

ČÁROVÉ PORUCHY

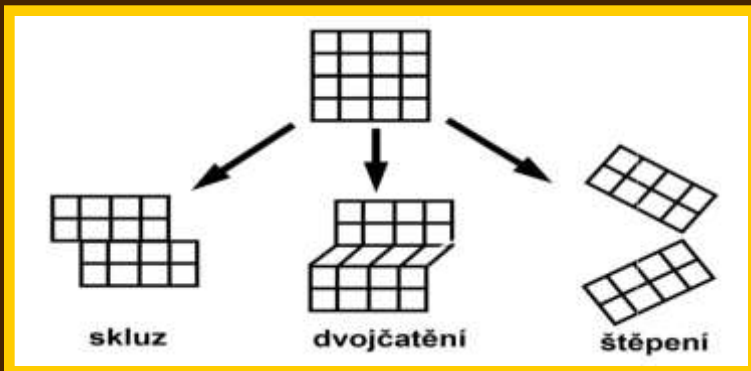
- porušení pravidelnosti mřížky v blízkém okolí určité čáry
(zbývající rozměry jsou nejvýše několik meziatomových vzdáleností)
- vytváří napěťové pole dlouhého dosahu

čárové poruchy

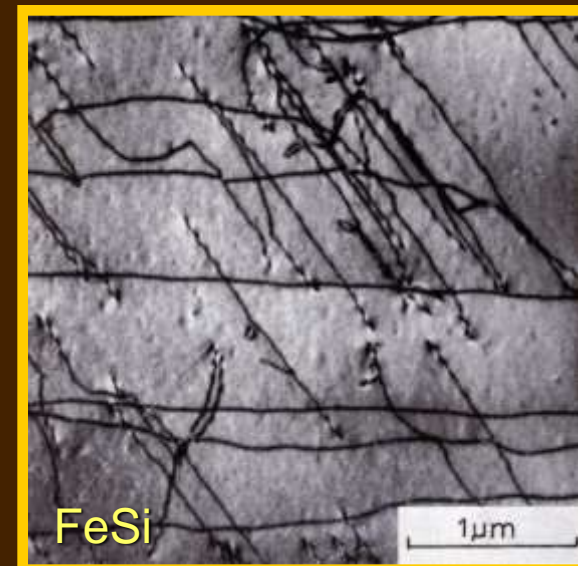
- dislokace
- řetízky vakancí, intersticiálů (vznik při tváření kovů)

Dislokace

- jako poruchy krystalové mřížky je zavedli ve fyzice pevných látek v roce 1934 Taylor a Orowan
(jako východisko z vážného rozporu při studiu plastické deformace kovů)
- o 20 let později byly experimentálně prokázány TEM



Možnosti deformace krystalu



Dislokace jako mřížkové poruchy dovolily vysvětlit rozdíly v teoreticky vypočtených hodnotách a naměřených hodnotách kritického skluzového napětí.

kritické skluzové napětí  **teoretické hodnoty** - stovky MPa
naměřené hodnoty - setiny až desetiny MPa

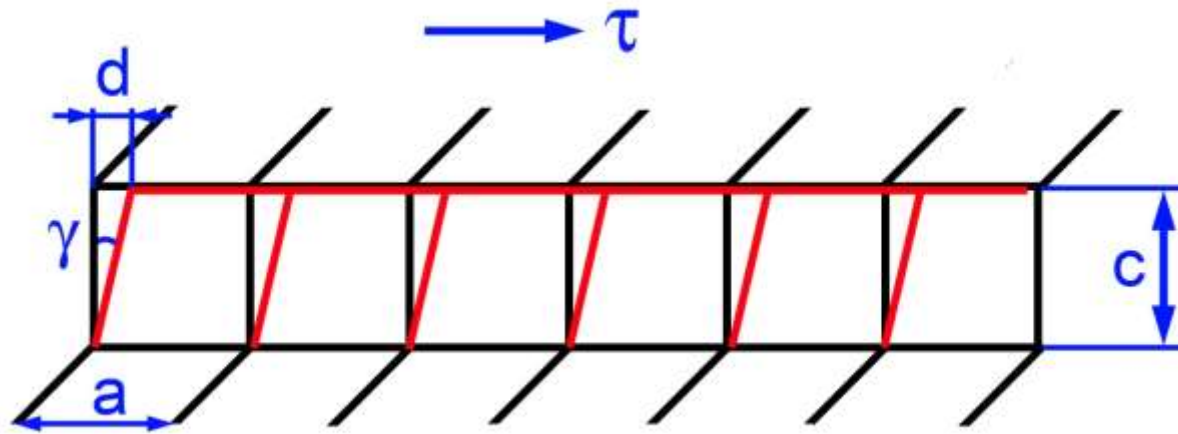
První výklad skluzu a kritického skluzového napětí z atomových představ podal **Frenkel (1926)**

Frenkelova teorie kritického skluzového napětí

Předpoklady

- ideální krystal
- obě části krystalu se posunují podél určité krystalografické roviny jako tuhé celky
- působící napětí musí současně v celé rovině překonat meziatomové síly
(ty jsou periodickou funkcí vzájemného posunutí obou částí krystalu s periodou rovnou meziatomové vzdálenosti – předpoklad sinusový průběh)

Frenkelova teorie kritického skluzového napětí

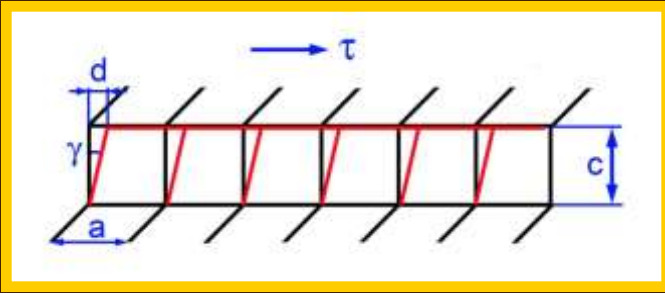


Obecný tvar $\tau = A \cdot \sin \frac{2\pi}{a} \cdot d$ pokud $d \ll a$, pak $\sin x \approx x$

$$\tau = A \cdot \frac{2\pi}{a} \cdot d \Rightarrow A = \tau \cdot \frac{a}{2\pi d} \quad \text{platí } \tau = G \cdot \gamma \quad \text{a} \quad \gamma = \frac{d}{c} \Rightarrow \tau = G \frac{d}{c}$$

$$A = \tau \cdot \frac{a}{2\pi d} = G \cdot \frac{d}{c} \cdot \frac{a}{2\pi d} = \frac{G}{2\pi} \cdot \frac{a}{c}$$

Frenkelova teorie kritického skluzového napětí



Zpětným dosazením do původní rovnice se dostane

$$\tau = \frac{G}{2\pi} \cdot \frac{a}{c} \cdot \sin \frac{2\pi}{a} \cdot d \quad \tau \text{ bude maximální, pokud } \sin \frac{2\pi}{a} \cdot d = 1$$

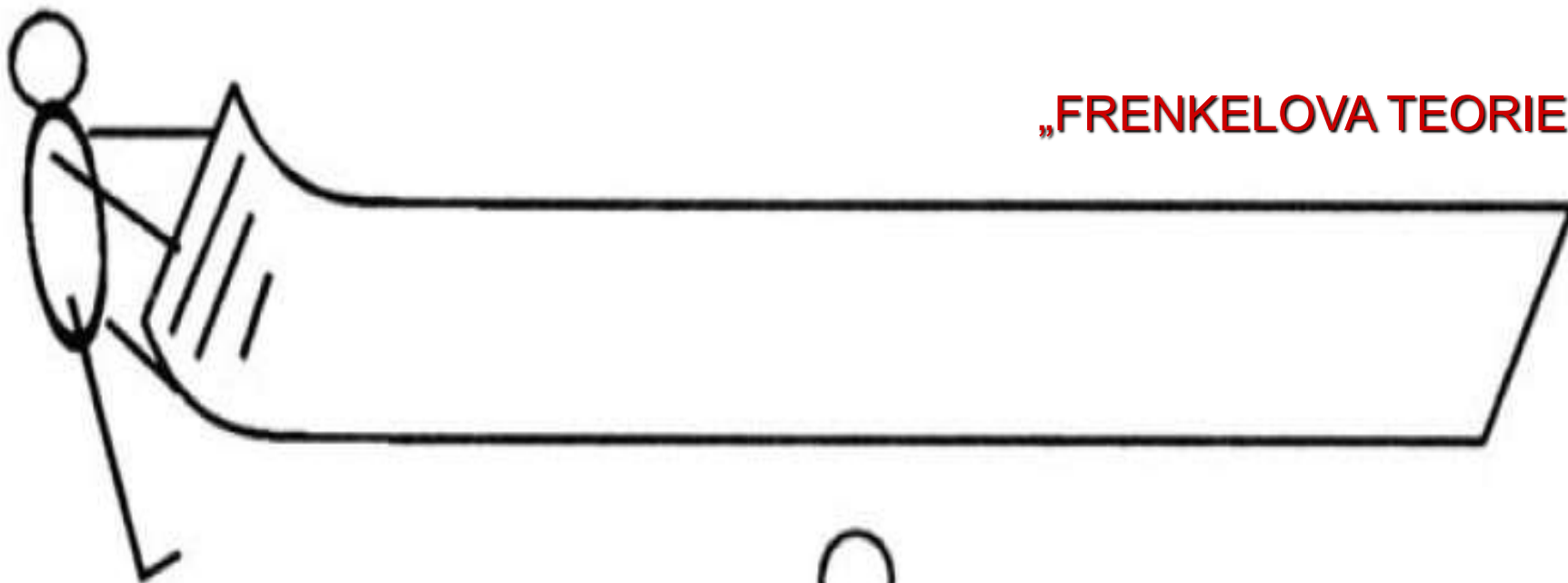
U krychlové mřížky $a = c$ a pokud $d \ll a \rightarrow \tau_{krit.} = \frac{G}{2\pi}$

Za předpokladu, že se uvažuje i vliv dalších atomů, lze dospět ke vztahu

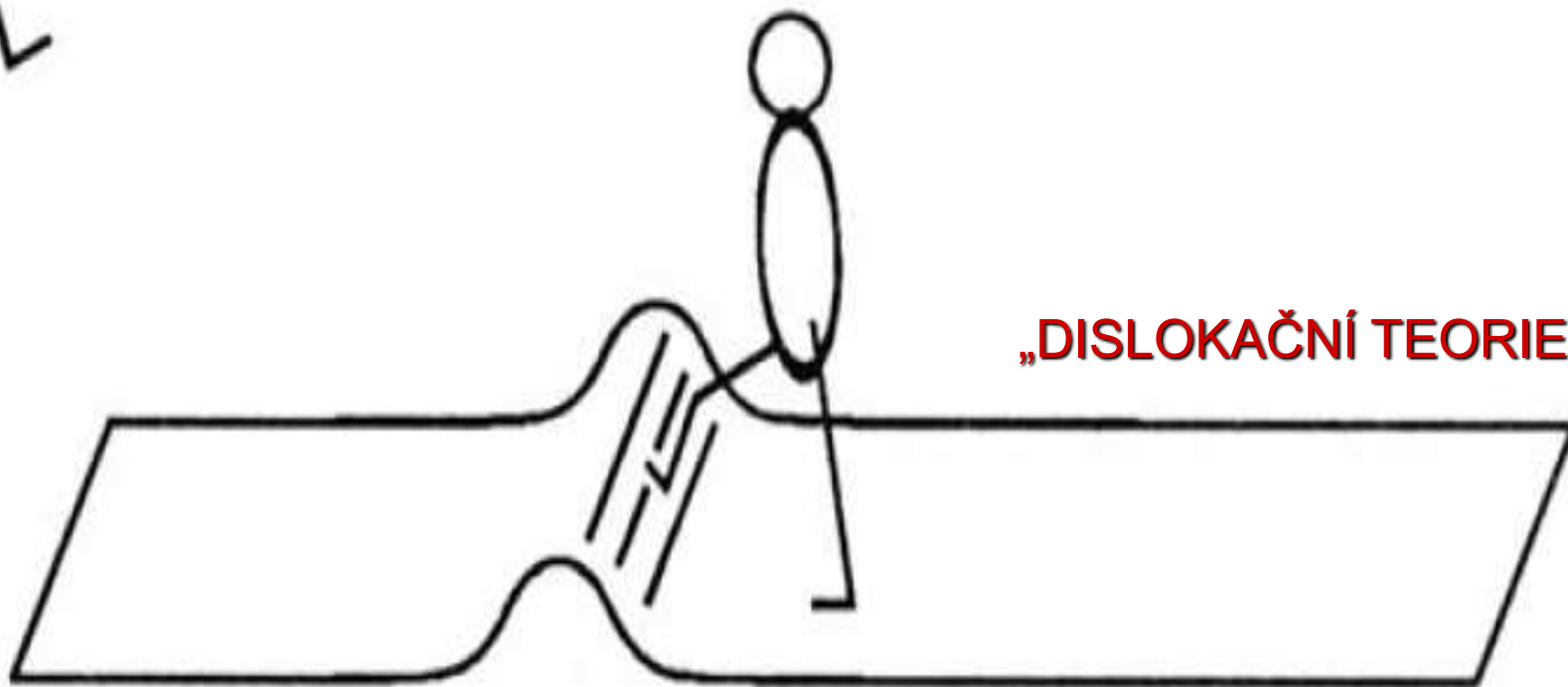
$$\tau_{krit.} \approx \frac{G}{30}$$

Nové modely ukázaly, že se obě části krystalu po sobě neposunují v celé rovině skluzu najednou, ale deformace nastává postupně.

