

Mašinski materijali 3

- *Materials Science and Engineering: An Introduction*
W.D. Callister, Jr., 7th edition, John Wiley and Sons, Inc. (2007).

1 Uvod

- Greške kristalne rešetke
 - Reakcije u čvrstom stanju
 - Dijagrami stanja
 - Zašto nam je bitno?
-
- Idealni kristal su bez nečistoća, atomi/joni su pravilno raspoređeni i zauzimaju samo mesta koja su određena tipom kristalne rešetke.
 - U tehničkoj praksi **nema idealnih kristala**, tako da se srećemo sa realnim kristalima, u čijoj kristalnoj građi se pojavljuju različita odstupanja - defekti kristalne rešetke.

Vrste grešaka kristalnih struktura

- praznine
- intersticijali
- supstitucijski atomi

Tačkaste greške

(ovo su atomske, a postoje i elektronske – npr. prazna mesta u valentnoj zoni)

- dislokacije: ivične i zavojne

Linijske greške

- granice zrna/subzrna

Površinske greške

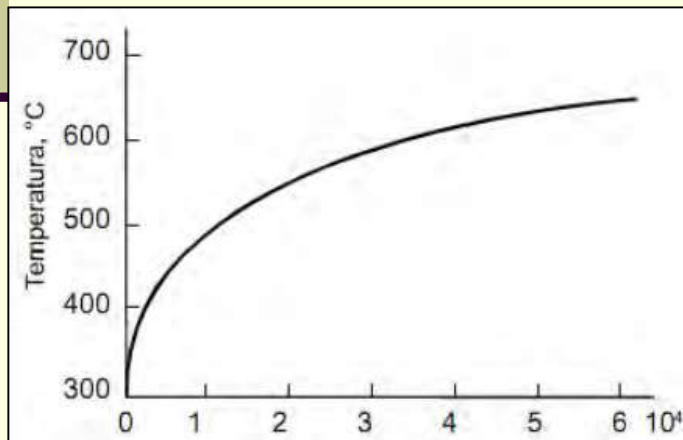
- prsline, uključci, čestice

Zapreminske greške

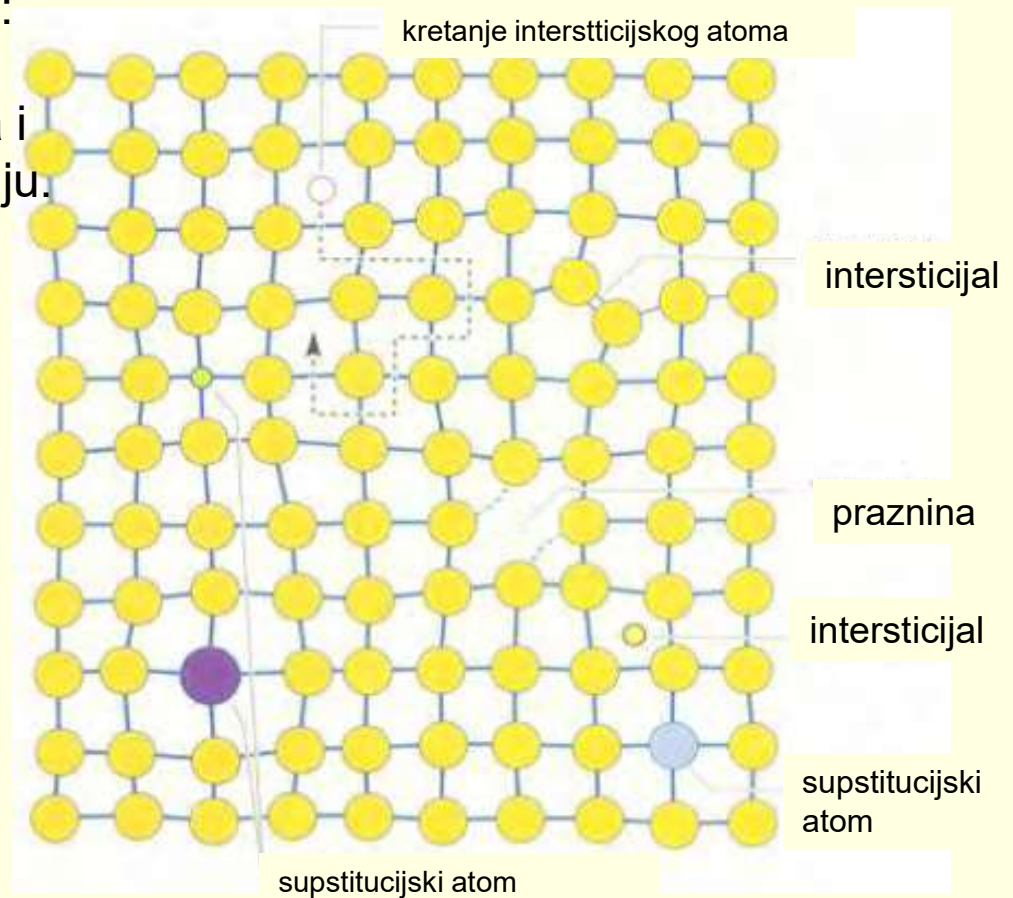
Tačkaste greške

- Praznine mogu da nastanu zbog:
- toplotne energije,
- zbog poremećaja u rastu kristala i
- zbog neravnoteže u naelektrisanju.

Tačkaste greške imaju veliki uticaj na fizičke osobine materijala (npr. na električni otpor) kao i na **mehaničke osobine** (npr. na tvrdoću).



koncentracija praznina



Dislokacije - Ivična dislokacija

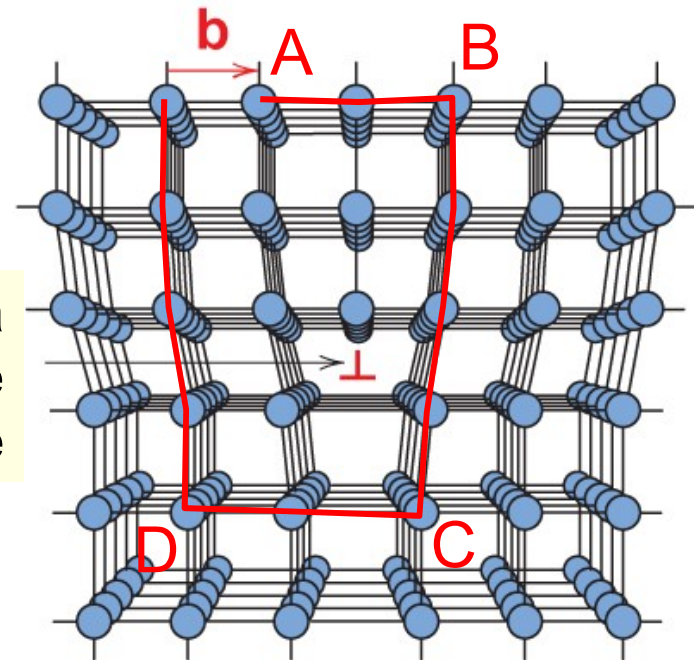
Dislokacija – Linijska jednodimenzionalna greška oko koje su atomi izvedeni iz ravnotežnog položaja

