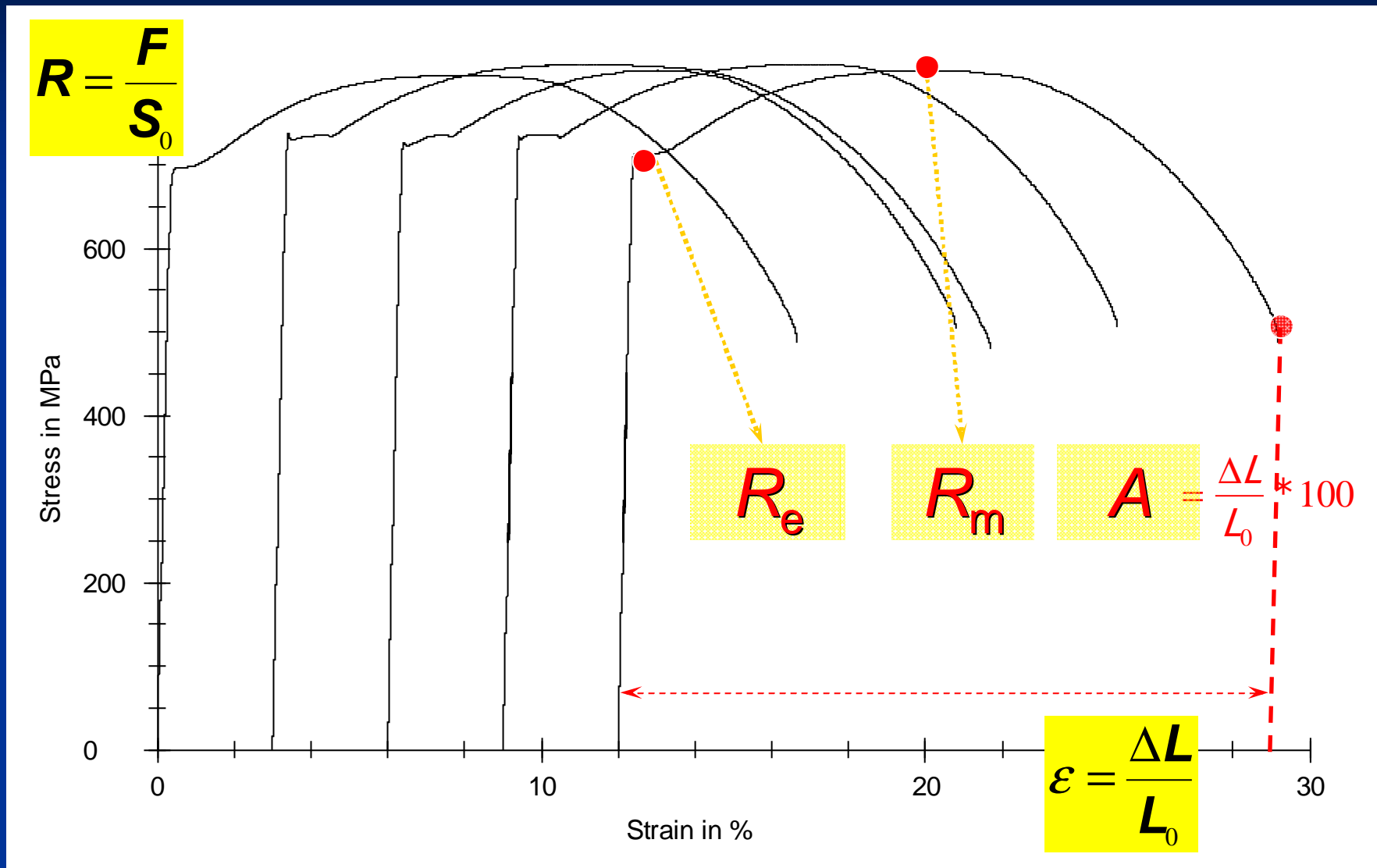


Plastická deformace a pevnost

- ✓ Anelasticita – vnitřní útlum
- ✓ Tahová zkouška (kovy, plasty, keramiky, kompozity)
- ❖ Fyzikální podstata pevnosti
 - dislokace (monokrystal – polykrystal)
 - mez kluzu nízkouhlíkových ocelí – H. P. vztah
 - vliv teploty a rychlosti zatěžování na mez kluzu
- ❖ Skutečný tahový diagram
- ❖ Tvrdost a tahový diagram

Zkouška tahem



Zkouška tahem

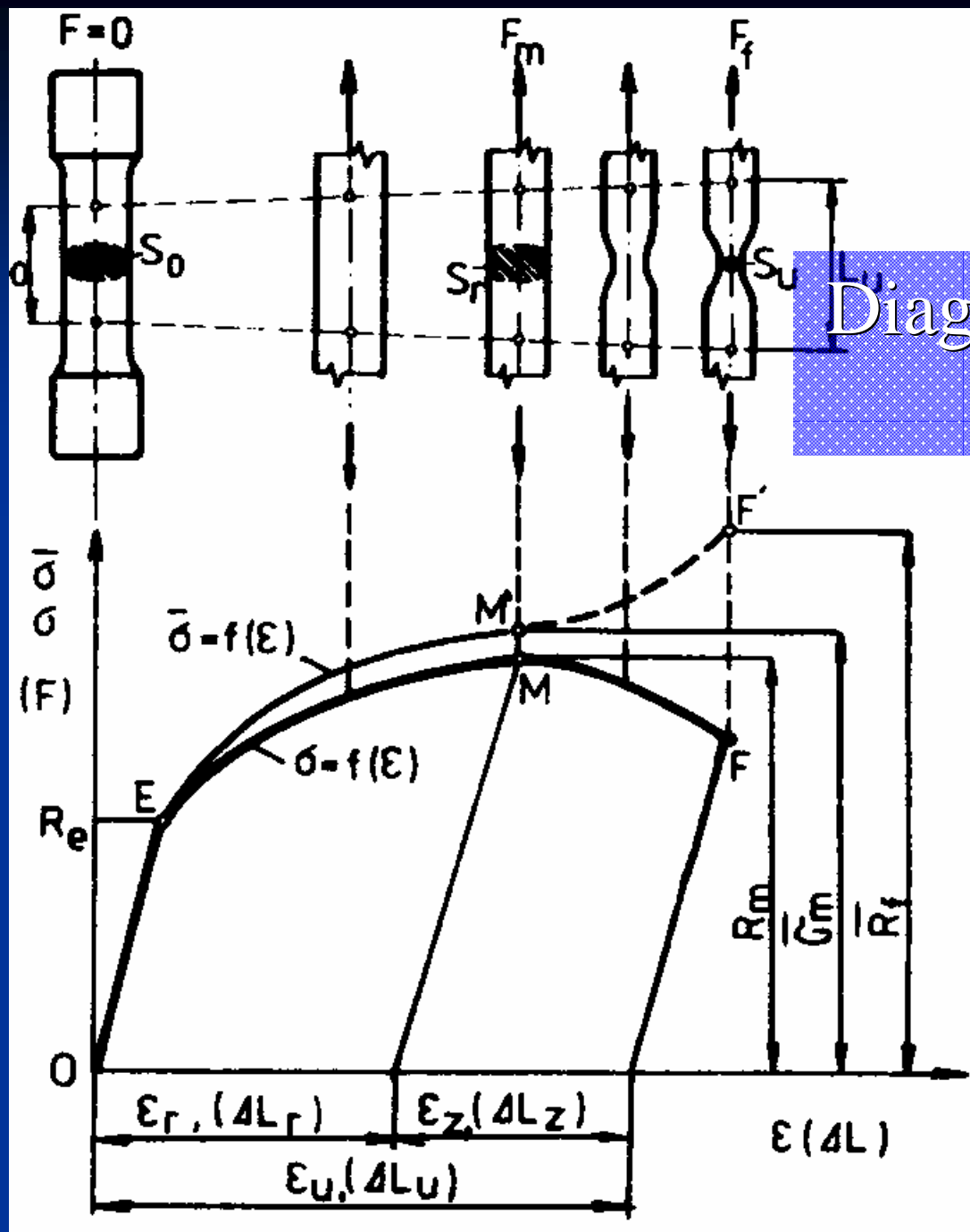
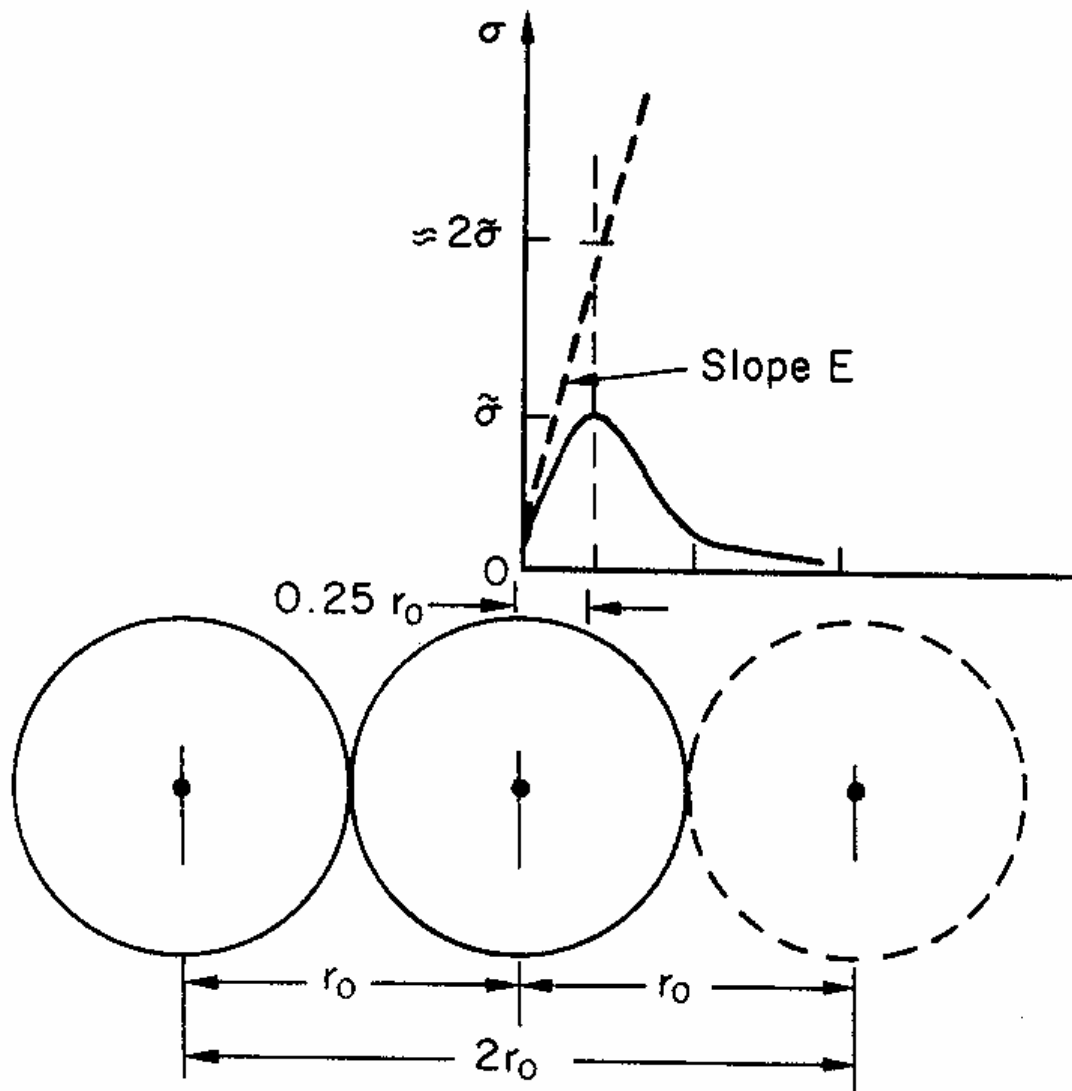


Diagram skutečné napětí –
skutečná deformace

Ideální pevnost

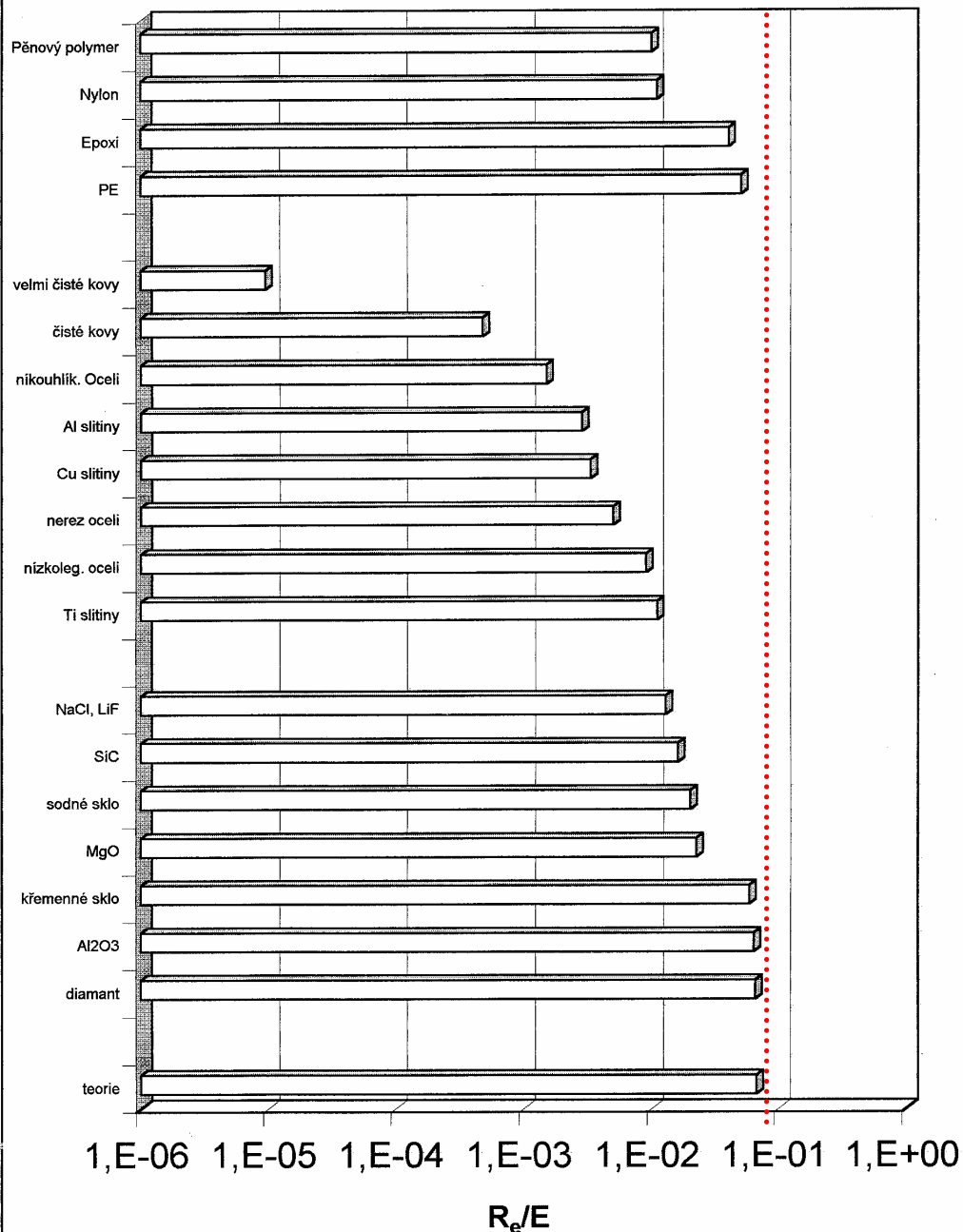


$$\sigma = E\varepsilon$$

$$2\tilde{\sigma} \approx E \frac{0,25r_0}{r_0} = \frac{E}{4}$$

$$\tilde{\sigma} \approx \frac{E}{8}$$

Mez kluzu normalizovaná k E



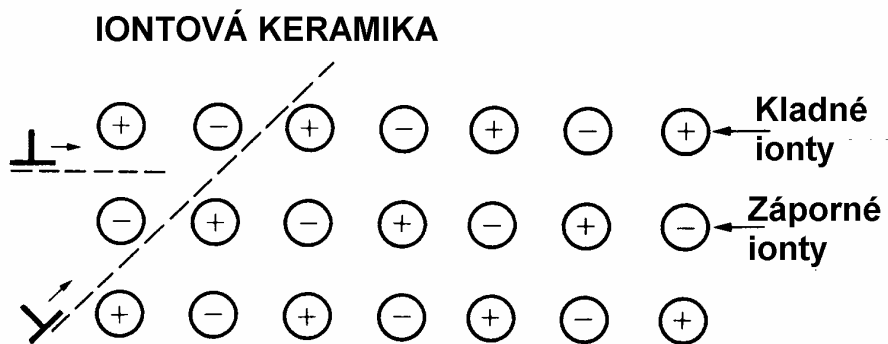
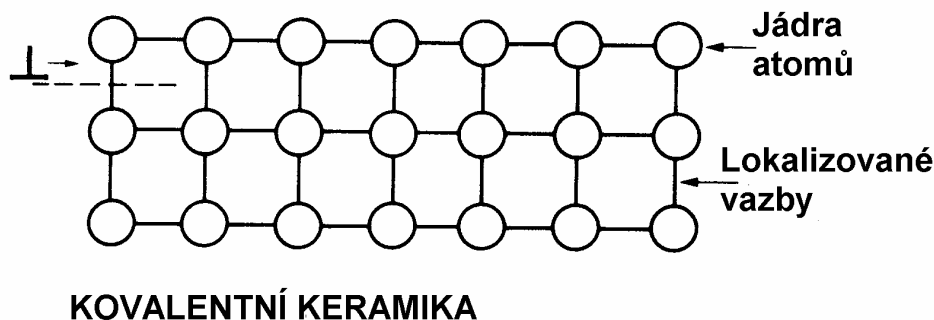
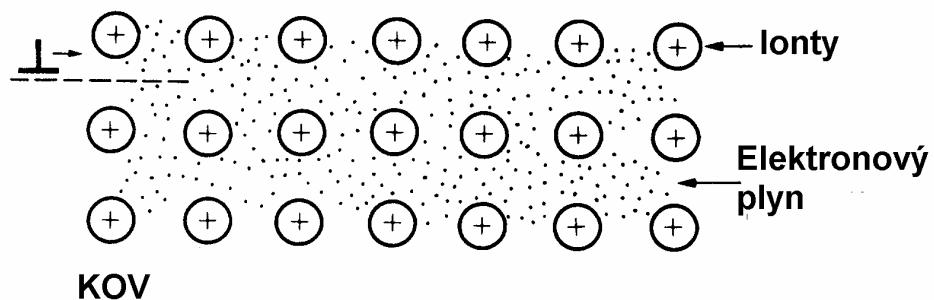
Ideální pevnost

Co ji „kazí“ ?