„FRENKELOVA TEORIE“

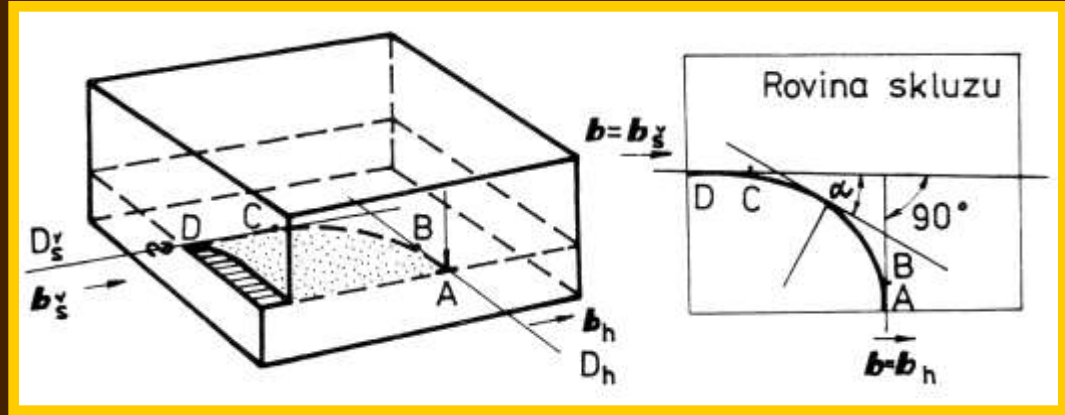


„DISLOKAČNÍ TEORIE“

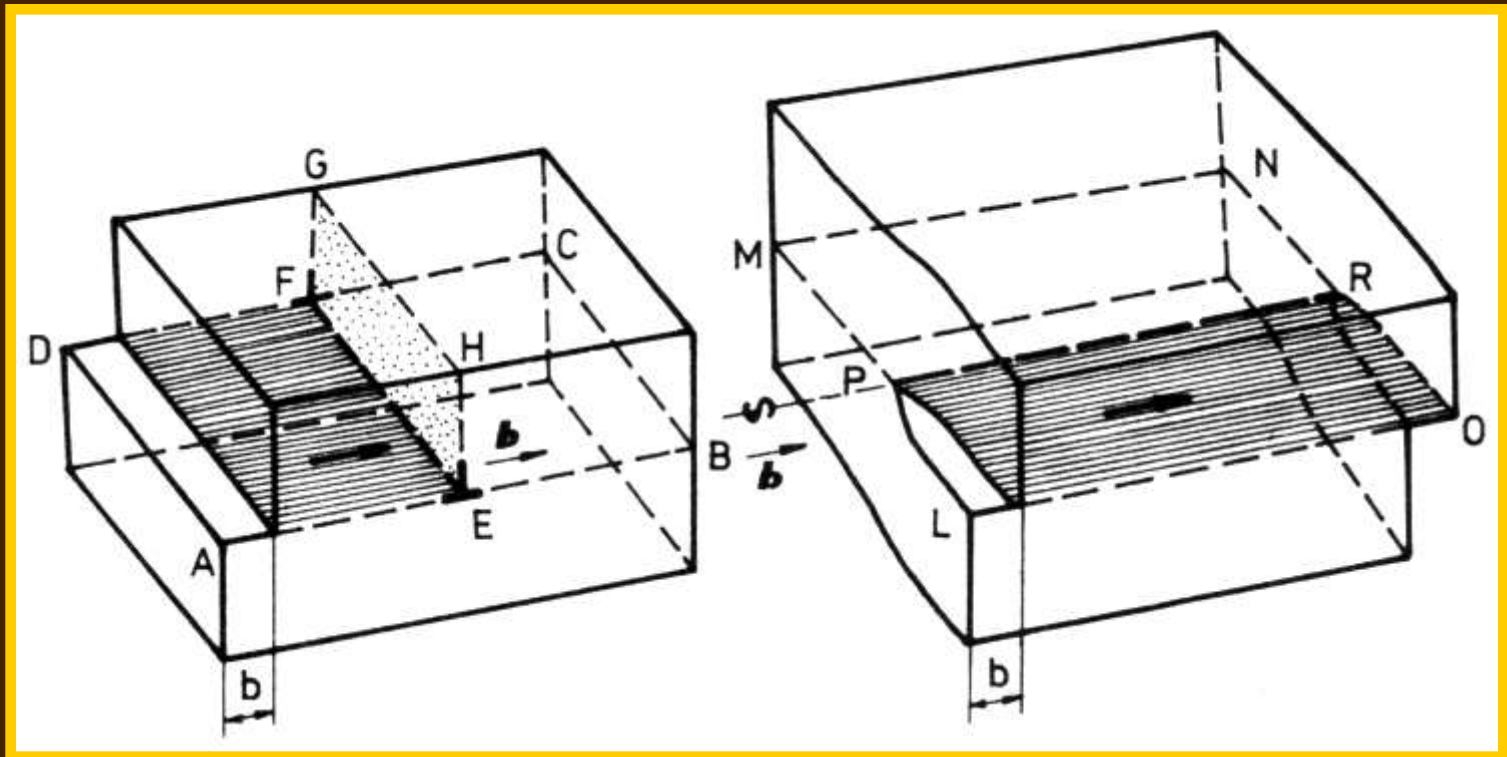


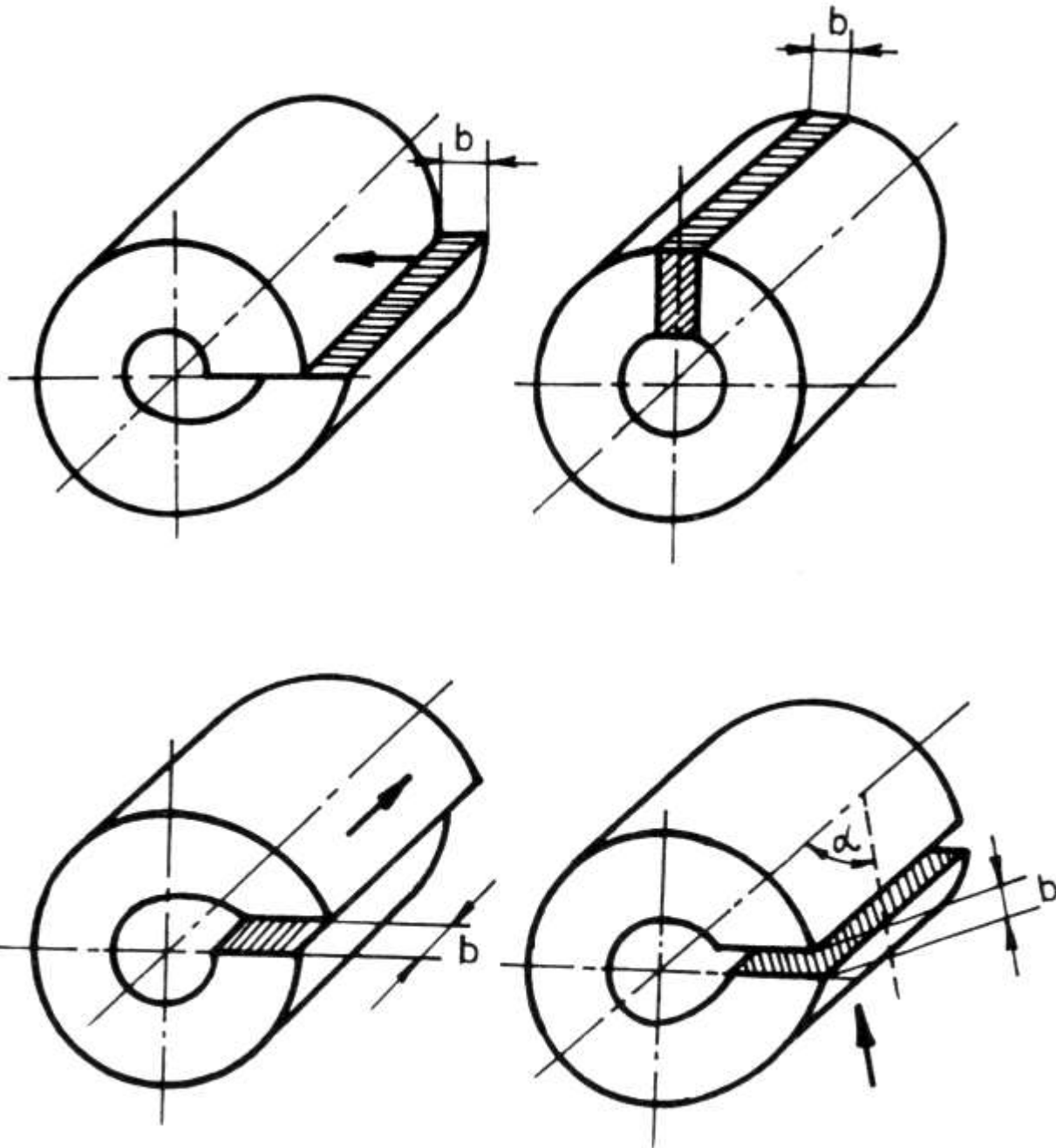
DRUHY DISLOKACÍ

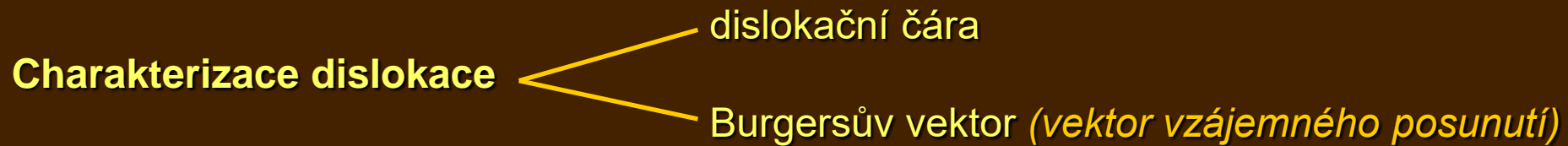
dislokace $\left\{ \begin{array}{l} \text{hranová} \\ \text{šroubová} \\ \text{smíšená} \end{array} \right.$



dislokace - rozhraní mezi posunutou a neposunutou částí krystalu
- směr relativního posunutí vzhledem k poloze rozhraní (*dislokační čáre*) rozhoduje o hranovém či šroubovém charakteru







- Burgersův vektor \mathbf{b}** - vektor nezbytný k uzavření smyčky z translačních mřížkových vektorů (*Burgersovy smyčky*)
- kolmý k dislokační čáře u **hranové** dislokace
 - rovnoběžná s dislokační čarou u **šroubové** dislokace

$\mathbf{b} = \mathbf{a}$ - úplná dislokace

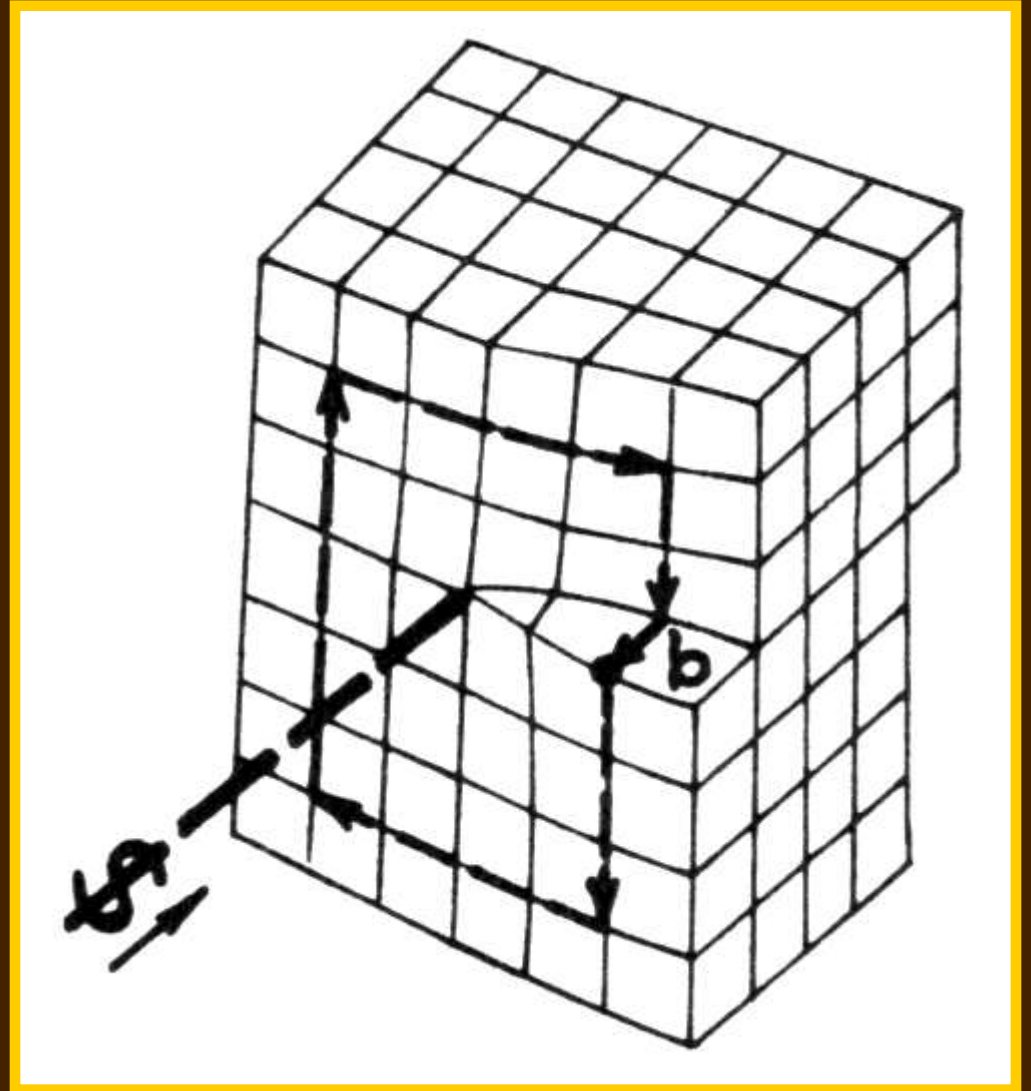
$\mathbf{b} < \mathbf{a}$ - neúplná dislokace (*parciální*)

$\mathbf{b} > \mathbf{a}$ - vícenásobná dislokace

Stanovení smyslu dislokace

Při stanovení sil působících na dislokaci či interakcemi mezi dislokacemi je nutné znát znaménko (*smysl*) dislokace.

1. zvolí se kladný směr dislokační čáry (*obvykle směrem do krystalu*)
2. při pohledu tímto směrem se opíše okolo dislokace pravotočivá smyčka
3. smyčka se uzavře Burgersovým vektorem vedeným z konečného do výchozího bodu
4. souhlasí-li *smysl b* se zvoleným kladným směrem, je dislokace kladná



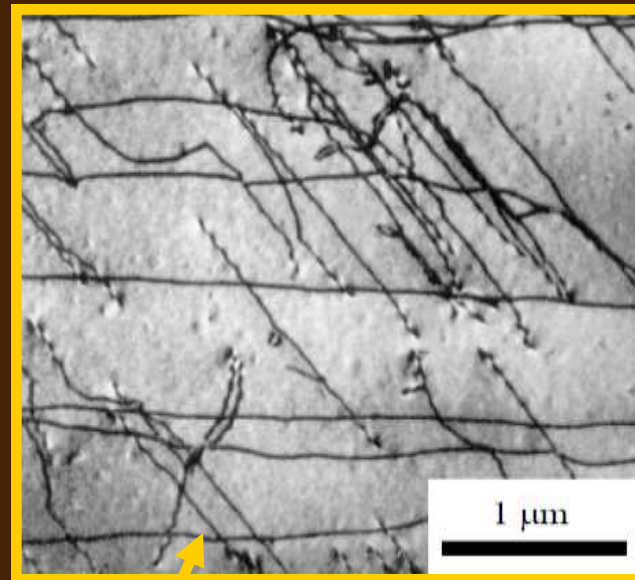
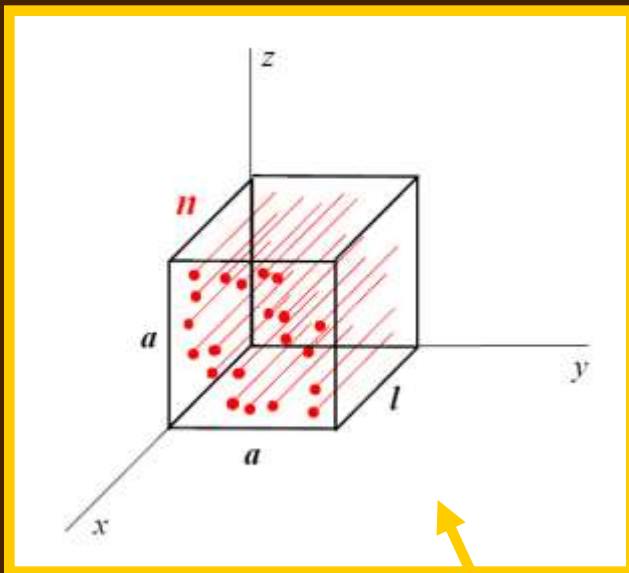
Počet dislokací v materiálu

Vyjadřuje se pomocí hustoty dislokací ρ [m^{-2}]

	ρ [m^{-2}]
Vyžíhané polykrystalické materiály	10^{12}
Monokrystaly	10^{10}
Deformované materiály	$10^{16} - 10^{17}$

