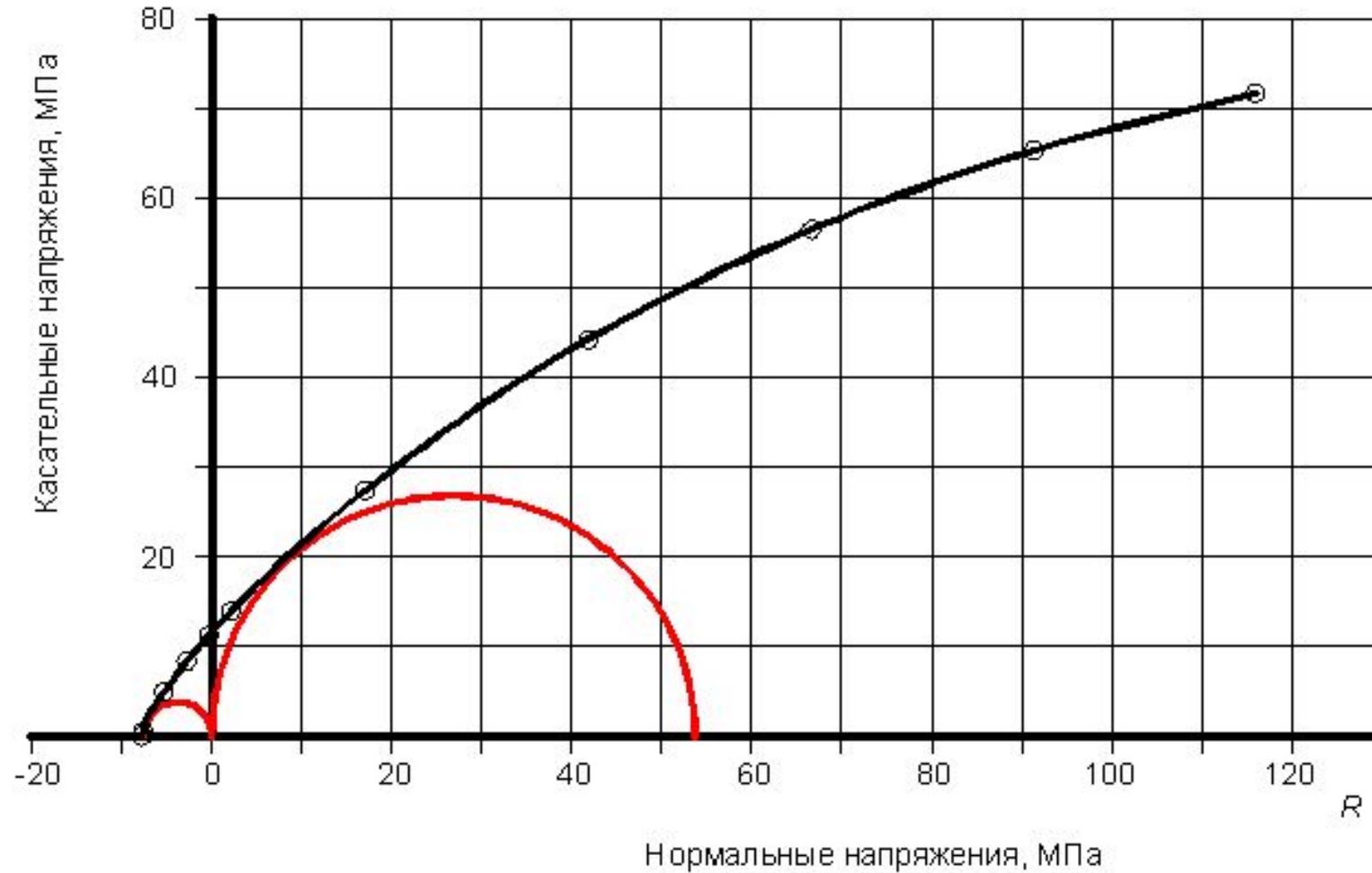


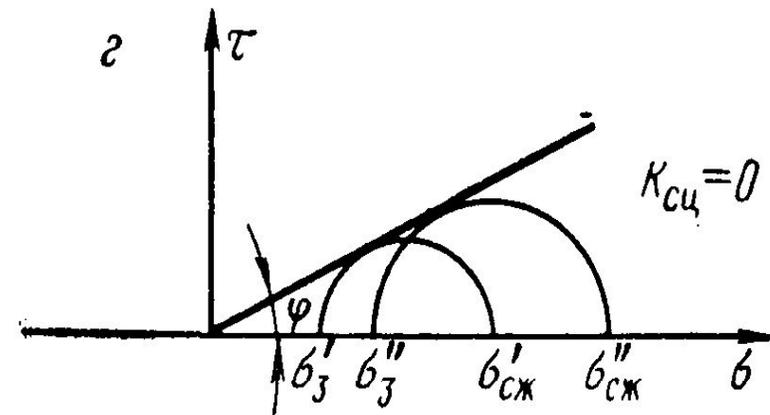
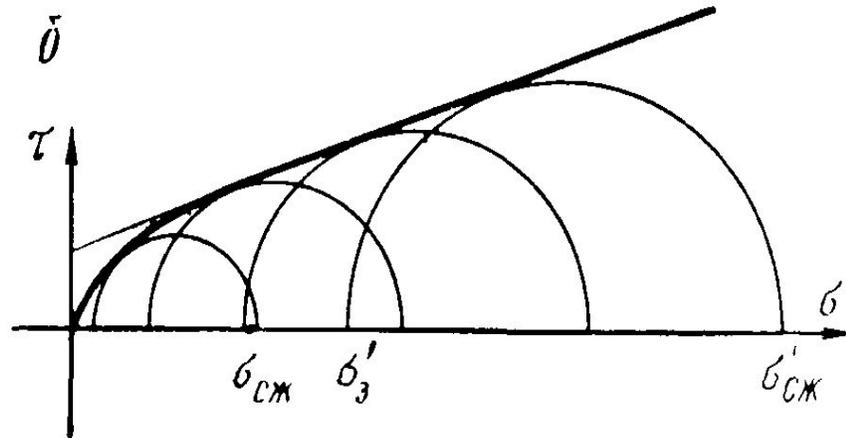
