

Mašinski materijali 3

dr Gordana Bakić, van.prof.

1 Uvod

- Greške kristalne rešetke
- Reakcije u čvrstom stanju
- Dijagrami stanja
- Zašto nam je bitno?

Vrste grešaka kristalnih struktura

- praznine
- intersticijali
- supstitucijski atomi

Tačkaste greške

- dislokacije: ivične i zavojne

Linijske greške

- granice zrna/subzrna

Površinske greške

- prsline, uključci, čestice

Zapreminske greške

Dislokacije - Ivična dislokacija

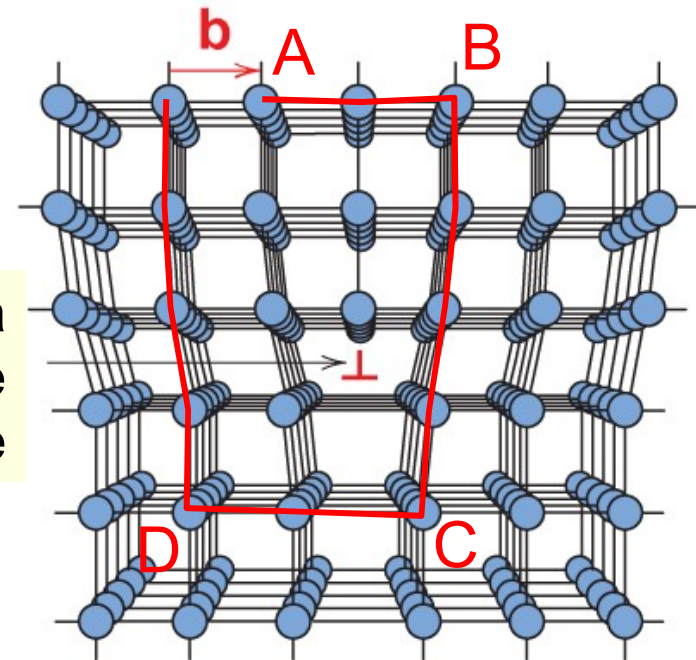
Dislokacija – Linijska jednodimenzionalna greška oko koje su atomi izvedeni iz ravnotežnog položaja

- umetnuta poluravan
- kristalne ravni “klizaju” kada se dislokacije kreću,
- rezultat kretanja dislokacija je plastična, trajna deformacija.

- $\mathbf{b} \perp$ na dislokaciju

linija
ivične
dislokacije

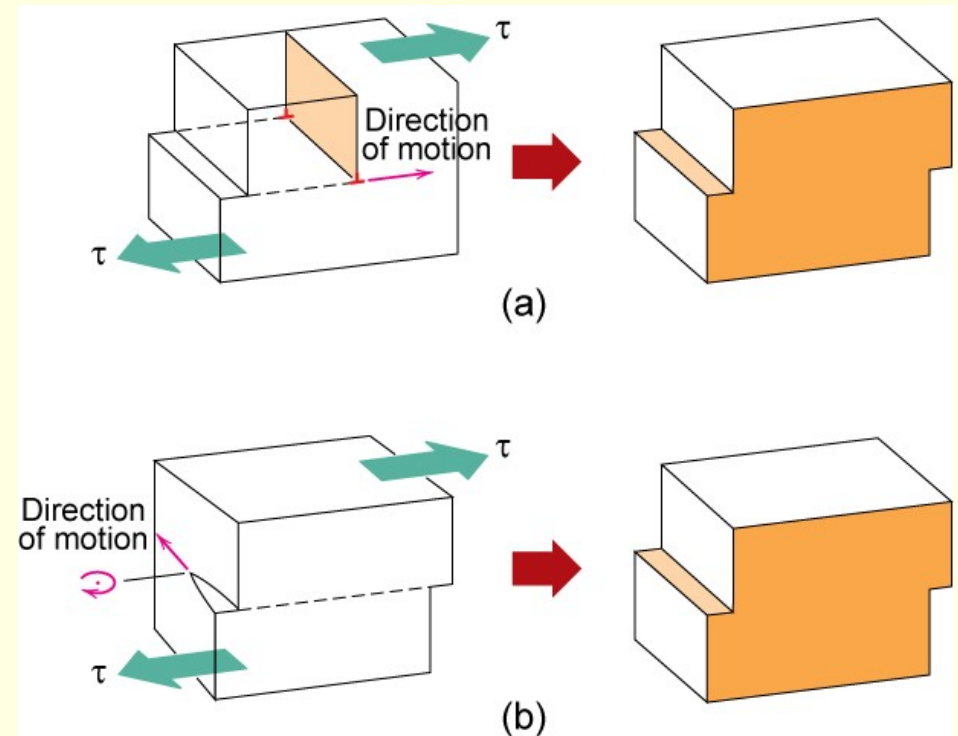
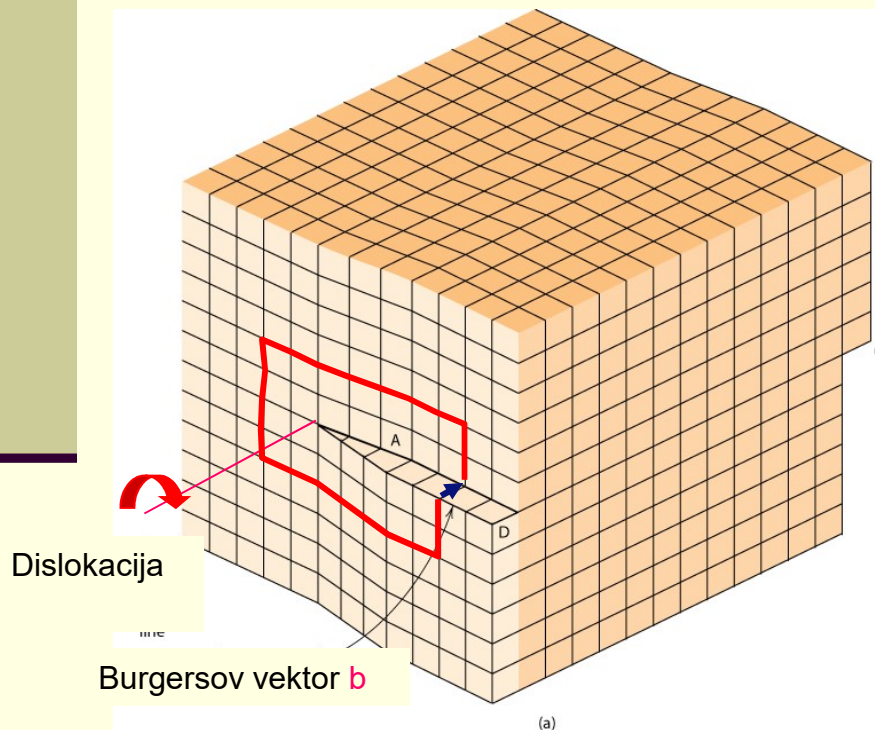
Burgersov vektor



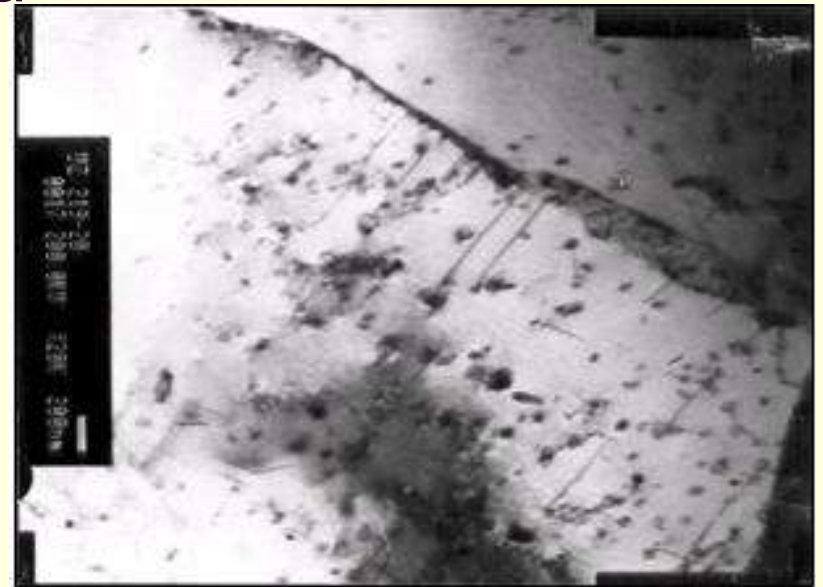
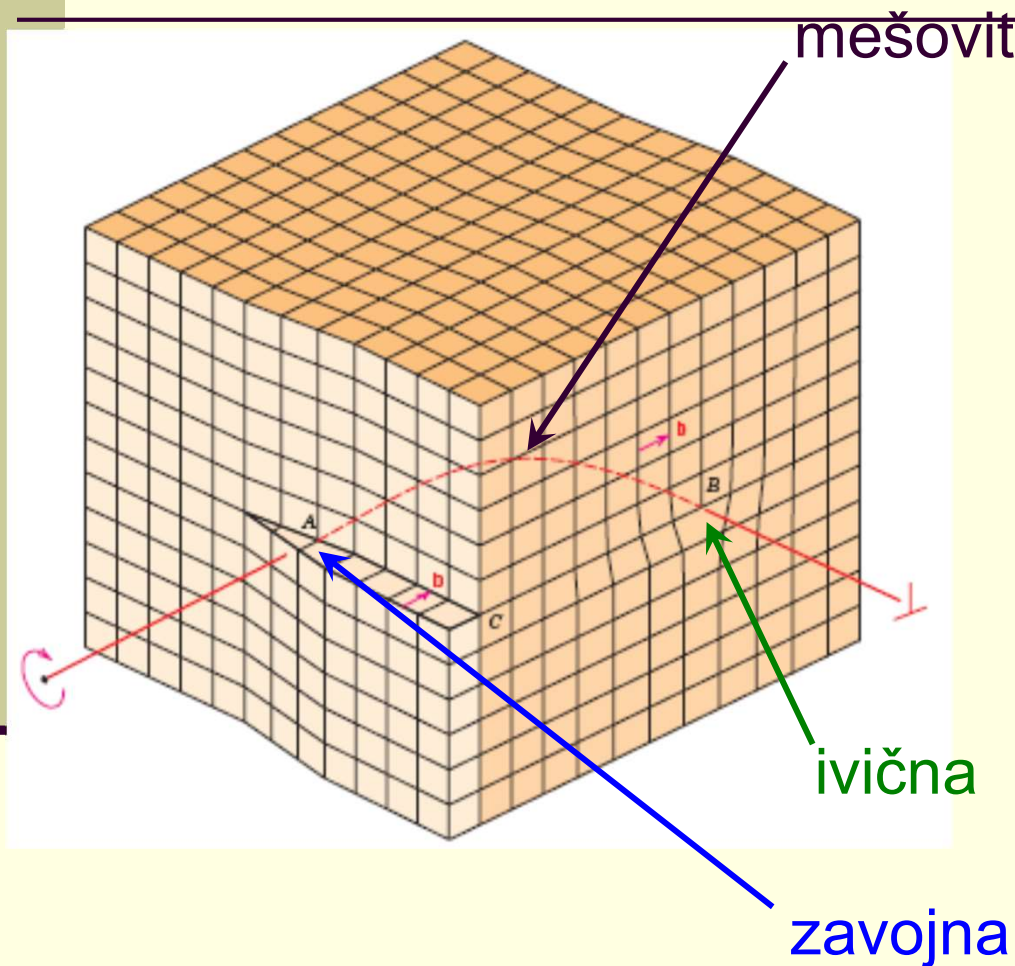
Burgersov vektor, \mathbf{b} : mera deformacije rešetke