Bodové poruchy –
vakance, divakance, cizí
atomy

Čárové poruchy –
dislokace – šroubové,
hranové smíšené

Plošné poruchy – vrstevné
chyby, hranice zrn
a jejich vzájemná
interakce



kovy – inherentní křehkost –
tvárnost na typu krystalické
mřížky

kovalentní keramika (r.t.) –
nejsou pohyblivé dislokace –
materiál je křehký

sklo – nejsou pohyblivé
dislokace – materiál je křehký

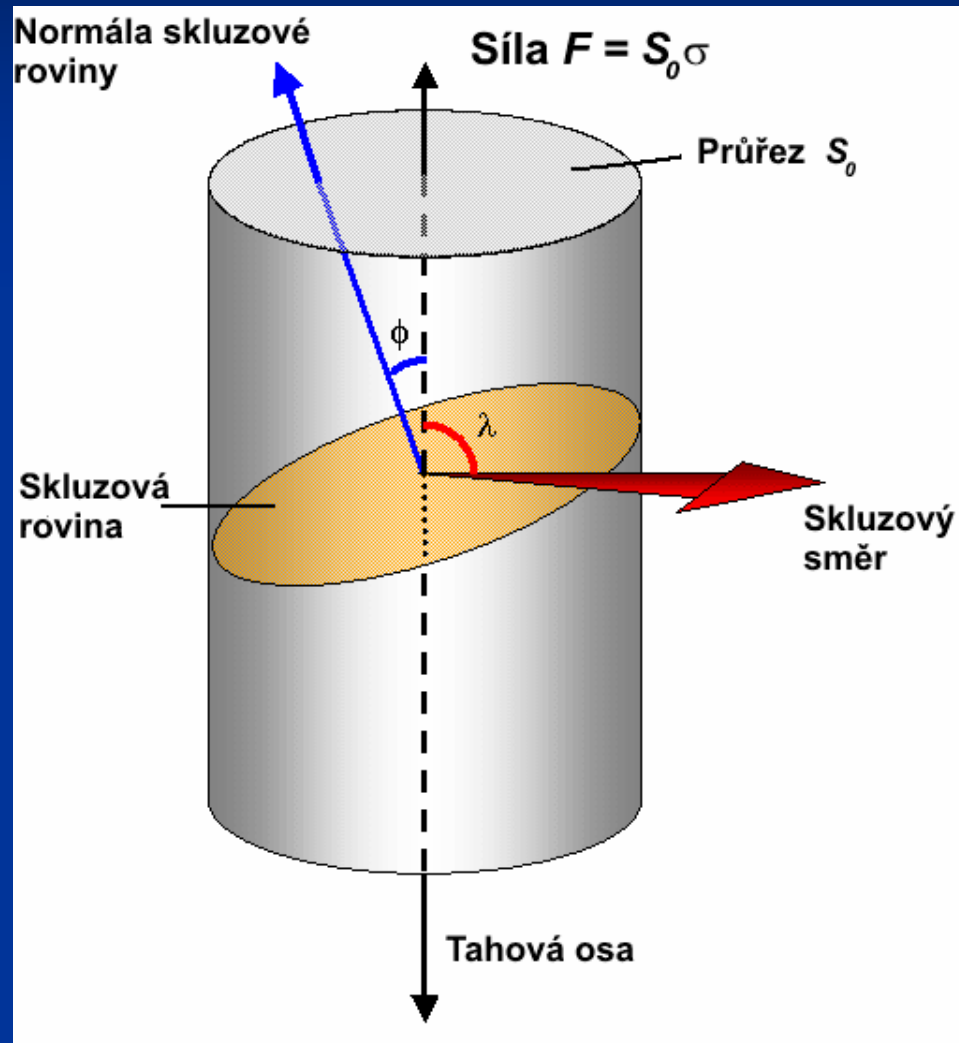
kovalentní plasty

iontová keramika

- *monokrystaly* plasticky
deformovatelné (např. NaCl)

- *polykrystal* křehká (malý
počet kluzových rovin)

Tahový diagram monokrystalu (kovu)



$$\tau_{skluz} = \sigma(\cos \Phi \cos \lambda)$$

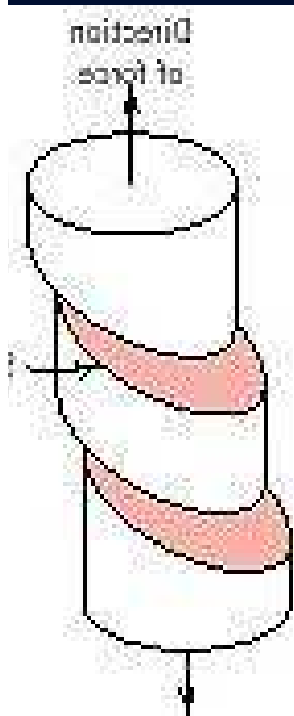
Schmidtův zákon:

- skluz nastane, když:

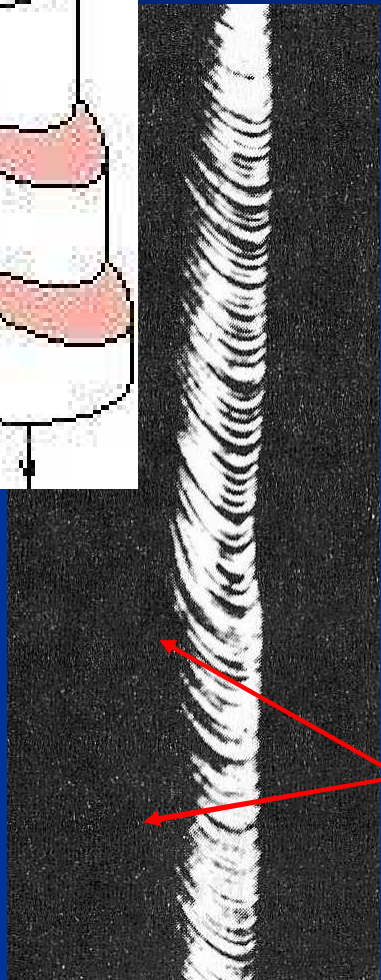
$$m\sigma = \tau_{krit}$$

Tahový diagram monokrystalu (kovu)

pohyblivé dislokace

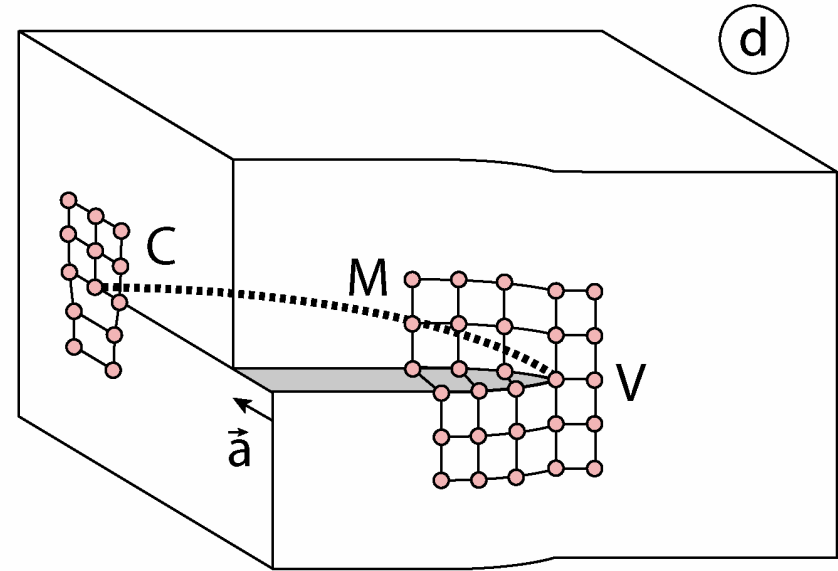
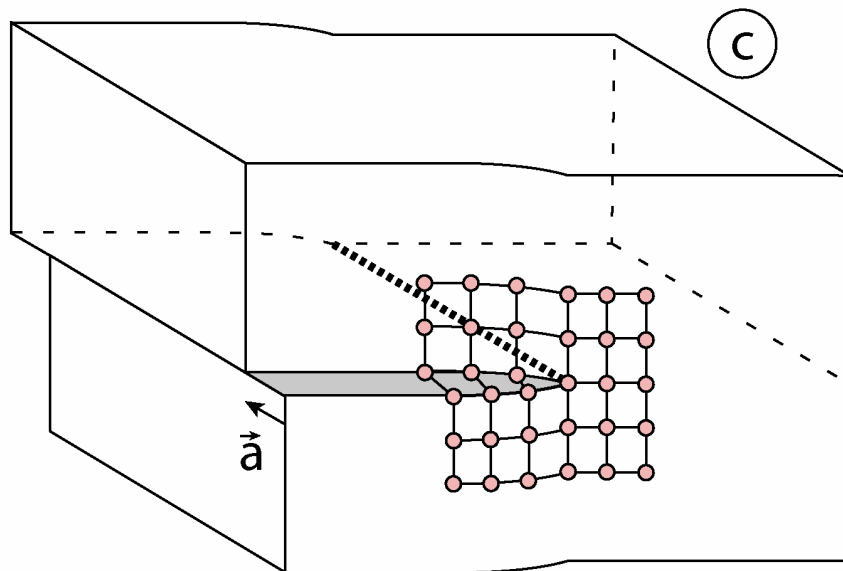
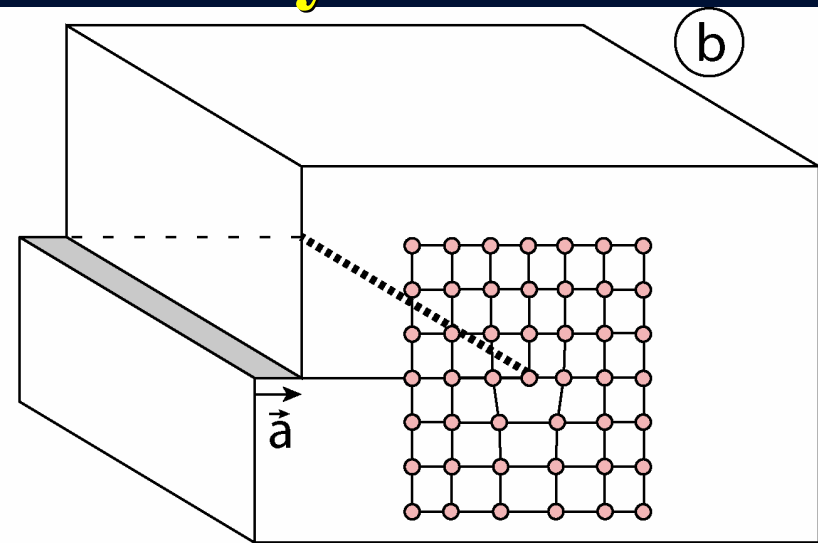
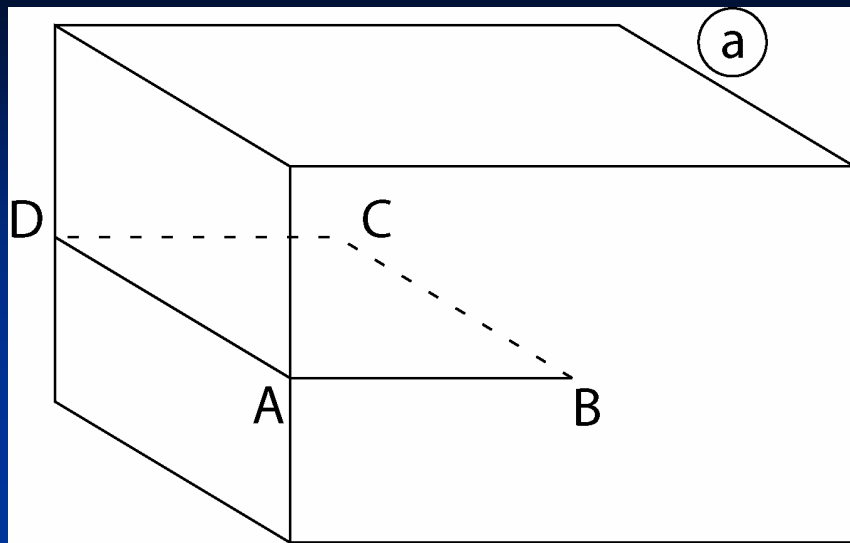


- Směr kluzu je totožný se směrem nejhustěji obsazeným atomy
- Skluzová rovina je totožná s nejhustěji obsazenou rovinou
- Skluz probíhá v té skluzové rovině, kde působí největší smykové napětí