- počet průniků dislokačních čar na jednotkovou plochu

- celková délka vztažená na objem materiálu



$$\rho = \frac{n}{S}$$
$$\rho = \frac{\sum l_i}{V}$$

FeSi, TEM

Termodynamický popis dislokací

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S$$

- zavedením dislokace do krystalu se zvýší entalpie soustavy o ΔH a změní se entropie o ΔS

$$\Delta H = E_{celk.}^{dis.} \approx \alpha G b^2$$

energie dislokace – zahrnuje zejména pružnou energii dislokace

α ... konstanta v rozmezí 0,5 - 1

- ΔS lze rozdělit na konfigurační a frekvenční složku

$$\Delta G = E_{celk.}^{dis.} - T(S_{konf.}^{dis.} + S_{frek.}^{dis.})$$

$$4 \cdot 10^{-9} \text{ Jm}^{-1}$$

$$x \cdot 10^{-10} \text{ Jm}^{-1} \text{ při všech teplotách}$$

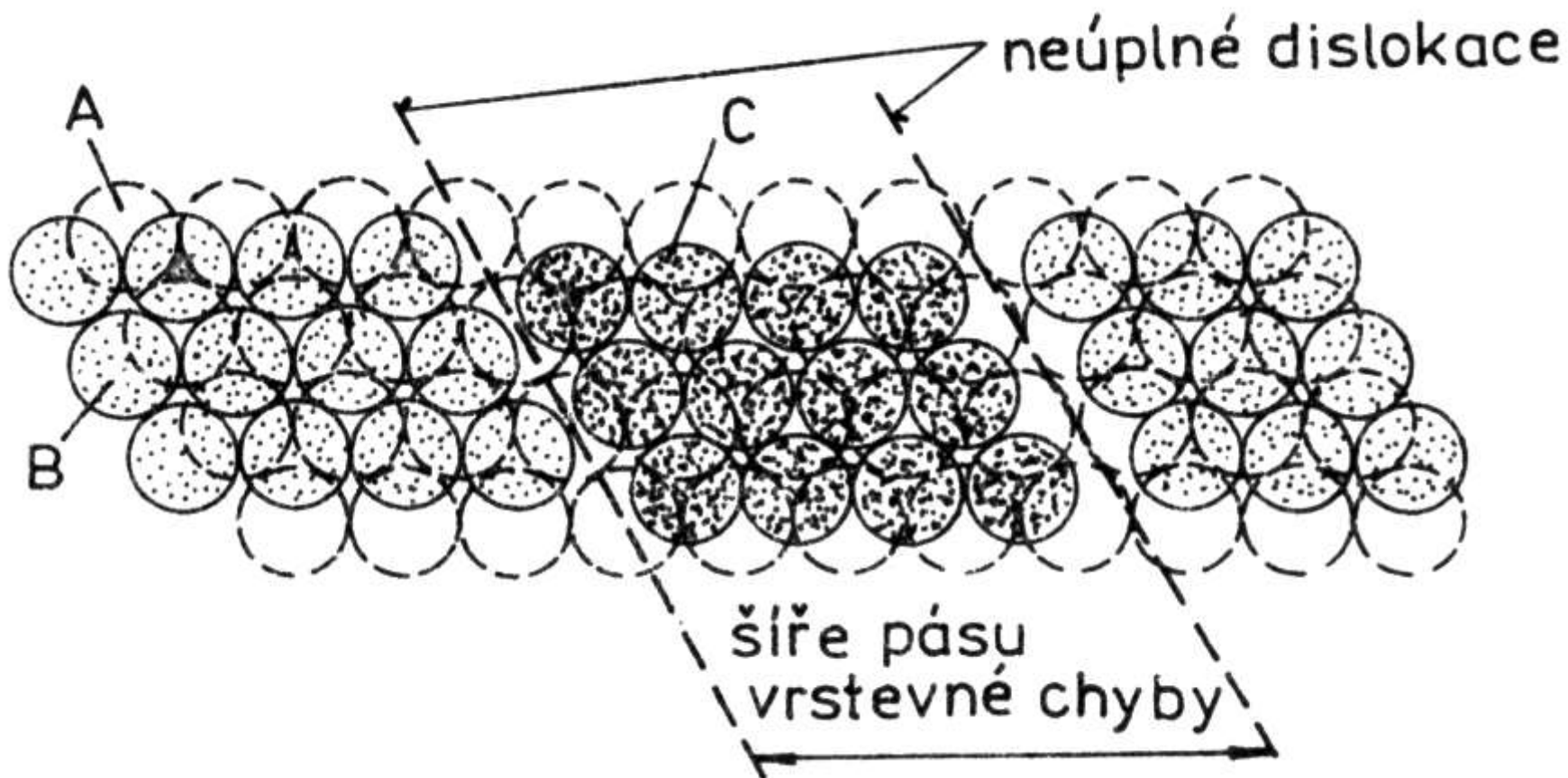
→ nelze splnit podmínku

$$\Delta G = 0$$

→ dislokace jsou termodynamicky nerovnovážné

Neúplné dislokace (*parciální*)

- existují jen společně s jinou poruchou mřížky (*vrstevné chyby*)
- neúplná dislokace i vrstevná chyba může vzniknout rozštěpením úplné dislokace



Pohyb dislokací

Skluz (*konzervativní pohyb*)

- dislokace se pohybuje ve skluzové rovině
- možná u hranových i šroubových dislokací

Šplhání (*nekonzervativní pohyb*)

- dislokace se pohybuje mimo skluzovou rovinu
- pouze u hranových dislokací

Skluz dislokací

- ne každá rovina v krystalu může být skluzová
- u kovů jsou skluzové roviny nejhustěji obsazené roviny (*největší meziatomové vzdálenosti*)
- aktivní je vždy ta rovina, v níž je nejdříve dosaženo smykové napětí τ

Skruzové systémy u kovových materiálů

- skluzový systém charakterizován směrem skluzu a rovinou skluzu

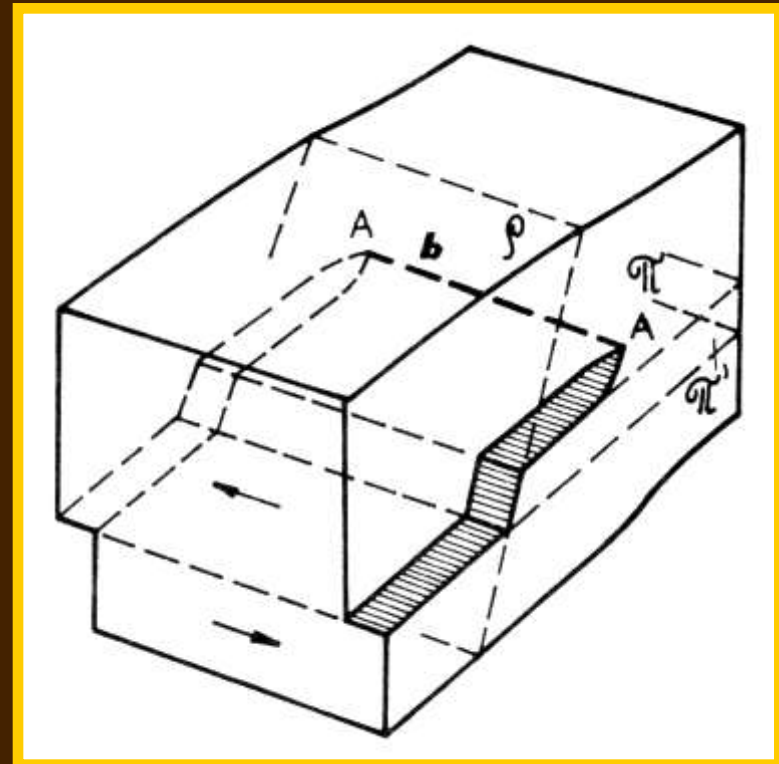
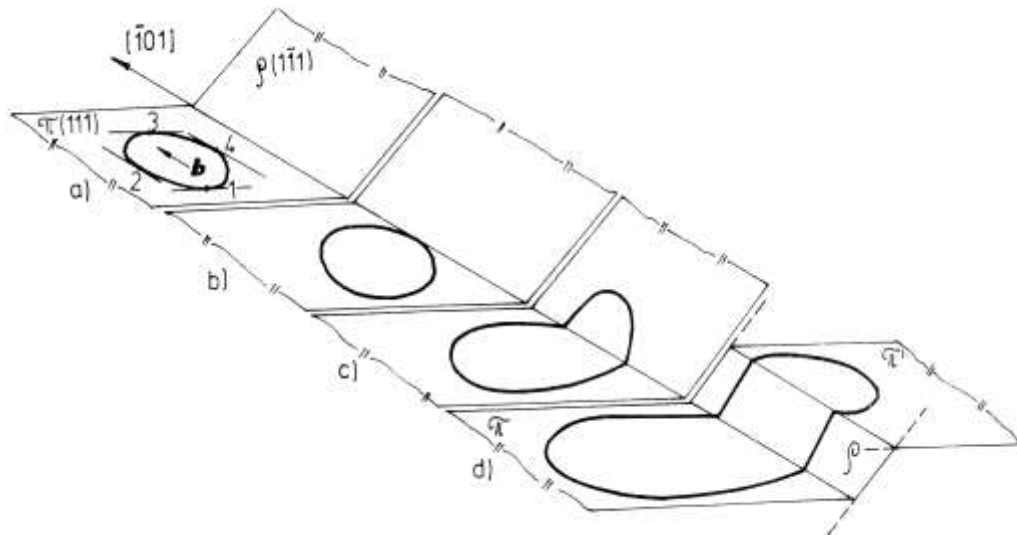
Mřížka	Směry skluzu	Roviny skluzu
fcc kubická plošně centrovaná (Cu, Ag, Au, Ni, Al, γ -Fe) až 12 skluzových systémů	[110]	(111)
bcc kubická tělesně centrovaná (α -Fe, δ -Fe, α -Mn, Mo, Cr, Ta) max. 12 skluzových systémů - počet závisí na teplotě	[111]	(110) (112) (123)
hcp hexagonální (Zn, Mg, Cd) 3 až 9 skluzových systémů - závisí na poměru c/a	[2 $\bar{1}\bar{1}$ 0]	(0001)

Příčný skluz

- v případě šroubové dislokace mohou být rovinami skluzu všechny dostatečně hustě obsazené roviny procházející dislokační čarou
 - umožňuje to šroubové dislokaci, která narazila při skluzovém pohybu na překážku, vybočit do jiné skluzové roviny

Dvojitý příčný skluz

- nastává pokud se dislokace po přechodném vybočení opět vrátí do své původní skluzové roviny



Napětí potřebné ke skluzu dislokace

Peierlsovo- Nabarrovo napětí

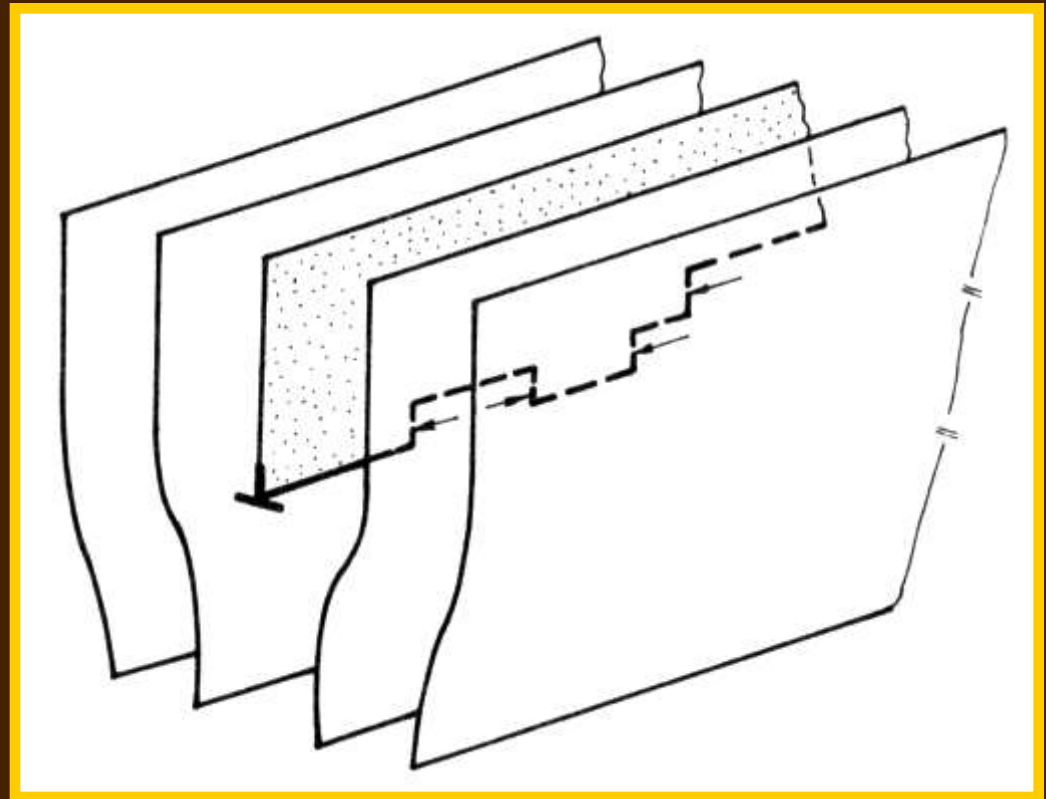
- napětí potřebné k pohybu dislokace v prostředí jinak ideálního krystalu

Třecí napětí

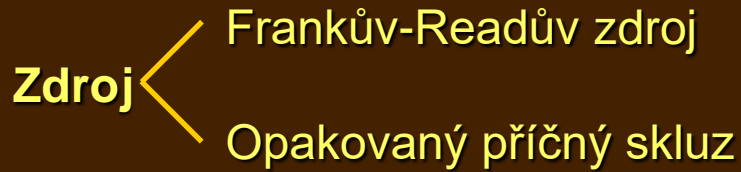
- napětí potřebné k pohybu dislokace v reálném prostředí s mřížkovými poruchami

Šplhání dislokací

- u hranových dislokací a hranových úseků smíšených dislokací
- je spojeno s difúzí vakancí nebo intersticiálů k dislokaci - atomy se postupně připojují ke kraji nadbytečné poloroviny
- na dislokační čáře vzniká stupeň - jeho průchodem podél celé dislokační čáry se dislokace přemístí z původní skluzové roviny do rovnoběžné roviny
- šplhání je tepelně aktivovaný děj - uplatňuje se za vysokých teplot - tečení
($T > 0,5 \cdot T_{\text{tání}}$)