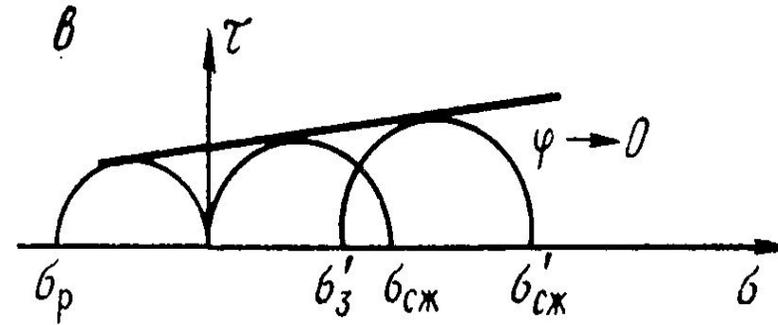
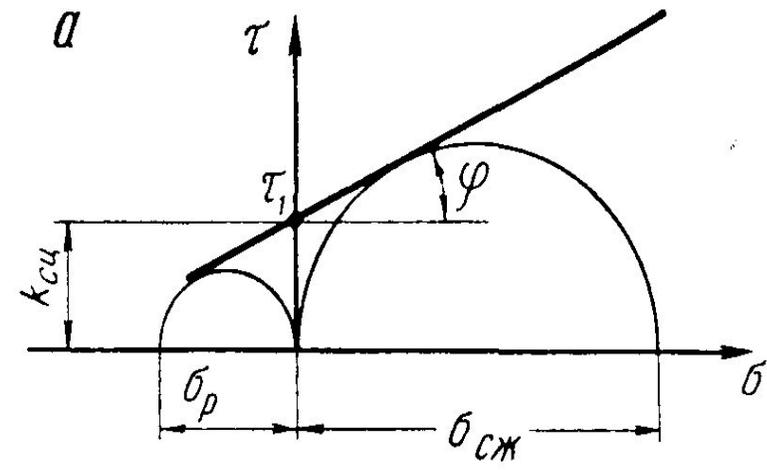
# Паспорт прочности