Dislokacije - Zavojna dislokacija

- spiralna zavojnica kao rezultat smicanja ravni
- $\mathbf{b} \parallel$ dislokacionoj liniji

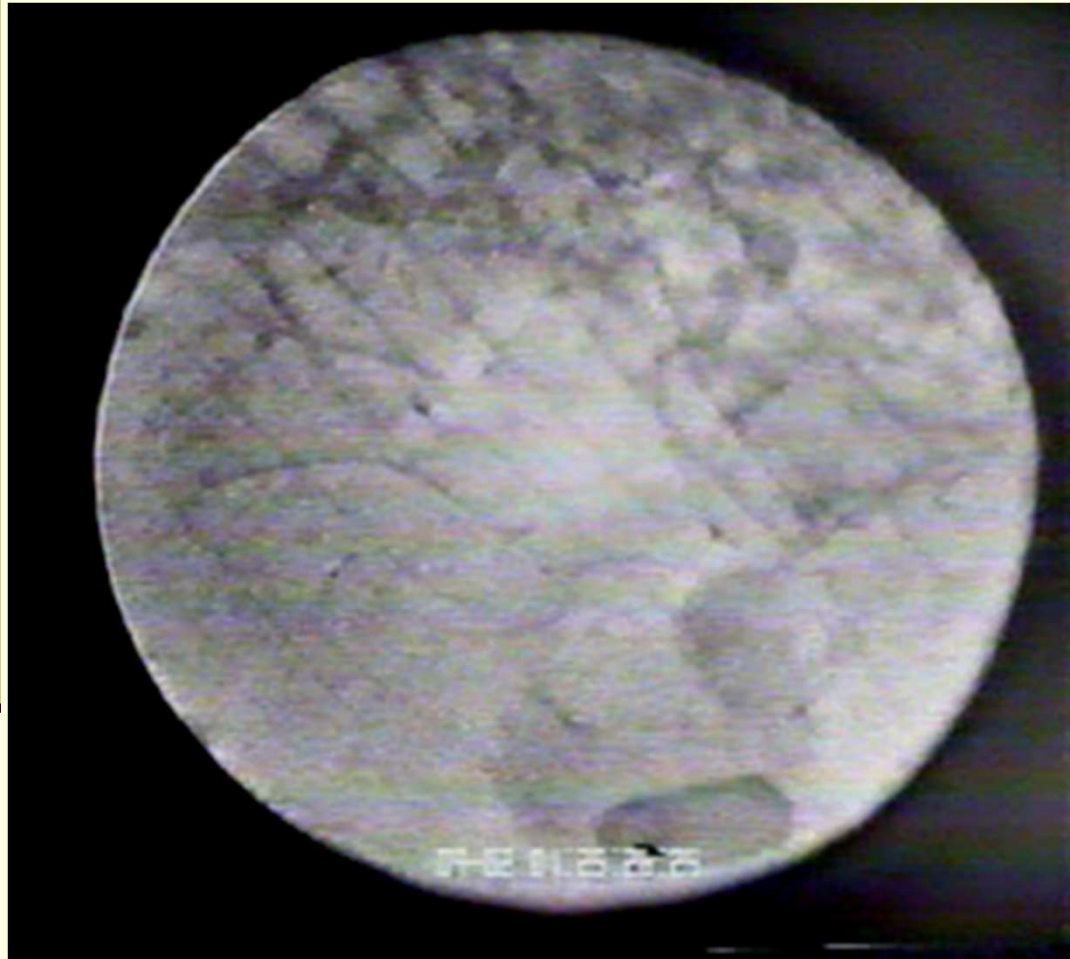


Ivična, zavojna i mešovita dislokacija

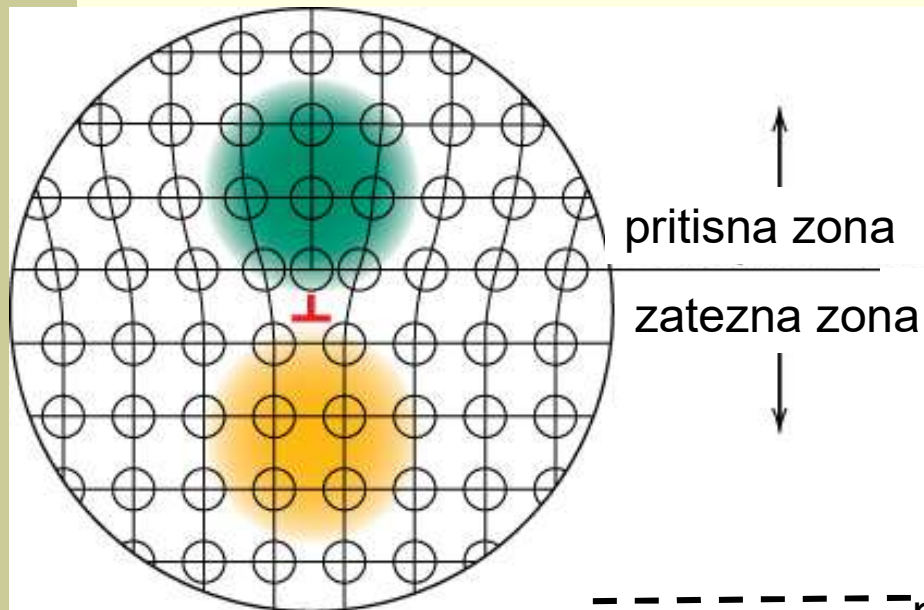


Dislokacije su vidljive pod elektronskim mikroskopom (TEM)

Kretanje dislokacija

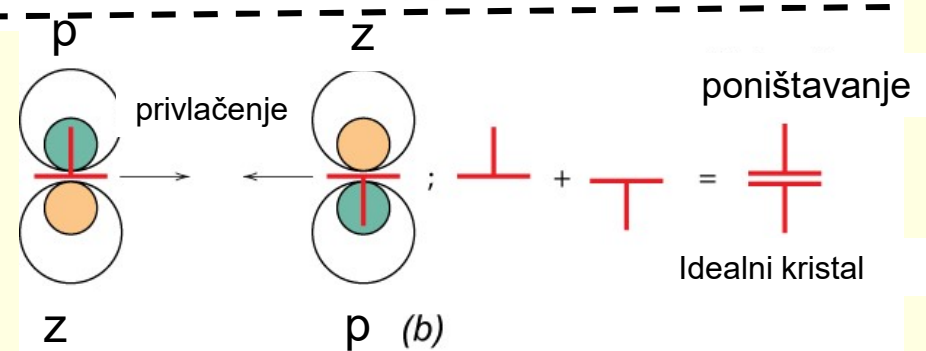
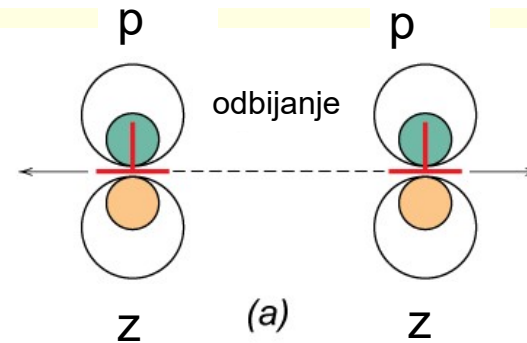


Koncentracija napona na dislokacijama



Reakcije dislokacija

Dislokacije istog znaka se odbijaju



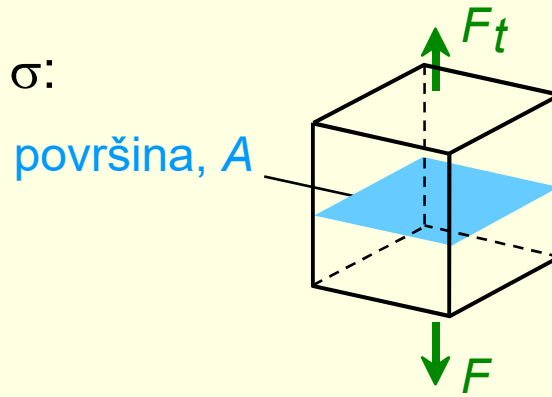
Dislokacije suprotnog znaka se privlače

Dislokacije i mehanizmi ojačavanja

Naponi

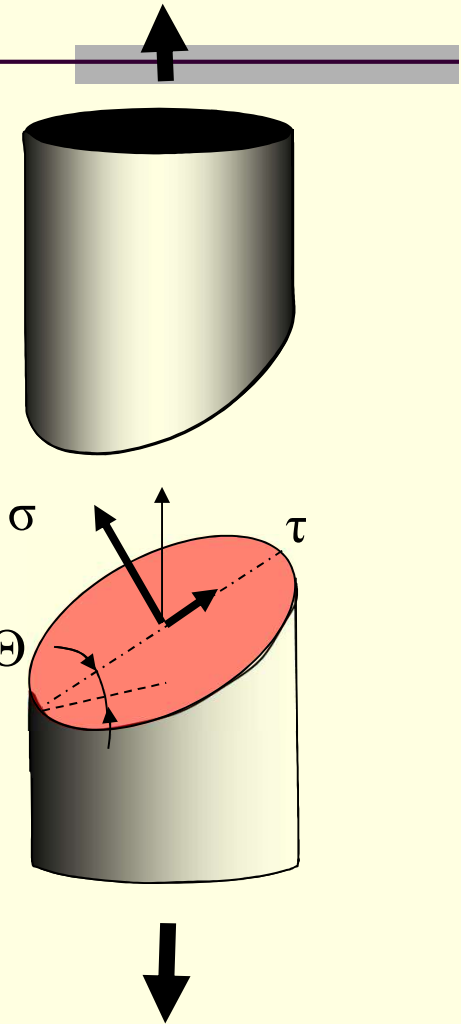
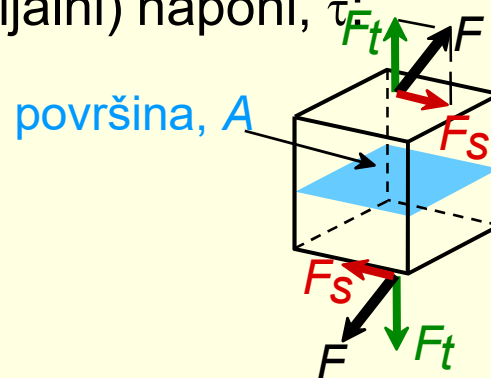
- **Zatezni** naponi, σ :

$$\sigma = \frac{F_t}{A_o}$$



- **Smicajni** (tangencijalni) naponi, τ :

$$\tau = \frac{F_s}{A_o}$$



Dislokacije i mehanizmi ojačavanja

- Dislokacije klizaju usled rezultujućeg smicajnog napona, τ_R .
- Smicajni napon se indukuje i kod zatezanja u nekom preseku