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

linija
ivične
dislokacije

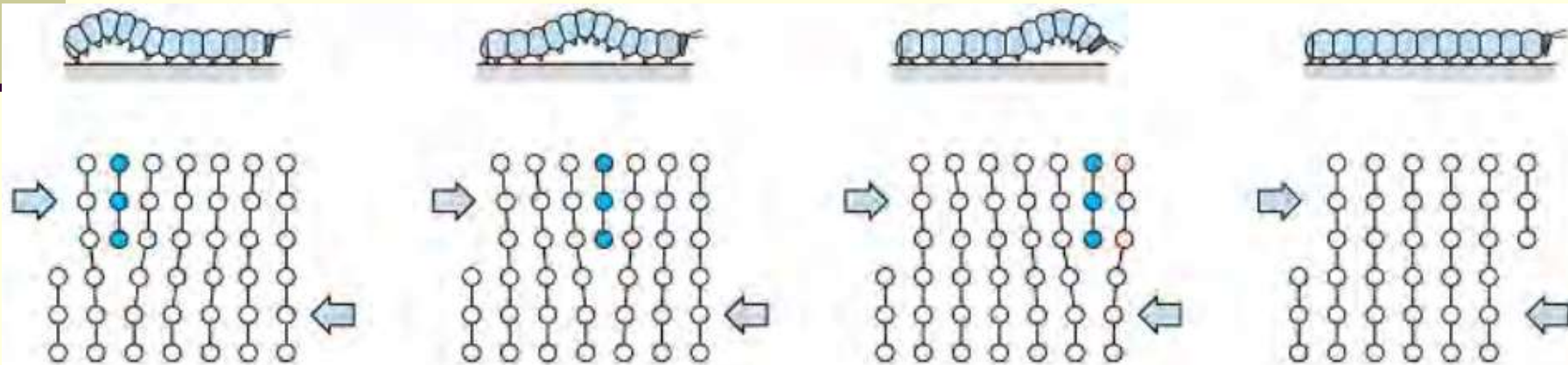
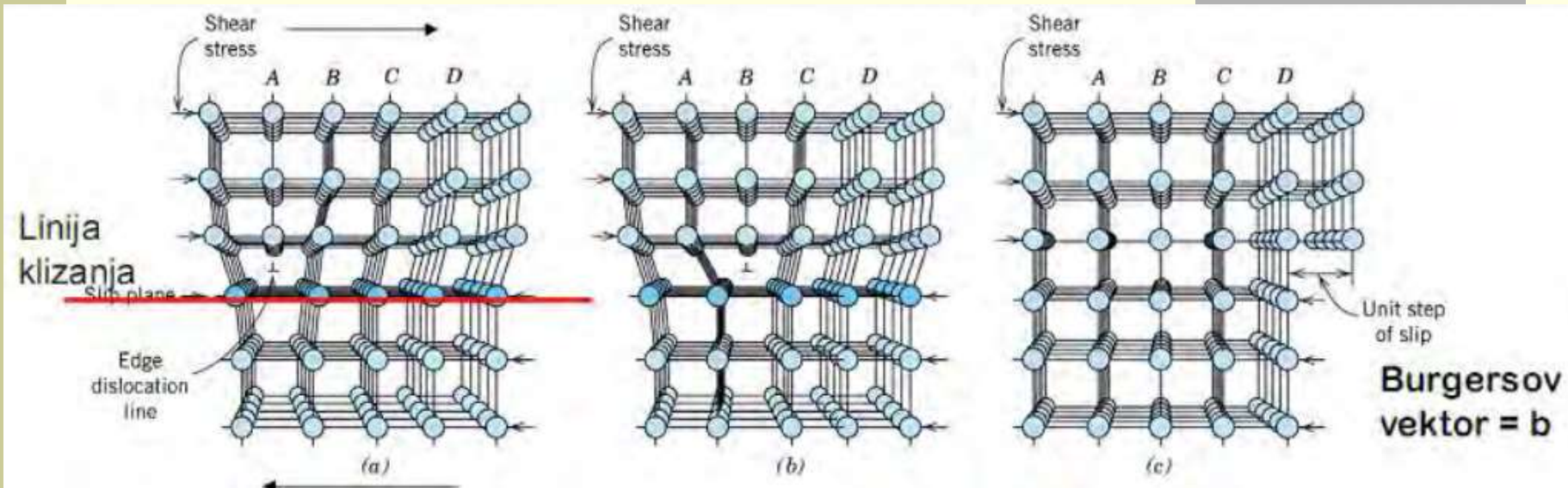
- $\mathbf{b} \perp$ na ivičnu dislokaciju

Burgersov vektor



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

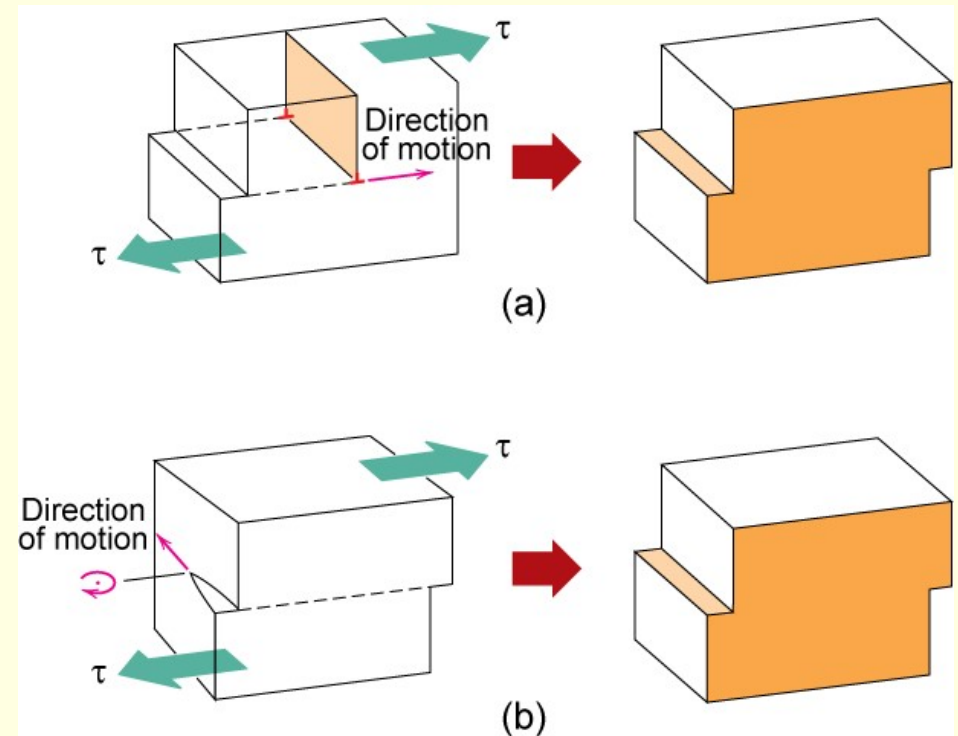
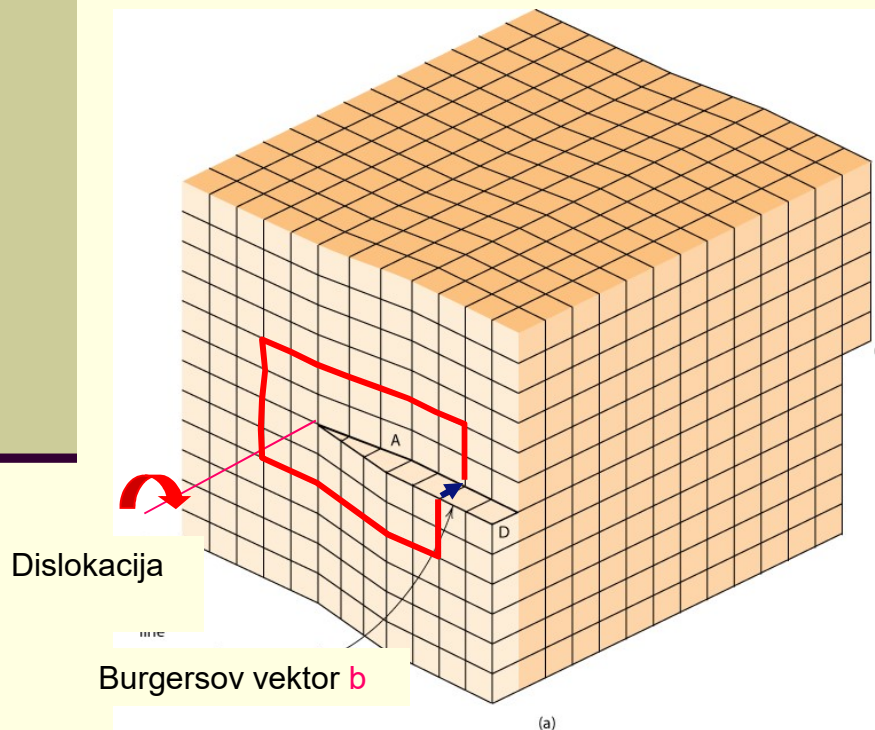
Dislokacije - Ivična dislokacija