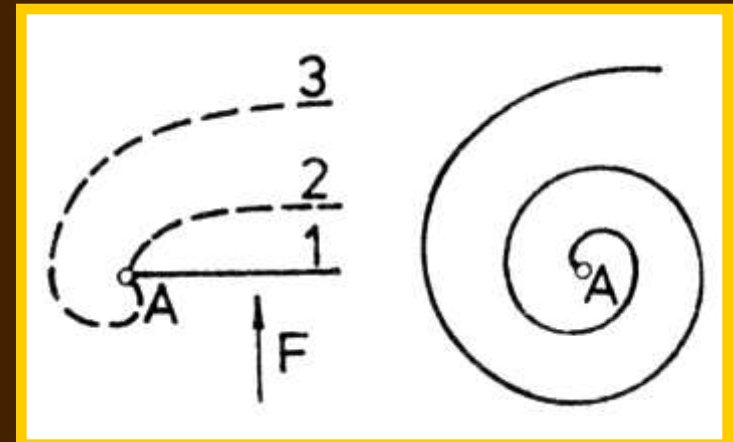
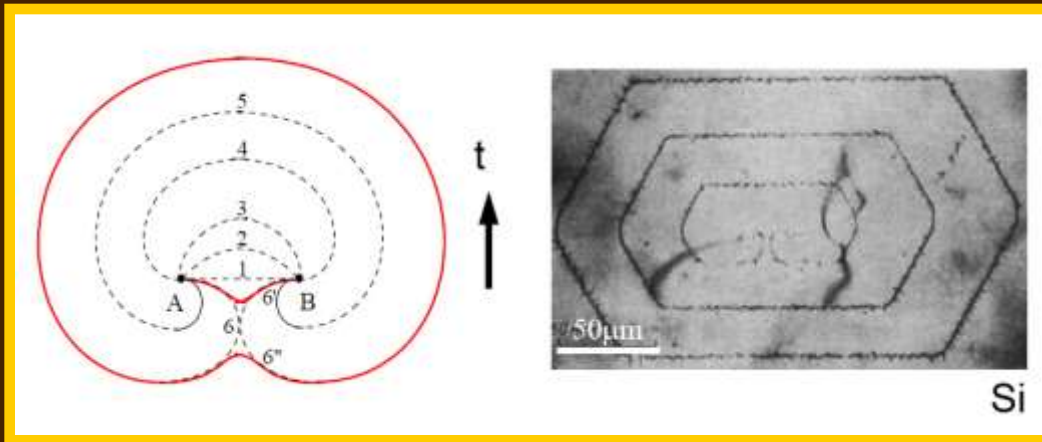


Zdroje dislokací



Frankův – Readův zdroj

- dislokace narazí na jednu nebo více překážek a začne se ohýbat
- schopen produkovat až několik se dislokačních smyček (*nelze nekonečně mnoho, protože se jednotlivé smyčky odpuzují a působí proti další činnosti zdroje*)



Opakovaný příčný skluz

- Frankovy - Readovy zdroje se vytvářejí díky dvojitému příčnému skluzu v dalších rovinách (*u šroubových dislokací*)

Interakce mezi dislokacemi a dalšími poruchami

Interakce s bodovými poruchami (s atomy příměsí)

Elastická (*Cottrellova*)

- nejvýznamnější
- napěťové pole dislokace interaguje s napěťovým polem bodové poruchy
- umístěním atomu příměsí do napěťového pole se snižuje pružná deformace mřížky a tím tedy také deformační energie soustavy → cizí atomy mají tendenci se hromadit kolem dislokace a tvořit shluky (*Cottrellovy atmosféry*)
- tato interakce má velký význam při výkladu plastické deformace

Chemická

- u parciálních dislokací s atomy příměsí → změna rozpustnost příměsí

Elektrická

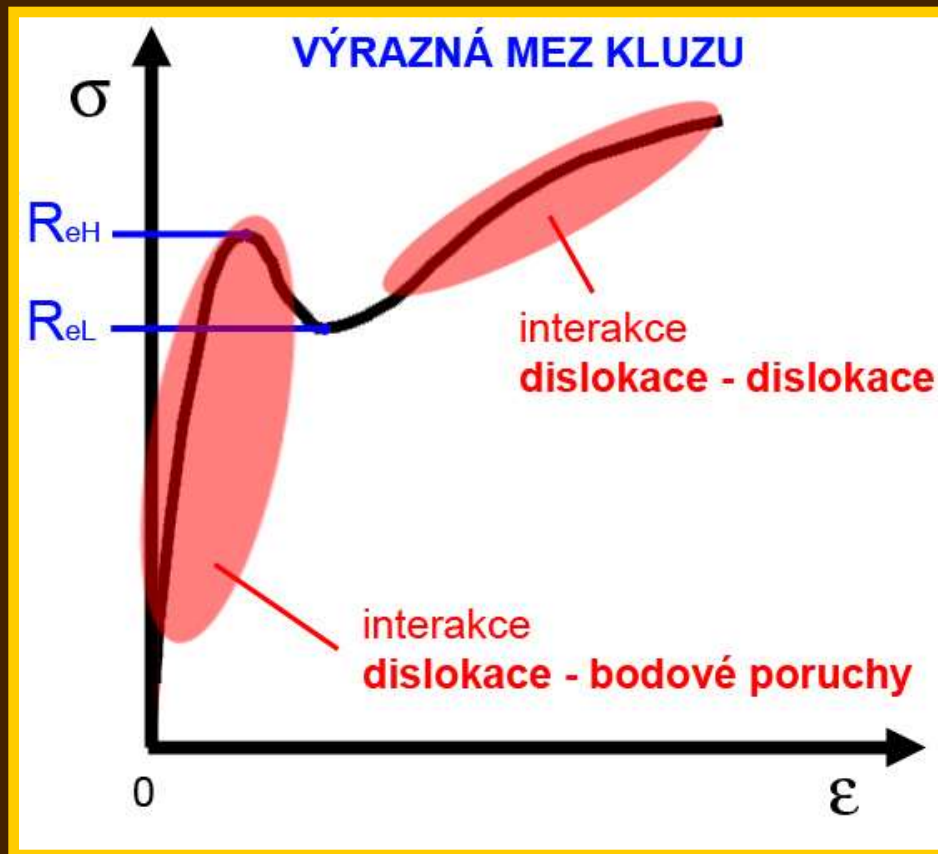
- interakce iontu příměsí s elektrostatickým polem dislokace, vzniklým deformací mřížky

Geometrická

- interakce dislokací v uspořádaných tuhých roztocích

Význam Cottrellovy interakce pro vysvětlení výrazné meze kluzu

- pokud na soustavu dislokace- atmosféra působí vnější síla, musí se dislokace snažit uvolnit, aby se mohly pohybovat → musí překonat síly, které se snaží soustavu zachovat
- pokud brzdicí účinek atmosfér nedovolí uvolnění dislokací, musí se pohybovat i s atmosférou (*rychlost tohoto pohybu je velmi malá*)
- bude-li brzdicí účinek dislokací nižší než přiložená síla dojde k odtržení dislokací a jejich další pohyb bude mnohem snadnější



R_{eH} - horní mez kluzu

- napětí potřebné k odtržení dislokací od atmosfér

R_{eL} - dolní mez kluzu

- napětí potřebné k pohybu odtržených dislokací

- interakce dislokace - atmosféra je základním principem zpevnování materiálu legováním

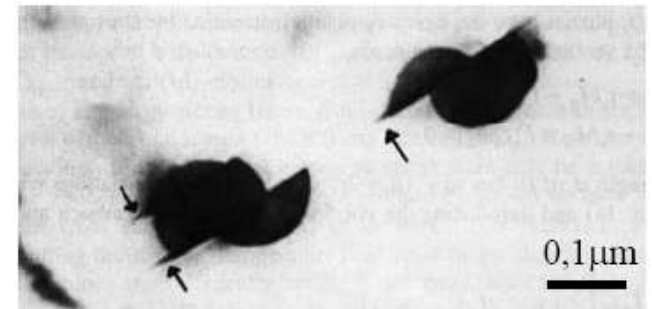
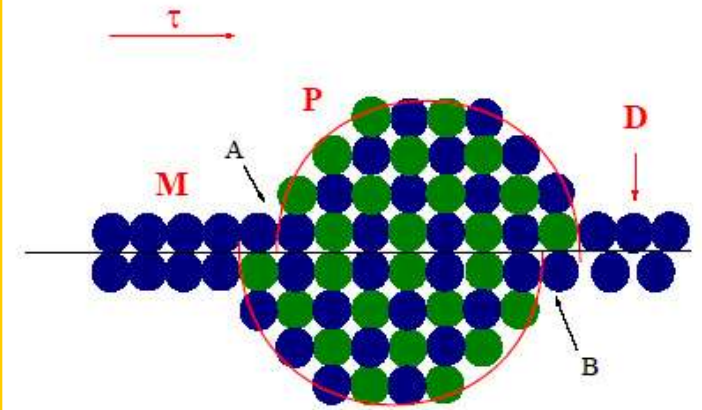
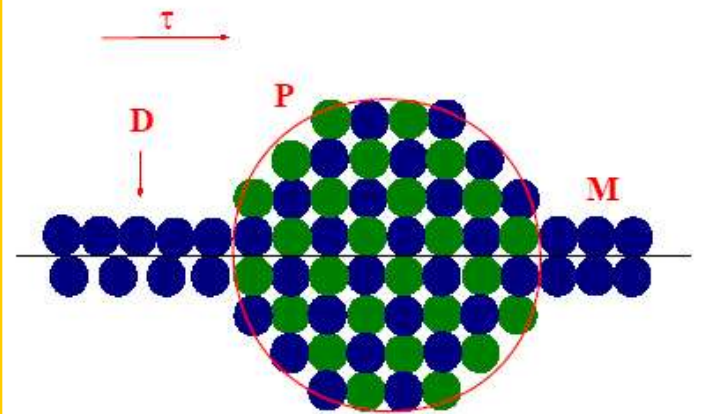
Interakce s disperzními částicemi



- velký význam pro návrhy matric a výztuží u kompozitních materiálů

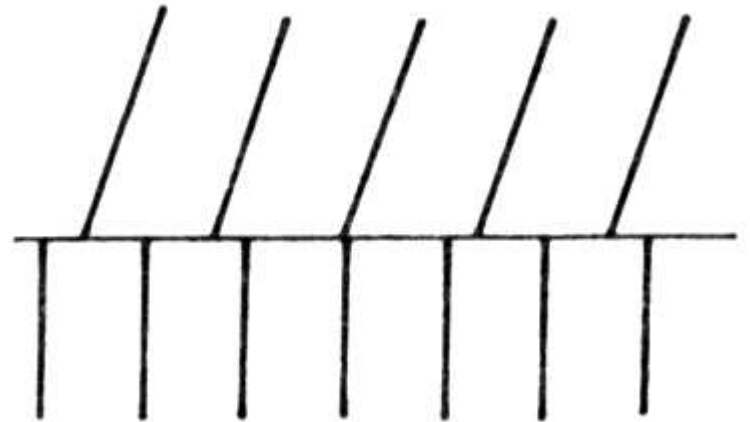
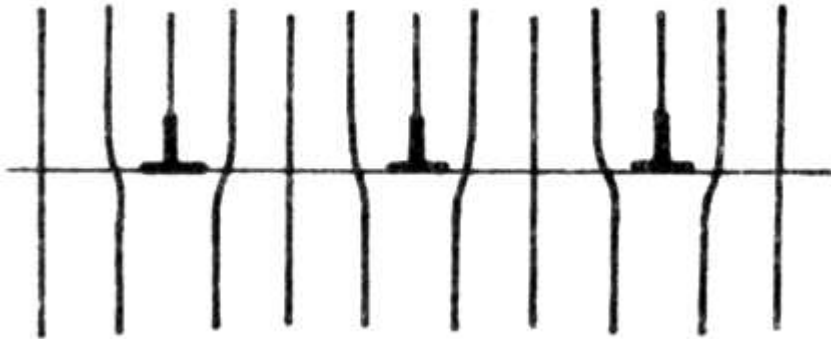
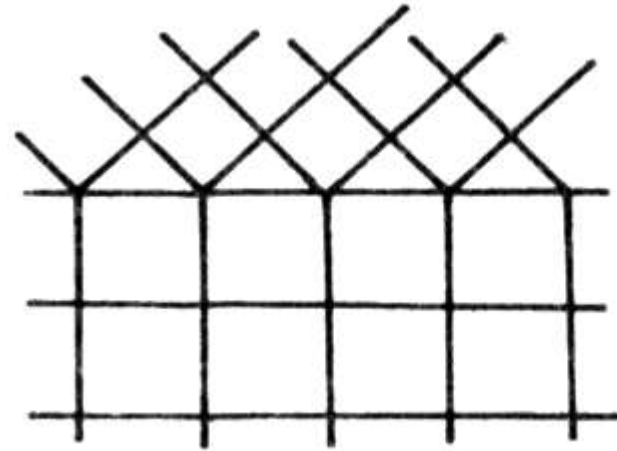
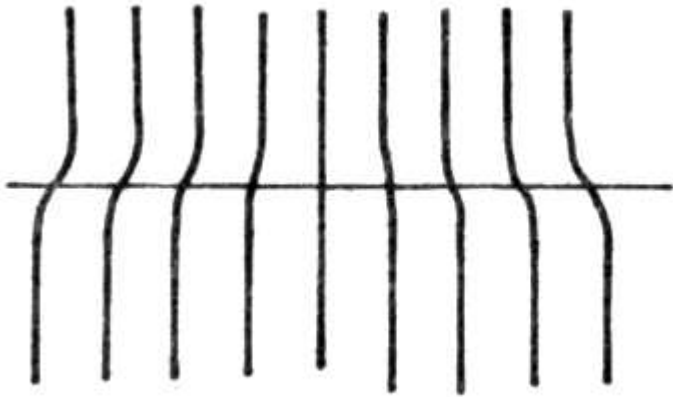
Protínání částic (*Friedelův mechanismus*)

- částice se označují jako **měkké** (rozhraní mezi matricí a precipitátem je koherentní nebo semikoherentní)
- dislokace musí při průchodu zrušit energeticky nejpříznivější vazby mezi atomy částice a vytvořit novou plochu odpovídající řezu skluzové roviny dislokace částic (zvýšení ΔG v důsledku zvětšení povrchu)
- dislokace částicí prostě projde