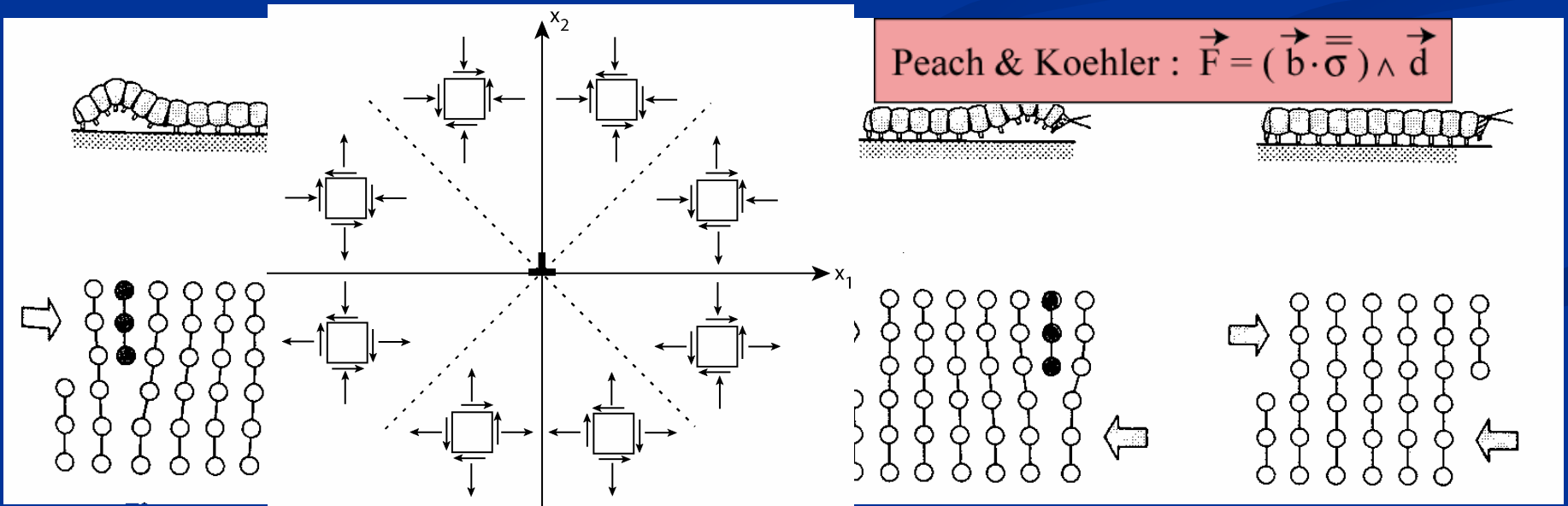
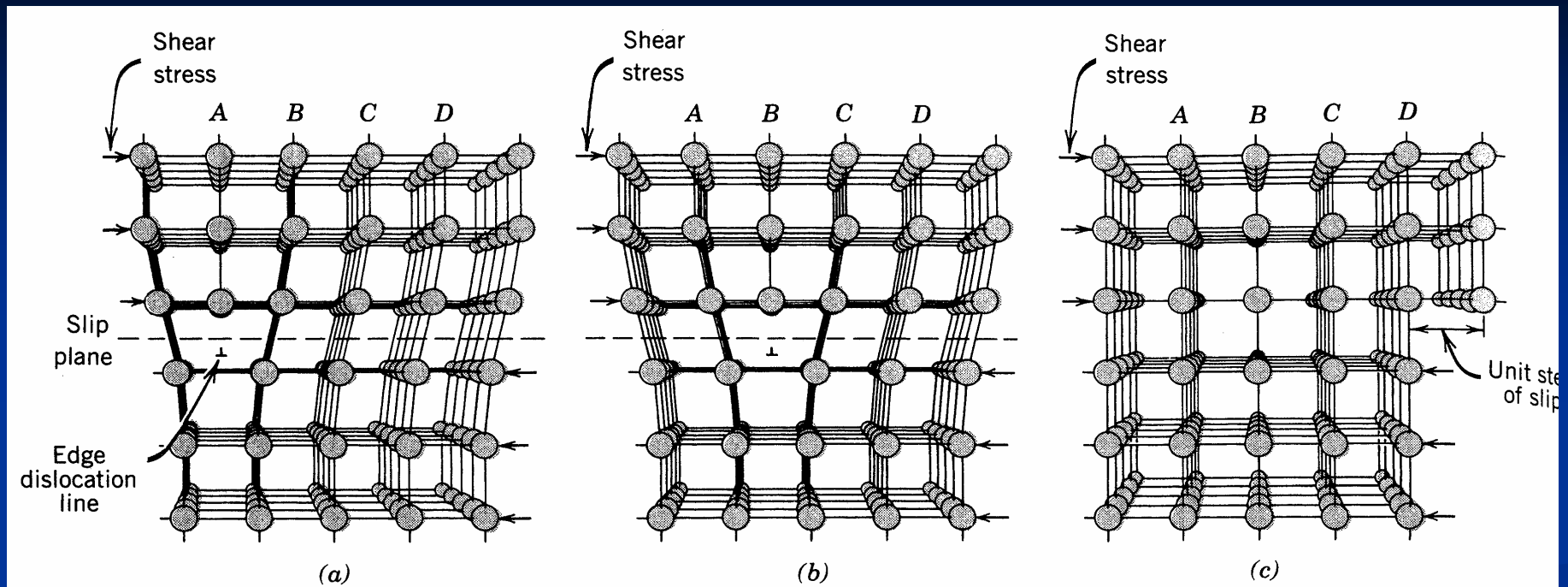


aktivní skluzové roviny

Pohyblivé dislokace

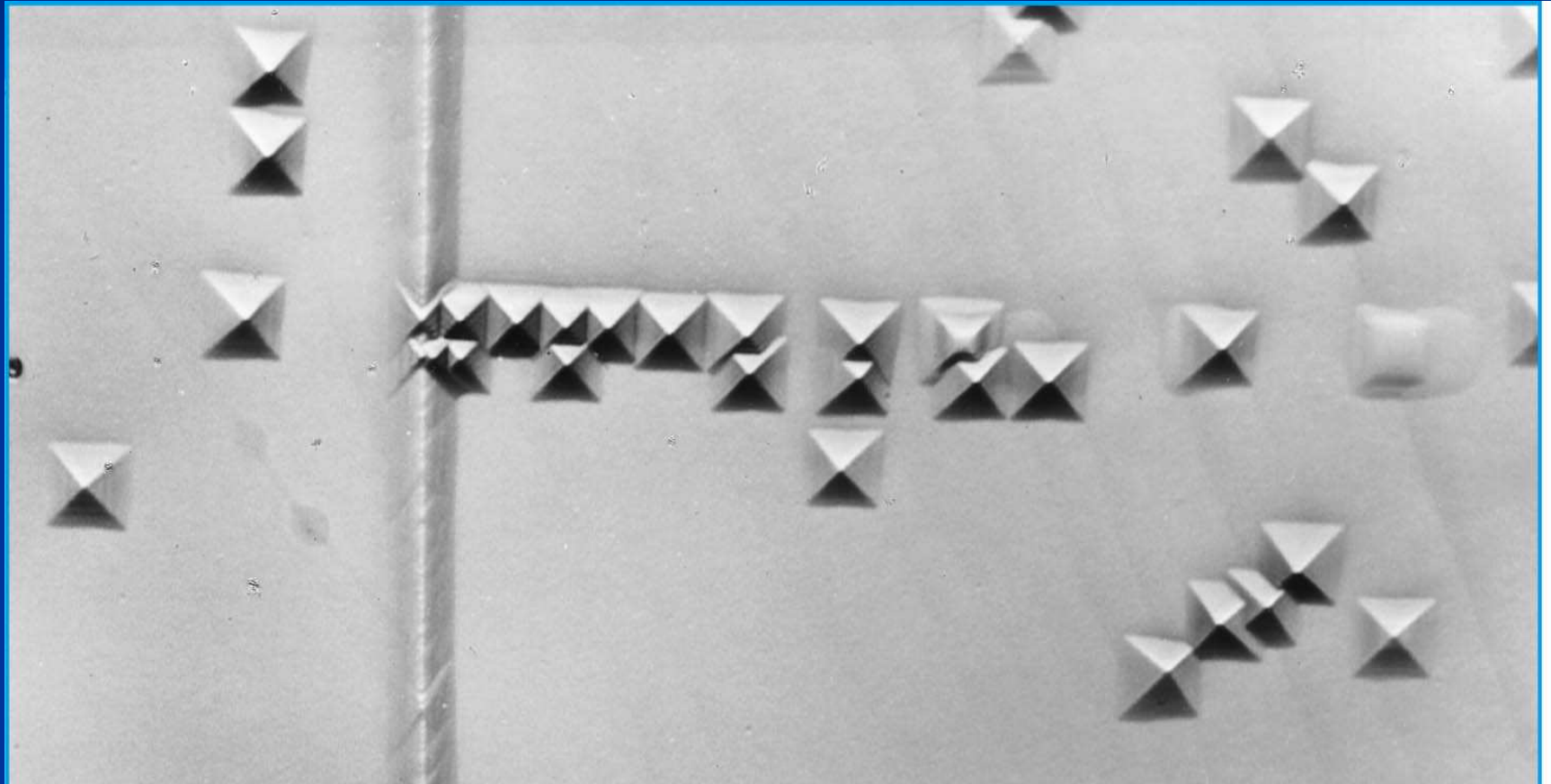


Pohyblivé dislokace

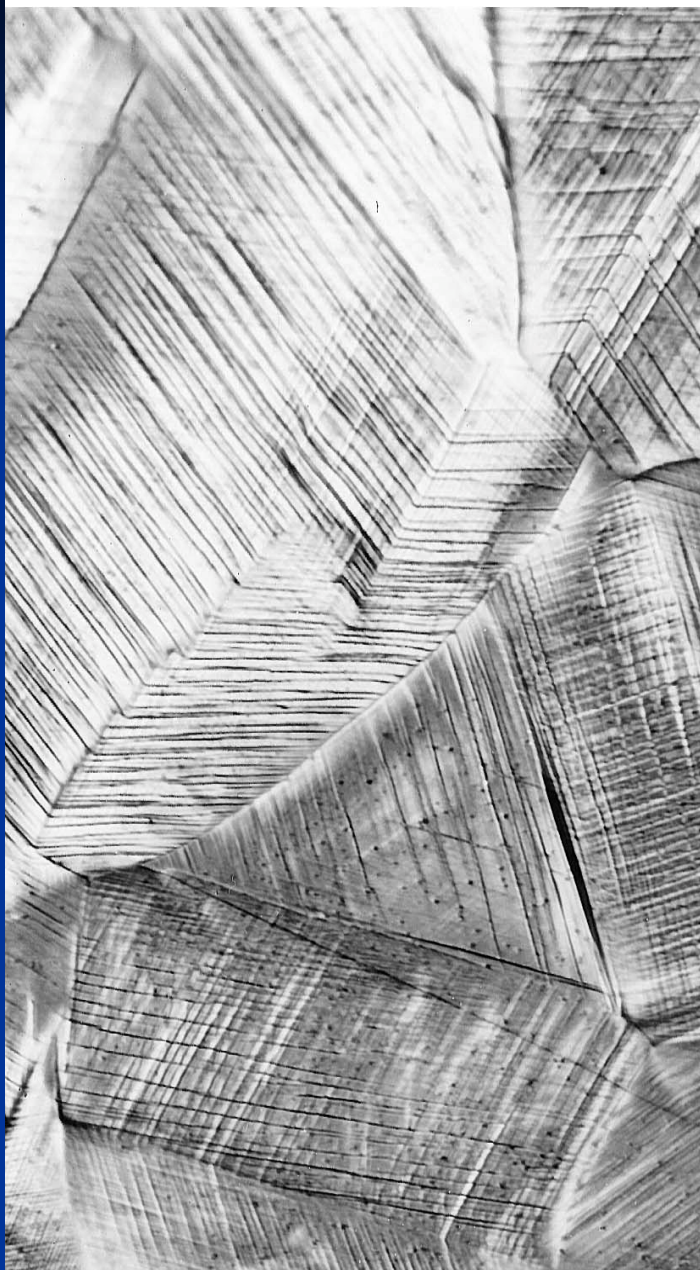


Pohyblivé dislokace

Experimentální důkazy existence dislokací



Pohyblivé dislokace

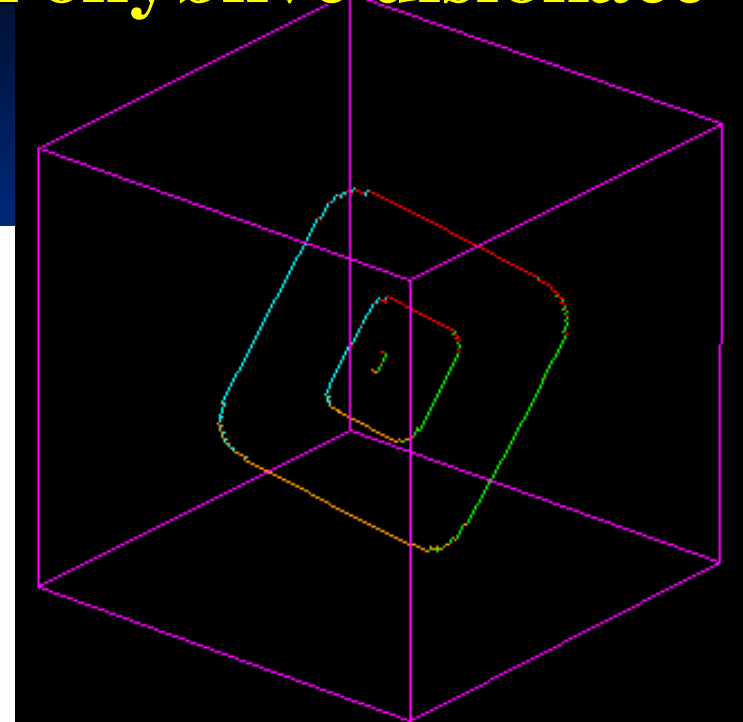
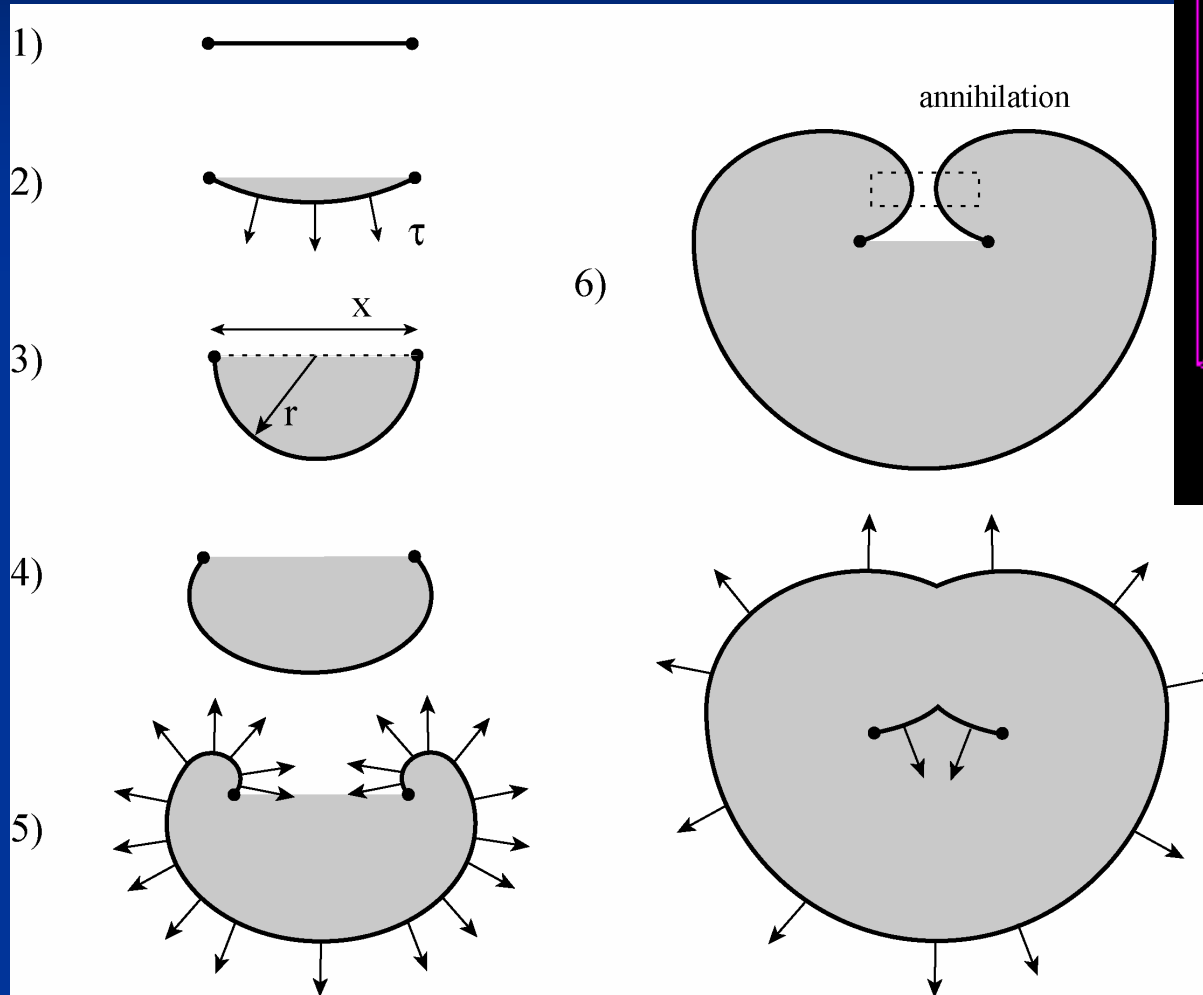