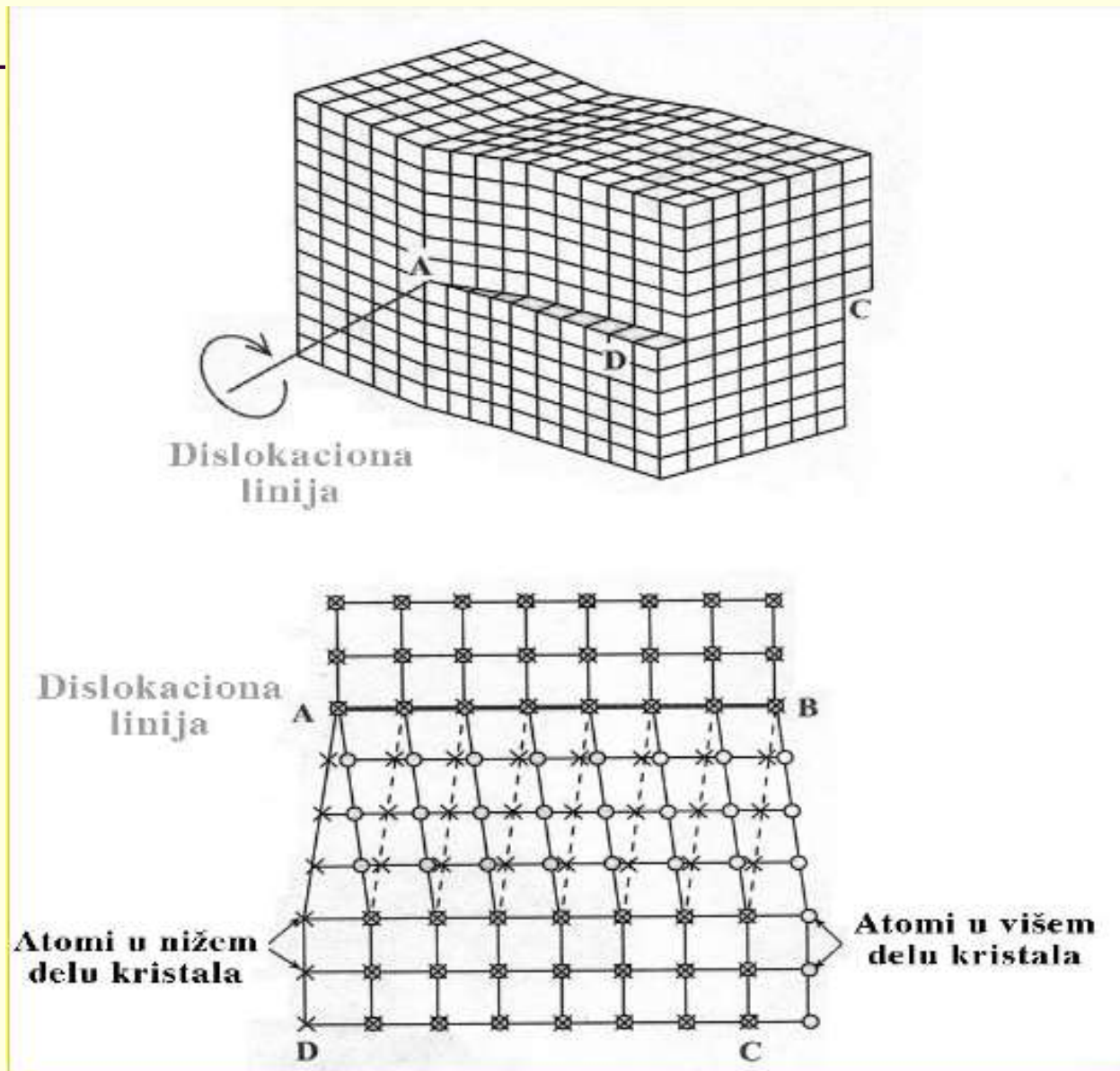
Burgersov vektor, b : mera deformacije rešetke

Dislokacije - Zavojna dislokacija

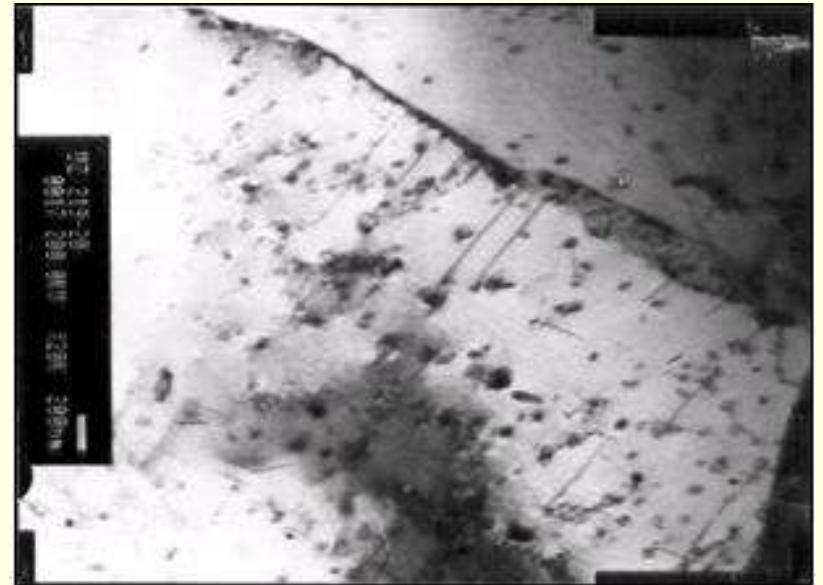
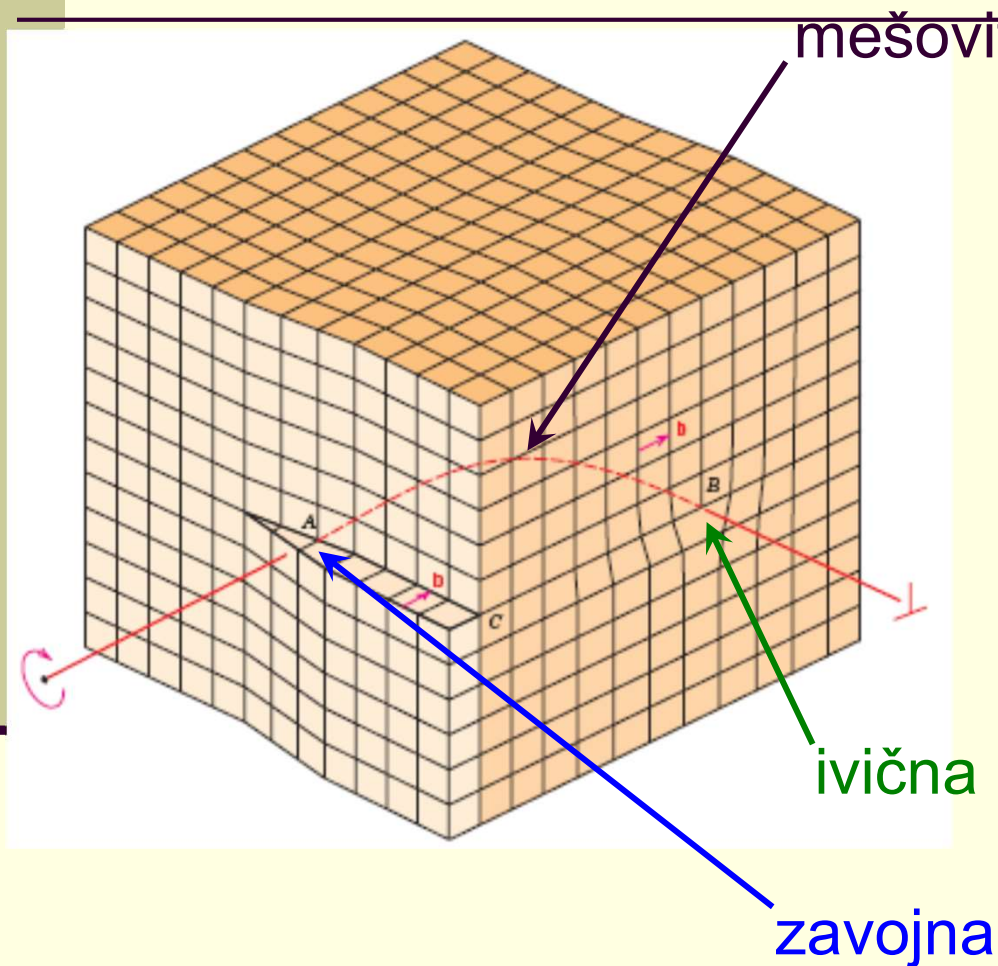
- spiralna zavojnica kao rezultat smicanja ravni
- $\mathbf{b} \parallel$ dislokacionoj liniji