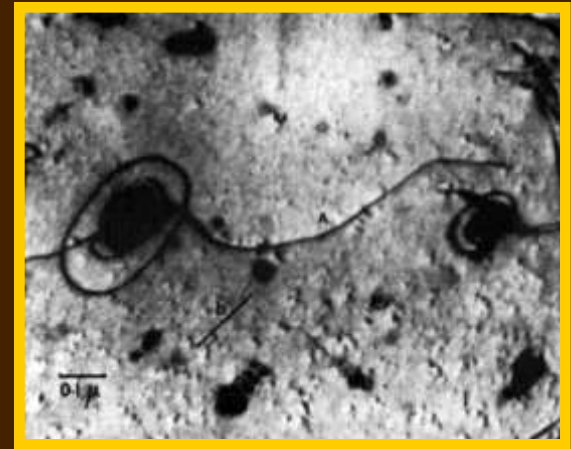
- rozhraní mezi zrny mohou mít různý charakter

rozhraní  koherentní
semikoherentní
nekoherentní

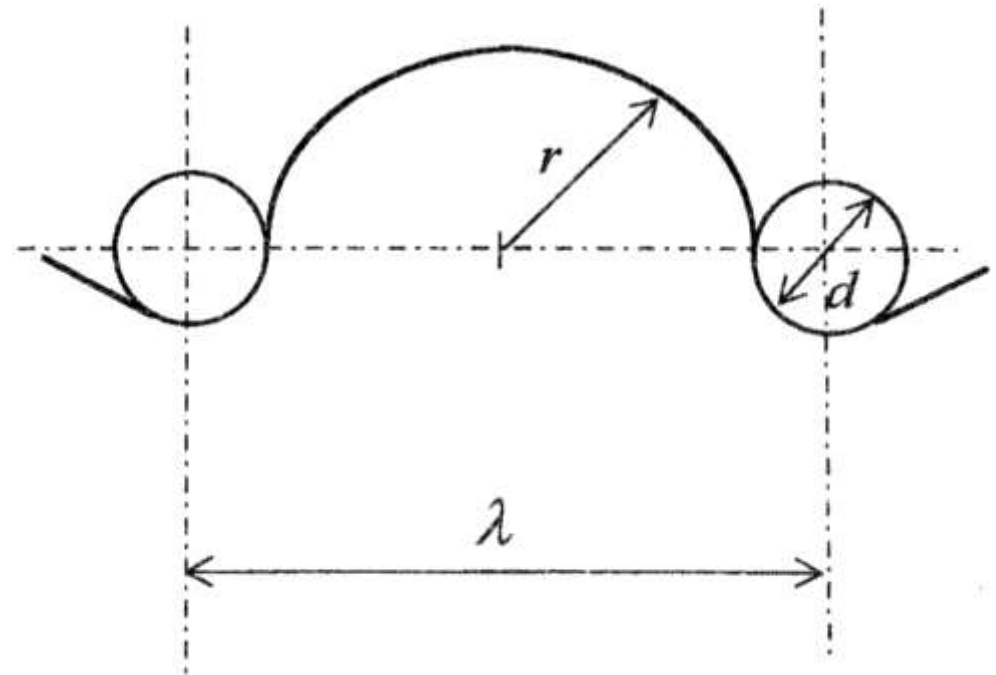
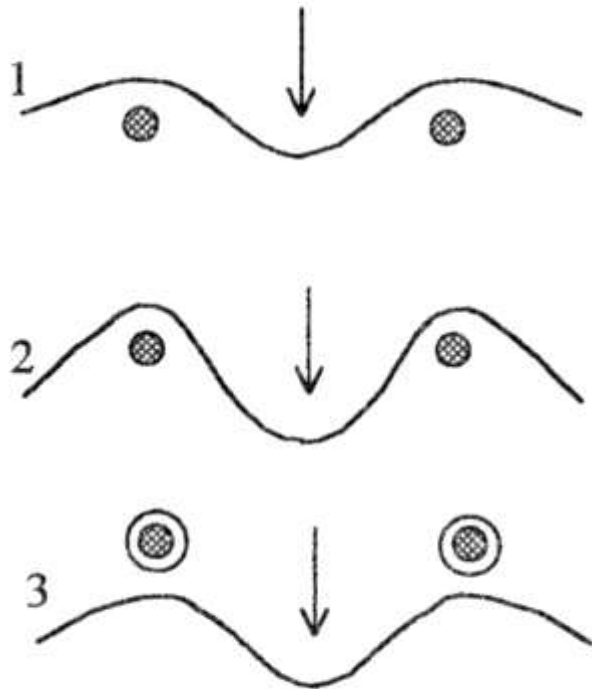


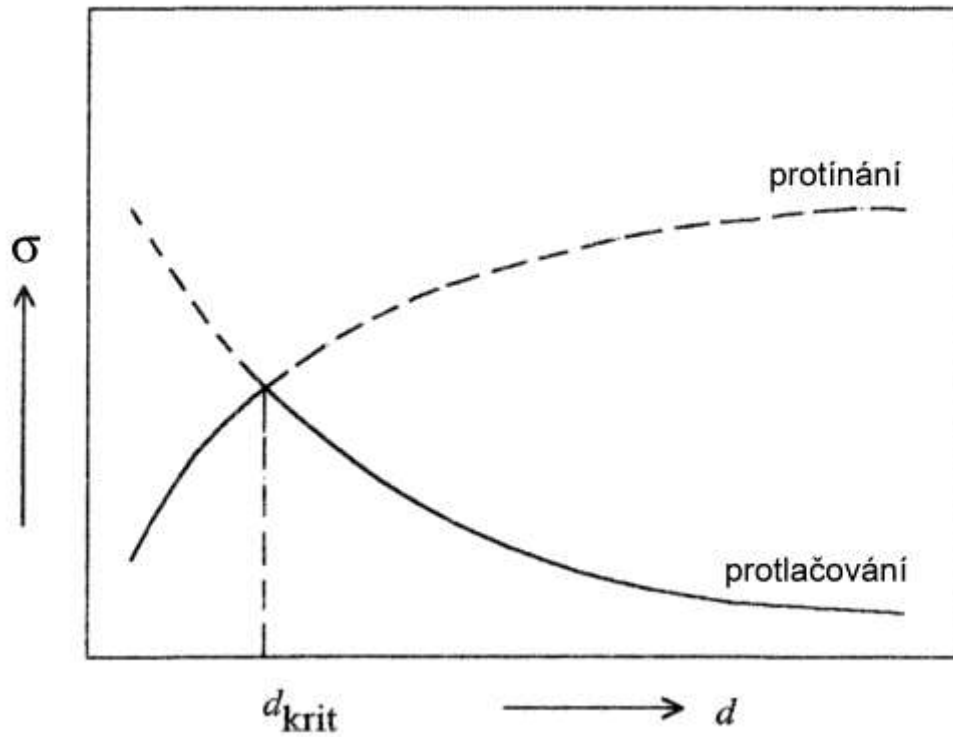
Protlačování částic (Orowanův mechanismus)

- částice se označují jako **tvrdé**
(rozhraní mezi matricí a precipitátem je nekoherentní)
- předpokládá se ohebná dislokační čára
- velký význam u kompozitních materiálů

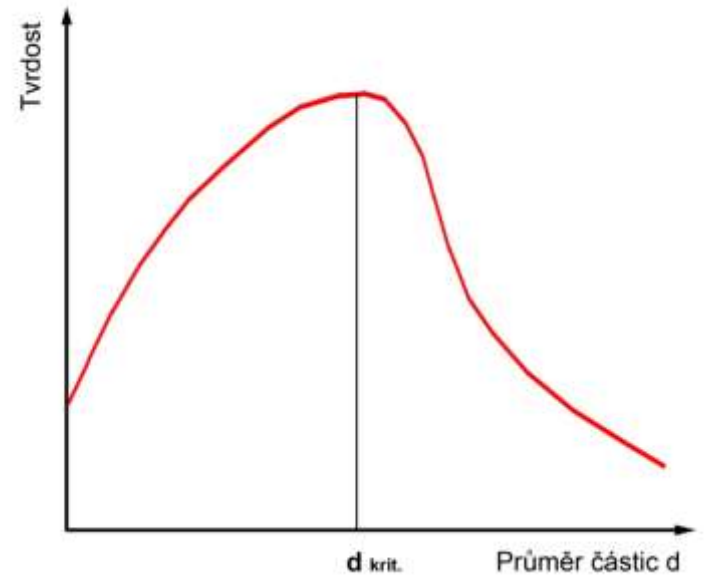


Cu





- mechanické vlastnosti materiálu jsou maximální, mají-li částice rozměr d_{krit} .



Interakce mezi dislokacemi

Dělení interakcí podle charakteru vzájemného působení dislokací

Pružná interakce

- prostřednictvím jejich napěťových polí
- dislokace téhož znaménka se odpuzují, opačného znaménka se přitahují
- dochází k nakupení dislokací u překážek
- významně se podílí na zpevnění materiálu

Protínání dislokací

- pokud se setkají dislokace pohybující se v různých skluzových rovinách
- vznikají schody, které výrazně zhoršují možnosti dalšího pohybu dislokací
- velmi významně se podílí na zpevnění materiálu

Reakce mezi dislokacemi

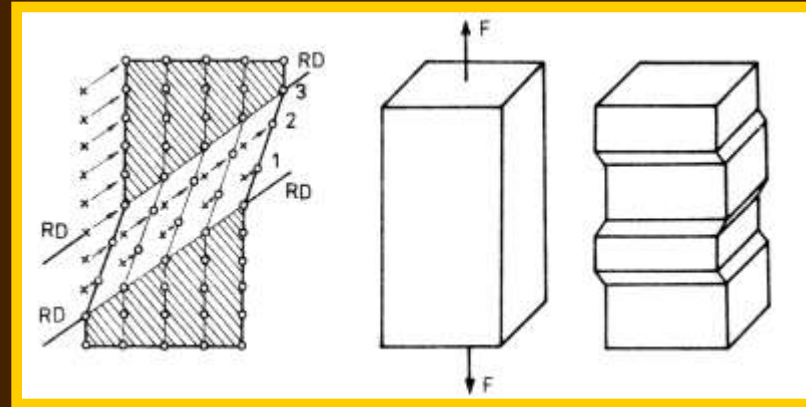
- dochází ke vzniku či zániku dislokací

$$D_1 + D_2 + \dots + D_i \leftrightarrow D$$

- významný je zánik dislokací při žíhání kovů za vyšších teplot

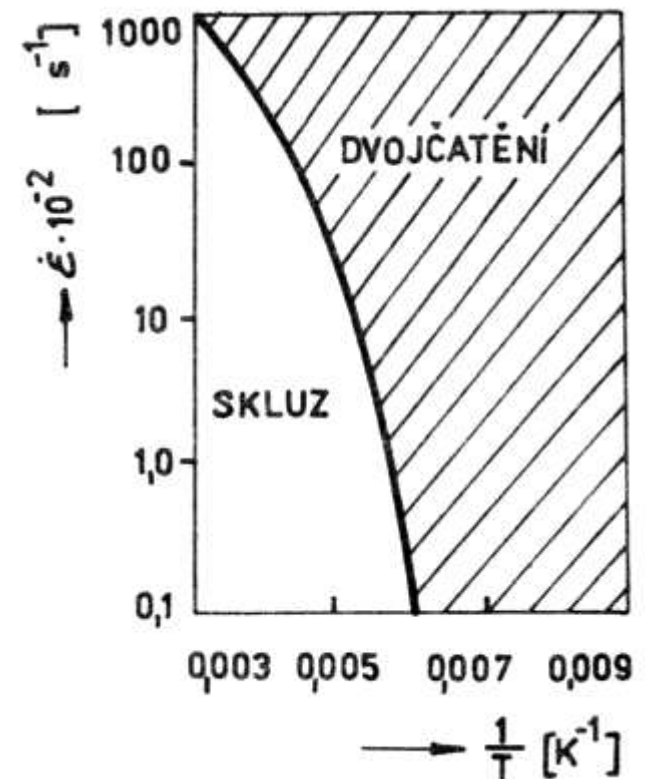
Dvojčatění

- projevuje se náhlým přeskupením celého úseku krystalové mřížky (*parciální dislokace*)
- nová mřížka má pravidelné uspořádání jako původní mřížka, je však symetricky přetočena vzhledem k původní rovině
- obě mřížky jsou tedy zrcadlově symetrické k rovině - rovině dvojčatění

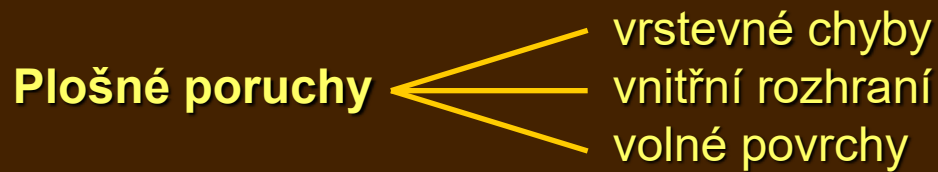


vznik dvojčat  plastická deformace
vlivem napětí při ohřevu
při krystalizaci

- přednostně se uplatňuje u kovů s hexagonální strukturou a u kovů s nízkým počtem skluzových systémů (*Sn, In – typický praskavý zvuk*)
- probíhá zejména
 - při nízkých teplotách
 - vysokých rychlostech deformace
- rychlost vzniku dvojčat je velmi vysoká (*rychlost zvuku*)
- zpevnění materiálu dvojčatěním je nevýznamné