# Пример паспорта прочности



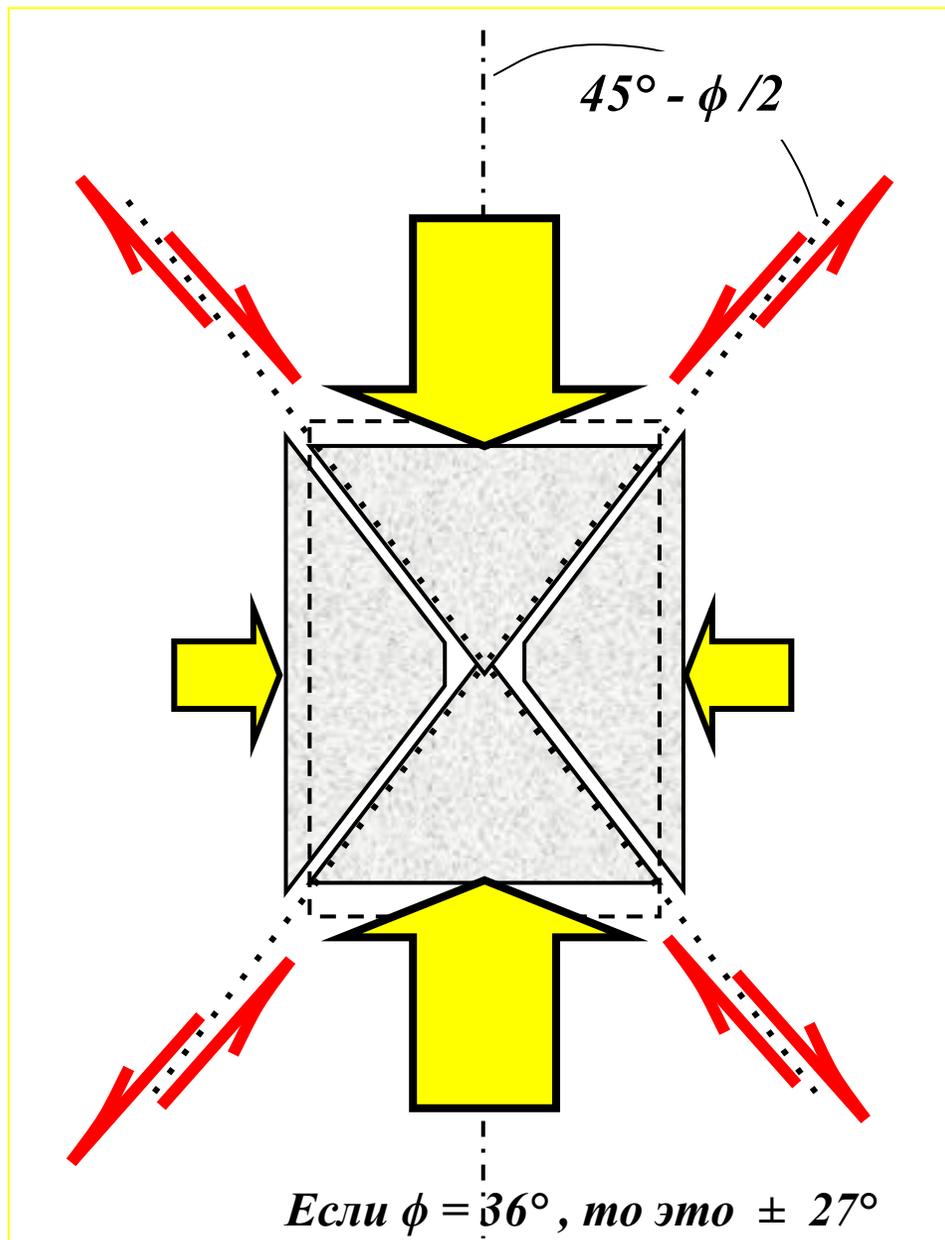


**Огибающие кругов напряжений:**

**а** — построение; **б, в и г** — паспорта прочности соответственно известняка, глинистых и сыпучих горных пород:

$\sigma'_{сж}$ ,  $\sigma''_{сж}$  — пределы прочности на сжатие при боковом давлении соответствующем  $\sigma'_з$  и  $\sigma''_з$