09:21

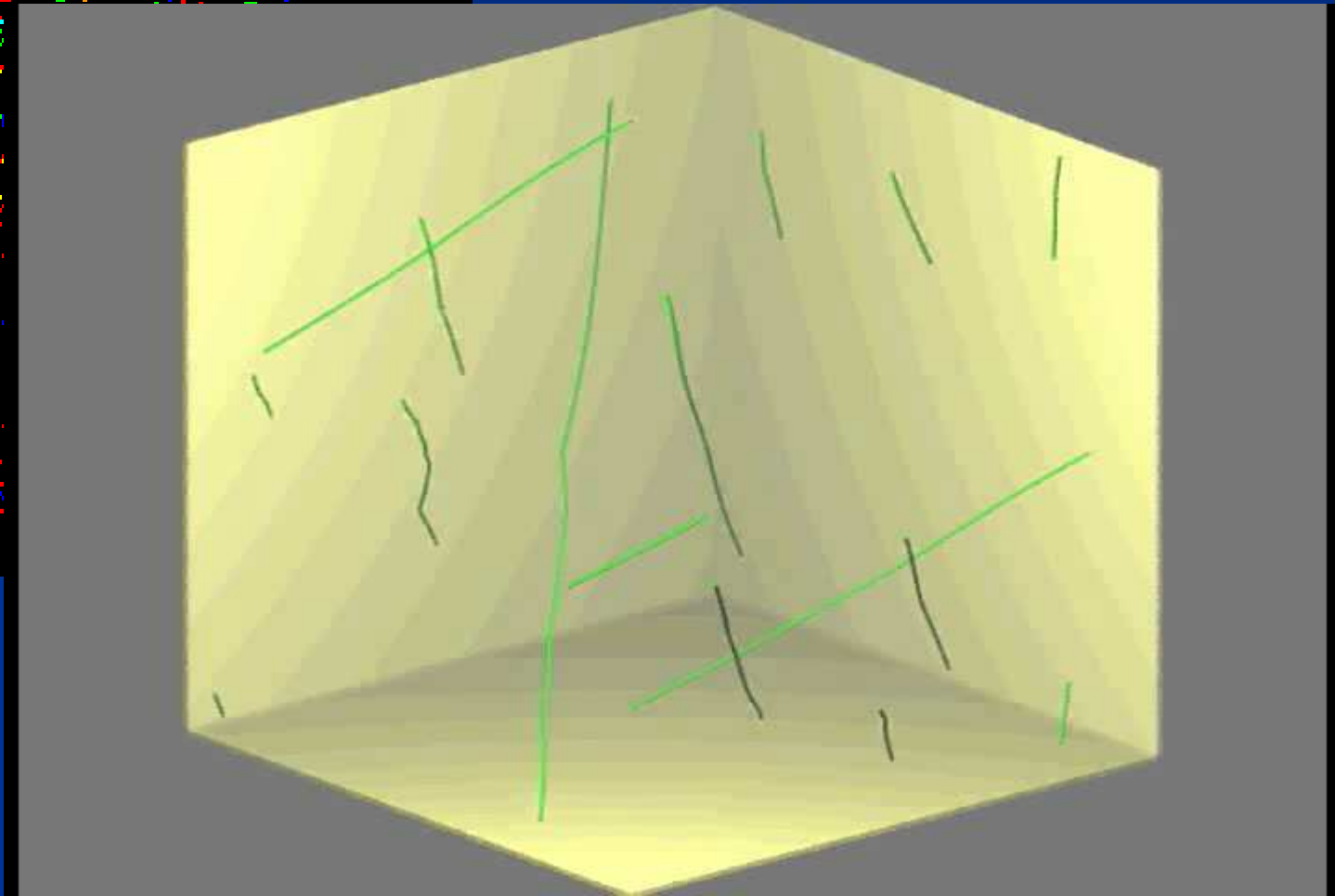
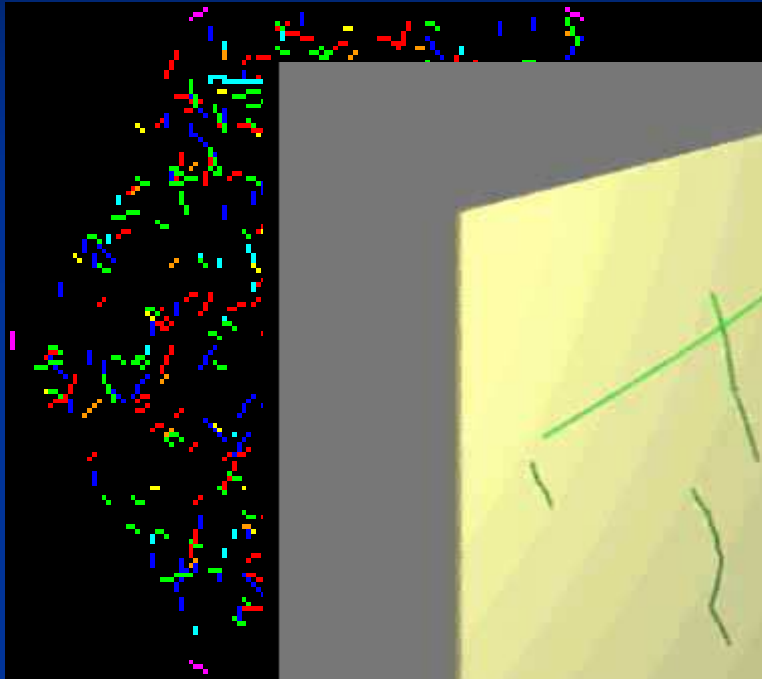


12

Frankův - Readův zdroj



ukotvené dislokace – dislokace lesa





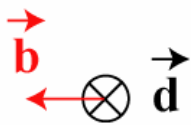
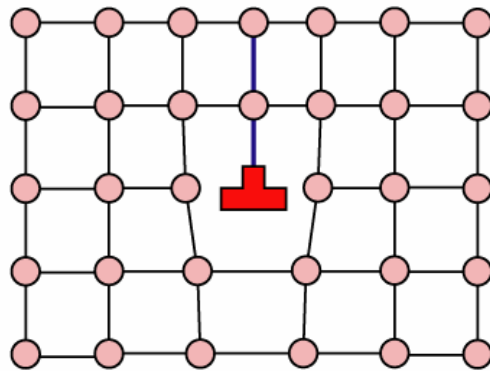
© Tomáš Kruml

09:21

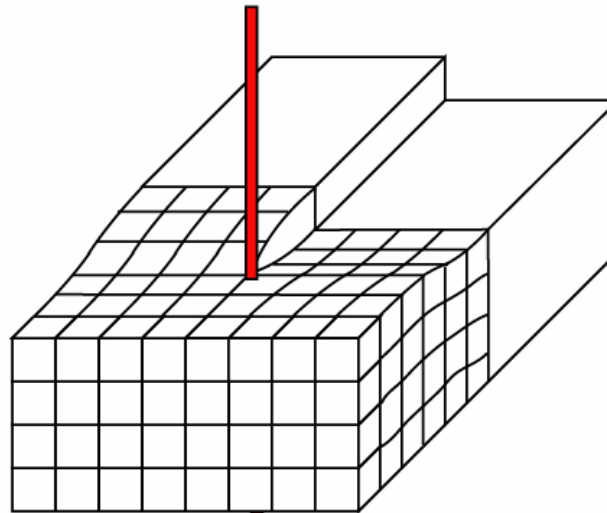
15

Tahový diagram monokrystalu (kovu)

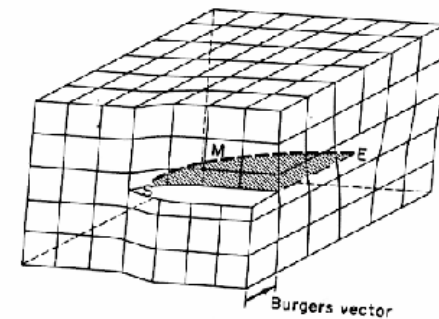
Dislocation coin



Dislocation vis



Dislocation mixte



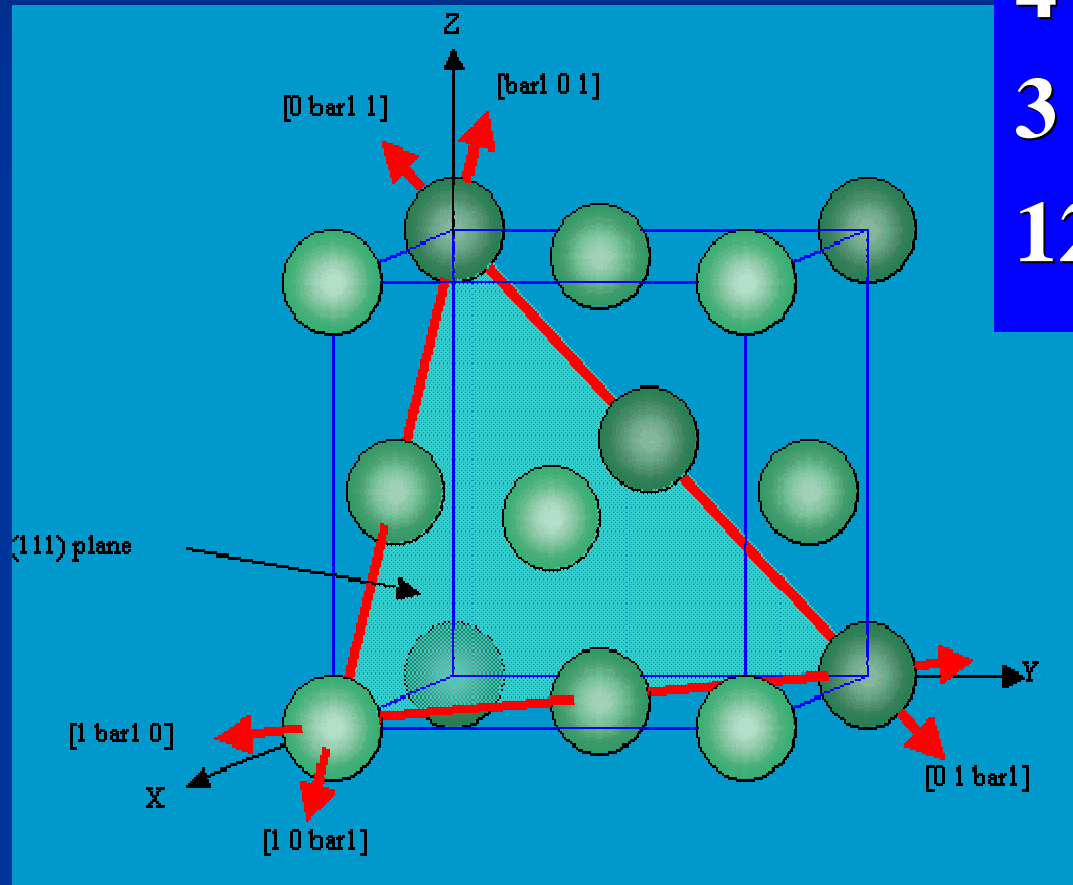
Tahový diagram monokrystalu (kovů)

fcc kovy – Al, Cu, γ -Fe, Ag, Au, Pt

4 roviny $\{111\}$

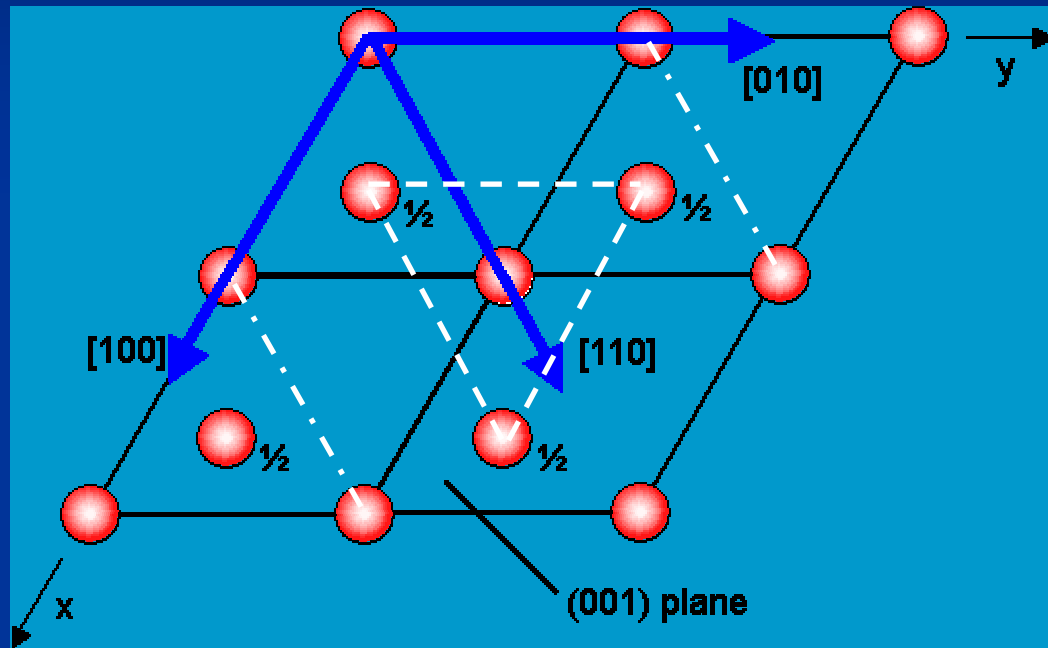
3 směry $\langle 110 \rangle$

12 skluzových systémů



Tahový diagram monokrystalu (kovu)

hcp kovy – Mg, Zn, Cd, Be, Ti



Základna

{0001}.....1x

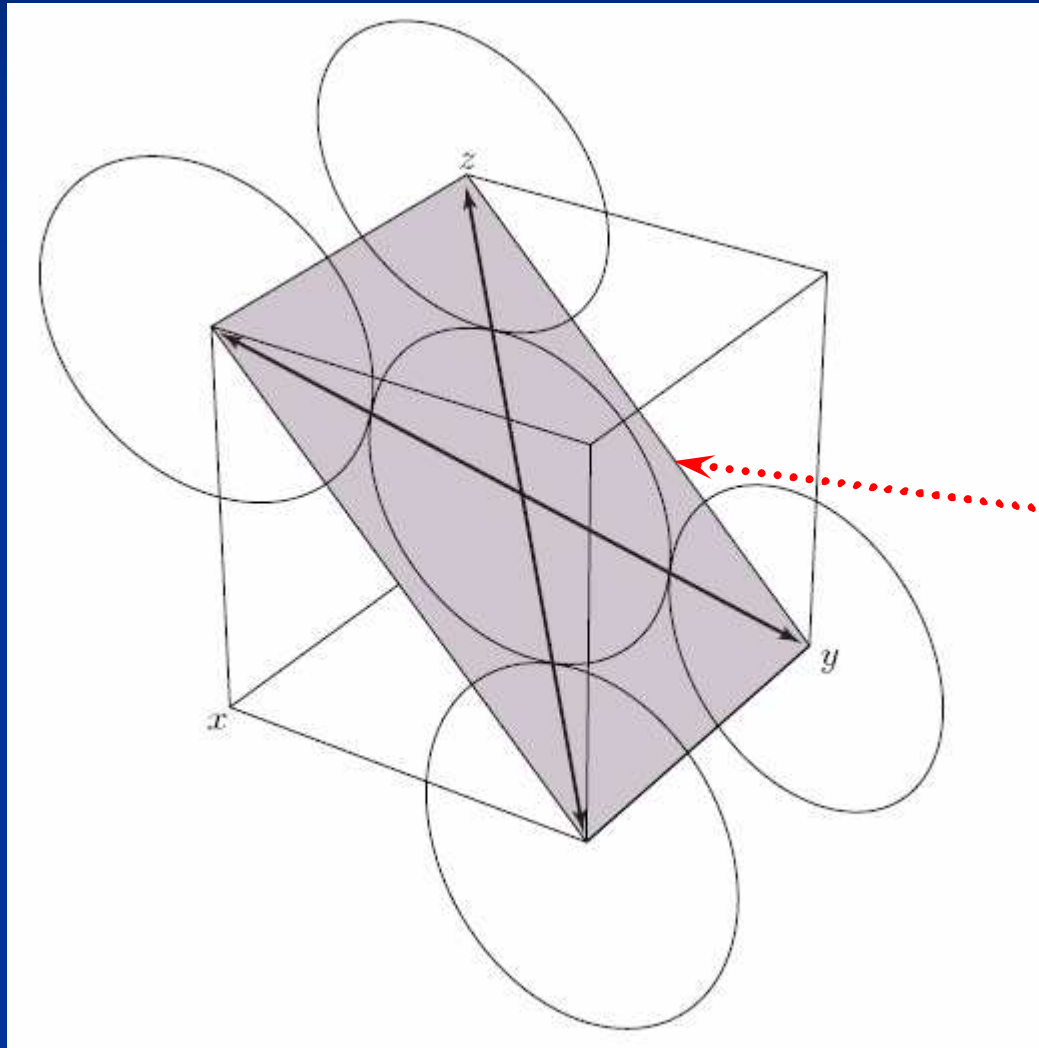
Směr

$\langle 1120 \rangle$3x

3 skluzové systémy

Tahový diagram monokrystalu (kovu)