Dislokacije - Zavojna dislokacija



Ivična, zavojna i mešovita dislokacija



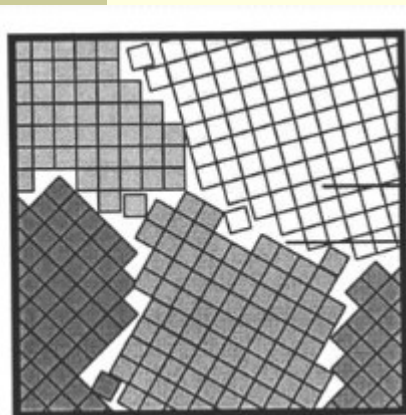
Dislokacije su vidljive pod elektronskim mikroskopom (TEM)

Kretanje dislokacija

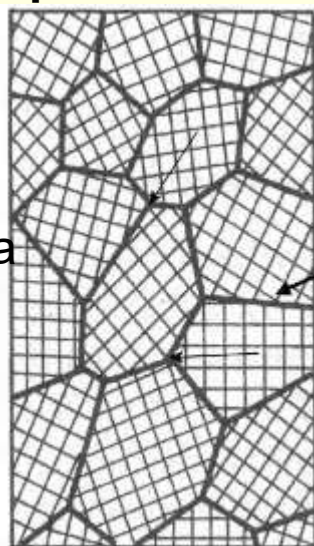


Granice zrna i faza

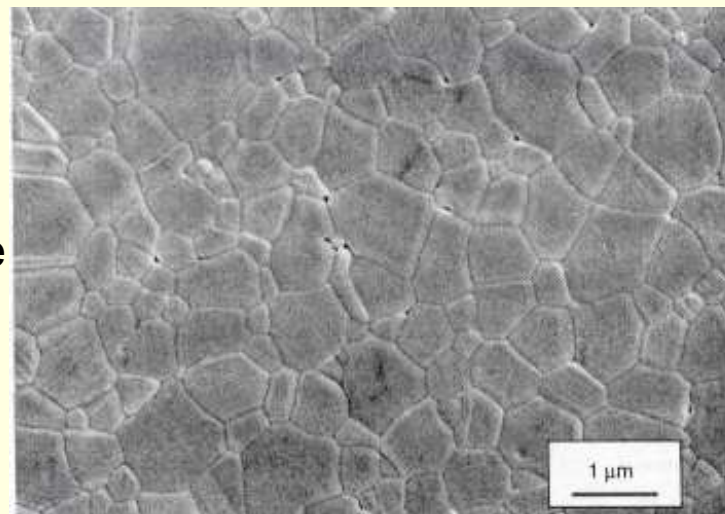
polikristalni materijali



zrna
granice zrna



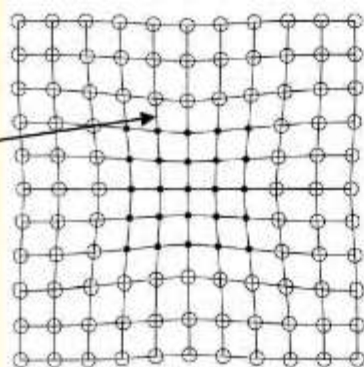
granice
zrna



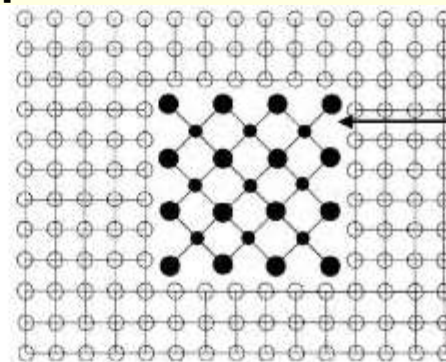
korund - Al_2O_3

Višefazni materijali - zapreminski defekti

Koherentne
granice



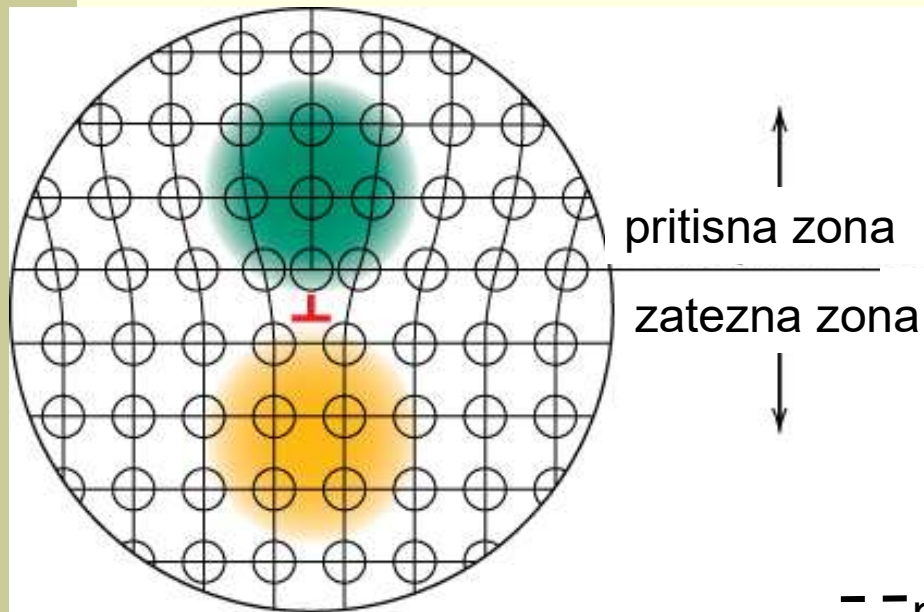
(a)



(b)

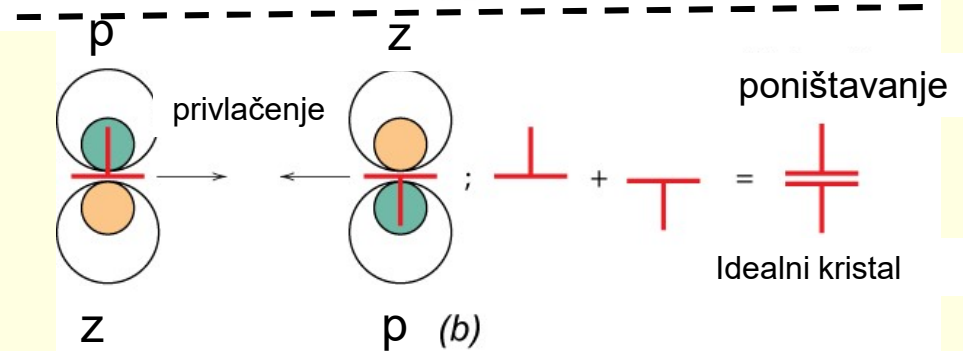
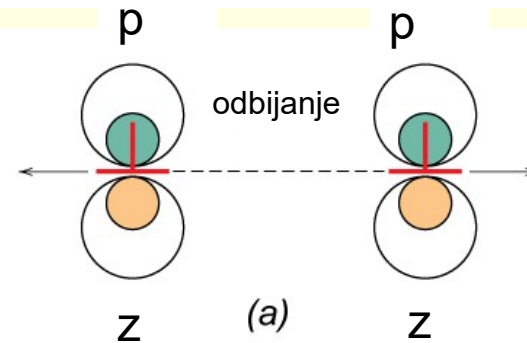
Nekoherentne
granice