## РАЗРУШЕНИЕ МАССИВА

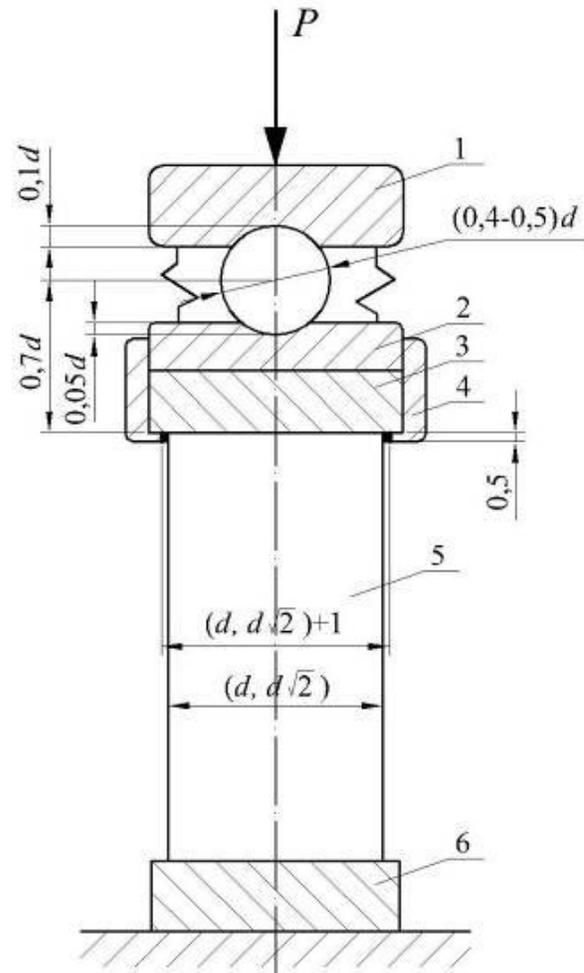


*При сжатии разрушение пород происходит сдвигом по сопряженным площадкам, отклоненным от направления максимального сжатия на угол:*