bcc - α Fe, Mo, W



Směr

$\langle 111 \rangle$ 3

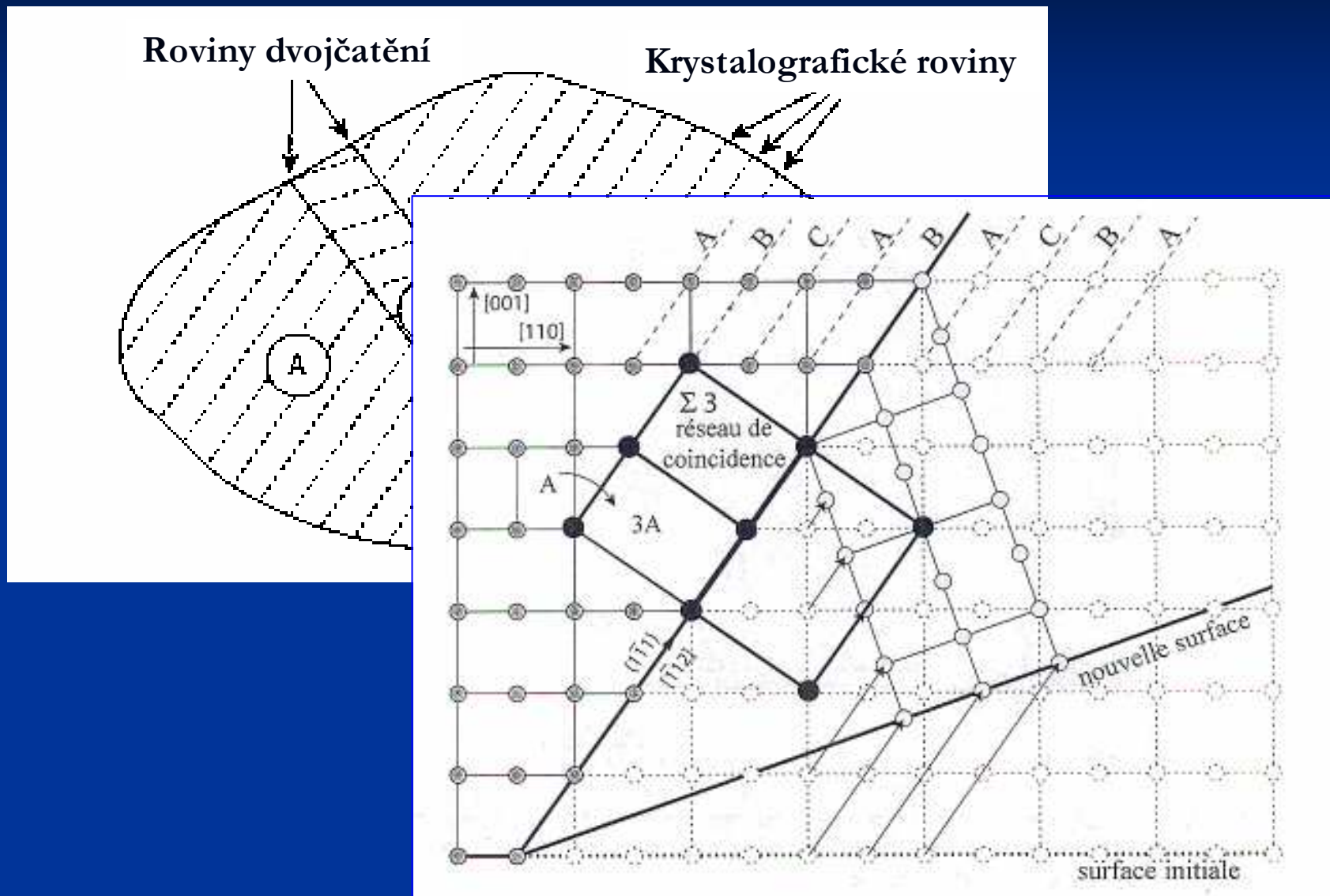
Roviny

$\{110\}$ 4

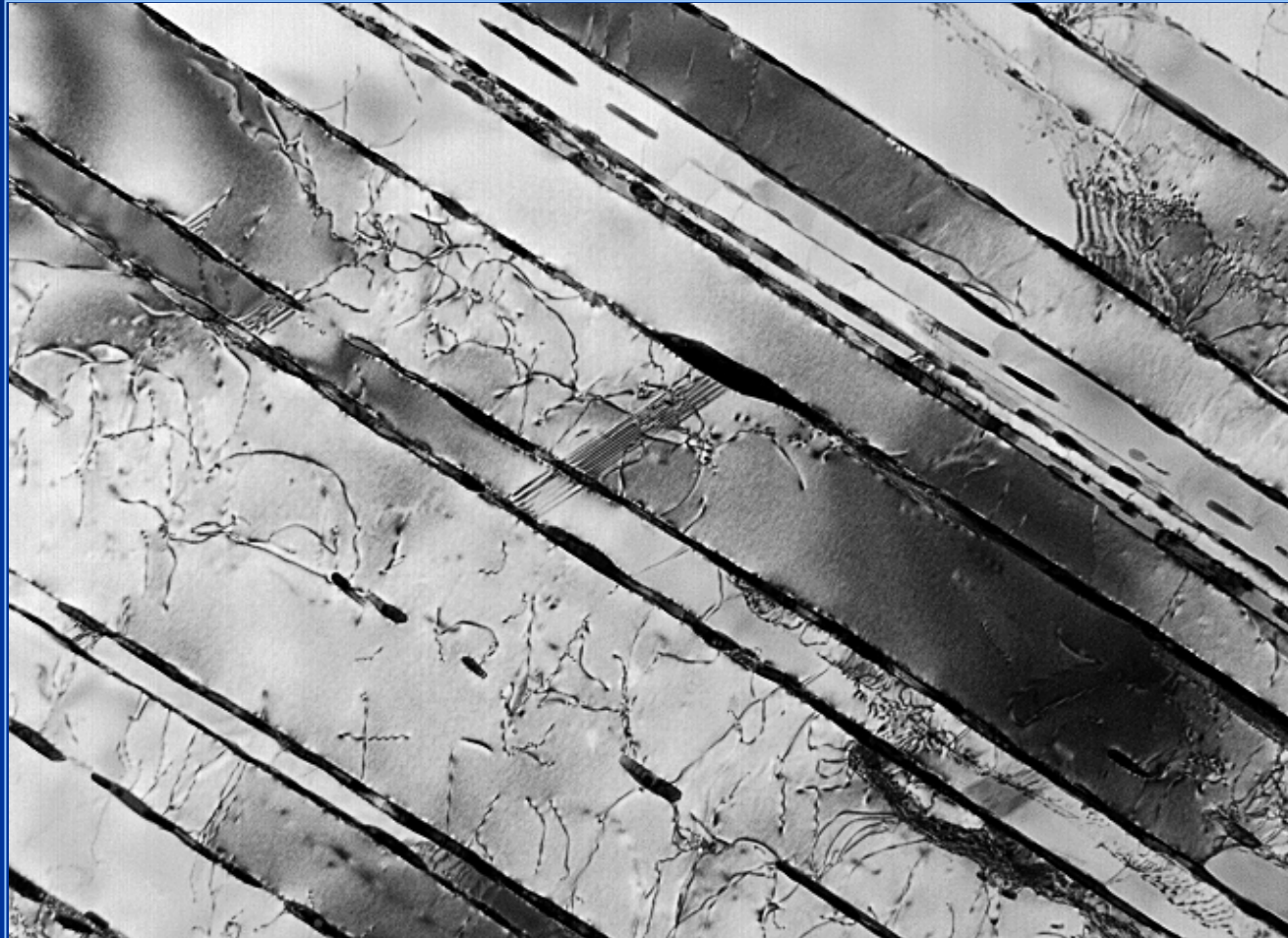
$\{211\}$ 4

$\{321\}$ 8

Dvojčatění

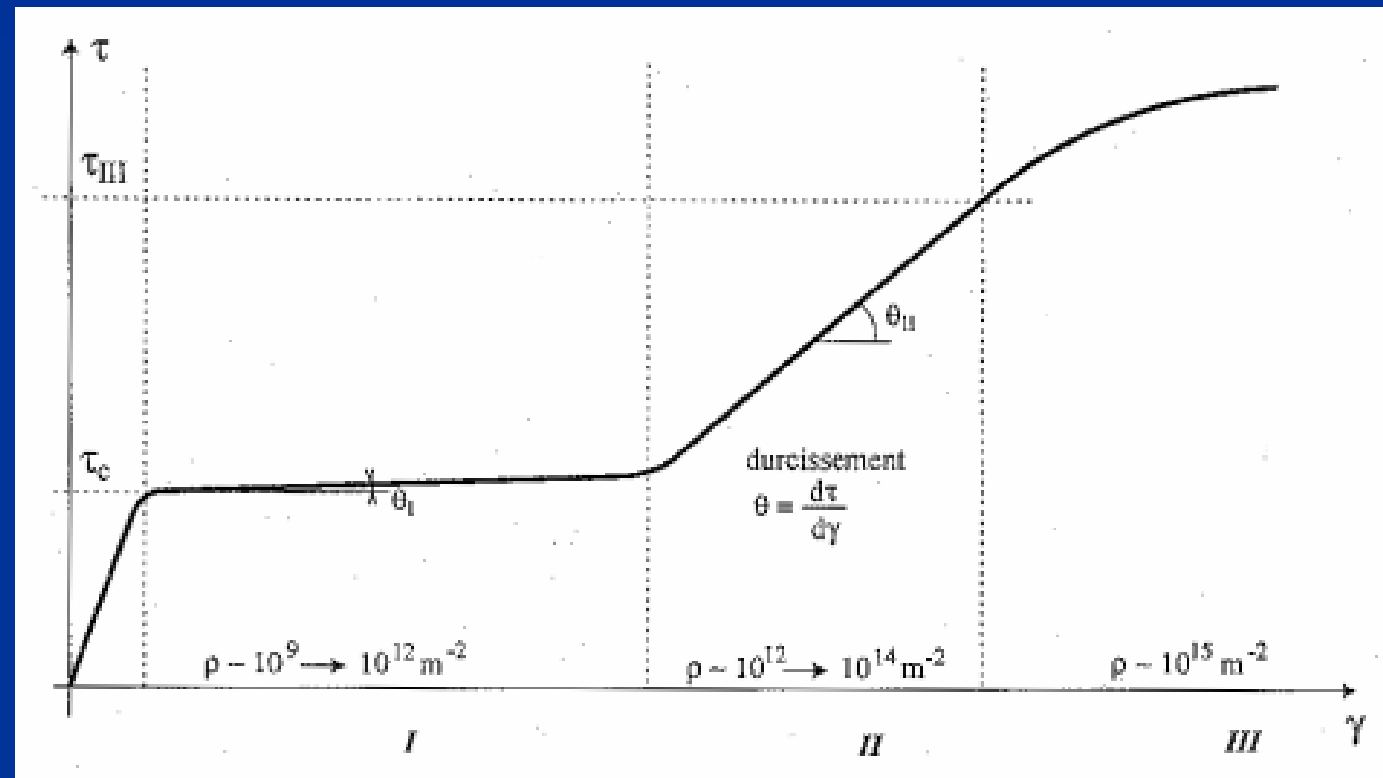


Dvojčatění



Tahový diagram monokrystalu (kovu)

- I. oblast snadného kluzu,
- II. oblast lineárního zpevnění,
- III. oblast odpevnění



Tahový diagram monokrystalu (kovu)

Co je typické pro jednotlivé mřížky

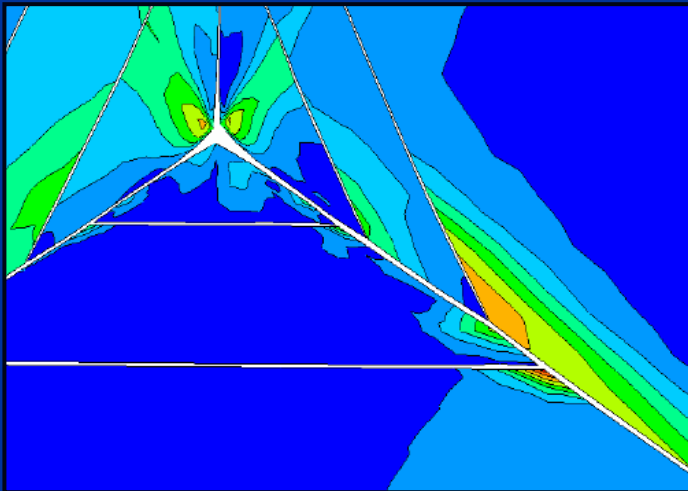
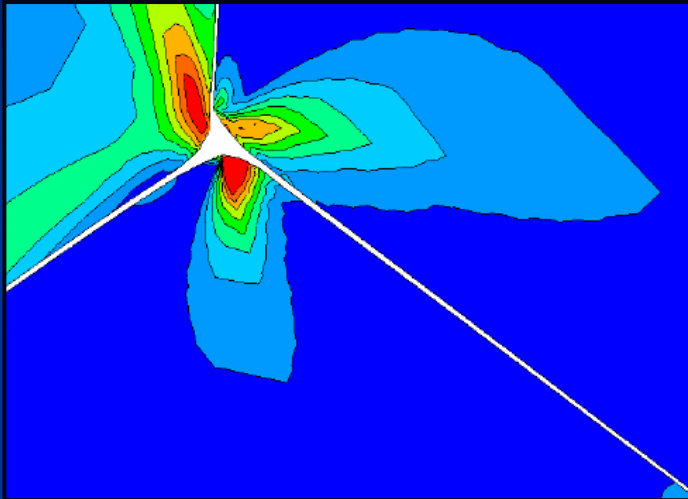
fcc: $\tau_{\text{krit}} = (0,3-0,8)\text{MPa}$; I stádium 30%;
II a III závisí na teplotě

hcp: $\tau_{\text{krit}} = (0,3-0,8)\text{MPa}$; I stádium 200%;
II a III závisí na teplotě

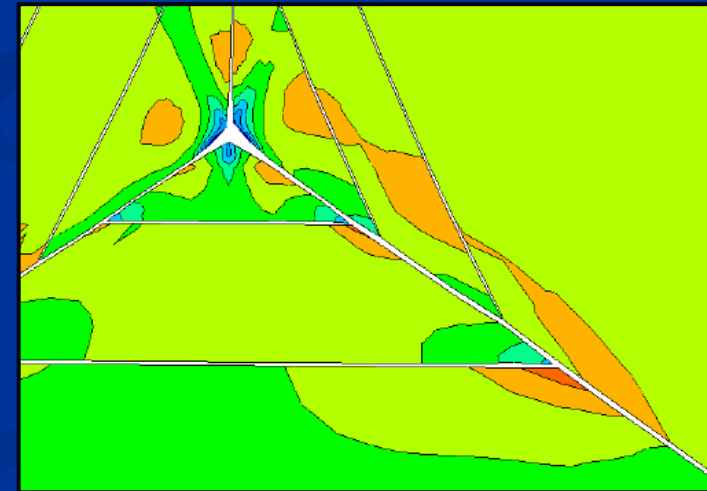
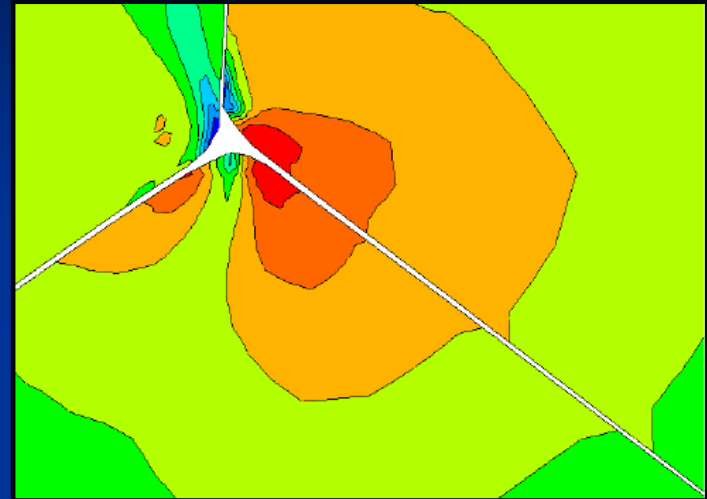
bcc: $\tau_{\text{krit}} = (30-80)\text{MPa}$ a závisí na teplotě;
I stádium velmi malé