Koncentracija napona na dislokacijama



Reakcije dislokacija

Dislokacije istog znaka se odbijaju



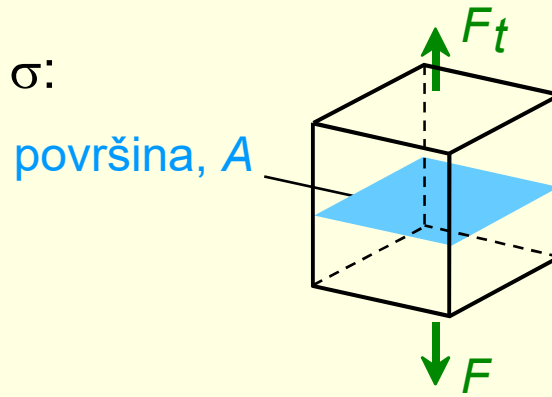
Dislokacije suprotnog znaka se privlače

Dislokacije i mehanizmi ojačavanja

naponi

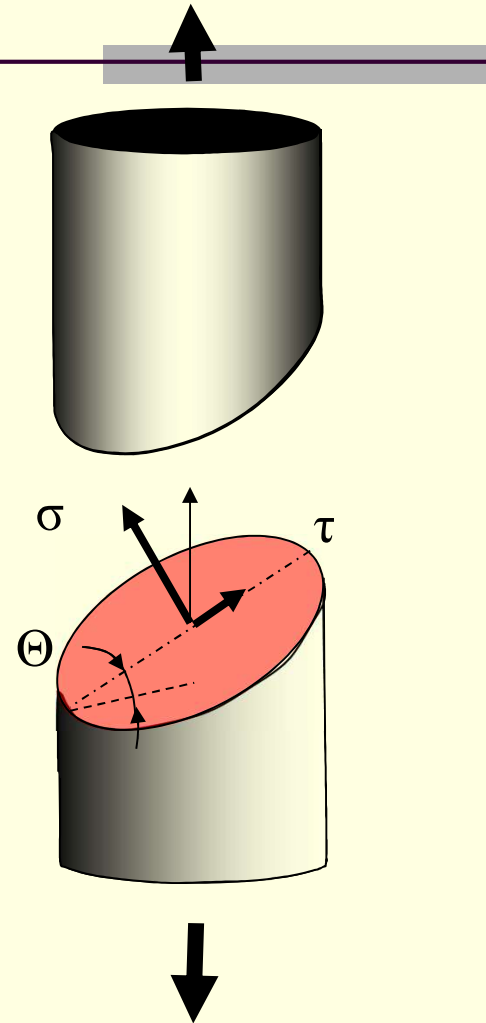
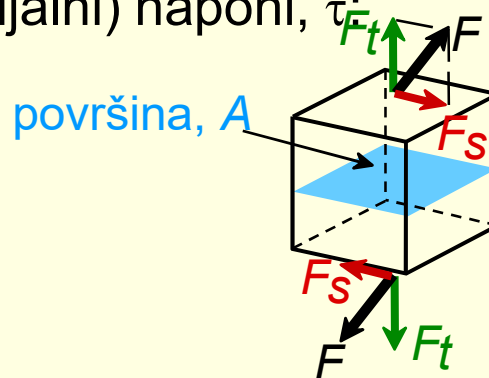
- **Zatezni** naponi, σ :

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



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

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



Dislokacije i mehanizmi ojačavanja

Kretanje dislokacija usled delovanja napona

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

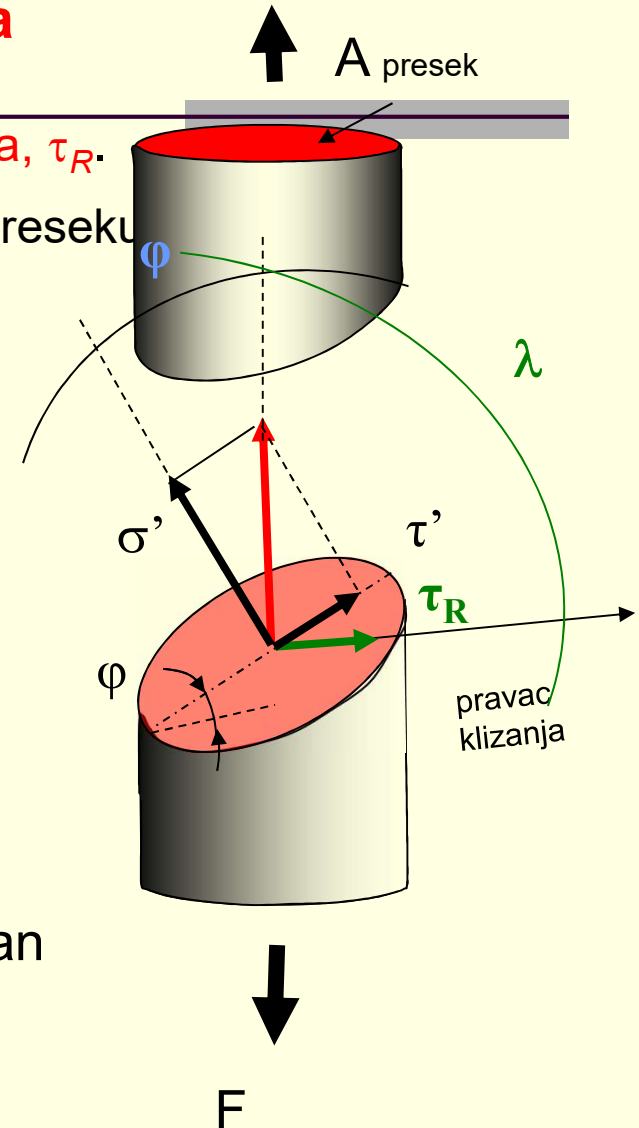
$$\sigma = \frac{F}{A}$$

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

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

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

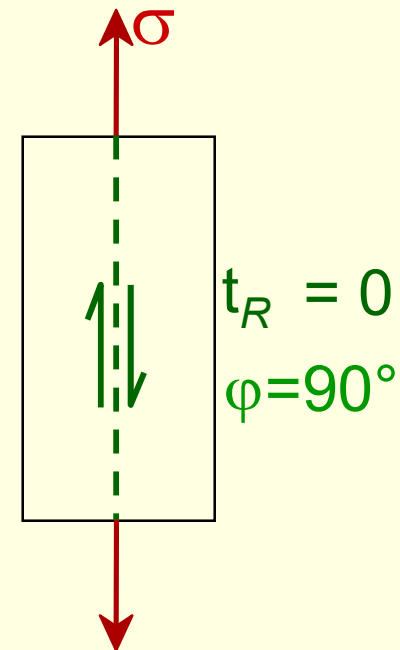
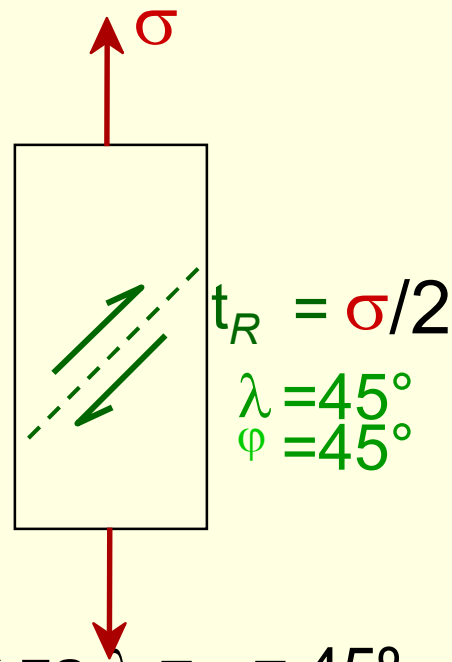
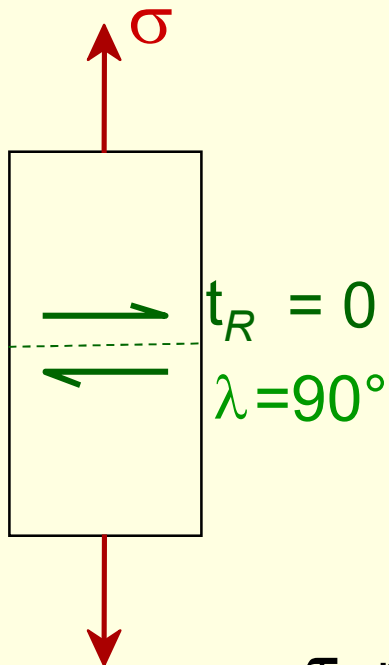
Uslov za kretanje dislokacija:
Orientacija kristala olakšava ili otežava kretanje dislokacija