PORUCHY PLOŠNÉ A PROSTOROVÉ

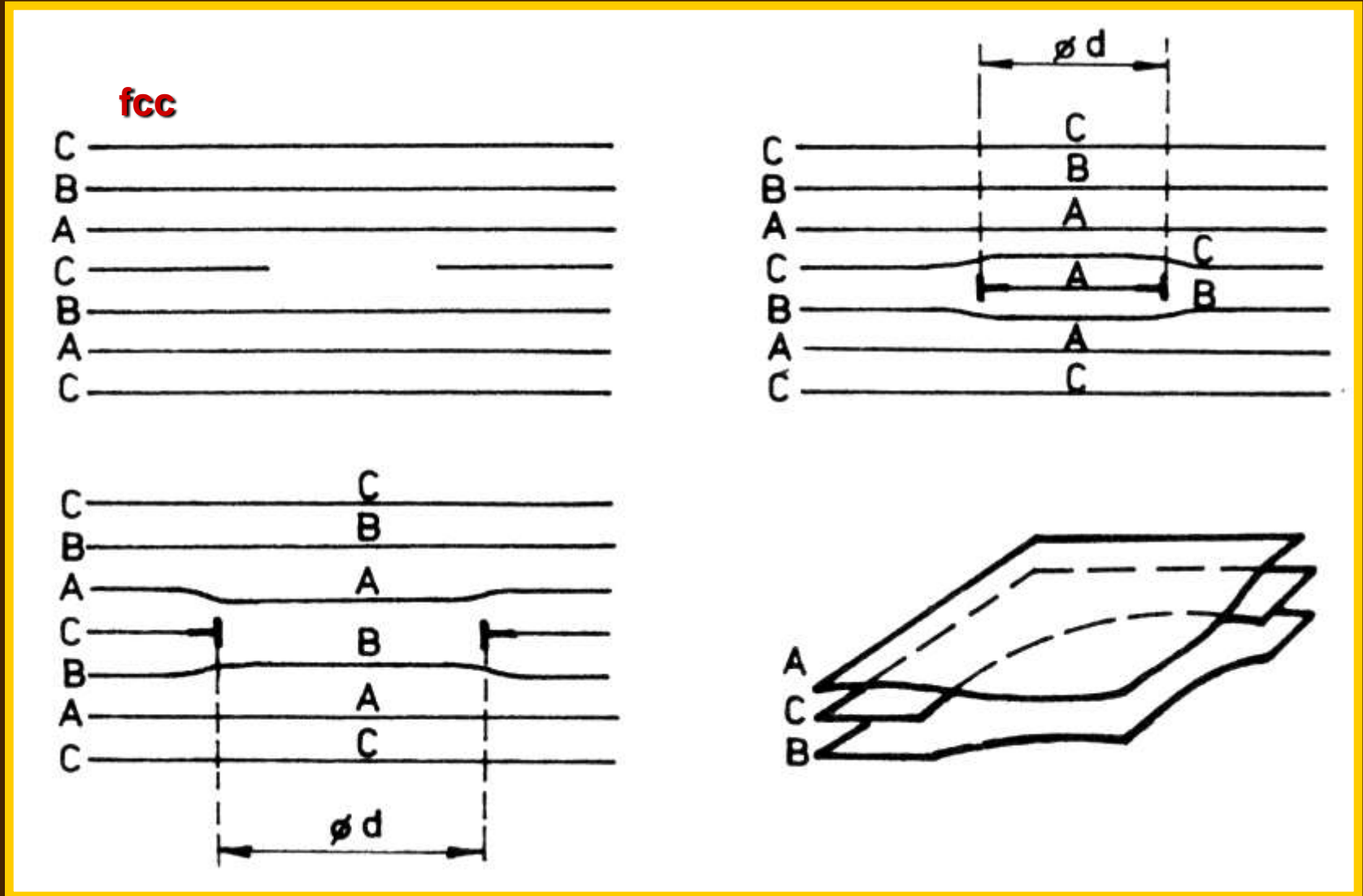


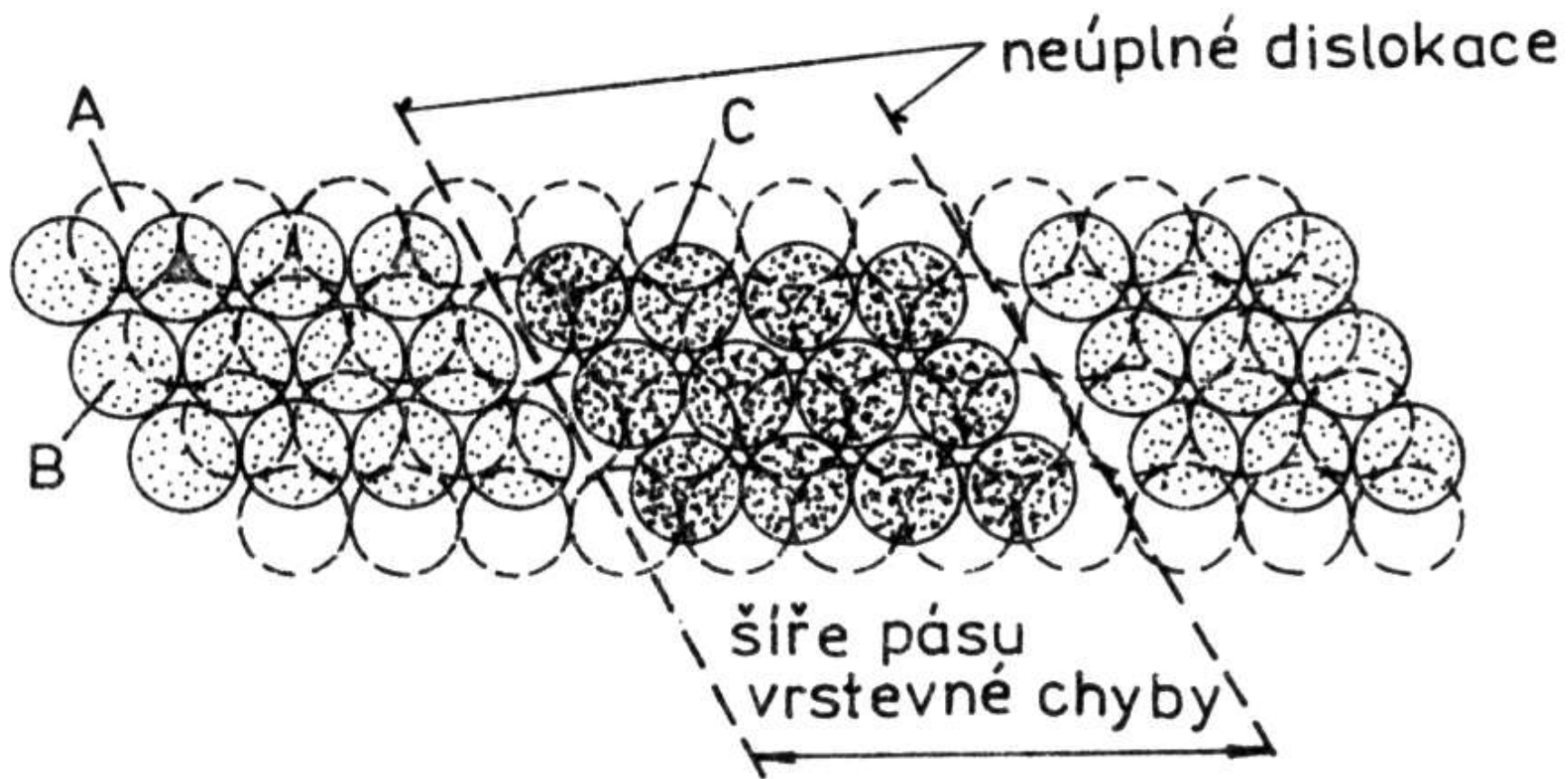
Prostorové poruchy

- prostorové oblasti s jinými vlastnostmi než má okolní mřížka
 - zrna jiné fáze
 - precipitáty
 - vměstky
 - póry
 - plynové bubliny
 - staženiny

Vrstevné chyby

- krystal si lze představit jako sled na sebe naskládaných atomových rovin
- je-li tento sled porušen, jedná se o **vrstevnou chybu**



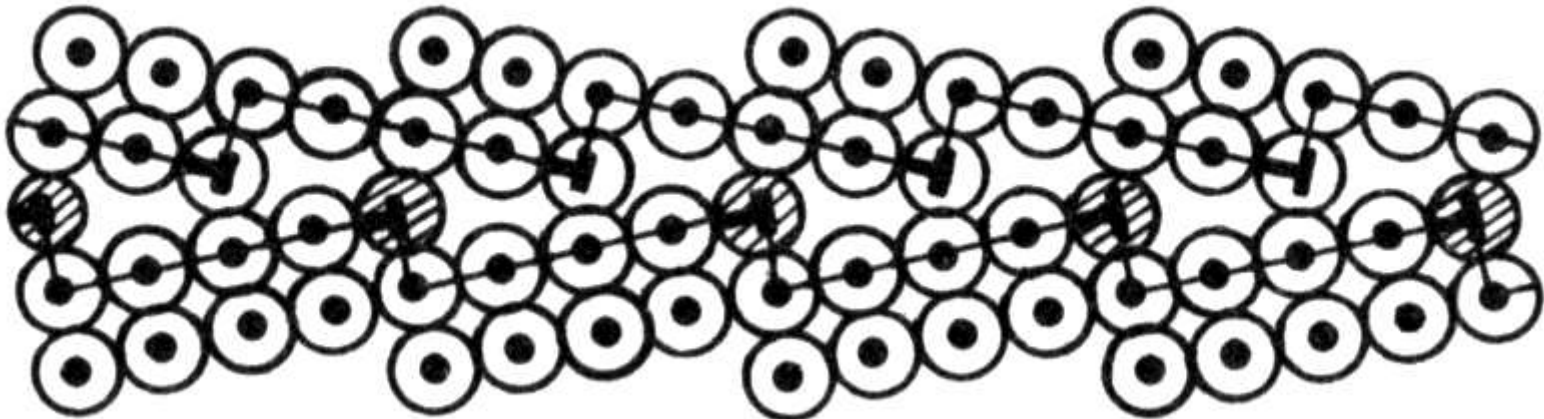


Vnitřní rozhraní

- jednotlivá zrna mají odlišnou krystalografickou orientaci a jsou oddělena hranicemi
- plocha oddělující oblasti s odlišnými vlastnostmi

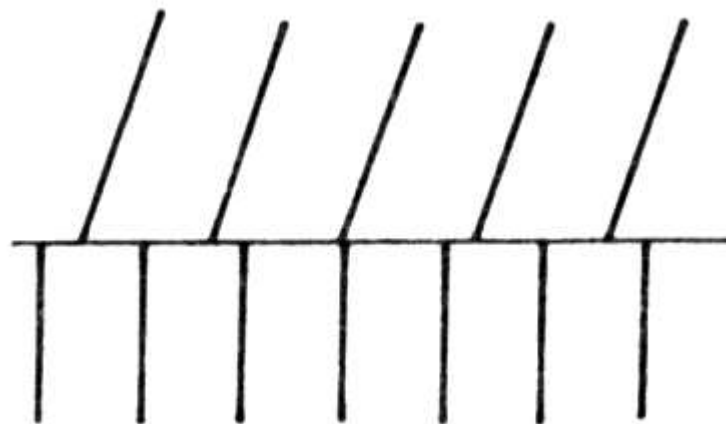
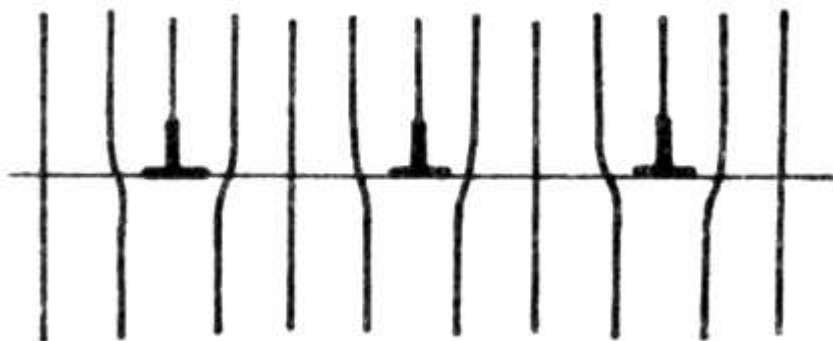
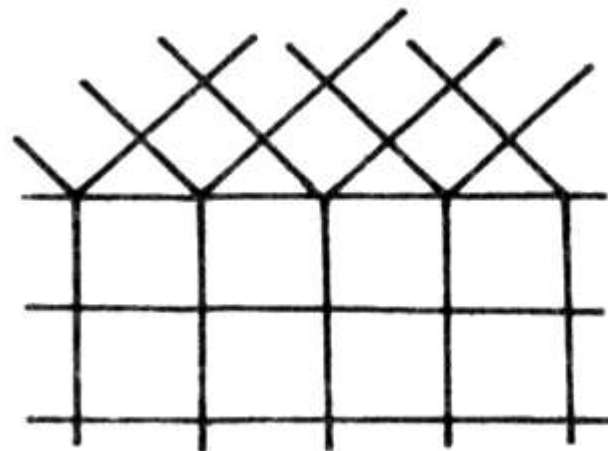
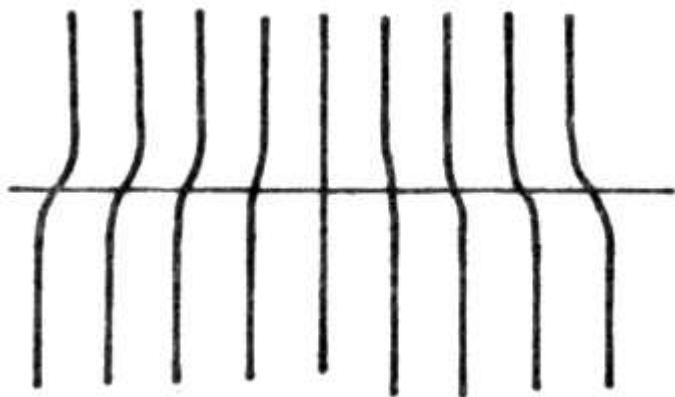
Dělení hranic podle disorientace

- maloúhlové** (*disorientace do 15° - subzrna*)
- velkoúhlové** (*disorientace nad 15° - hranice zrna*)



- rozhraní mezi zrny mohou mít různý charakter

rozhraní  koherentní
semikoherentní
nekoherentní



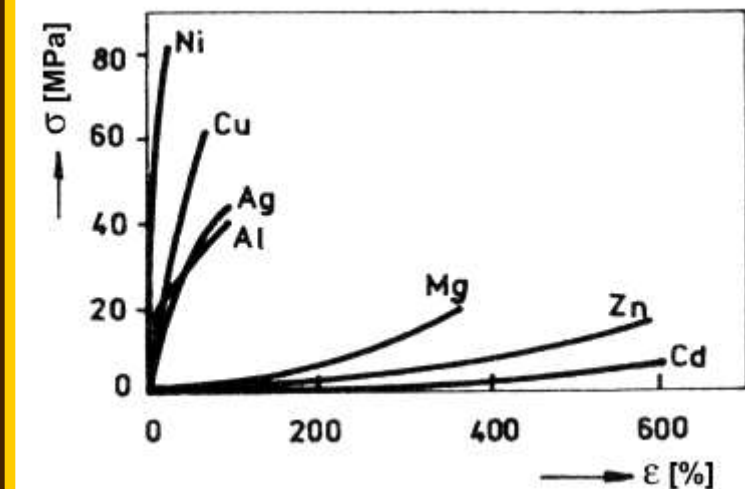
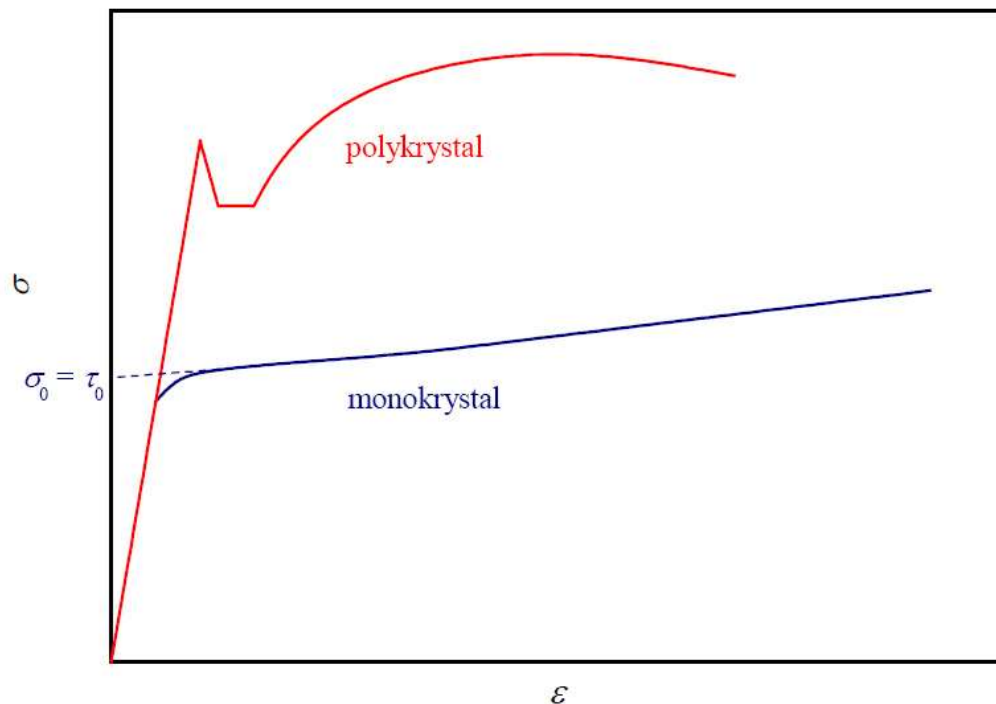
Volný povrch

- rozhodující význam pro korozi, tření, opotřebení
- povrchové vlastnosti ovlivňuje zejména povrchová vrstva atomů, ale určitý vliv mají i vrstvy nižší (*jejich vliv se snižuje s rostoucí vzdáleností od povrchu*)
- někdy může mít amorfni charakter (*B-vrstva*)
- při žíhání materiálu je tendence ke snížení ΔG a k dosažení rovnovážného stavu
→ dochází ke zmenšování plochy zrn

MOŽNOSTI ZPEVNĚOVÁNÍ MATERIÁLU

základní možnosti $\left\{ \begin{array}{l} \text{legování (interakce dislokací s bodovými poruchami)} \\ \text{plastická deformace (interakce mezi dislokacemi)} \end{array} \right.$