$$\pm (45^\circ - \phi / 2)$$

*где  $\phi = 30 \div 38^\circ$  - угол внутреннего трения пород*

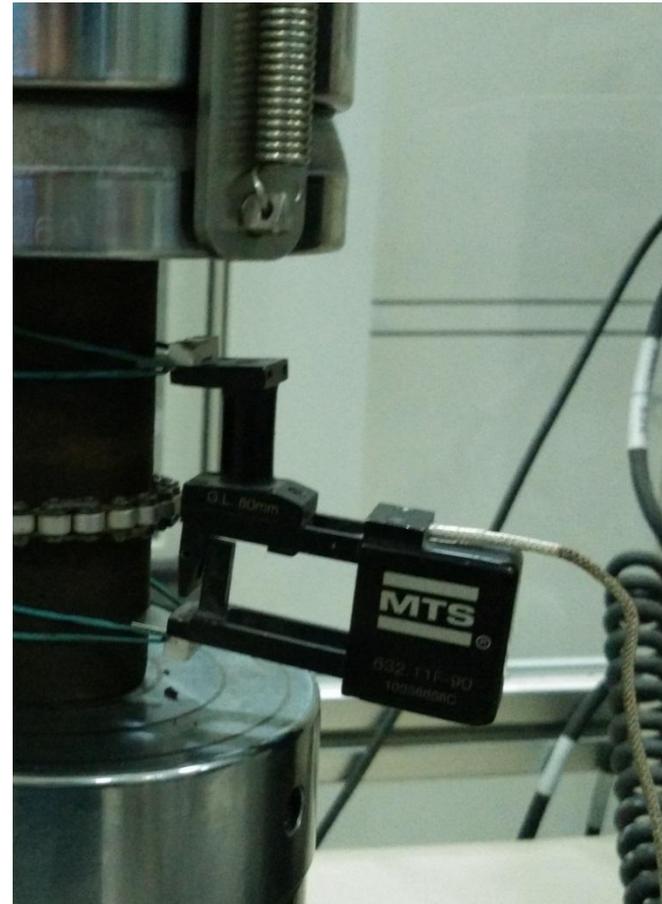
# Схема испытаний на одноосное сжатие



$$\sigma_c = \frac{P_{разр}}{S_o},$$

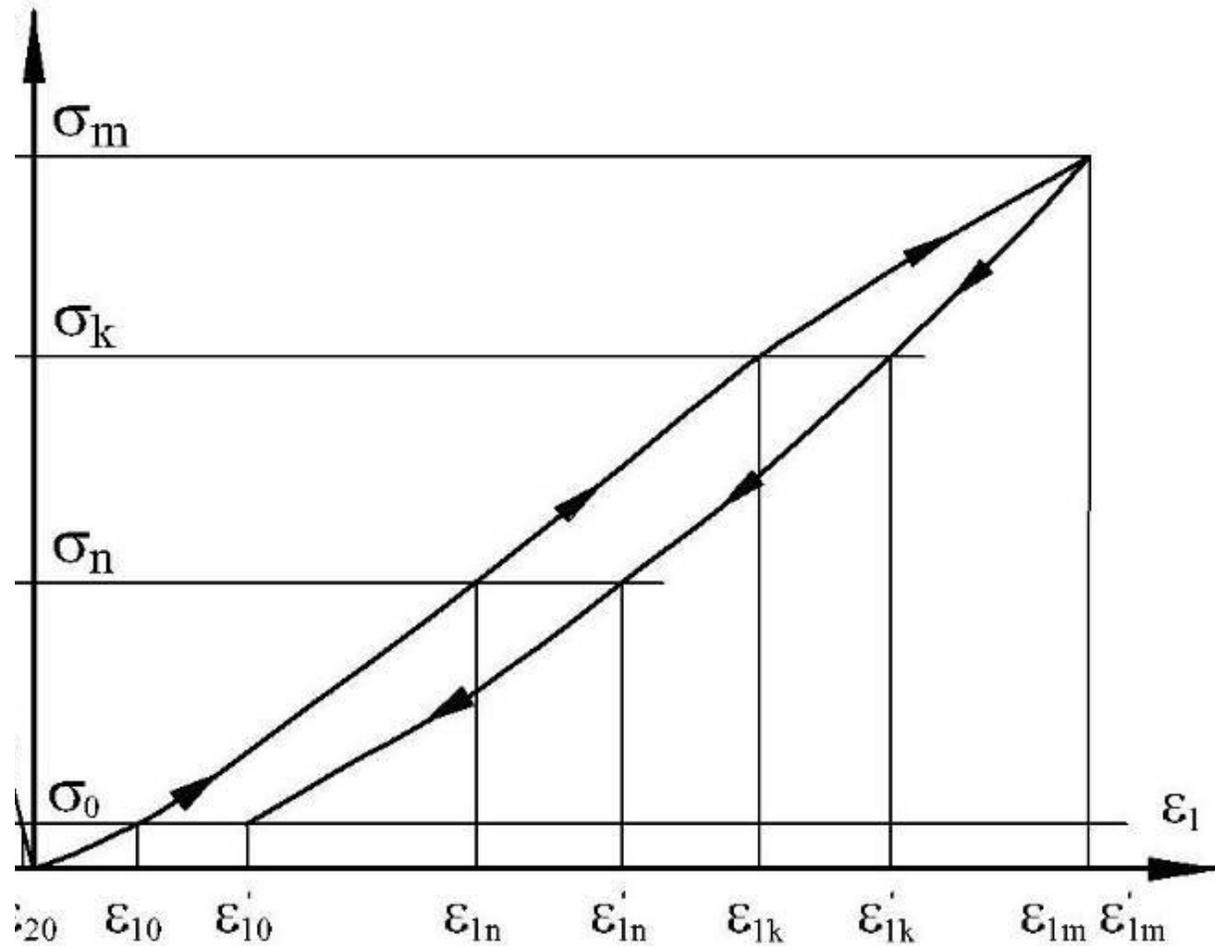
- 1 - накладная пята;
- 2 – подкладная пята;
- 3 – верхняя пята;
- 4 – обойма; 5 – образец;
- 6 – нижняя плита