Tahový diagram polykrystalu

Ekvivalentní plastická deformace



Hydrostatická napětí



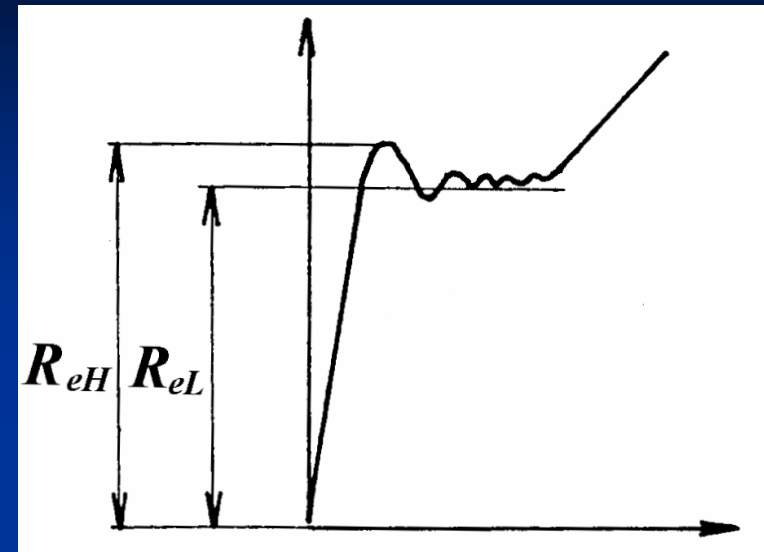
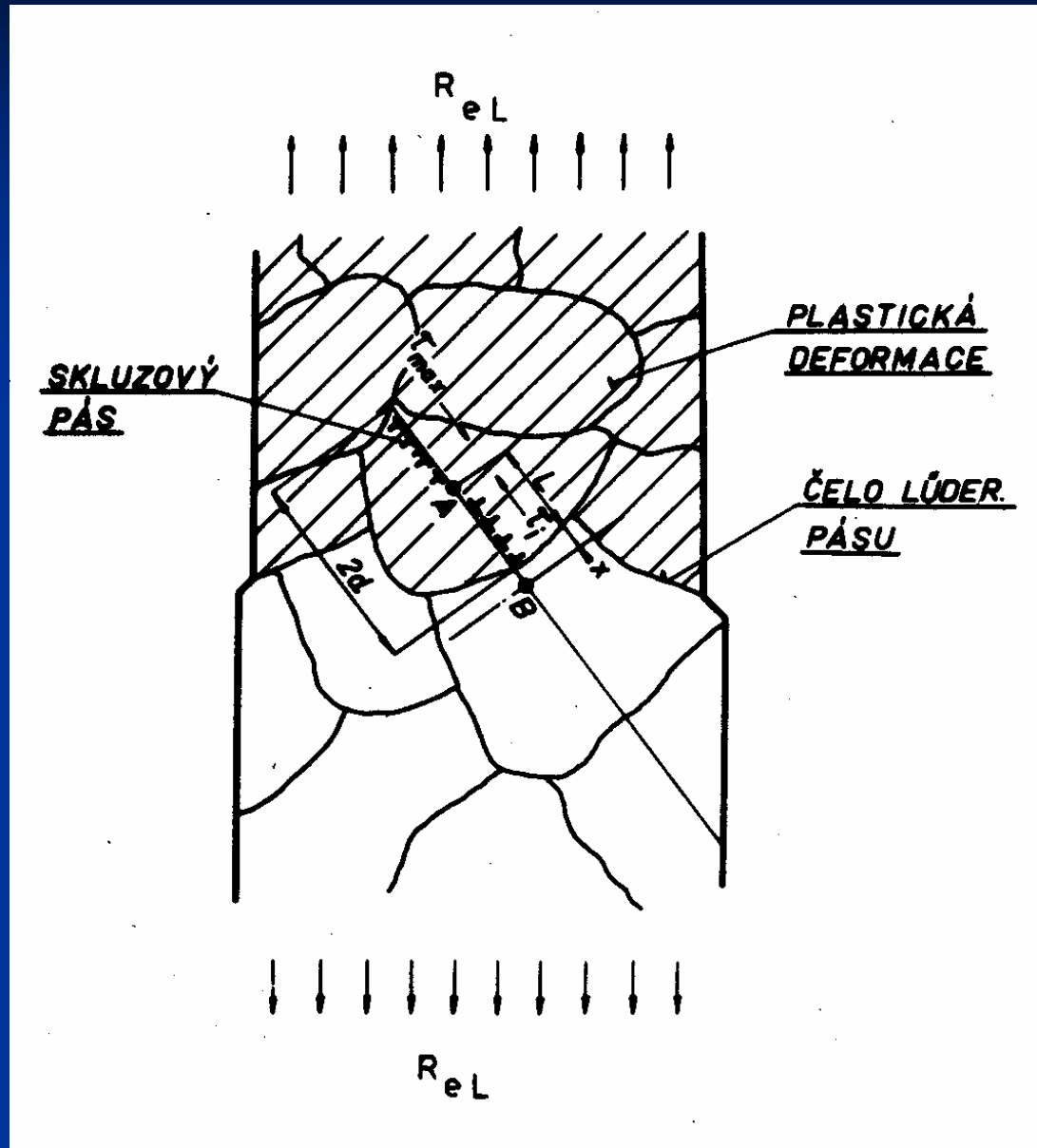
Tahový diagram polykrystalu

pohyblivé dislokace

aspoň 5 nezávislých skluzových systémů

- ❖ **fcc mřížka** (malé τ_{krit} + 12 nezávislých skluzových rovin) – **tvárný materiál**
- ❖ **hcp mřížka** (malé τ_{krit} + někdy jen 3 nezávislé skluzové roviny) – **zpravidla křehký**
- ❖ **bcc mřížka** (velké τ_{krit} + mnoho nezávislých skluzových rovin) – **pevný a tvárný**

Tahový diagram polykrystalu



Hall - Petchova rovnice



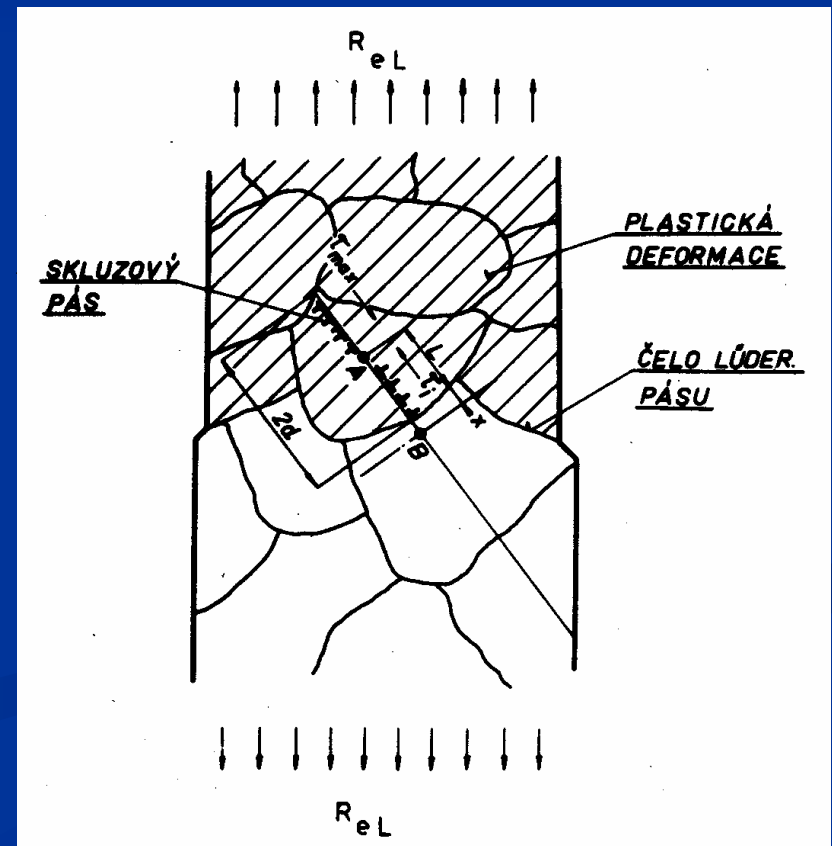
© Tomáš Kruml

Hall - Petchova rovnice

- τ_{\max} - smykové napětí působící ve skluzové rovině vyvolané vnějším napětím
- τ_i - napětí působící proti pohybu dislokací
- τ_D - napětí nutné ke vzniku (uvolnění dislokací)

koncentrace napětí v bodě B

$$(\tau_{\max} - \tau_i) \cdot \sqrt{\frac{L}{x}}$$



Hall - Petchova rovnice

podmínka plastické deformace na hranici

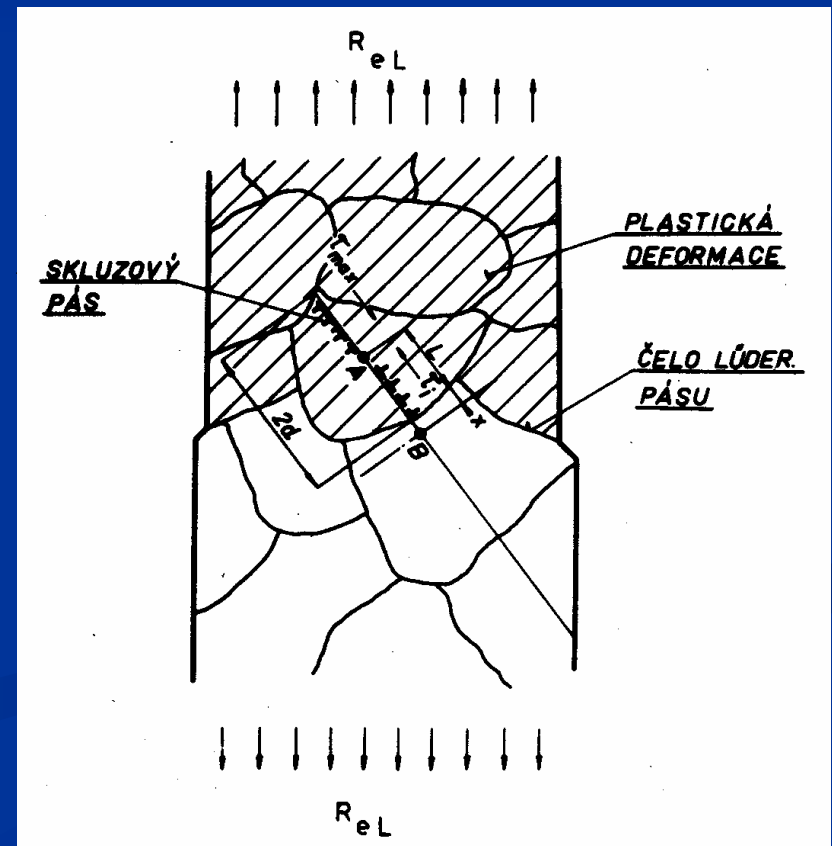
$$\tau_D = \tau_{\max} + (\tau_{\max} - \tau_i) \sqrt{\frac{L}{x}}$$

$$\tau_{\max} = \frac{\tau_i + \tau_D \sqrt{\frac{x}{L}}}{1 + \frac{x}{L}},$$

$$\tau_{\max} = \tau_i + k'_y d^{-1/2},$$

$$\sigma_i = 2\tau_i, k_y = 2^{3/2} k'_y$$

$$R_e = \sigma_i + k_y d^{-1/2}$$



Hall - Petchova rovnice

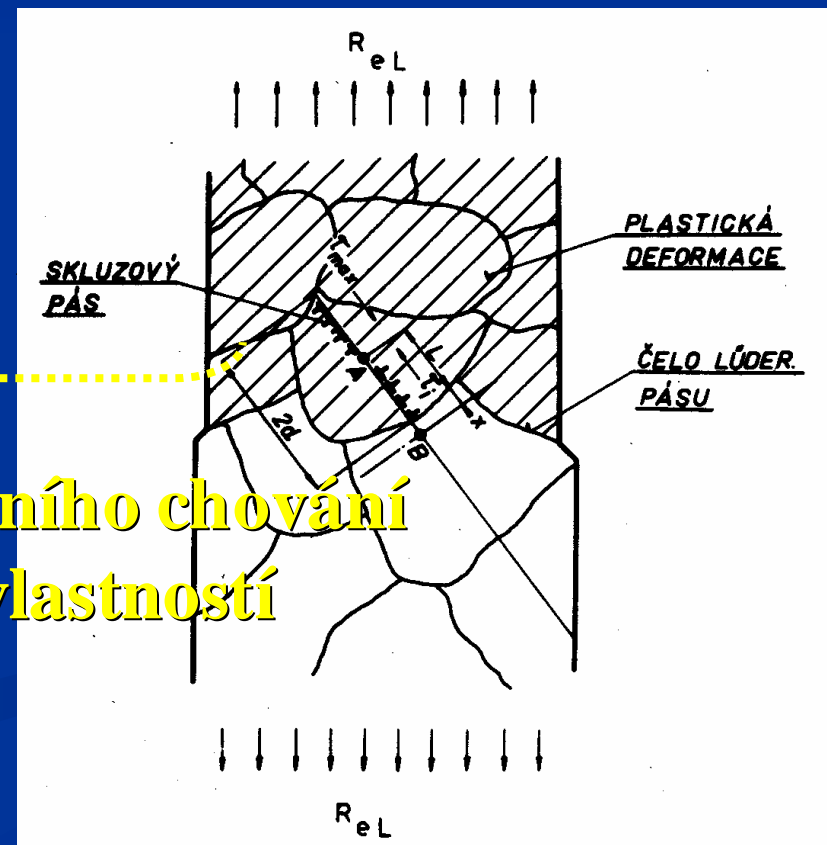
$$R_{eL} = \sigma_i + k \cdot d^{-1/2}$$

vliv velikosti zrna

napětí působící proti
pohybu dislokací



Ovládání deformačního chování
a pevnostních vlastností



$$\sigma_i = \sigma_0 + \sigma_\mu + \sigma_{t.r.} + \sigma_{p.r.}$$

σ_0 - P-N napětí

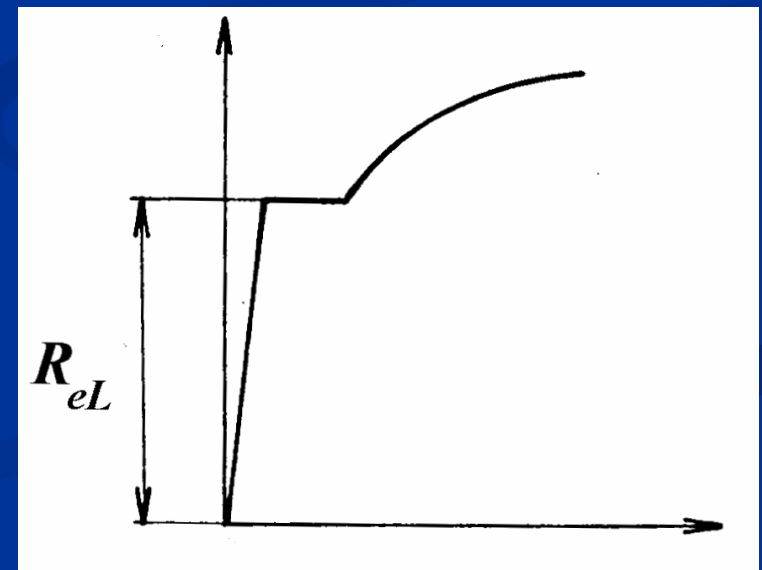
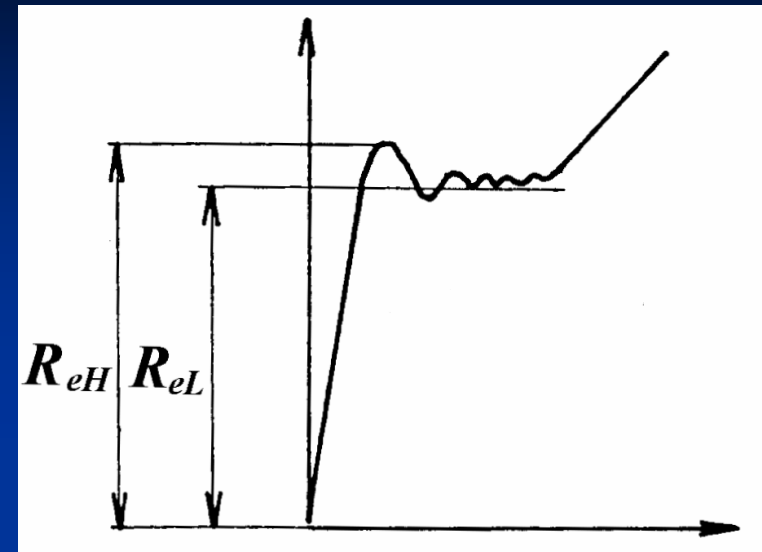
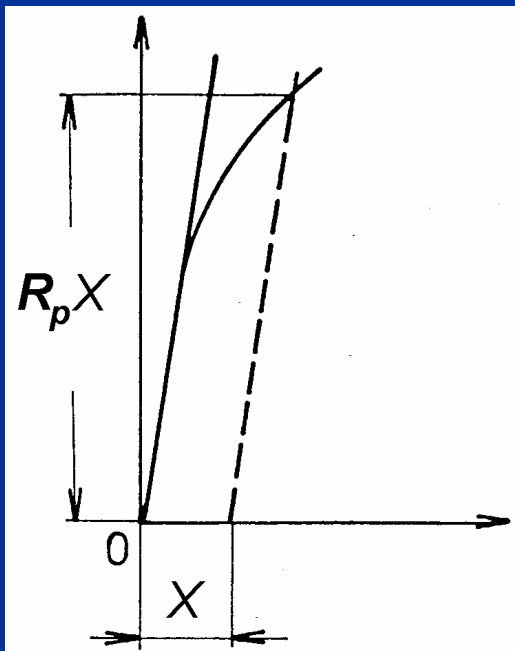
σ_μ - odpor vyvolaný přítomností jiných dislokací