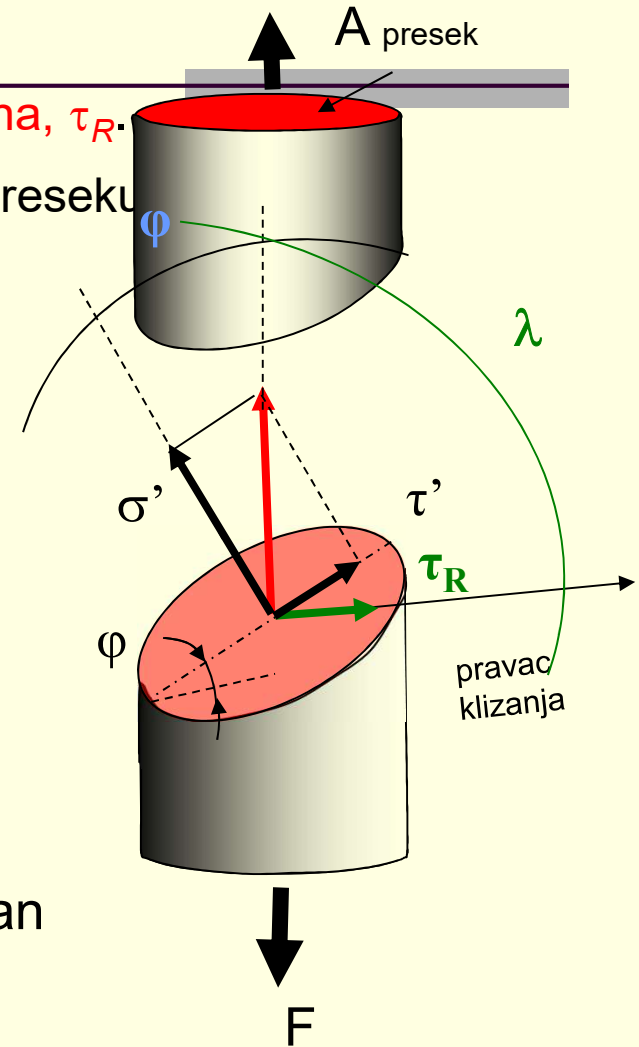
$$\sigma = \frac{F}{A}$$

$$\tau' = \sigma \sin \varphi \cos \varphi = \sigma \left(\frac{\sin 2\varphi}{2} \right)$$

$$\tau_R = \sigma \cos \varphi \cos \lambda$$

φ – ugao između sile zatezanja i normale na ravan klizanja

λ – ugao između sile zatezanja i pravca klizanja



Dislokacije i mehanizmi ojačavanja

Kritična veličina smicajnog napona za kretanje dislokacija

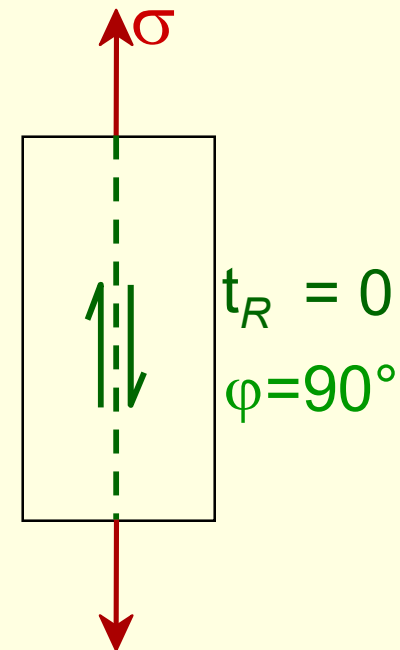
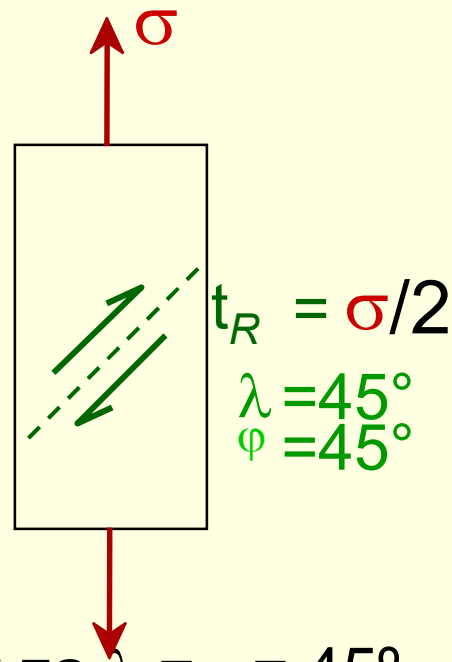
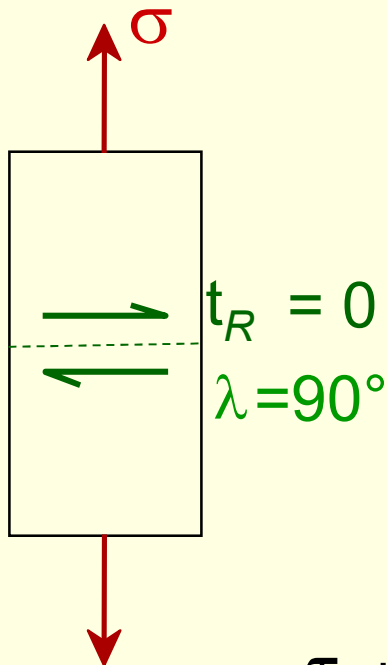
Uslov za kretanje dislokacija:
Orijentacija kristala olakšava ili
otežava kretanje dislokacija

$$\tau_R > \tau_{kr}$$

obično oko

10^{-4} GPa - 10^{-2} GPa

$$\tau_R = \sigma \cos \lambda \cos \varphi$$

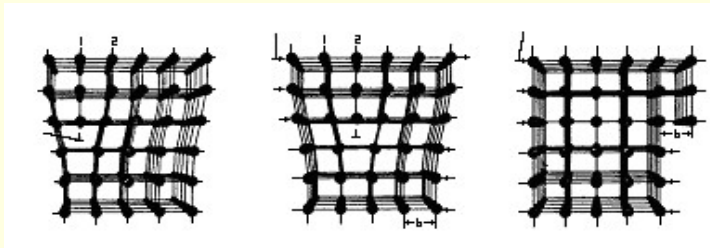


τ max za $\lambda = \varphi = 45^\circ$

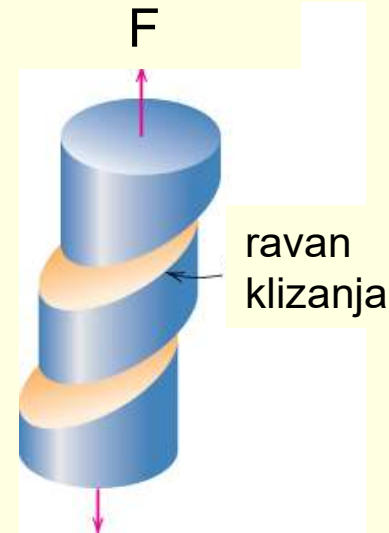
Dislokacije i mehanizmi ojačavanja

Klizanje dislokacija

Klizanje kod monokristala



Klizanje kod polikristala

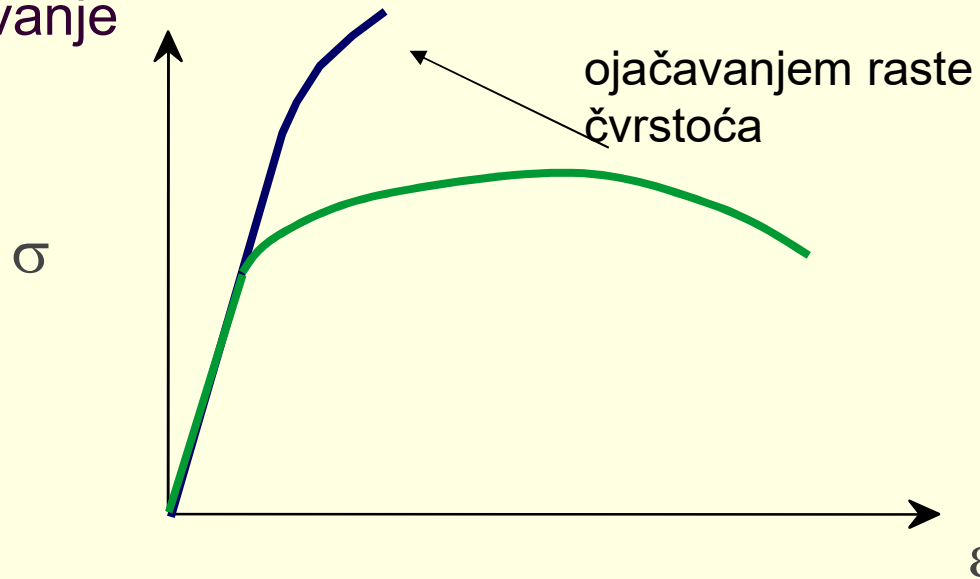


- Veća čvrstoća – granice zrna koče dislokacije
- Pravac i ravan klizanja dislokacija se menjanju od zrna do zrna – za to je potrebna dodatana energija.
- τ_R se menja od kristala do kristala tako da se prvo deformišu zrna koja imaju najviši smicajni napon, dok se ostala deformišu kasnije

Dislokacije i mehanizmi ojačavanja

4 Strategije za ojačavanje metala:

1. Smanjenje veličine zrna
2. Čvrsti rastvori
3. Čestično ojačavanje
4. Deformaciono ojačavanje

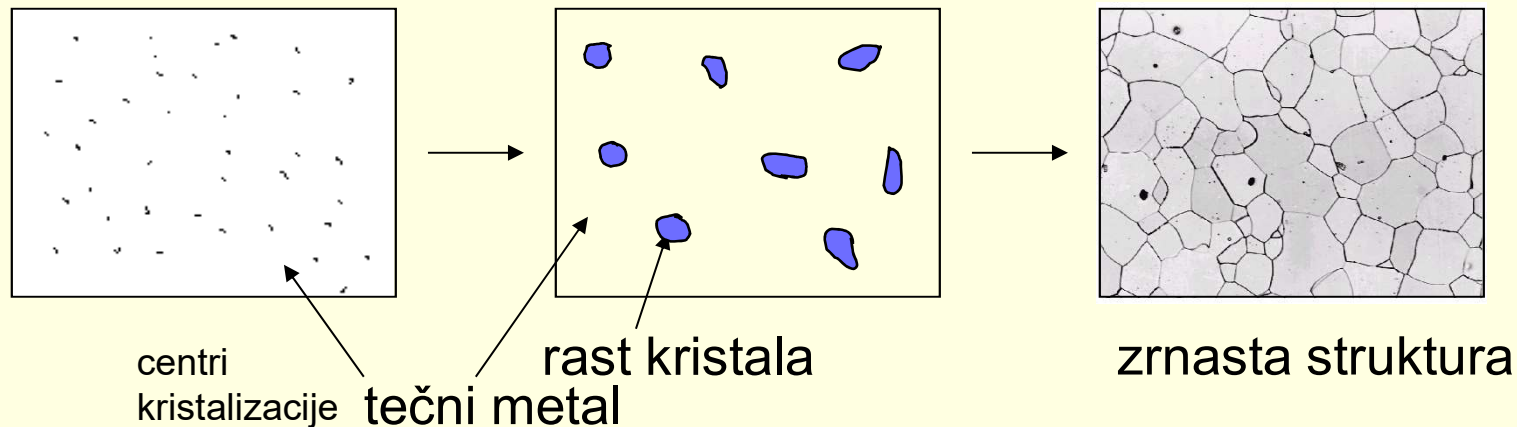


Sve strategije otežavaju kretanje dislokacija!