# Сервогидравлическая испытательная система MTS 816 в варианте с плитами на одноосное сжатие



- Расположени  
е  
продольного  
деформометр  
а на образце

# Графики зависимости напряжения сжатия от продольных относительных деформаций образца



Модуль деформации  $E_{\partial}$ , модуль упругости  $E_y$  определяются по формулам

$$E_y = \frac{\sigma_k - \sigma_n}{\varepsilon_{1k}^1 - \varepsilon_{1n}^1};$$

- где  $\sigma_n$  и  $\sigma_k$  – значения сжимающего напряжения в диапазонах частичной пригрузки и разгрузки образца, соответственно;
- $\varepsilon_{1n'}^1$ ;  $\varepsilon_{1k}^1$  – частные значения продольных относительных деформаций при частичных пригрузке и разгрузке образца, соответственно

- ***Коэффициент хрупкости  $K_{хр}$***  — отношение предела прочности на одноосное растяжение к пределу прочности на одноосное сжатие (или наоборот):
- Породы разрушаются хрупко, если  ***$K_{хр}$  больше 6 (меньше 1/6)***

- Коэффициент хрупкости характеризует хрупкие свойства пород
- С ростом предела прочности при одноосном сжатии коэффициент хрупкости возрастает.
- это величина, обратная коэффициенту пластичности

# Коэффициент хрупкости при запредельном деформ

$\sigma_1$  - осевое давление на образец, МПа;

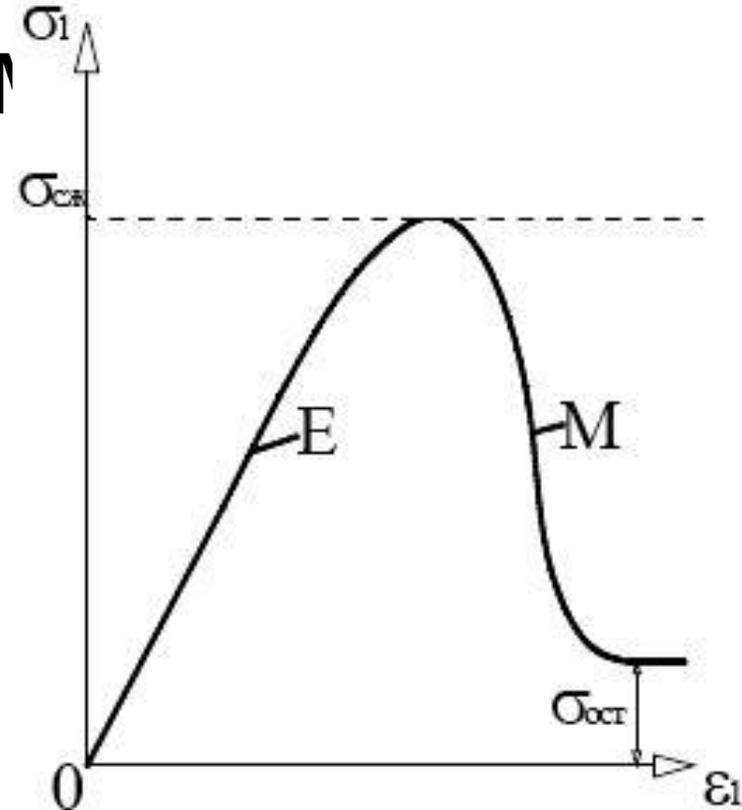
$\varepsilon_1$  - продольная деформация образца;

E - модуль упругости образца, МПа;

M - модуль спада образца, МПа;

$\sigma_{сж}$  - предел прочности при одноосном сжатии, МПа;

$\sigma_{ост}$  - предел остаточной прочности, МПа.



- на восходящей ветви диаграммы определяют модуль упругости E, на ниспадающей модуль спада M. При  $E/M < 1$  порода считается удароопасной; при  $E/M > 1$  - неудароопасной