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

obično oko

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

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

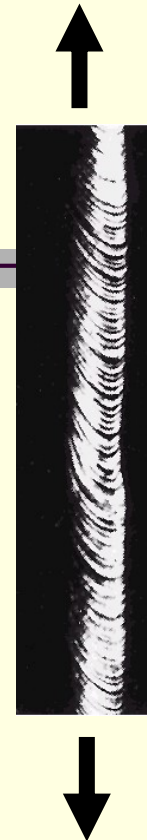
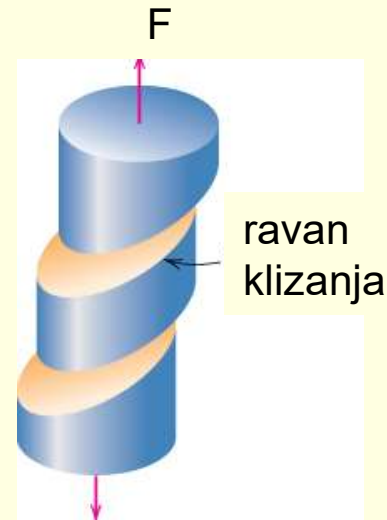
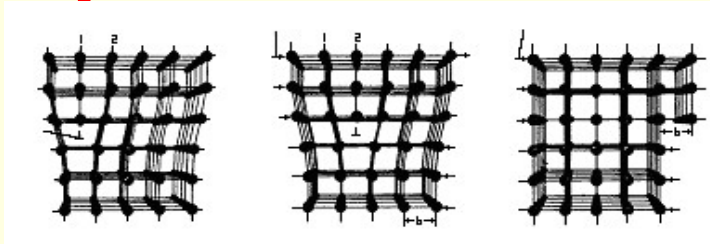


τ max za $\lambda = \varphi = 45^\circ$

Dislokacije i mehanizmi ojačavanja

Klizanje dislokacija

Klizanje kod monokristala



Klizanje kod polikristala

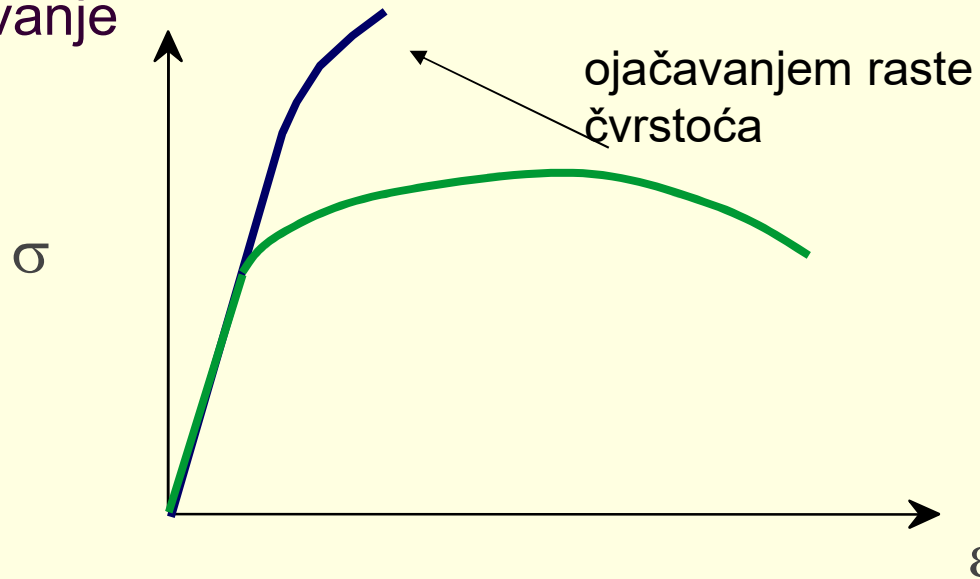


- Viša čvrstoća – granice zrna koče dislokacije
- Pravac i ravan klizanja dislokacija se menjanju od zrna do zrna – dodatana energija.
- τ_R se menja od kristala do kristala tako da se prvo deformišu zrna koja imaju najviši smicajni napon, dok se ostala deformišu kasnije

Dislokacije i mehanizmi ojačavanja

4 Strategije za ojačavanje metala:

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

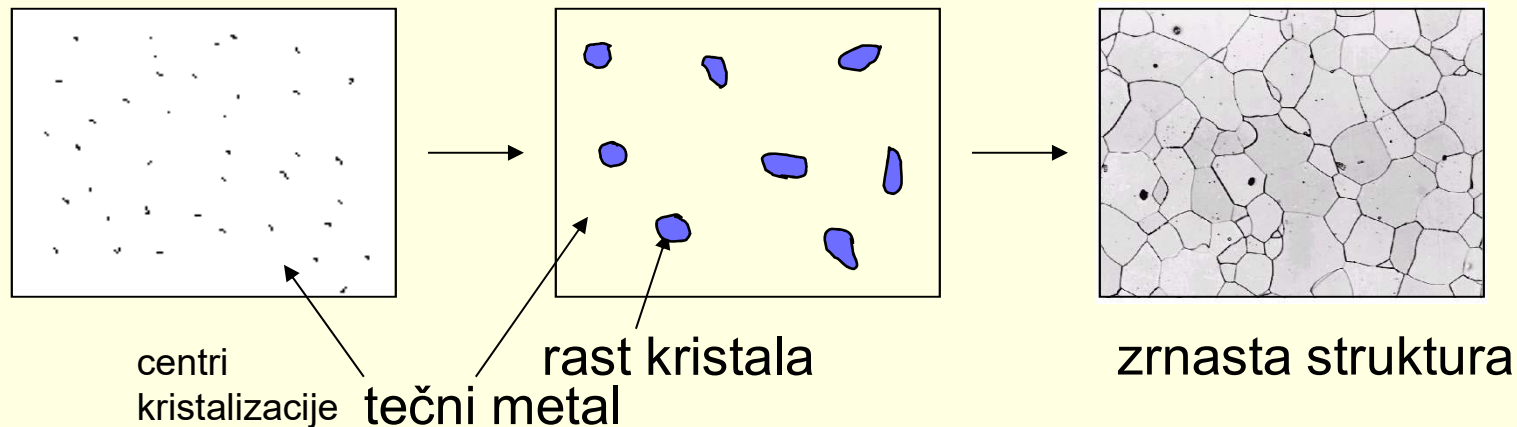


Sve strategije otežavaju kretanje dislokacija!