Dislokacije i mehanizmi ojačavanja

1. Smanjenje veličine zrna

- Očvršćavanje tokom livenja posmatramo u 2 koraka:
 - formiranje nukleusa – centara kristalizacije
 - rast nukleusa u kristale - zrna

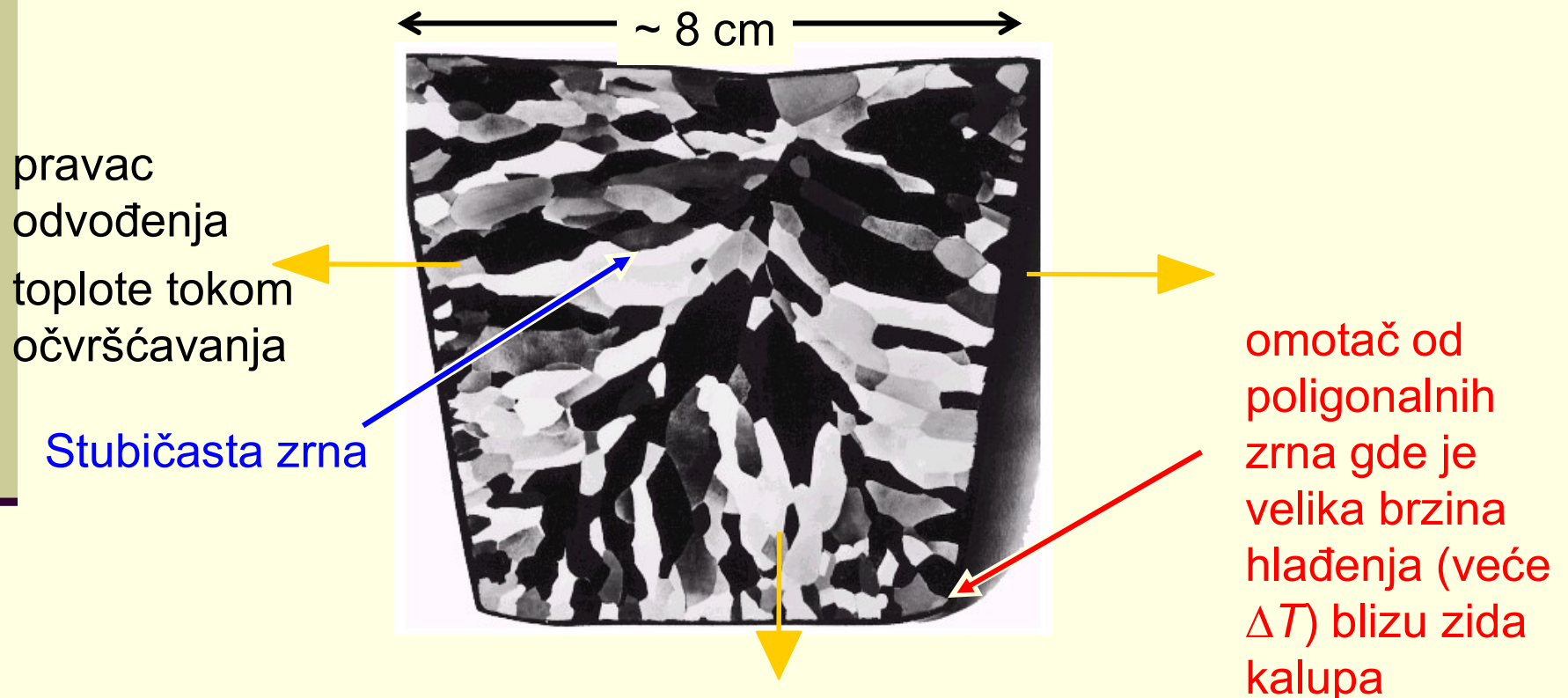


- Kristali rastu sve dok se ne sudare sa susednim

Dislokacije i mehanizmi ojačavanja

1. Smanjenje veličine zrna

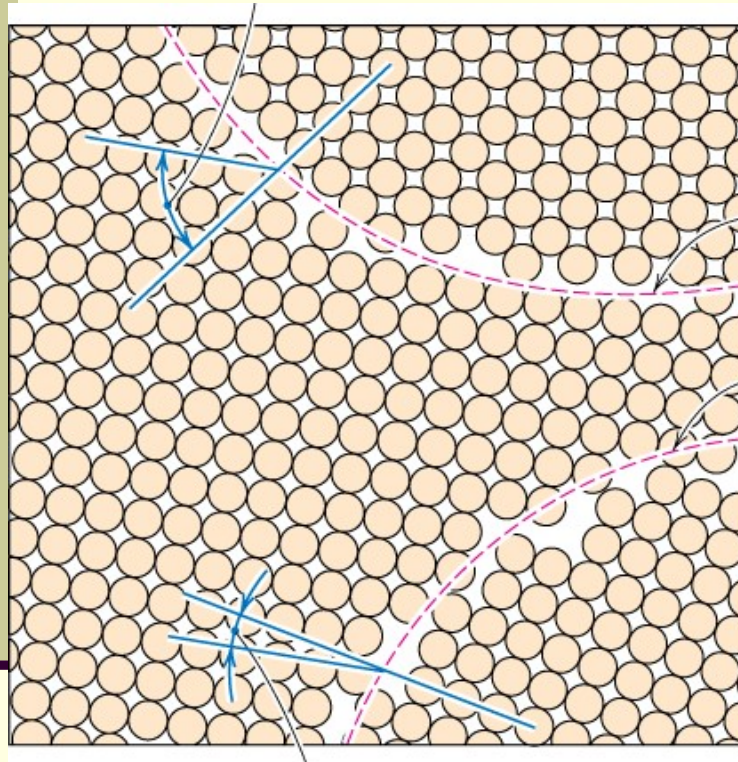
- Zrna mogu biti
- poligonalna (približno iste veličine u svim pravcima)
 - stubičasta (kolumnarna ili izdužena zrna)



Rafinacija zrna – dodajemo hemijske elemente koji pomažu da se formiraju sitnija i uniformnija zrna.

Dislokacije i mehanizmi ojačavanja

1. Smanjenje veličine zrna



granice
zrna –
granice pod
velikim
uglom

granice
subzrna –
granice pod
malim
uglom



Dislokacije i mehanizmi ojačavanja

1. Smanjenje veličine zrna

- Granice zrna su prepreka za klizanje dislokac.
- Granice su veća prepreka što im je ugao veći.
- Što su sitnija zrna veći je broj barijera – veća čvrstoća metala.

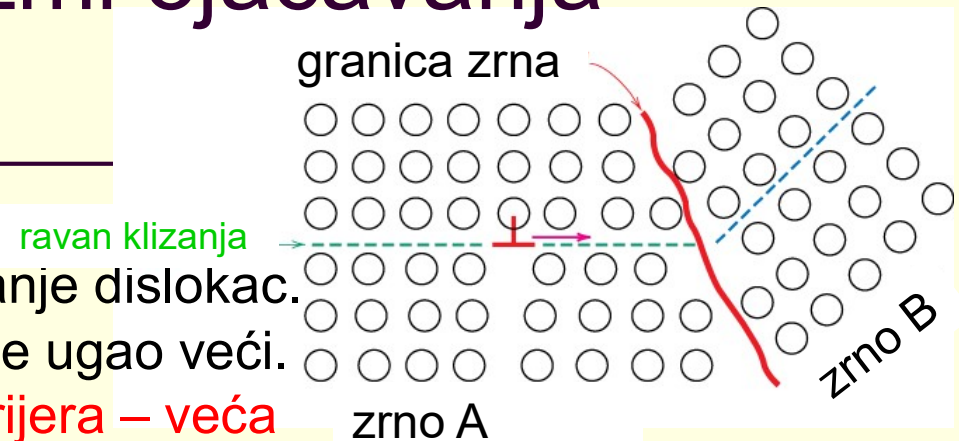
- Hall-Petch jednačina:

$$R_{eH} = \sigma_o + k_y d^{-1/2}$$

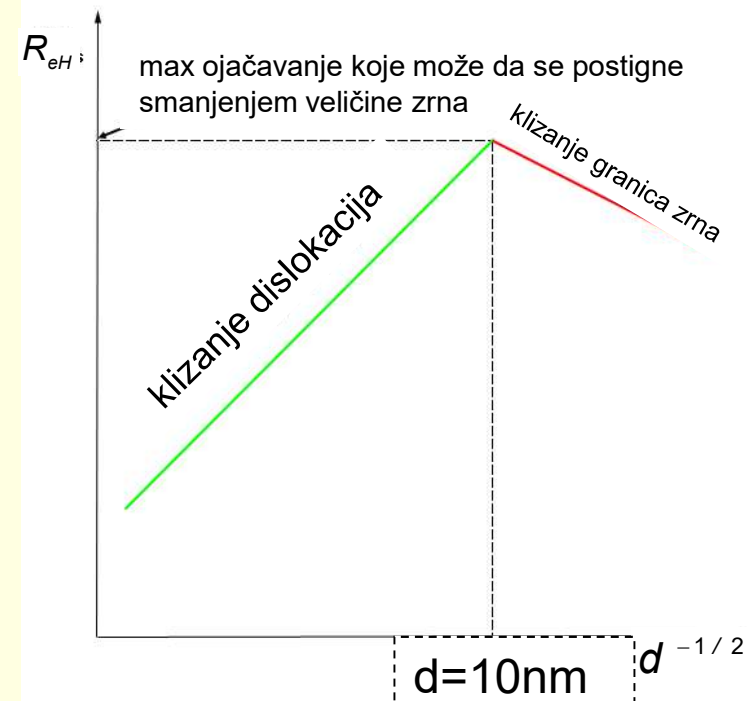
k_y - konstanta za materijal

d - veličina zrna

σ_o – napon za pokretanje dislokacija



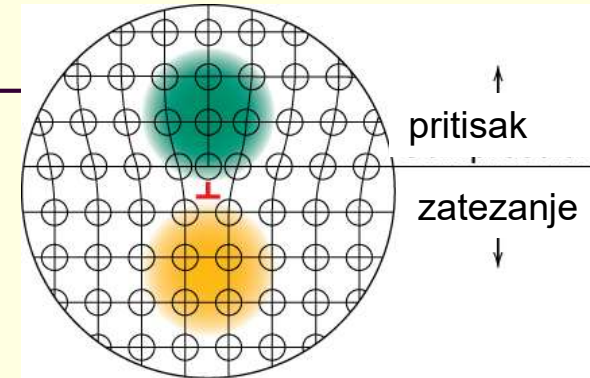
Granično ojačavanje



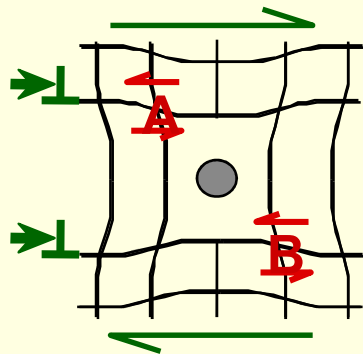
Dislokacije i mehanizmi ojačavanja

2. Ojačavanje čvrstim rastvorom

- Strani atomi krive rešetku i naprežu je
- Naponsko polje je prepreka za kretanje dislokacija