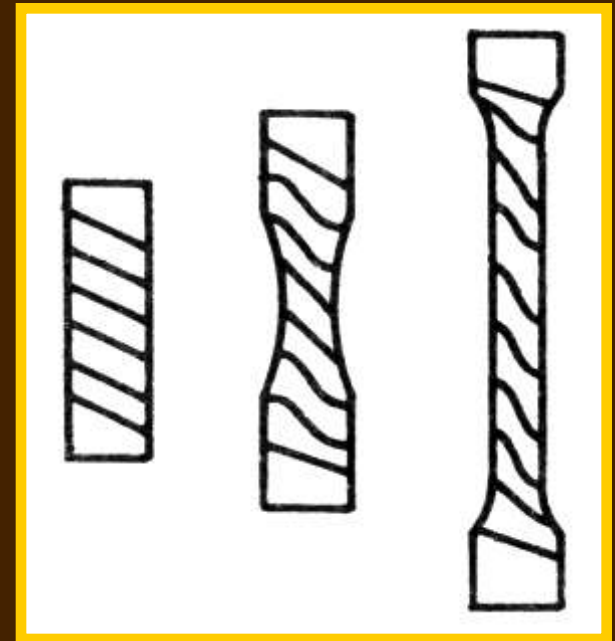
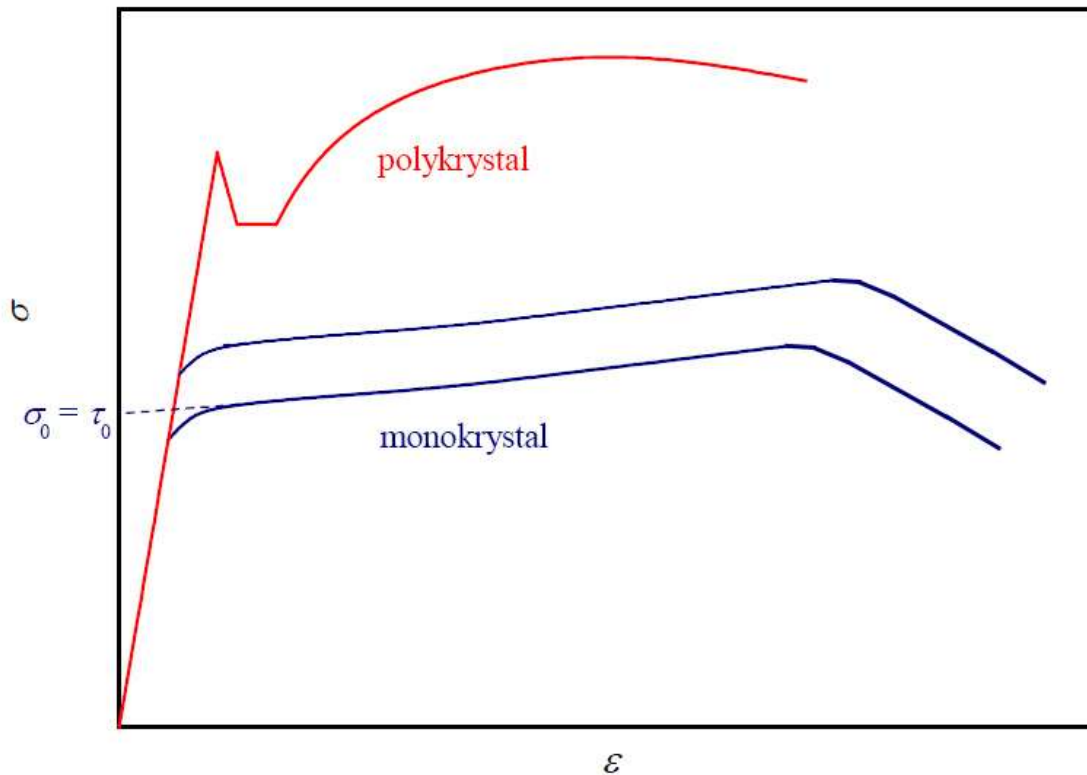
- materiál podrobený plastické deformaci má při novém zatížení podstatně vyšší hodnotu kritického skluzového napětí (u C-oceli po tváření za studena dojde ke zvýšení meze kluzu z hodnoty **180 MPa** na **880 MPa** !)



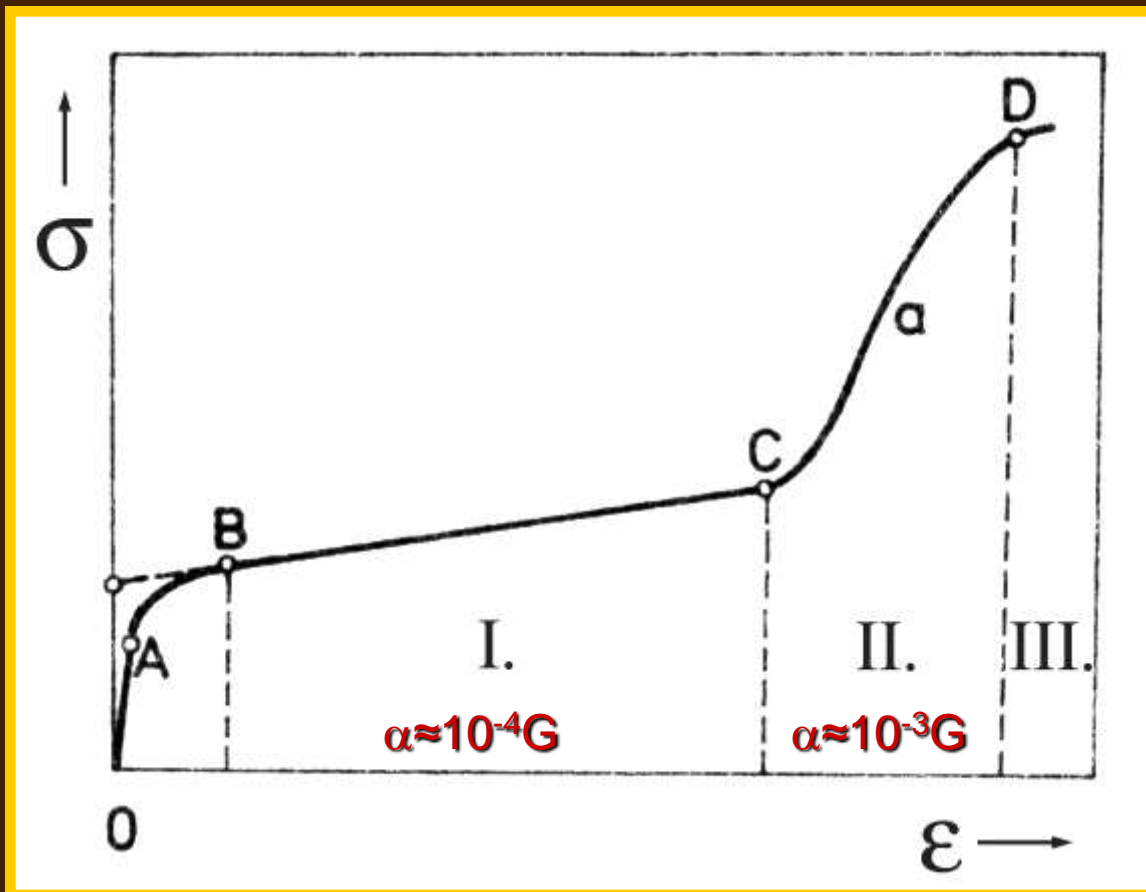
Zpevňování plastickou deformací

Monokrystaly

- zpevňování spočívá v odporu proti pohybu dislokací
- závisí na typu krystalové mřížky (lépe se zpevňují krystaly s bohatým systémem skluzových systémů - fcc, bcc struktury, špatně kovy s nízkým počtem skluzových systémů)



fcc struktura



Koeficient deformačního zpevnění

$$\alpha = \frac{d\sigma}{d\epsilon}$$

0 A

- elastická deformace

A

- mez kluzu

B C

- I. stadium zpevnění
(laminární skluz)

- i při malém zvýšení napětí
nastává velká deformace

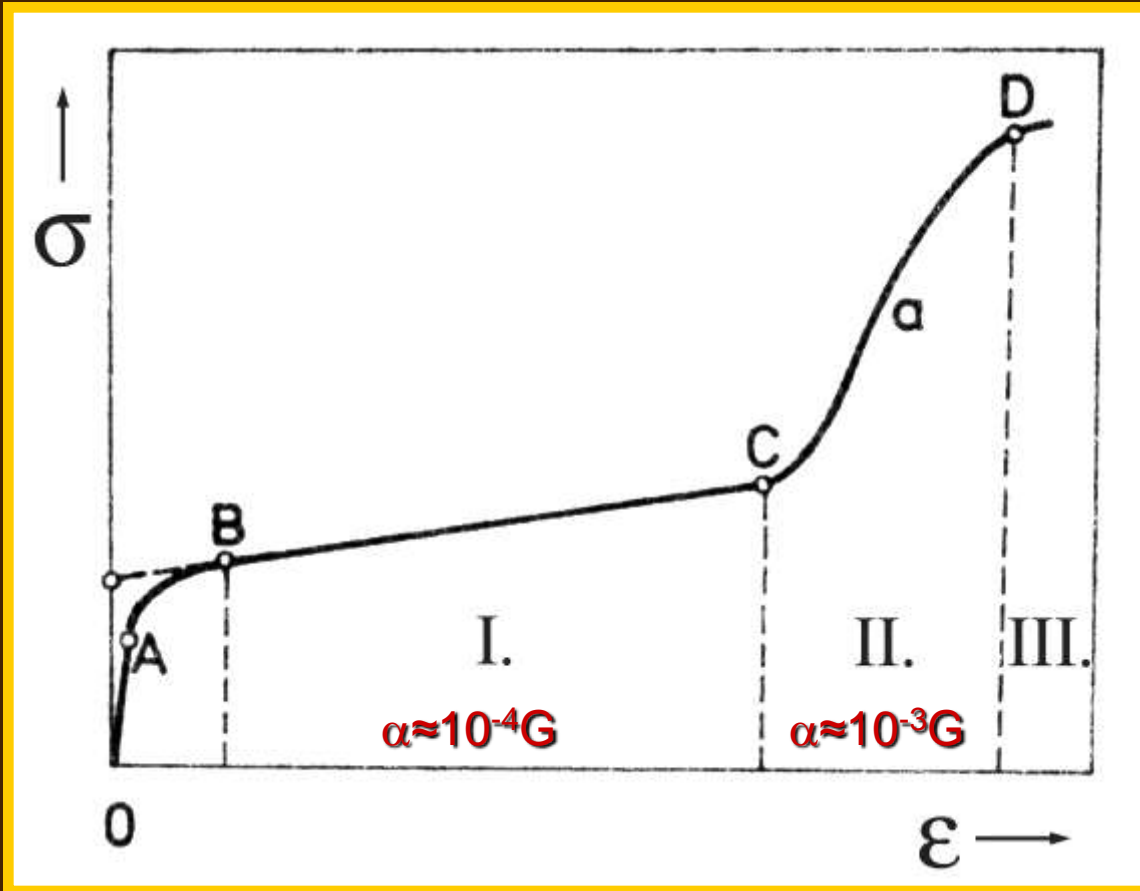
- zpevnění je malé (vyvoláno
pohybujícími se dislokacemi a
dislokacemi v neaktivních
skluzových rovinách)

C D

- II. stadium zpevnění
(turbulentní skluz)

- aktivní skluzové roviny jsou
natočeny do vhodné orientace
- začínají pracovat i ostatní
skluzové systémy v nichž bylo
dosaženo $\tau_{\text{krit.}}$ (protínání
dislokací \rightarrow pole napětí)
- zpevnění dosahuje maxima
v bodě D

fcc struktura



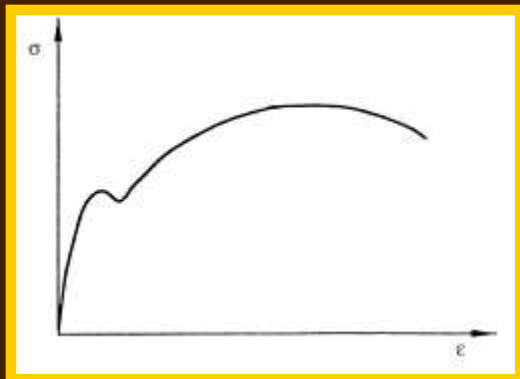
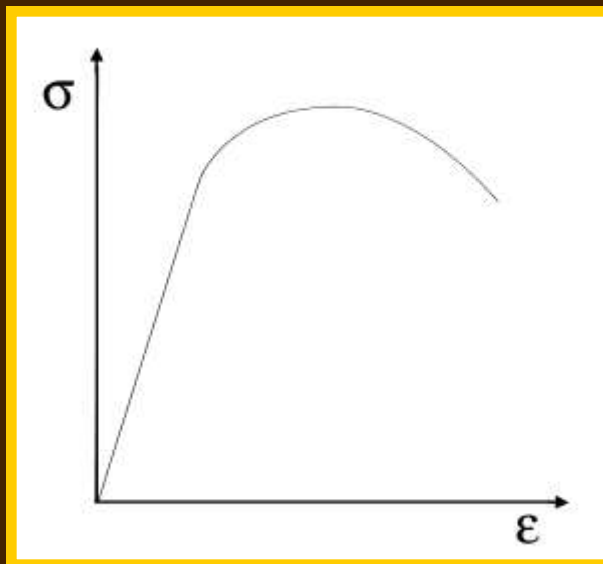
D

- III. stadium zpevnování
- zborcení brzdných mechanismů
- převládá příčný skluz
- anihilace dislokací → pokles koeficientu zpevnění

- při plastické deformaci se zvyšuje
 - počet dislokací (10% energie)
 - teplota (90% dodané energie se uvolní jako teplo)
- s rostoucí plastickou deformací roste teplota, což usnadňuje další plastickou deformaci (nastupují odpevňovací pochody)

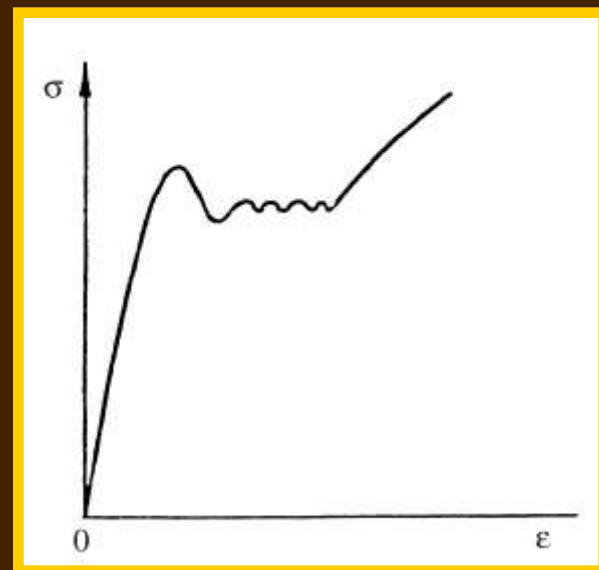
bcc struktura

- elastická deformace plynule přechází do III. stádia zpevnění (*chybí stadium snadného pohybu dislokací*)
- od začátku je aktivních více skluzových systémů