Dislokacije i mehanizmi ojačavanja

1. Smanjenje veličine zrna

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



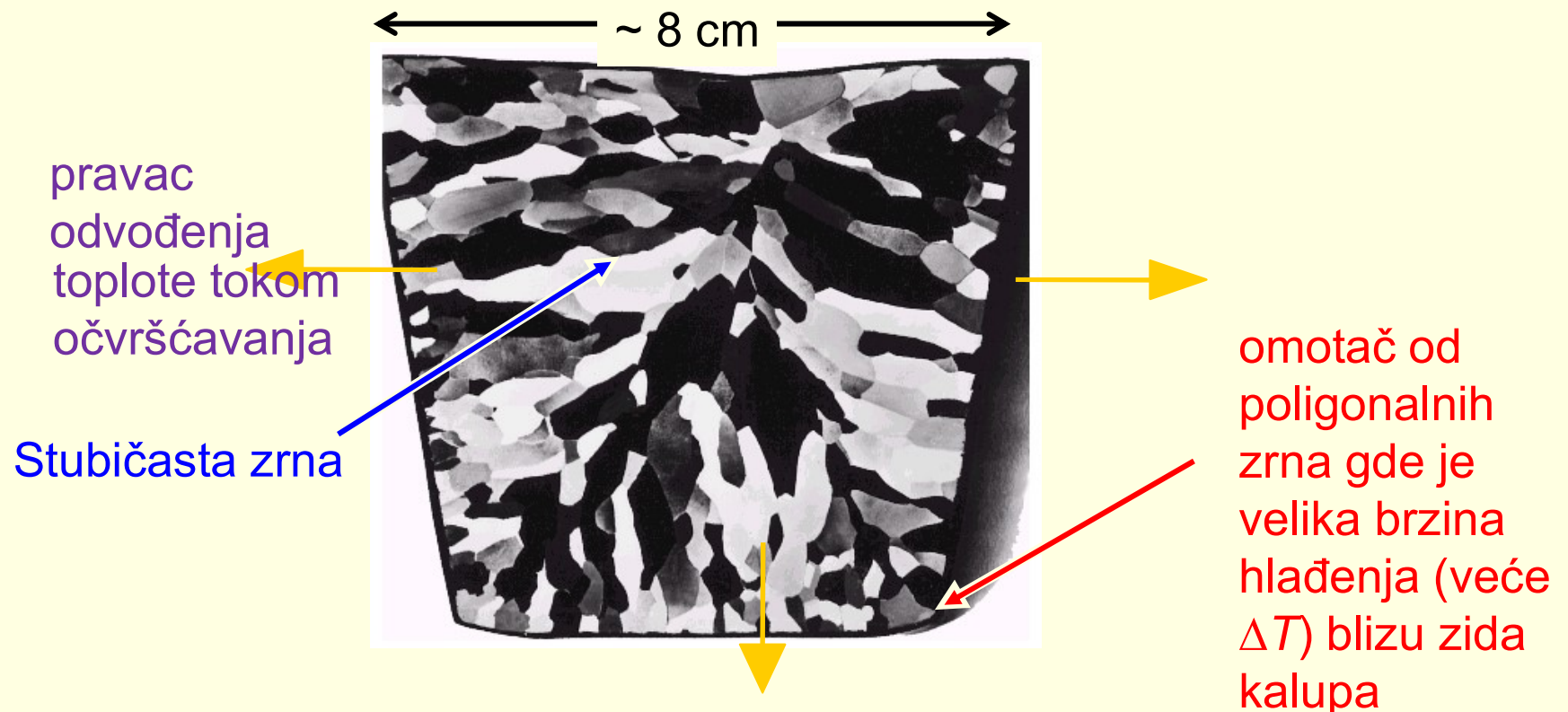
- **Kristali rastu sve dok se ne sudare sa susednim**

Dislokacije i mehanizmi ojačavanja

Očvršćavanje

1. Smanjenje veličine zrna

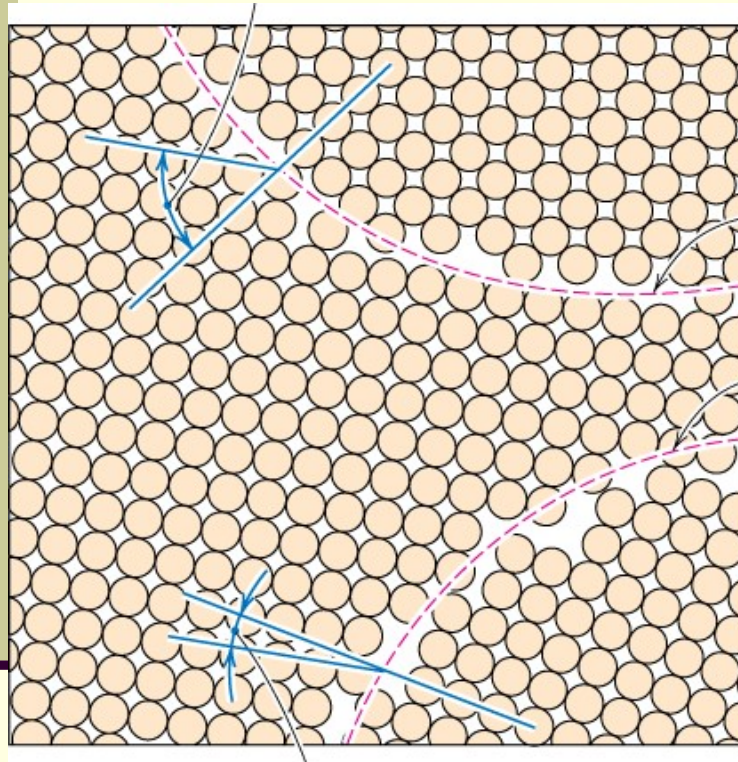
- Zrna mogu biti
- poligonalna (približno iste veličine u svim pravcima)
 - stubičasta (kolumnarna ili izdužena zrna)



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

Dislokacije i mehanizmi ojačavanja

Granice zrna **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 kretanje dislokacija
- Granice su veća prepreka što im je ugao veći
- Što su sitnija zrna veći je broj prepreka pa je i viša čvrstoća metala.

- Hall-Petch jednačina:

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

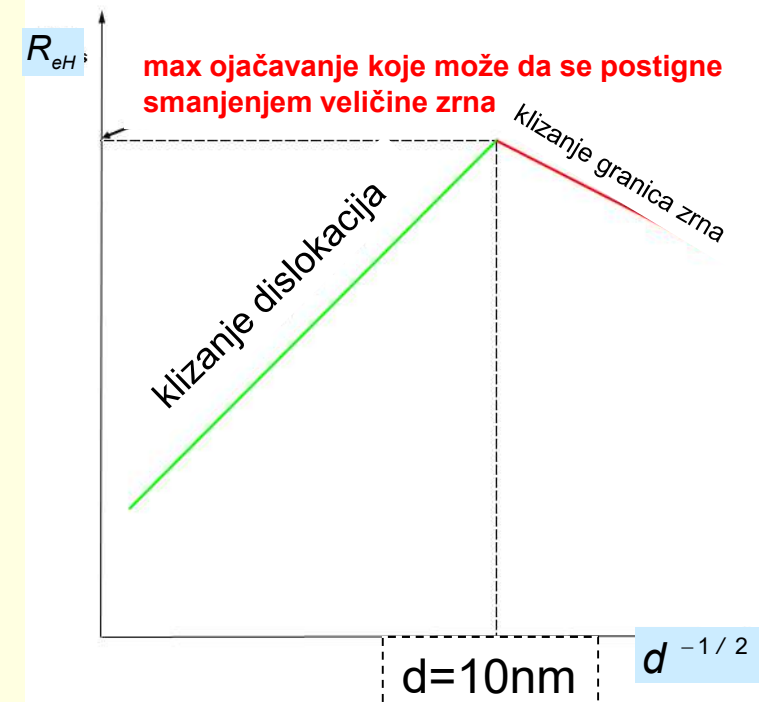
k_y konstanta za materijal

d - veličina zrna

σ_o – napon za pokretanje dislokacija



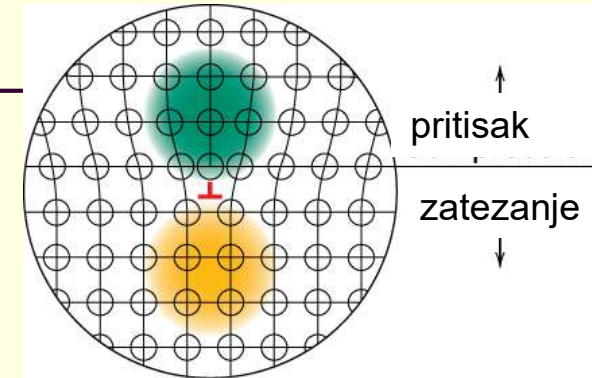
Granično ojačavanje



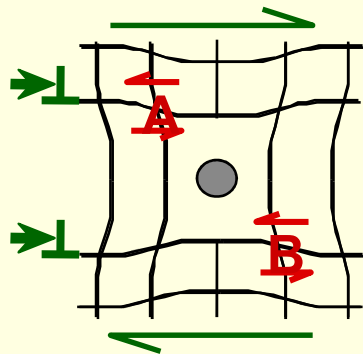
Dislokacije i mehanizmi ojačavanja

2. Ojačavanje čvrstim rastvorom

- Strani atomi deformišu rešetku & naprežu je
- Naponsko polje je prepreka za kretanje dislokacija