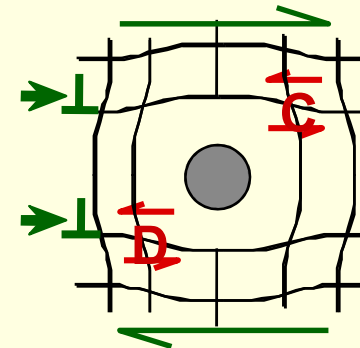


supstitucijski atom manjeg prečnika



Supstitucijski atomi generišu lokalne napone na mestima **A** i **B** koji se suprotstavljaju kretanju dislokacija u desno

supstitucijski atom većeg prečnika

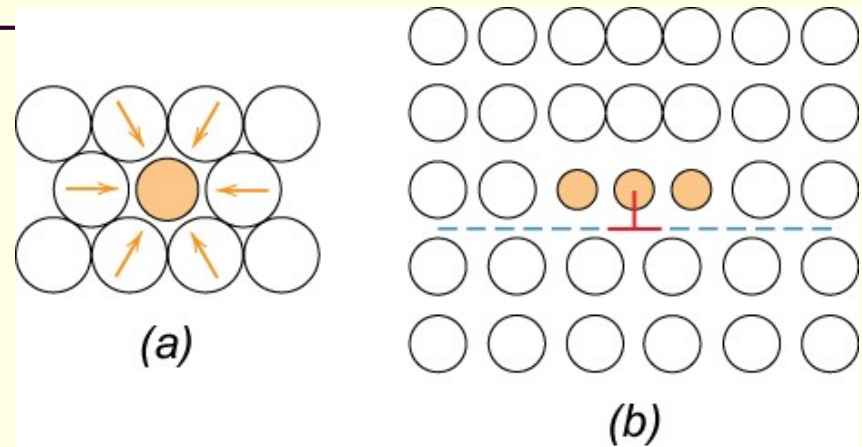


Supstitucijski atomi generišu lokalne napone na mestima **C** i **D** koji se suprotstavljaju kretanju dislokacija u desno

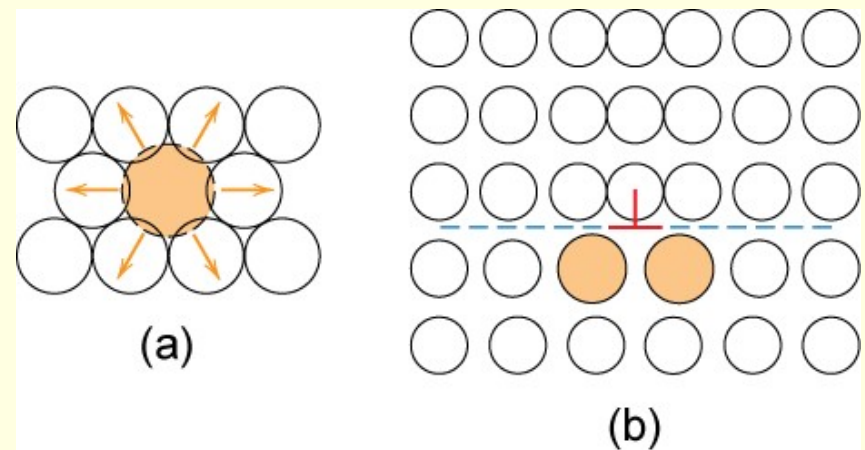
Dislokacije i mehanizmi ojačavanja

2. Ojačavanje čvrstim rastvorom

- **atomi manjeg prečnika** se obično skupljaju na pritisknoj strani dislokacije



- **atomi većeg prečnika** se obično skupljaju na zateznoj strani dislokacija

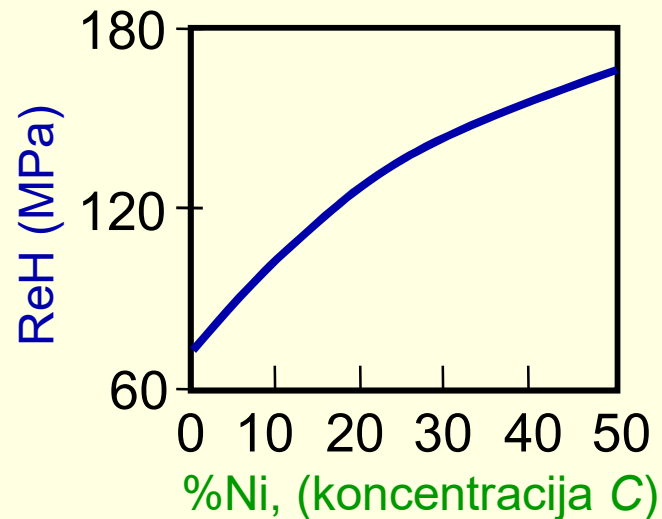
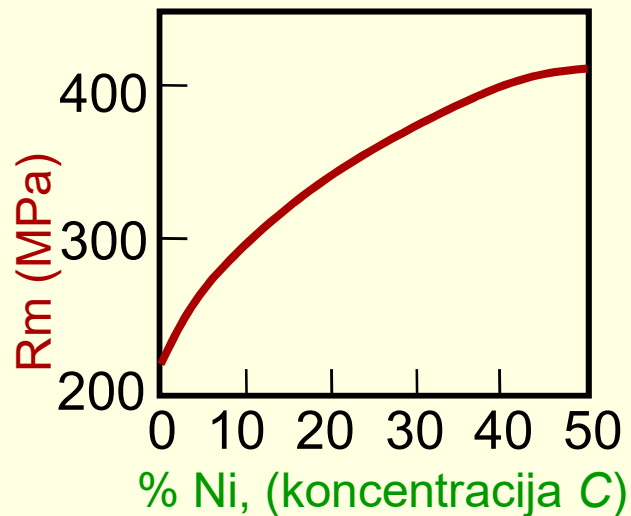


strani atomi koče dislokacije \therefore raste čvrstoća

Dislokacije i mehanizmi ojačavanja

npr: Ojačavanje čvrstim rastvorom bakra Cu

- Rm & ReH rastu sa % Ni.

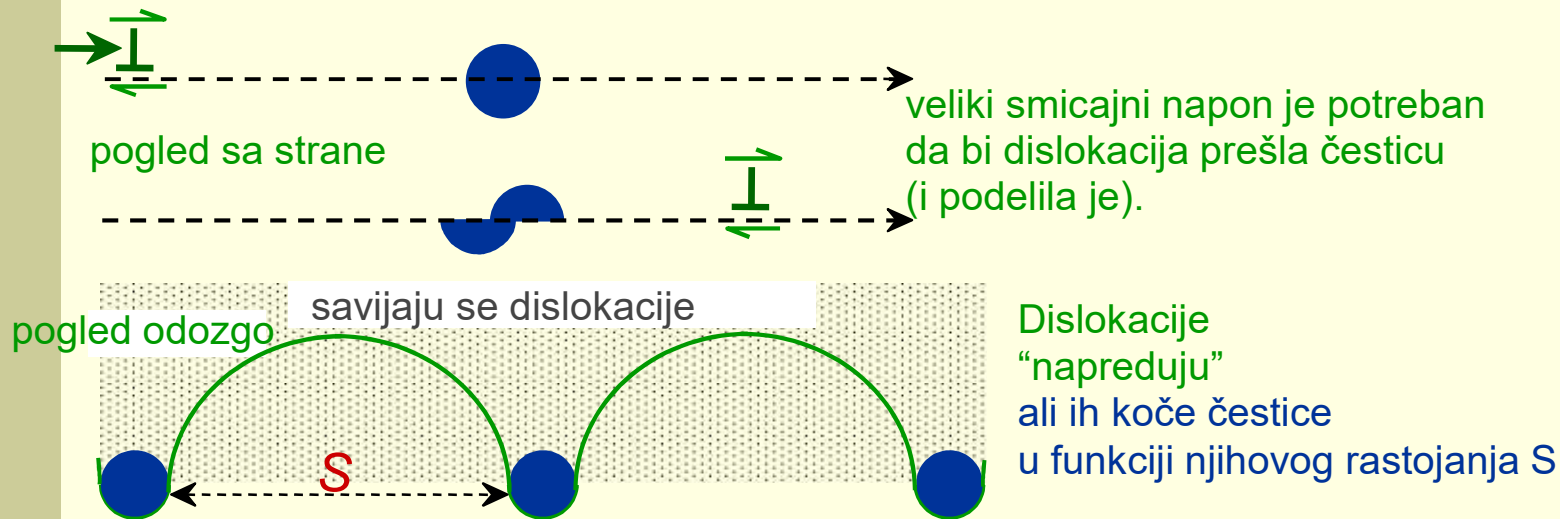


- Empirijska zavisnost: $\sigma_y \sim C^{1/2}$
- Legiranjem raste **ReH** and **Rm** (...do 50%... posle je to legura Ni...).

Dislokacije i mehanizmi ojačavanja

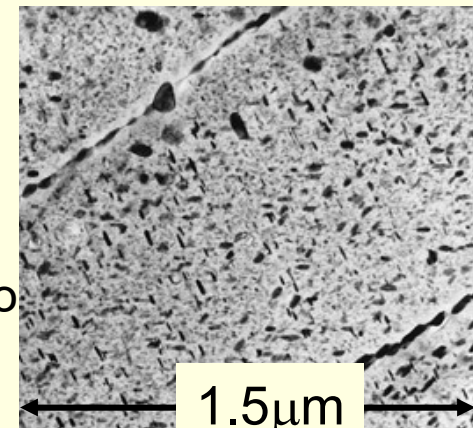
3. Čestično ojačavanje

- Tvrde čestice se teško dele kada dođe do njih dislokacija.
npr: keramike u metalima (neki karbidi kao što je Fe_3C u Fe).



- Ojačavanje: $\sigma_y \sim \frac{1}{S}$

Al legura ojačana čestično



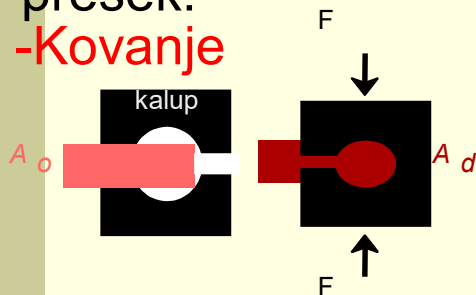
Dislokacije i mehanizmi ojačavanja

4. Deformaciono ojačavanje

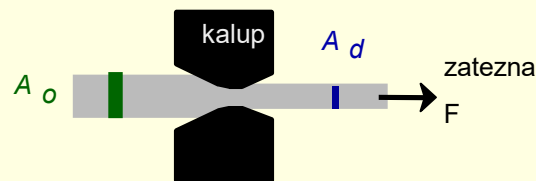
Deformacija koja nastaje ispod T rekristalizacije ili na sobnoj T .