$\sigma_{t.r.}$ - zpevnění tuhým roztokem

$\sigma_{p.r.}$ - precipitační zpevnění

Mez kluzu

- ❖ Vliv zpevnění (σ_i)
- ❖ Vliv intersticiálních příměsí
- ❖ Vliv teploty
- ❖ Vliv rychlosti zatěžování



Skutečné napětí – skutečná deformace

Skutečné napětí

$$\sigma = \frac{F}{S}$$

$$\sigma = R \frac{S_0}{S}$$

Skutečná deformace

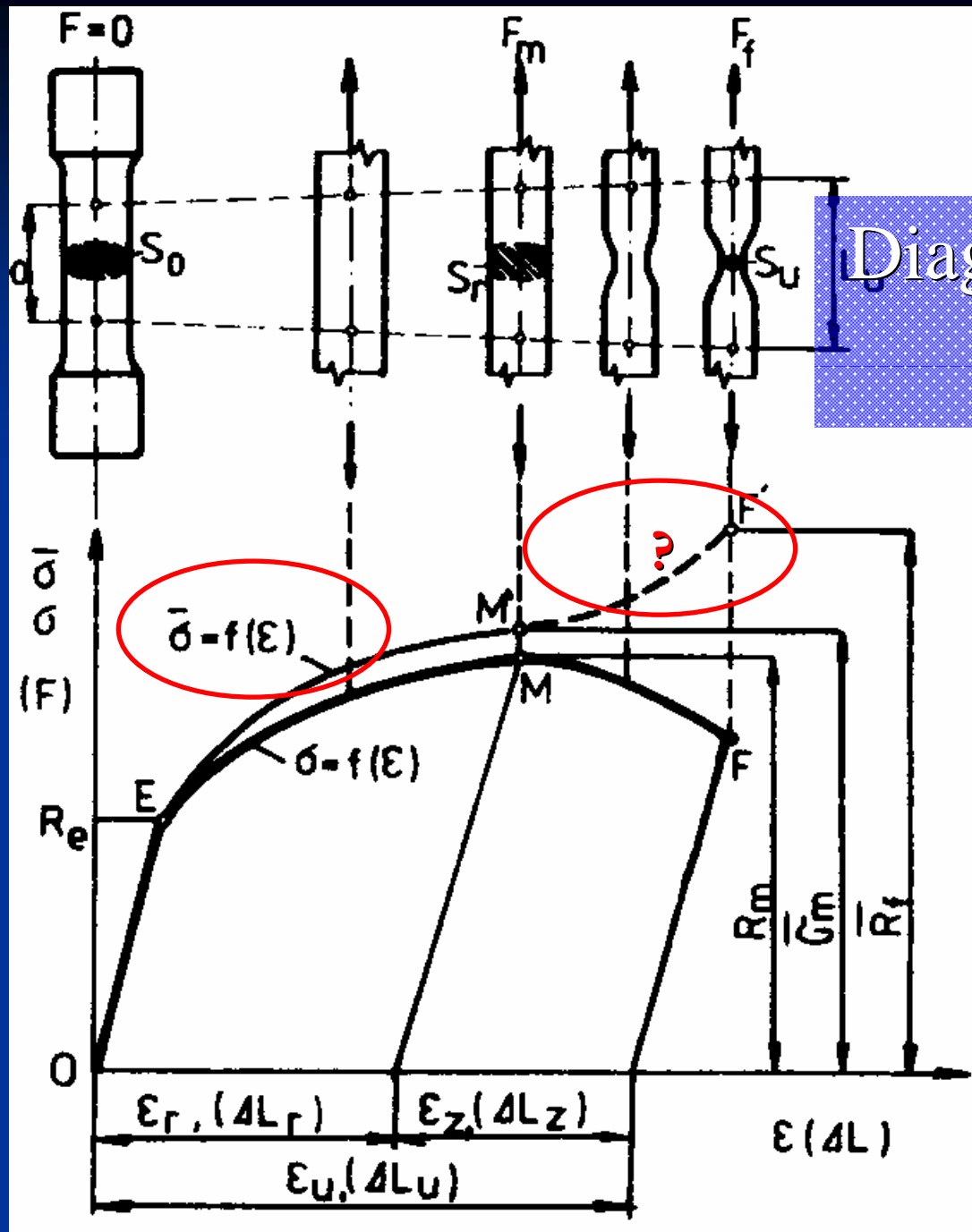
$$\frac{S_0}{S} = \frac{L}{L_0} = \frac{\Delta L + L_0}{L_0} = (\varepsilon + 1) \quad \sigma = R(1 + \varepsilon)$$

$$\bar{\varepsilon} = \int_{L_0}^{L_1} \frac{dL}{L} = \ln L_1 - \ln L_0 = \ln\left(\frac{L_1}{L_0}\right) = \ln\left(\frac{\Delta L}{L_0} + 1\right) = \ln(\varepsilon + 1)$$

$$\bar{\varepsilon} = \ln\left(\frac{S_0}{S}\right)$$

Zkouška tahem

Diagram skutečné napětí –
skutečná deformace



Skutečné napětí – skutečná deformace

Holomonův vztah

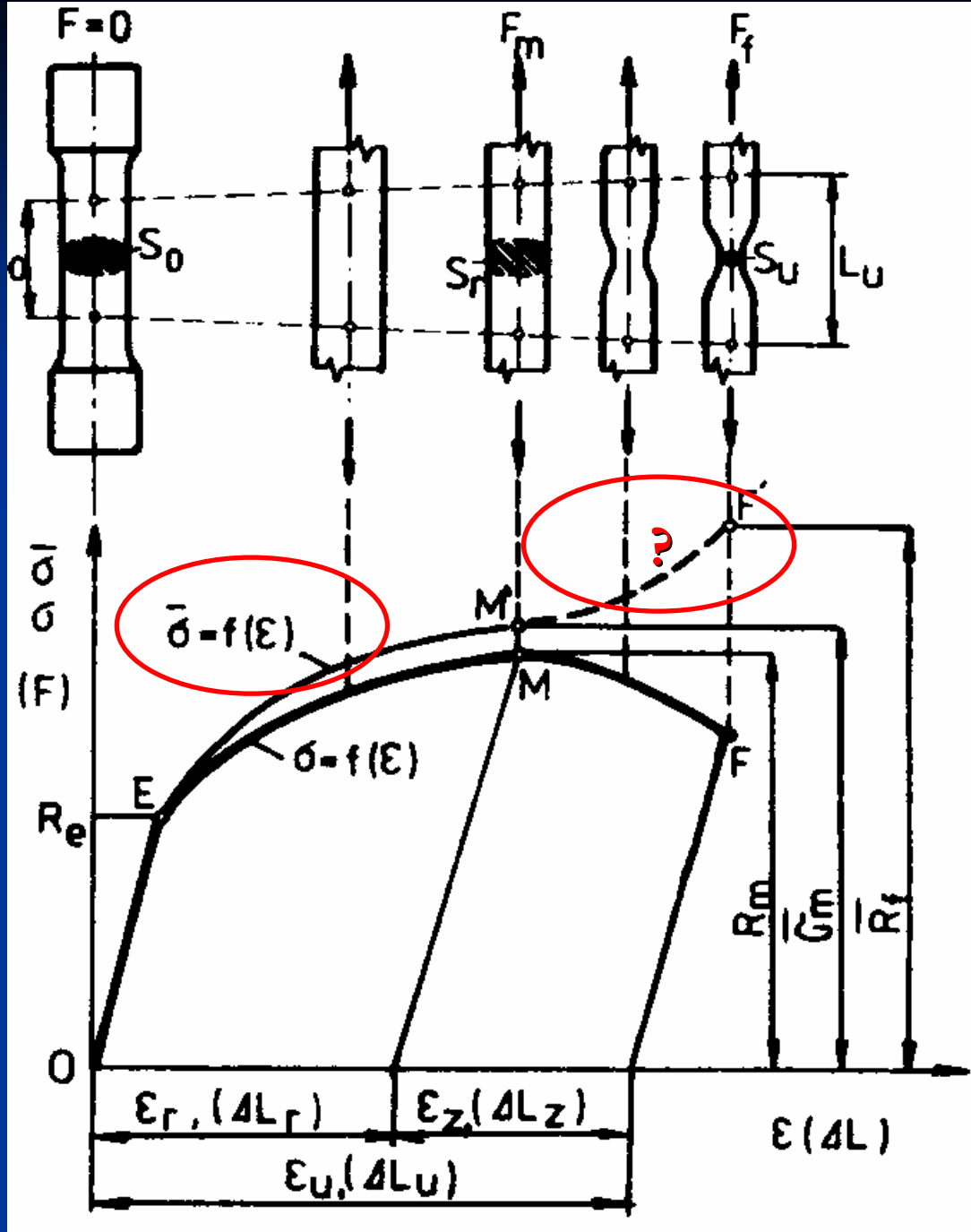
$$\sigma = k \bar{\varepsilon}_p^n,$$

k - koeficient deformačního zpevnění

n - exponent deformačního zpevnění

Rambergův - Osgoodův vztah

$$\bar{\varepsilon} = \varepsilon_{el} + \bar{\varepsilon}_p = \frac{\sigma}{E} + \left(\frac{\sigma}{k} \right)^{\frac{1}{n}}$$



Skutečné napětí – skutečná deformace

**krček – trojosá napjatost !
popis lokalizované deformace**

$$\sigma_n = \frac{F}{S_a}$$

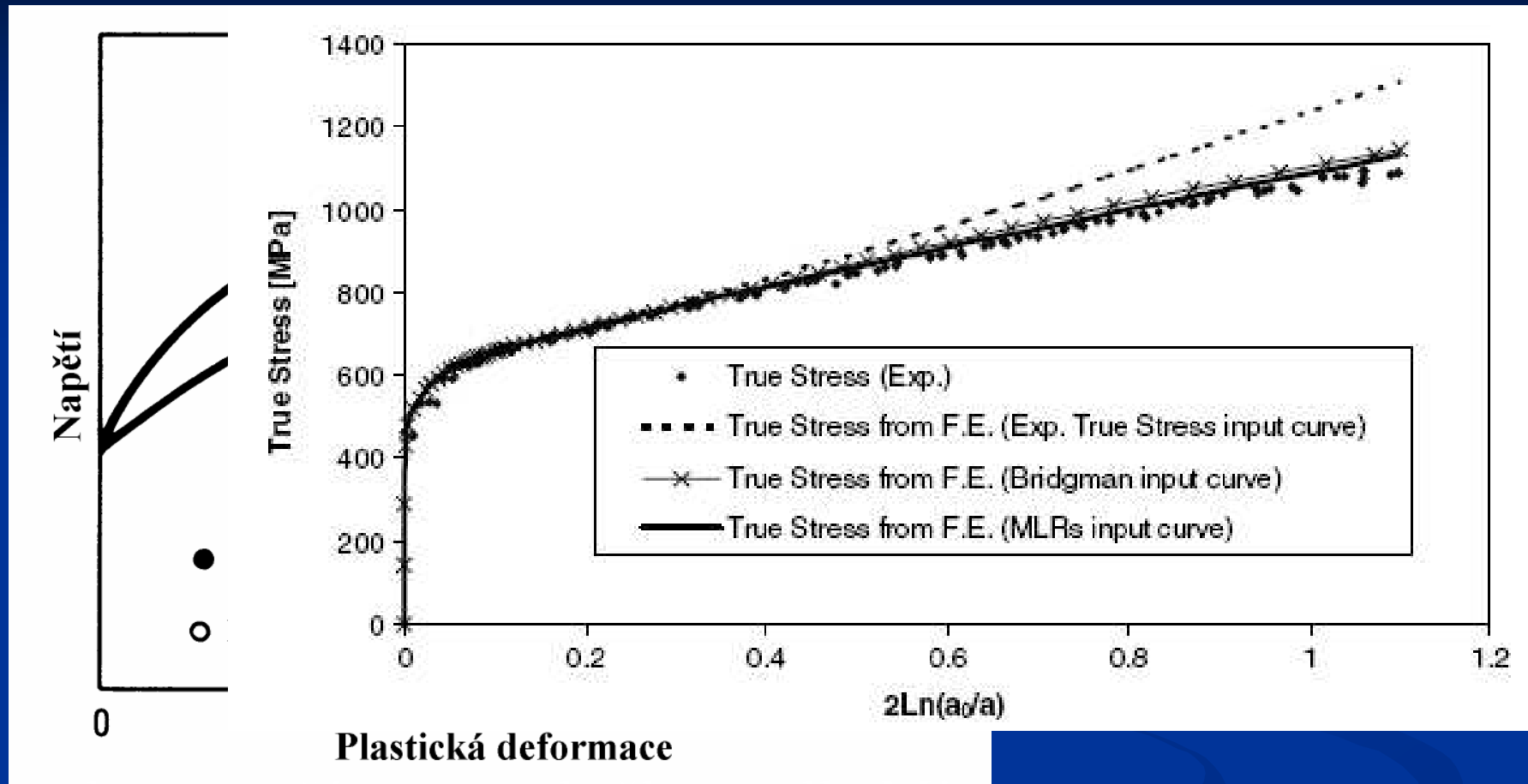
přepočítání nominálního napětí na hodnotu ekvivalentního napětí:

$$\sigma_B \rightarrow (2\tau_{\max}) = \sigma_n \cdot B$$

$$B = 0,83 - 0,1786 \cdot \log \bar{\epsilon}$$

korekce na přítomnost krčku podle Bridgmana

Skutečné napětí – skutečná deformace



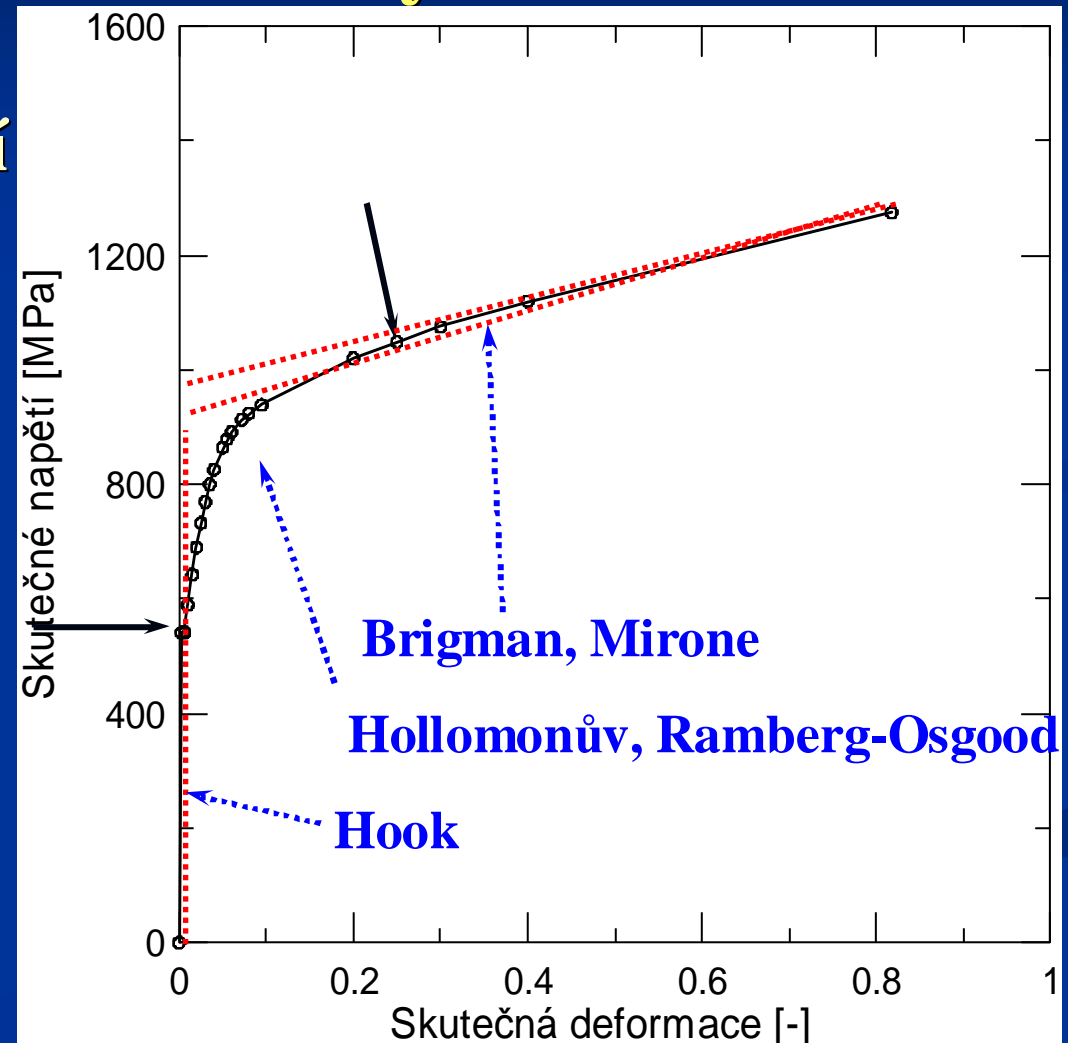
korekce na přítomnost krčku podle Mirone

$$\sigma(\bar{\varepsilon}) = 1 - 0,6058(\bar{\varepsilon} - \bar{\varepsilon}_{pn})^2 + 0,6317(\bar{\varepsilon} - \bar{\varepsilon}_{pn})^3 - 0,2107(\bar{\varepsilon} - \bar{\varepsilon}_{pn})^4$$