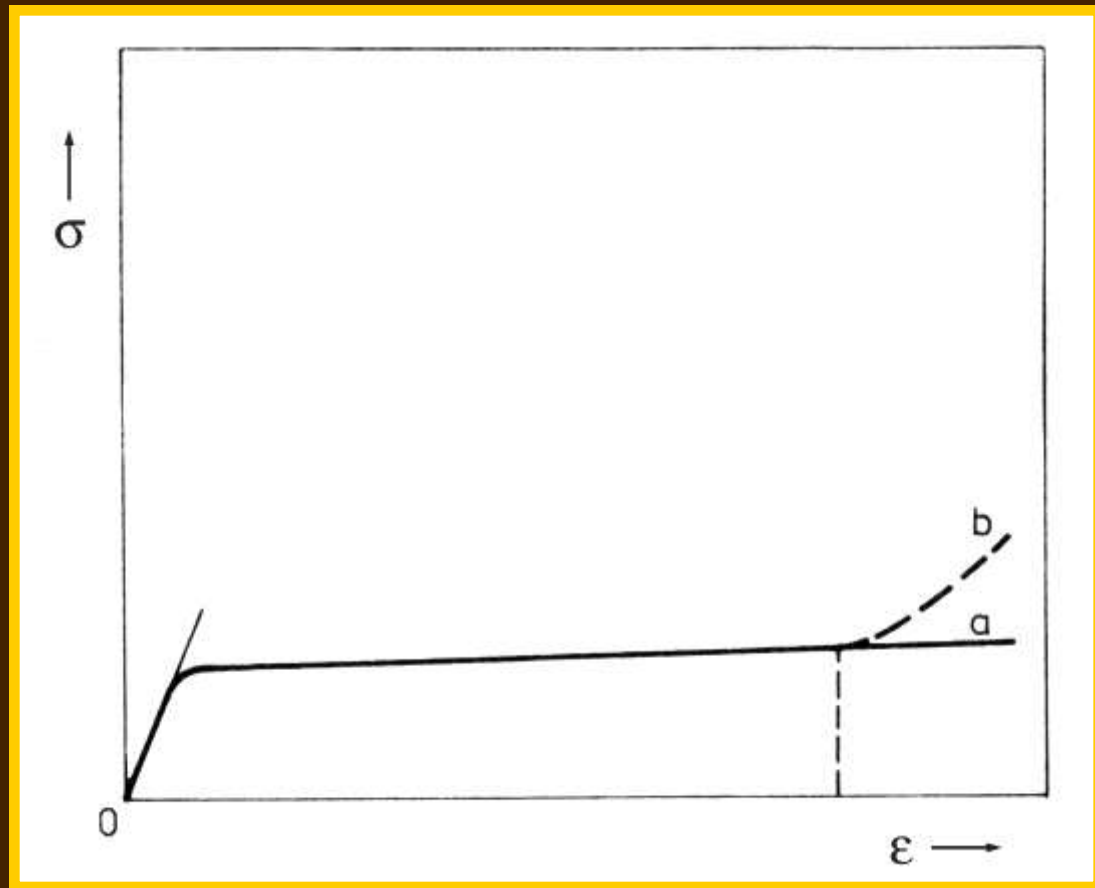
- u kovů s intersticiálními příměsemi se objevuje tzv. **výrazná mez kluzu**

- při nízkých teplotách se u kovů s bcc, hcp či bct mřížkou projevuje **výrazná mez kluzu spojená s dvojčatěním**



hexagonální struktura

- kovy s **hcp** mřížkou mají jedinou soustavu rovnoběžných rovin
 - nemůže se uskutečnit protínání dislokací
 - materiály se zpevňují jen velmi málo ve II. stádiu zpevňování ($\alpha \approx 10^{-4}G$)
- **III. stádium** se projevuje pouze kovů s nízkým poměrem **c/a**, (mohou se aktivovat i další roviny skluzu)

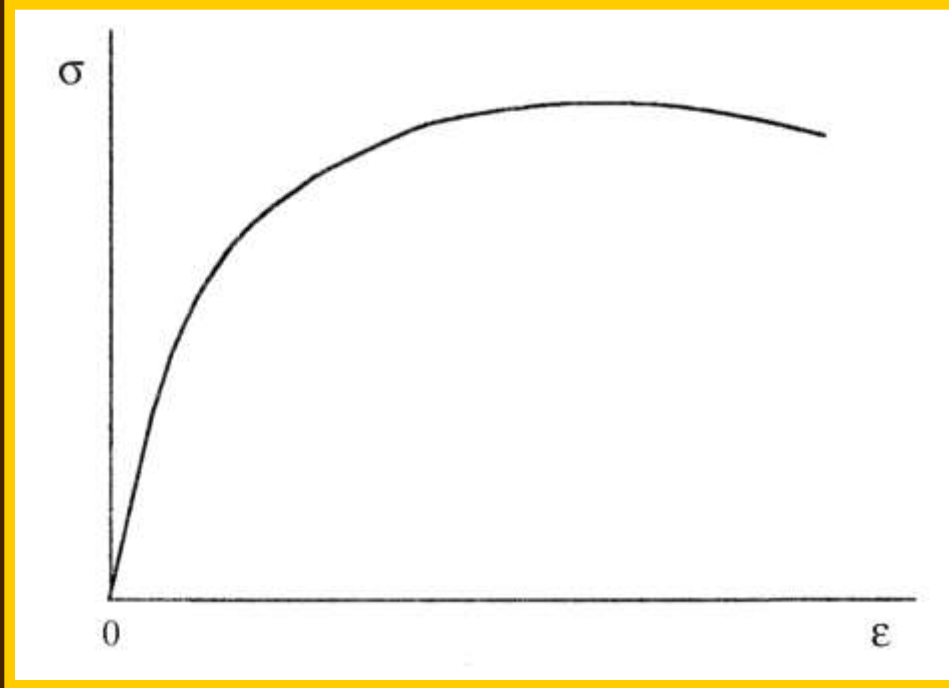


Zpevňování plastickou deformací

Polykrystalické materiály

Polykrystal = agregát náhodně orientovaných zrn různé velikosti, které jsou propojeny společnými hranicemi

- prakticky zde nedochází k čistě pružné deformaci
(určitý podíl zrn se namáhá plasticky)



v libovolném okamžiku namáhání platí

$$\epsilon_{celk.} = \epsilon_{elast.} + \epsilon_{plast.}$$

- nelze dosáhnout fyzikální meze pružnosti \rightarrow nutno uvádět hodnoty smluvní, kdy se zanedbávají plastické deformace

Deformační zpevňování polykrystalických materiálů

- všechny faktory a mechanismy deformačního zpevňování monokrystalů se uplatňují i u polykrystalických materiálů
- navíc přistupuje velmi významný účinek hranic zrn

Hranice zrna - nepřekonatelná překážka pro pohyb dislokací

- dislokace se zde hromadí, vytváří napětí
- místa zvýšené energie krystalů

Hallův – Petchův vztah

$$R_e = \sigma_0 + \frac{K}{\sqrt{d_{zrna}}}$$

mez kluzu

třecí napětí

průměr zrna

- pro homogenní jednofázové struktury
(*tuhé roztoky*)

Langfordův - Cohenův vztah

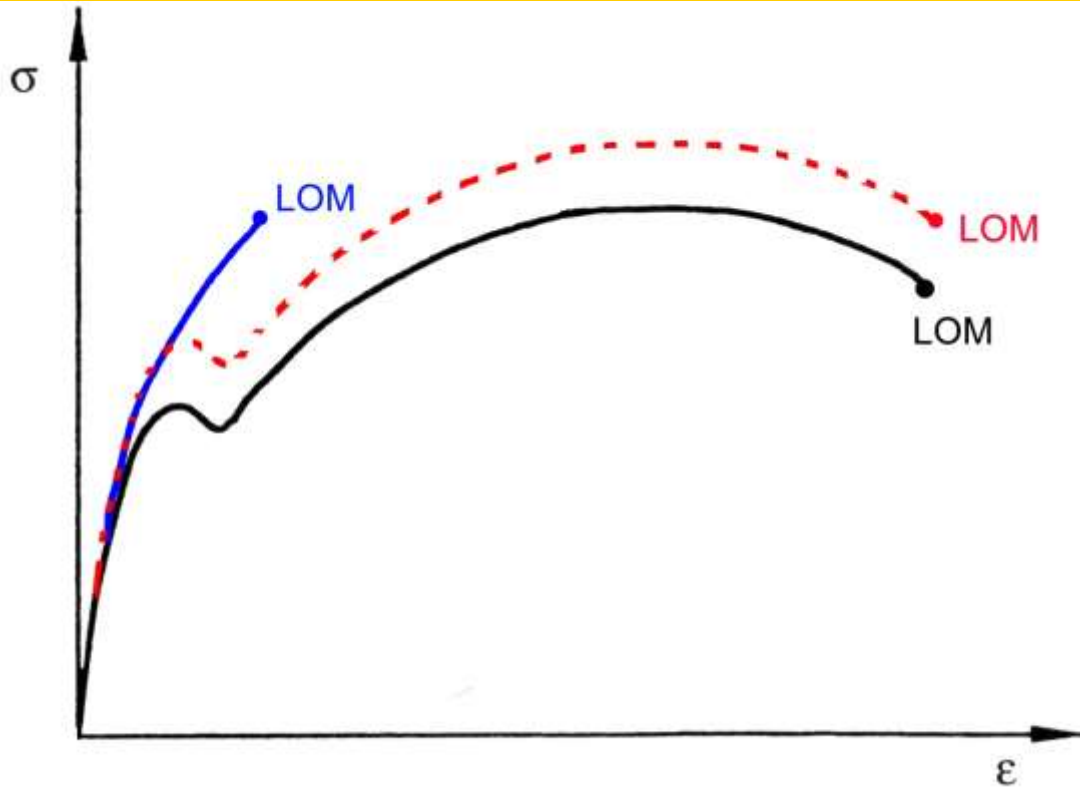
$$R_e = \sigma_0 + Kd_z^{-n}$$

- pro deskovité a jehlicovité struktury
(*martenzit, bainit*) $n \approx 1$

Vliv rychlosti deformace na deformační zpevnování polykrystalických materiálů

$$\sigma = A \cdot \left(\frac{d\varepsilon}{dt} \right)^m$$

A – konstanta závislá na typu materiálu
 $m > 0,2$ (konstanta závislá na typu materiálu)



- nejcitlivější jsou materiály s výraznou mezí kluzu
- s rostoucí rychlostí deformace roste tendence ke křehkému porušení
- m lze zvýšit zvolením vhodného chemického složení a velikosti zrna ($m \approx 0,5$)
- při namáhání takových materiálů lze docílit snadné deformace (velmi pomalé) o několik řádů než za normálních podmínek
- tažnost řádově x. 1000 % (*superplasticita*)

Superplasticita

$$\sigma = A \cdot \left(\frac{d\varepsilon}{dt} \right)^m$$

A – konstanta závislá na typu materiálu
m $\approx 0,5$ (konstanta závislá na typu materiálu)

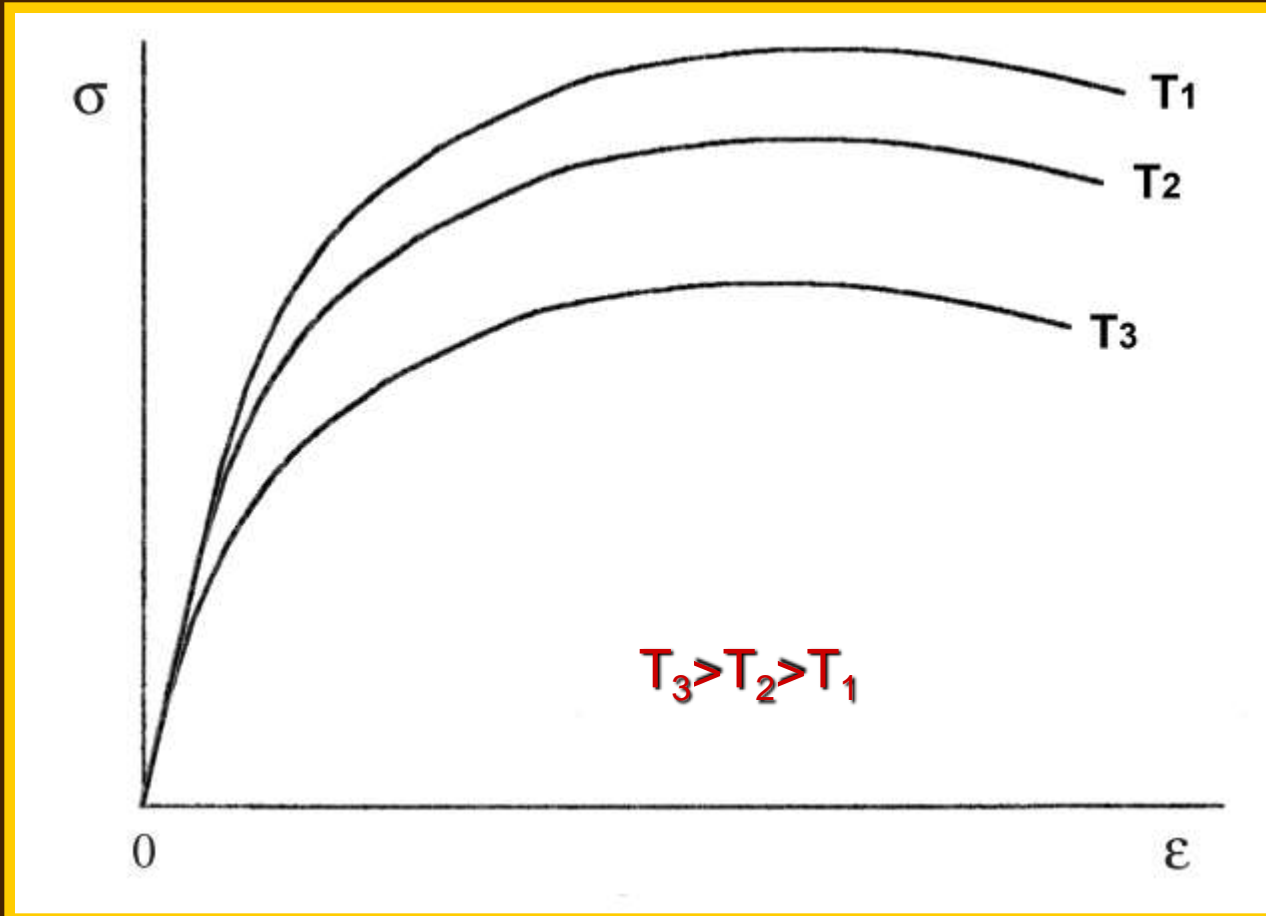
Podmínky

- chemické složení** (převážně eutektika – ZnAl22, AlMg23, AlCu33, SbPb38, TiAl6V4, oceli)
- teplota** (různá podle druhu slitiny, obvykle $T > 0,4 T_{\text{tání}}$)
- rychlost deformace** (obvykle cca 10^{-4} s^{-1})
- velikost zrna** (menší než $10 \mu\text{m}$)

- použití pro vysoce namáhané, strukturně bezdefektní výrobky

Vliv teploty na deformační zpevňování polykrystalických materiálů

- projevuje se změnou začátku III. stadia zpevnění (čím nižší je teplota, tím vyšší je napětí, při němž začíná III. stadium)
- vliv teploty je výraznější u čistých kovů než u slitin



- pokud v materiálu proběhne plastická deformace, dojde při ní k nahromadění energie
 - materiál je v **metastabilním stavu** a je-li třeba materiál dále zpracovávat tvářením, je nutné materiál přiblížit rovnovážnému stavu
 - nastupují tzv. **odpevňovací pochody**, které **uloženou energii** likvidují

Složky deformačního zpevnění

Dislokační zpevnění

- v důsledku interakcí volných dislokací s nepohyblivými dislokacemi
- závisí na hustotě dislokací

$$\sigma_{dislok.} = \rho^{0,5}$$

Zpevnění hranicemi zrn nebo subzrn

$$\sigma_z = Kd_z^{-0,5}$$

$$\sigma_{SZ} = Kd_{SZ}^{-0,5}$$

Zpevnění přítomností perlitu

$$\sigma_{per} = k_{per} x_{per}$$

x_{per} – objemový podíl perlitu

Zpevnění substitučními a intersticiálními atomy

$$\sigma_s = \sum_i k_i x_i$$

$$\sigma_i = kc$$

x_i – obsah prvku v hm. %

Zpevnění precipitací

σ_{per} – závisí na disperzitě částic, typu částic a druhu interakce dislokace-částice

Superpozice složek zpevnění

- jednotlivé dílčí příspěvky zpevnění jsou aditivní

$$R_{p0,2} = \sigma_0 + \sigma_{dislok.} + \sigma_z + \sigma_{sz} + \sigma_{per} + \sigma_s + \sigma_i + \sigma_{prec.}$$