Tokom oblikovanja menja se poprečni presek:

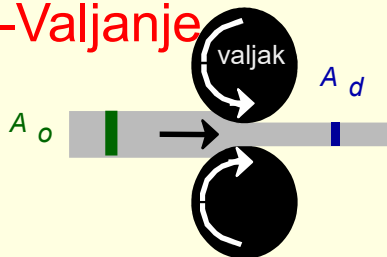
-Kovanje



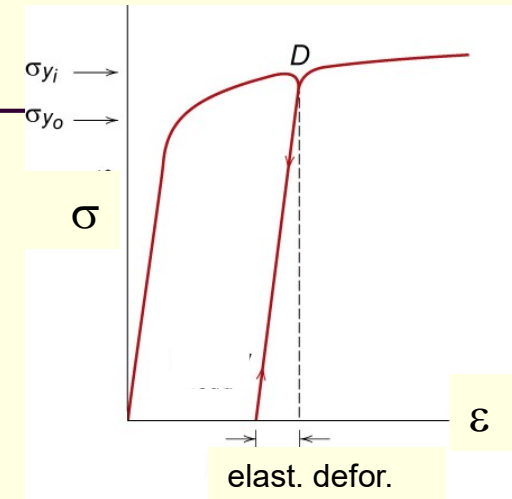
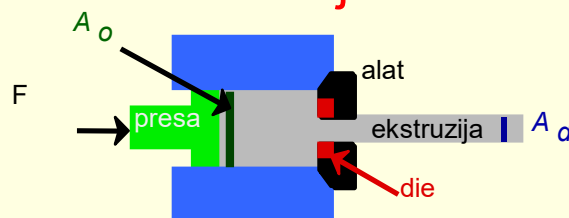
-Izvlačenje



-Valjanje



-Ekstruzija



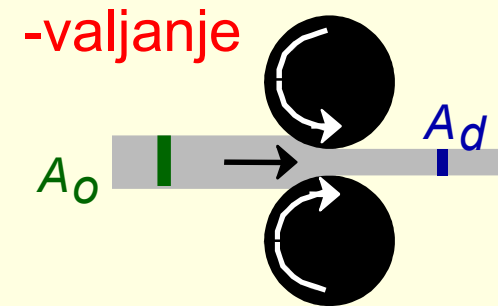
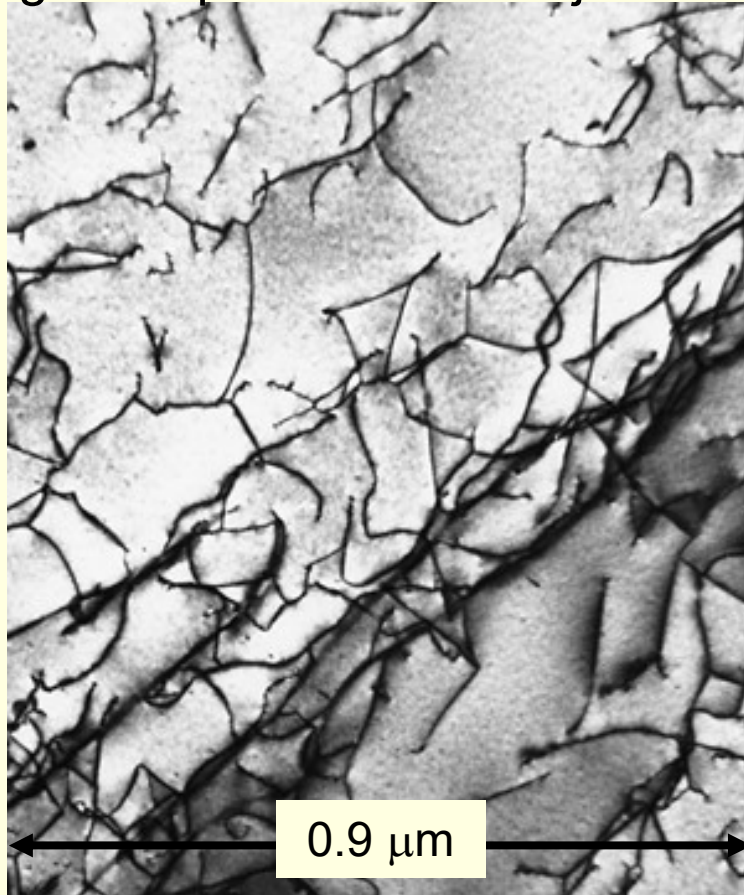
$$\% \text{defor.} = \frac{A_o - A_d}{A_o} \times 100$$

- Dislokacije se zapliću tokom hladne deformacije i koče.
- Stvaraju se nove

Dislokacije i mehanizmi ojačavanja

Npr: tokom hladnog valjanja – Deformaciono ojačavanje

- legura Ti posle deformacije na hladno:



- Dislokacije se koče međusobno tokom **hladne deformacije**.
- Zbog toga je njihovo dalje kretanje otežano.

Dislokacije i mehanizmi ojačavanja

Rezultat hladne deformacije

■ Gustina dislokacija = $\frac{\text{ukupna dužina dislokacija}}{\text{jed. zapremnine}} \quad \frac{\text{mm}}{\text{mm}^3}$

Monokristal

→ $\sim 10^3 \text{ mm}^{-2}$

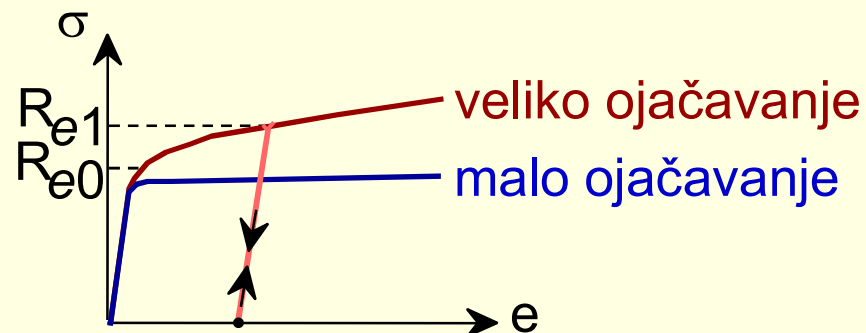
Hladna deformacija **uvećava** gustinu dislokacija

→ $10^9\text{-}10^{10} \text{ mm}^{-2}$

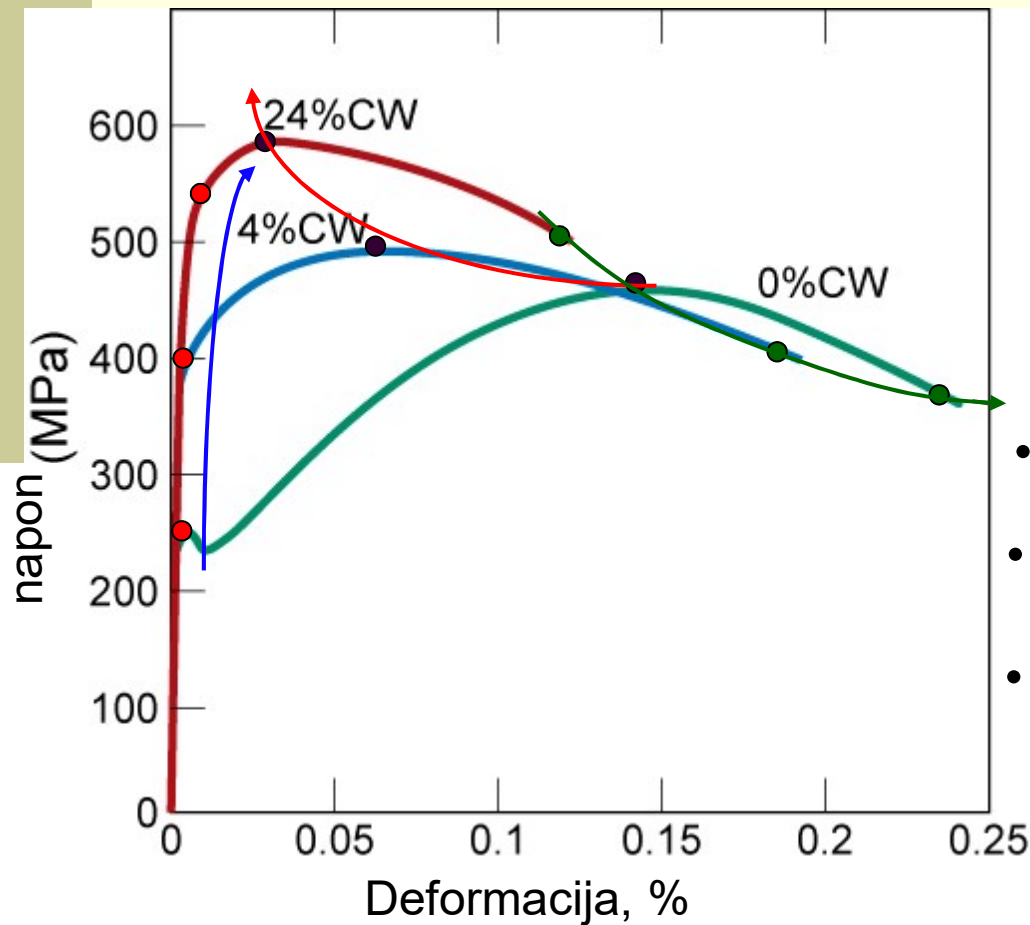
Termička obrada **smanjuje** gustinu dislokacija

→ $10^5\text{-}10^6 \text{ mm}^{-2}$

- Napon tečenja raste sa %deformacije:



Dislokacije i mehanizmi ojačavanja



Sa porastom **stepena deformacije:**
(na slici %CW je % hladne deformacije)

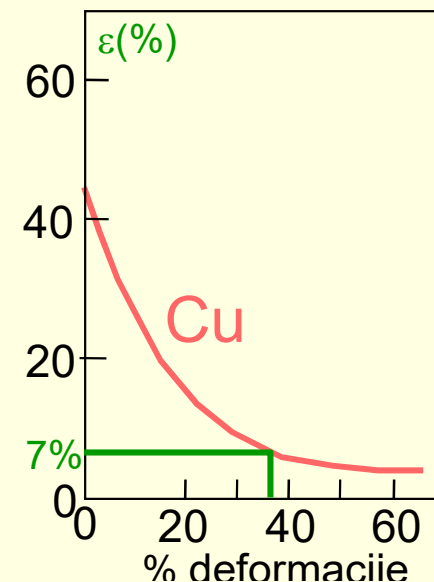
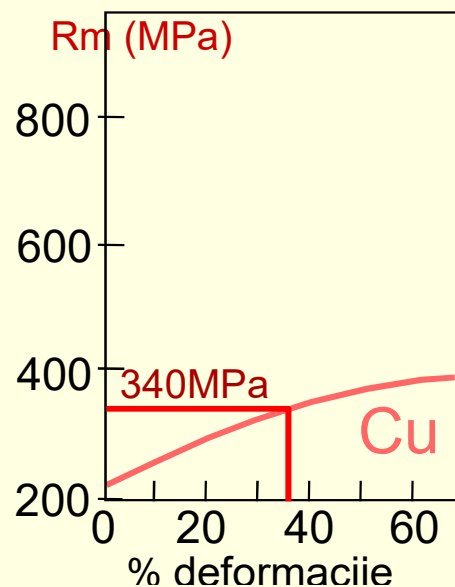
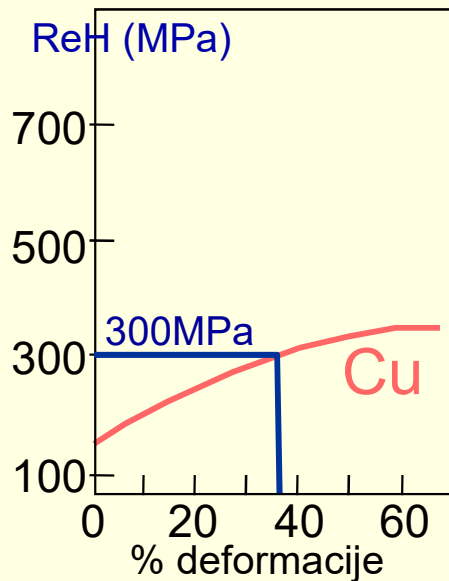
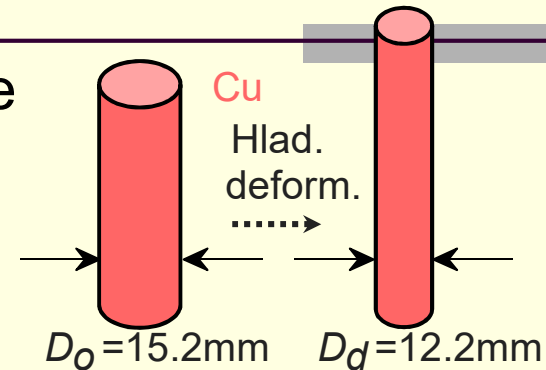
- **napon tečenja** raste.
- **zatezna čvrstoća** raste.
- duktilnost (**%A** i **%Z**) opada.