Skutečné napětí – skutečná deformace

Výpočty MKP – zadání křivky:

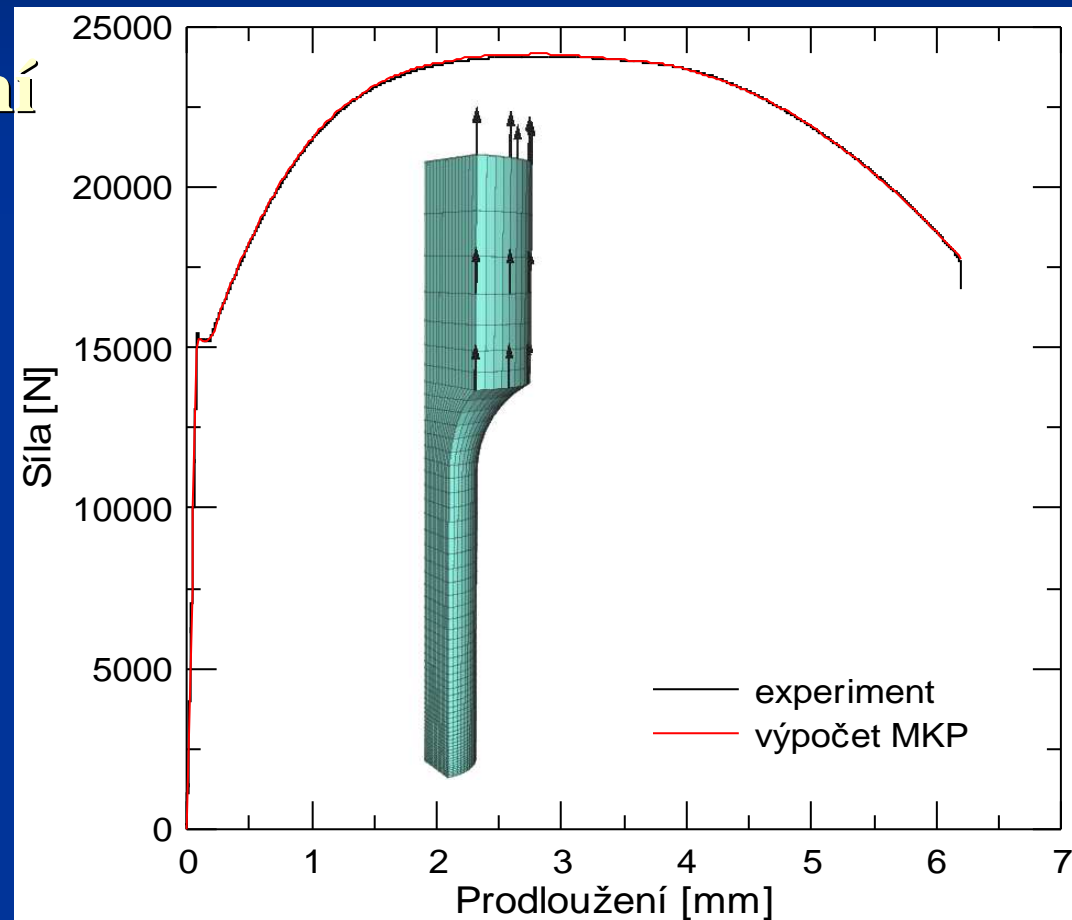
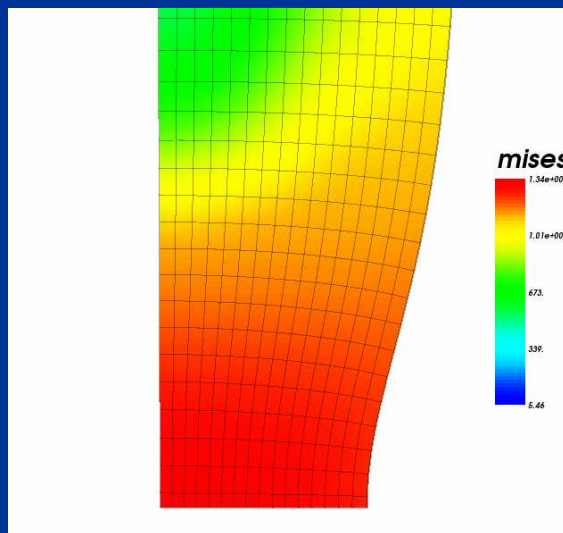
- ❖ bilineární
- ❖ po částech lineární
- ❖ E, n (N)
- ❖ křivka



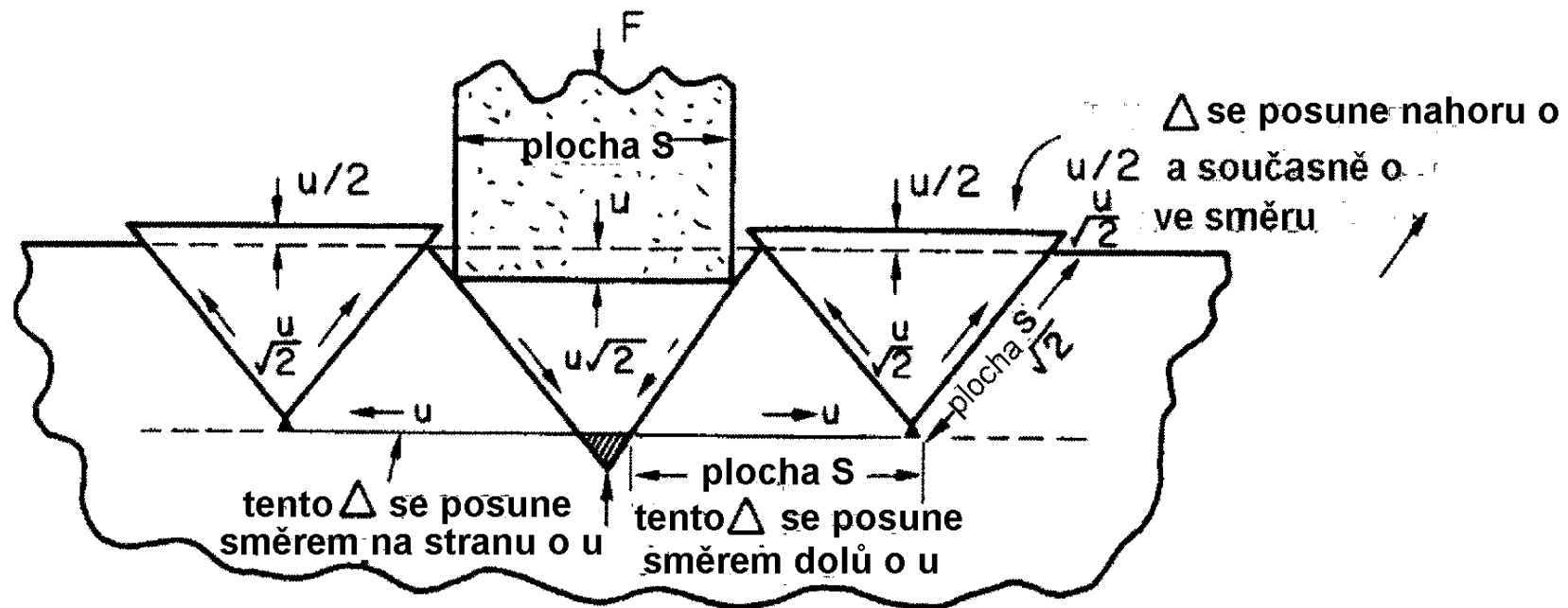
Skutečné napětí – skutečná deformace

Výpočty MKP – zadání křivky:

- ❖ bilineární
- ❖ po částech lineární
- ❖ E , n (N)
- ❖ křivka



Tahový diagram z indentace



$$F \cdot u = 2 \cdot \left(u\sqrt{2} \cdot \frac{\tau_e S}{\sqrt{2}} \right) + 2(uS\tau_e) + 4 \cdot \left(\frac{u}{\sqrt{2}} \cdot \frac{S\tau_e}{\sqrt{2}} \right)$$

Tahový diagram z indentace

$$F = 2\tau_e S + 2\tau_e S + 2\tau_e S$$

$$F = 6\tau_e S$$

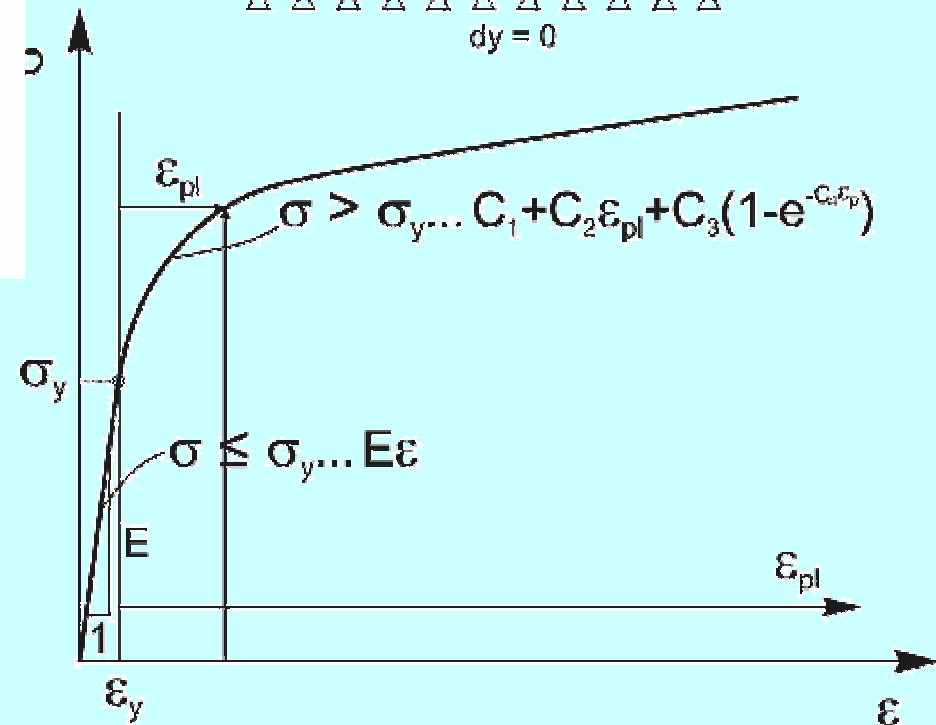
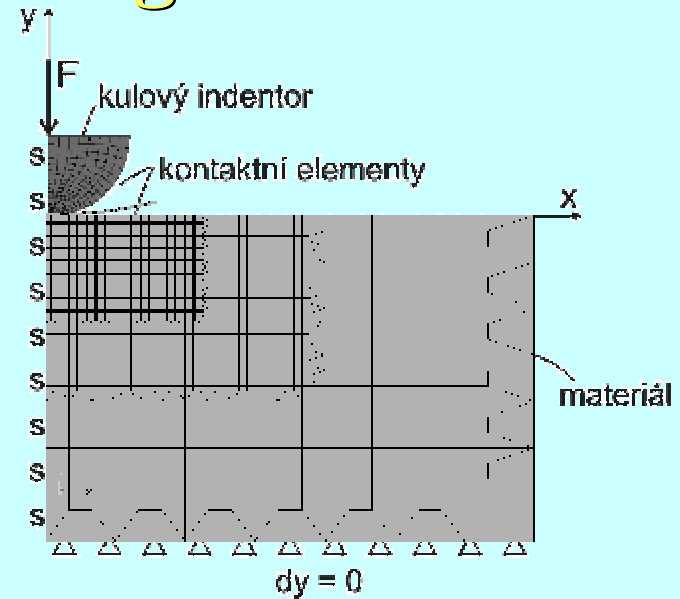
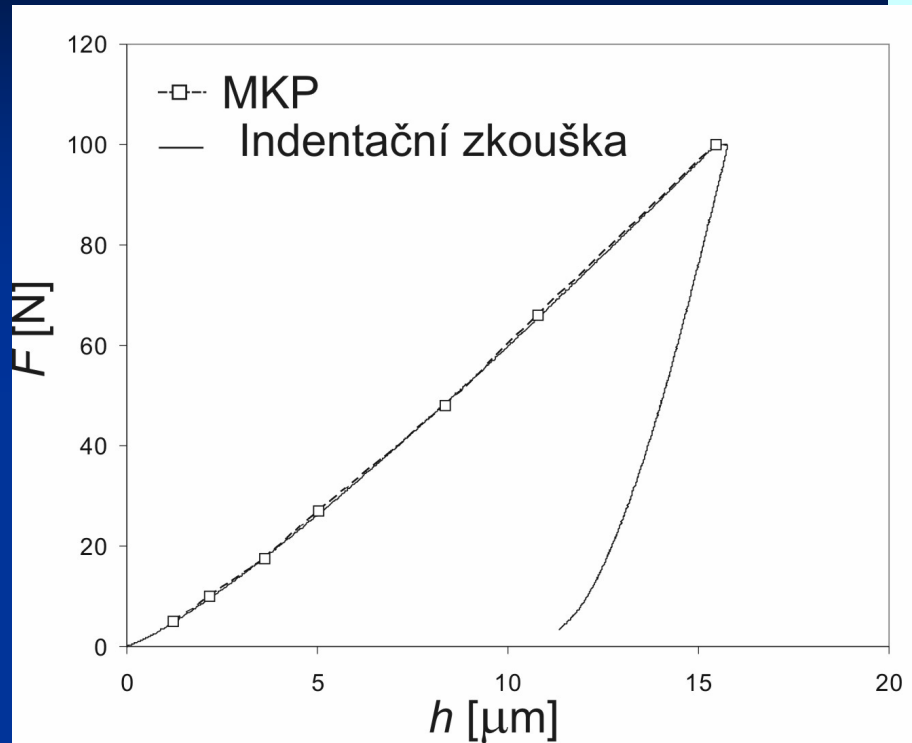


$$\frac{F}{S} = H = 6\tau_e = 3Re$$

$$\left[\frac{kp}{mm^2} \right]; kp = 9,81N$$

$$9,81H = 3Re, \quad H = 0,31Re$$

Tahový diagram z indentace



Tahový diagram z indentace

$$\sigma = \sigma_y + R_0 \varepsilon_{pl} + R_0 (1 - e^{-b\varepsilon_{pl}})$$

C1	C2	C3	C4
551,5	345,7	419,4	27,8