Dislokacije i mehanizmi ojačavanja

primer: ojačavanje Cu hladnom deformacijom

- Koliko iznose R_{eH} , R_m i ε posle hladne deformacije?

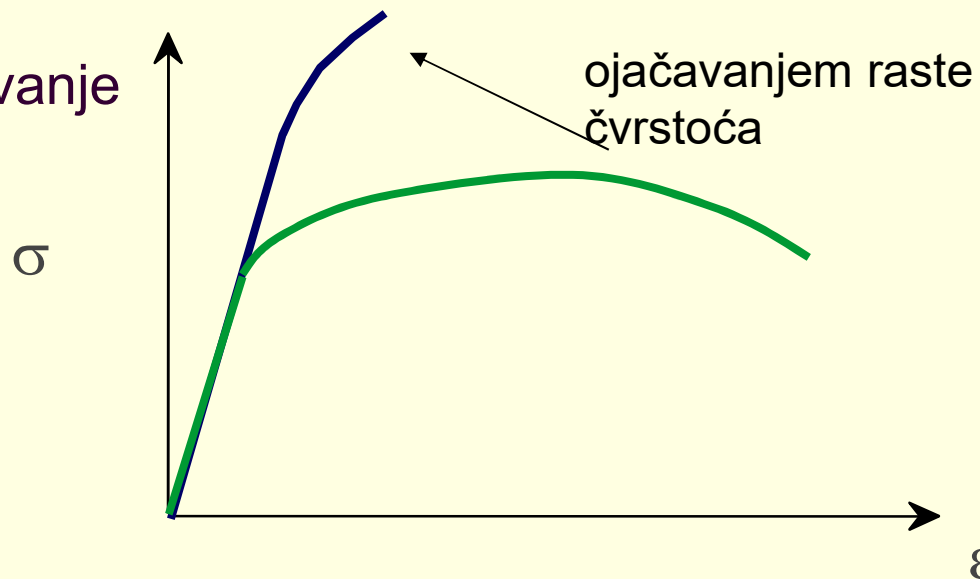
$$\%defor. = \frac{\pi r_o^2 - \pi r_d^2}{\pi r_o^2} \times 100 = 35.6\%$$



Dislokacije i mehanizmi ojačavanja

Da ponovimo – 4 mehanizma koja ojačavaju materijal tako što otežavaju kretanje dislokacija su:

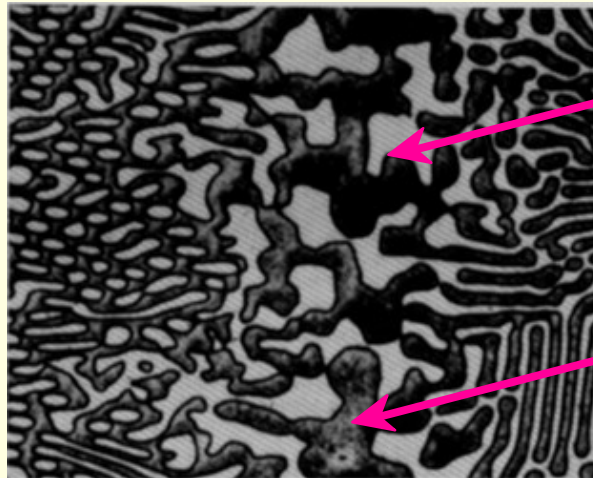
1. Smanjenje veličine zrna
2. Legiranje - čvrsti rastvori
3. Čestično ojačavanje
4. Deformaciono ojačavanje



Fazni dijagrami – dijagrami stanja

Retko se koriste jednokomponentni materijali

- **Komponente:**
Hemijski elementi u leguri (tj., Al, Cu, Fe, C, ...)
- **Faze:**
Fizički i hemijski različite oblasti (npr., A, α , β , M_7C_6 , mehanička smeša).
dvofazna legura



(svetla faza)

(tamna faza)

Reakcije u čvrstom stanju

Čvrsti rastvori: Intersticijski i supstitucijski

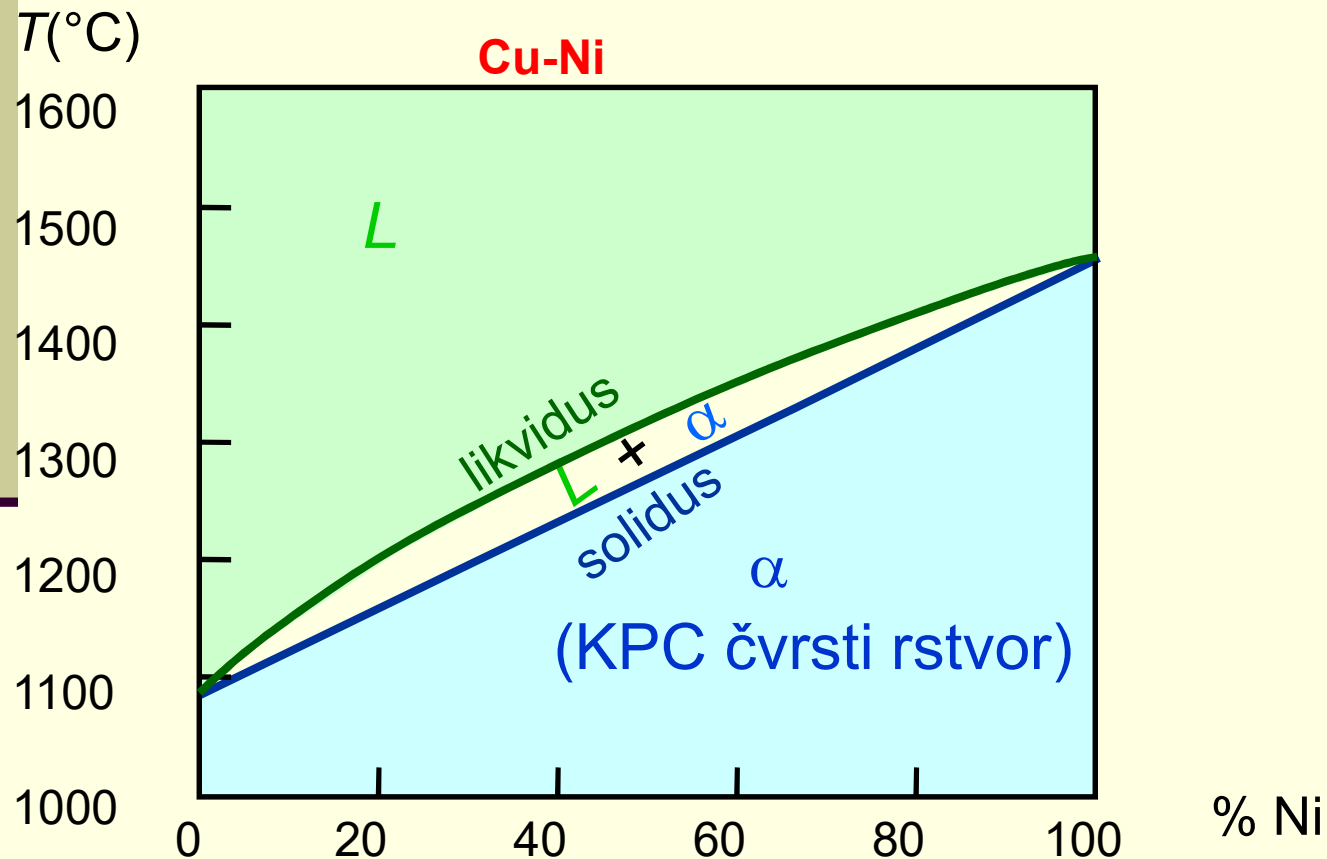
Mehaničke smeše

Hemijska jedinjenja

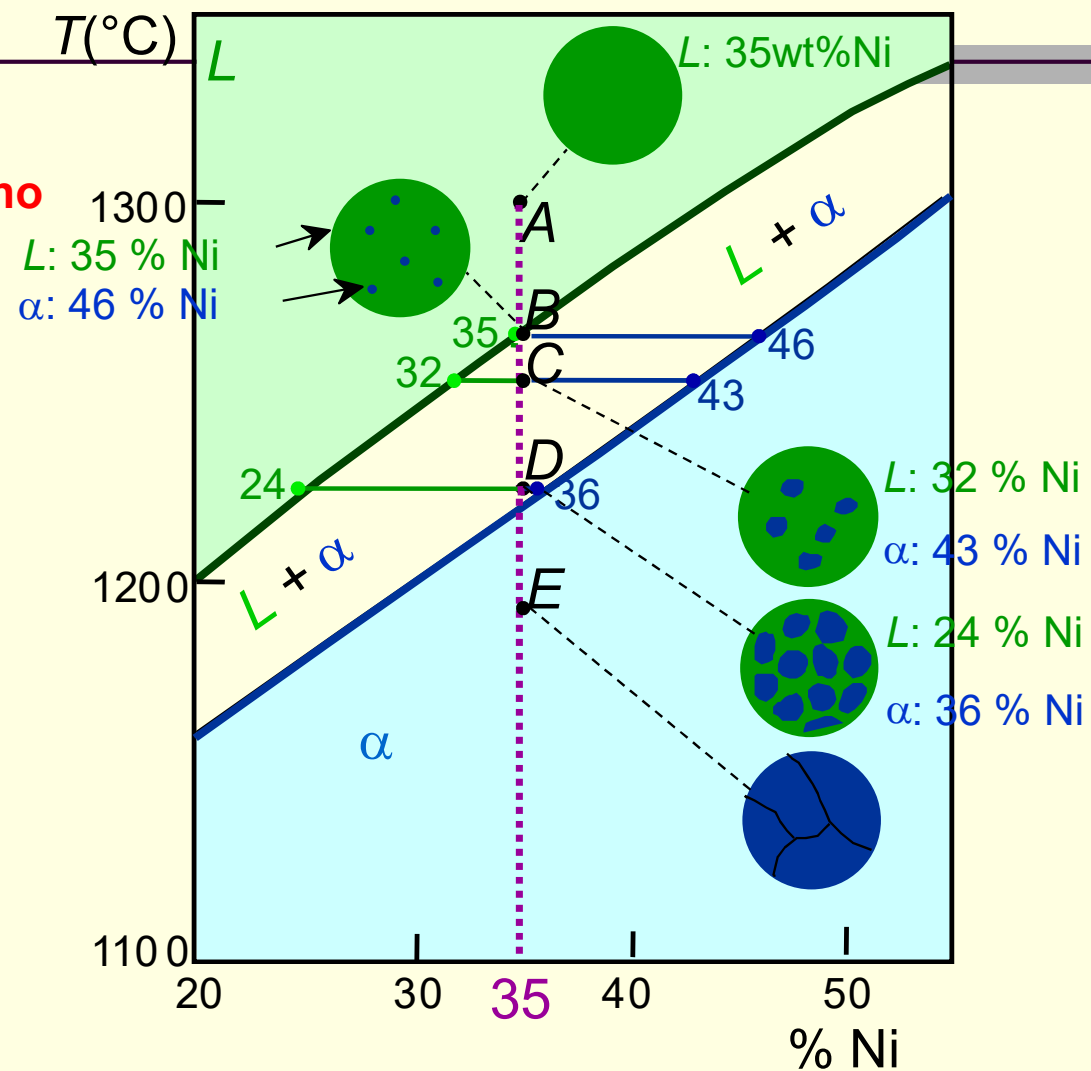
Dijagrami stanja

Stabilni/ili ravnotežni dijagrami stanja
sve faze su u termodinamičkoj ravnoteži

Metastabilni dijagrami
faze nisu u termodinamičkoj ravnoteži

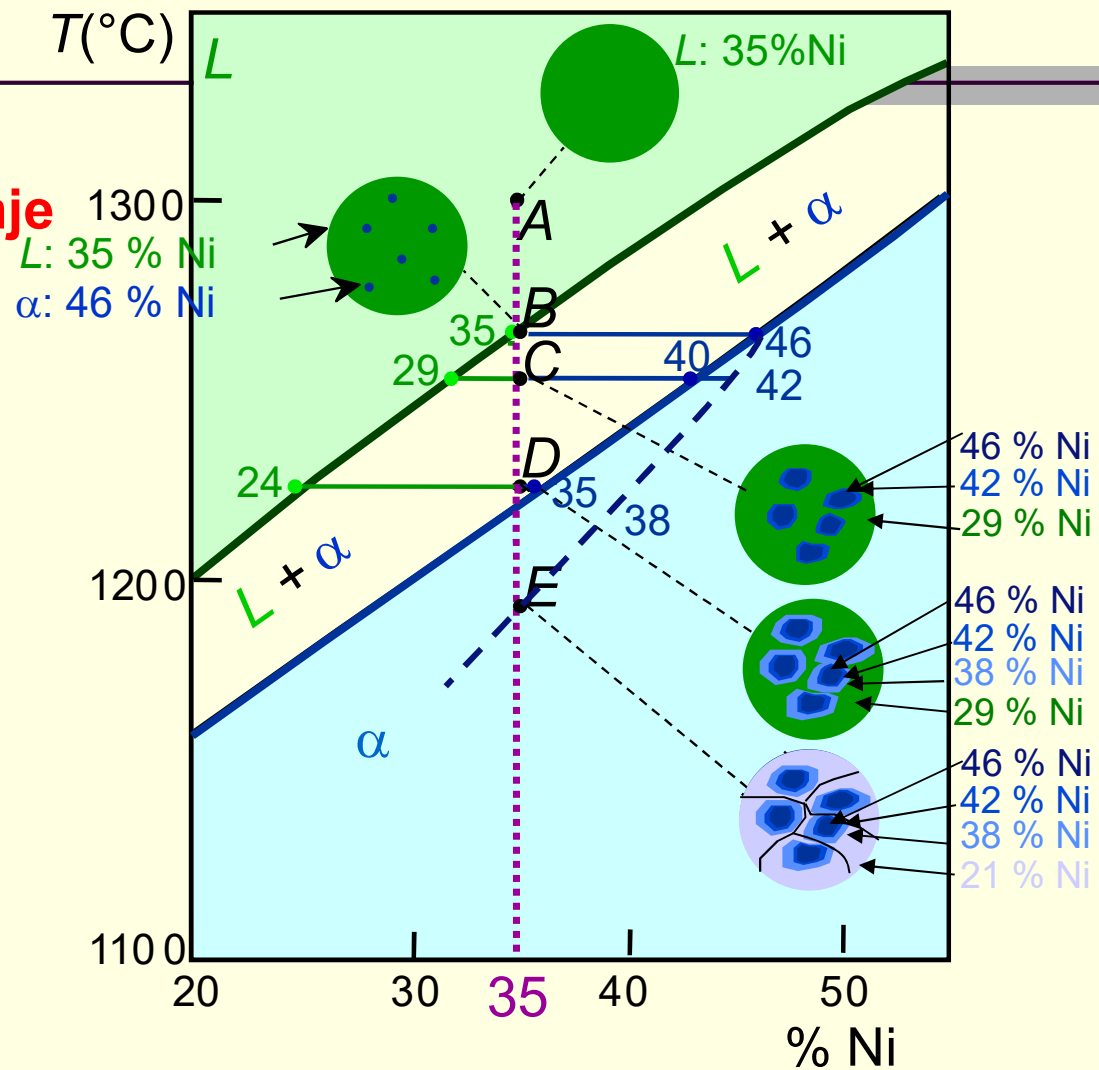


**ravnotežno hlađenje Cu-Ni
legure
Kristalizacija teče ujednačeno**



Neravnotežno hlađenje

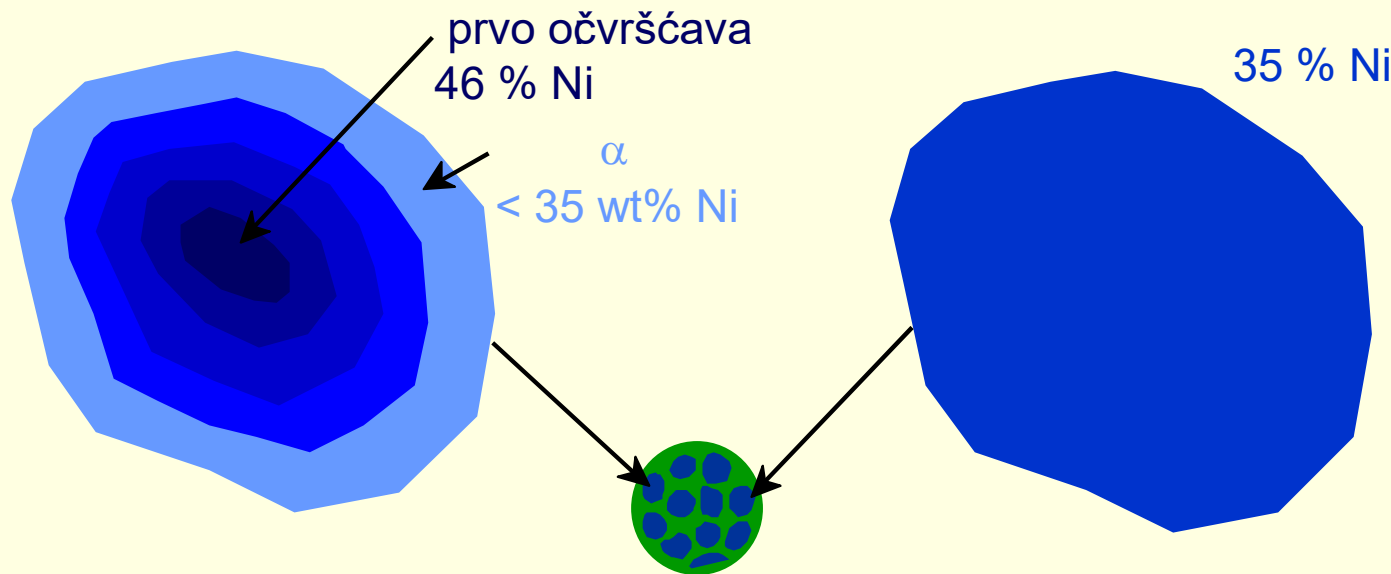
Metastabilni dijagram



Metastabilno i ravnotežno hlađenje - razlike

- Brzo hlađenje:
segregacija

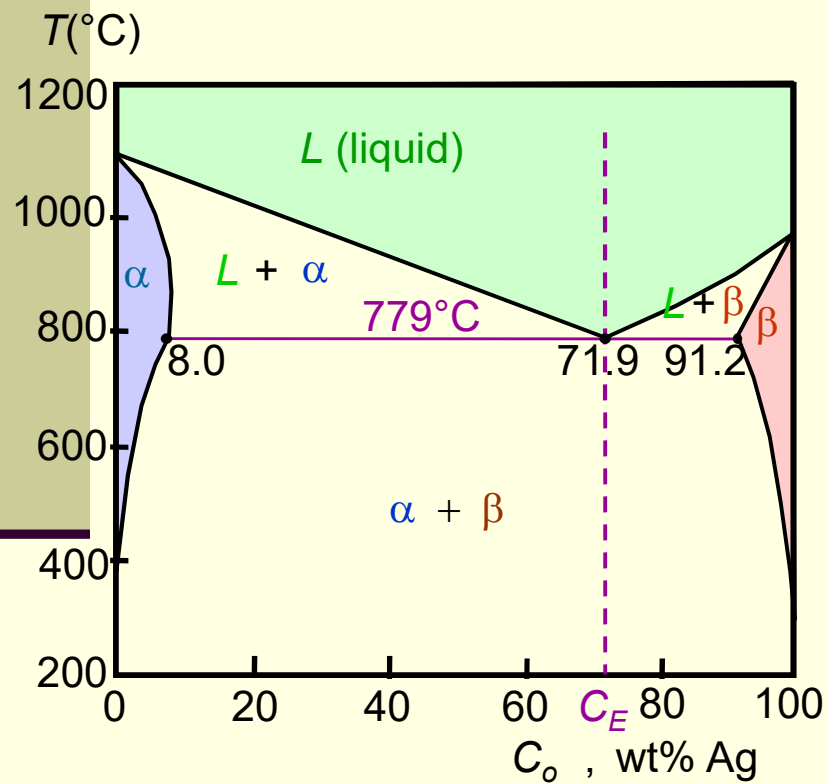
- sporo hlađenje:
homogena struktura



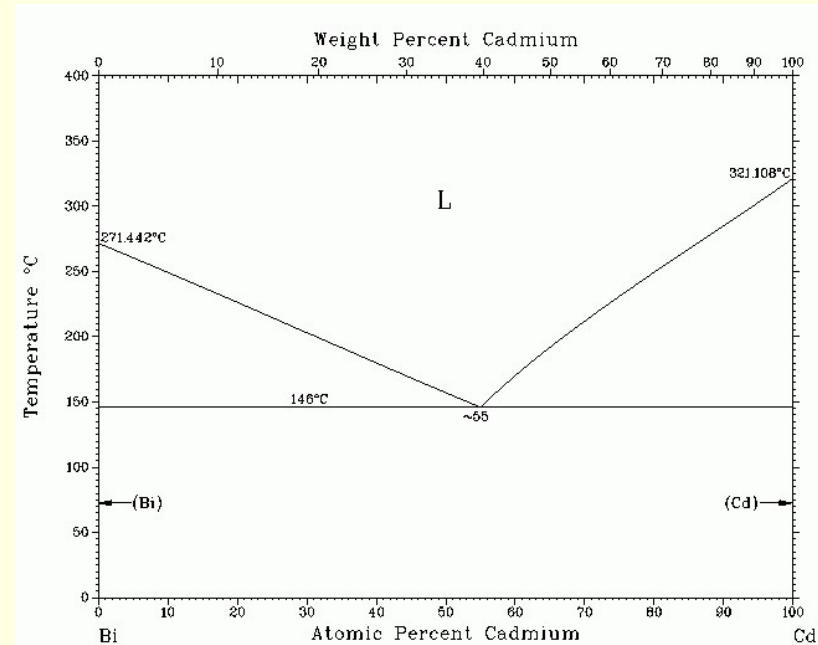
Dijagrami stanja

potpune nerastvorljivosti i delimične rastvorljivosti u čvrstom stanju

Cu-Ag



Cd-Bi



Dijagram stanja Fe-C