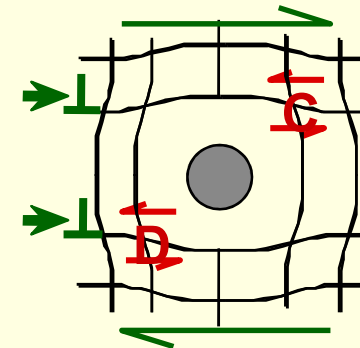


supstitucijski atom manjeg prečnika



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

supstitucijski atom većeg prečnika

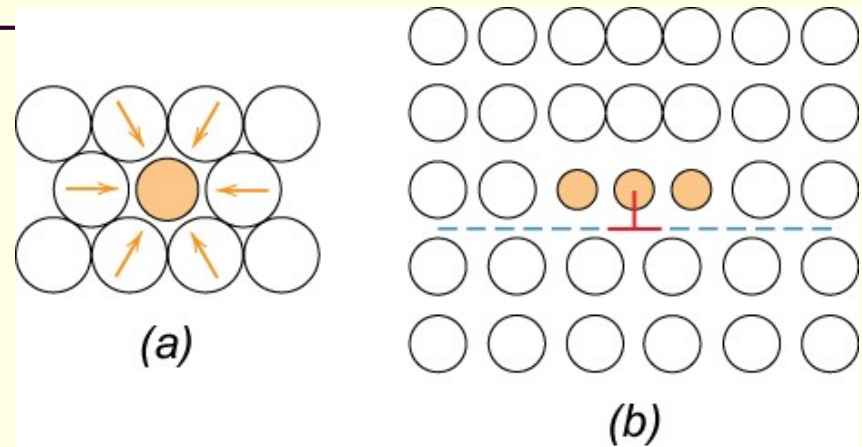


Supstitucijski atomi generišu lokalne napone na mestima **C** i **D** koji se suprotstavljaju kretanju dislokacija u desno

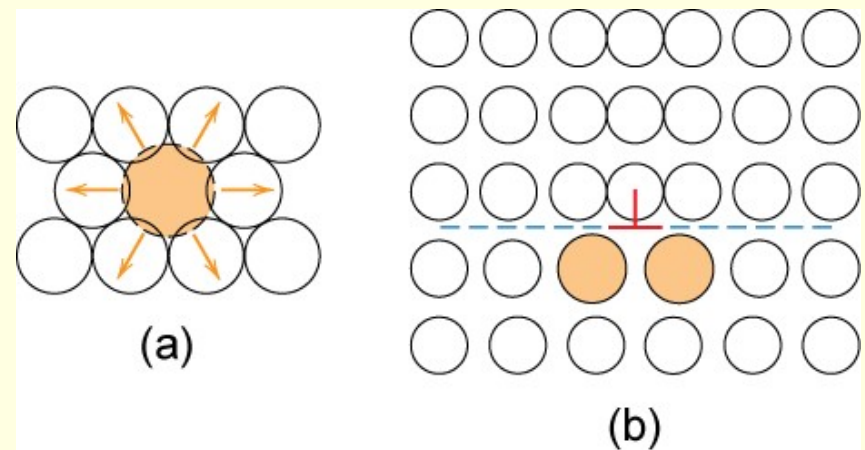
Dislokacije i mehanizmi ojačavanja

2. Ojačavanje čvrstim rastvorom

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



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

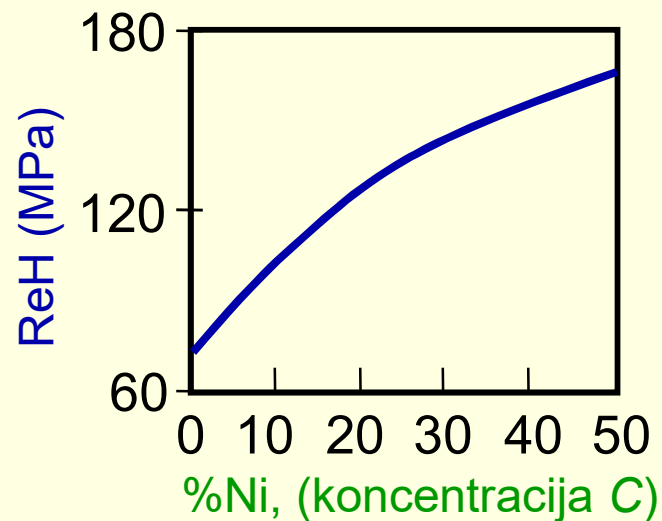
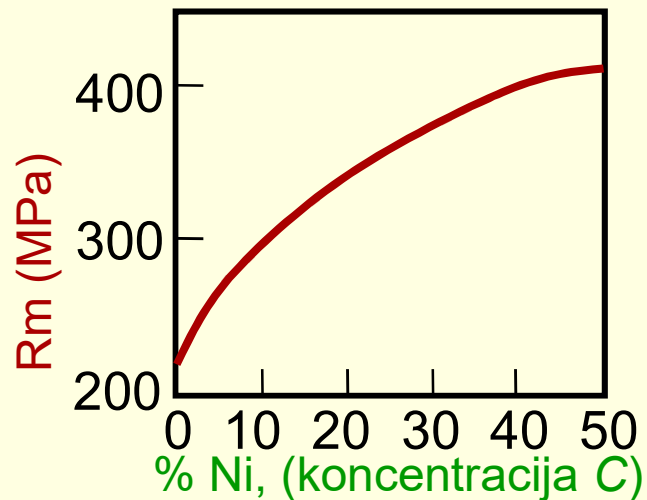


strani atomi koče dislokacije \therefore raste čvrstoća

Dislokacije i mehanizmi ojačavanja

npr: ojačavanje čvrstim rastvorom bakra Cu

- R_m & R_{eH} rastu sa % Ni kod legure CU-Ni.

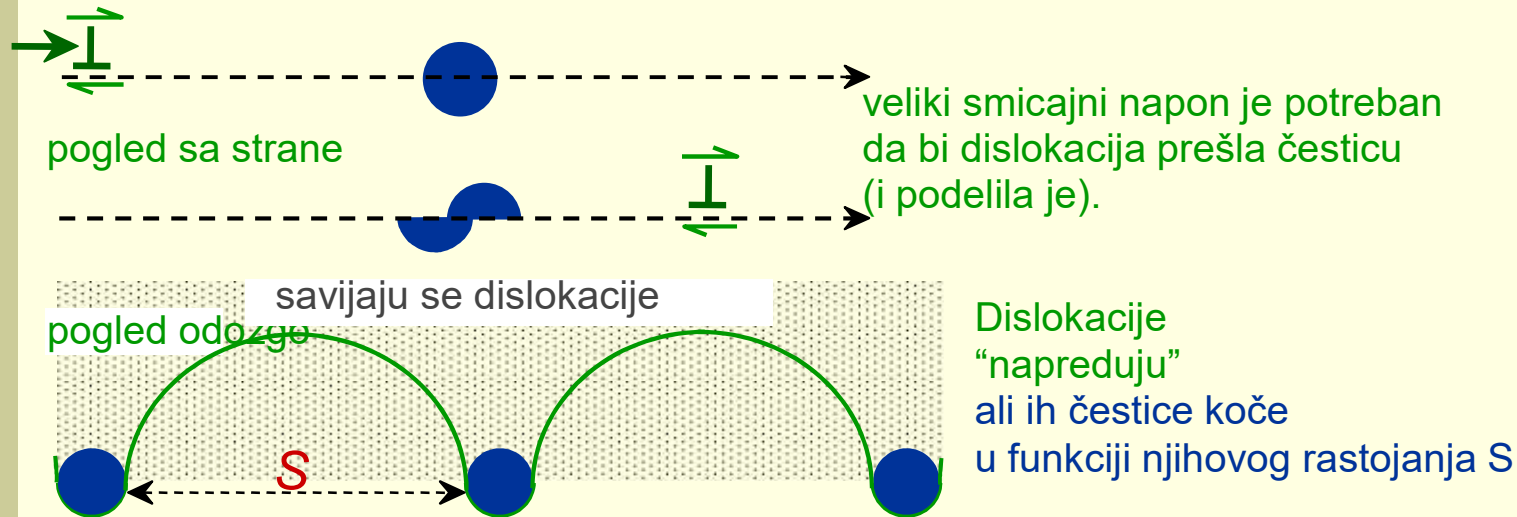


- Empirijska zavisnost čvrstoće od koncentracije: $\sigma_y \sim C^{1/2}$
- Legiranjem raste R_{eH} and R_m .

Dislokacije i mehanizmi ojačavanja

3. Čestično ojačavanje

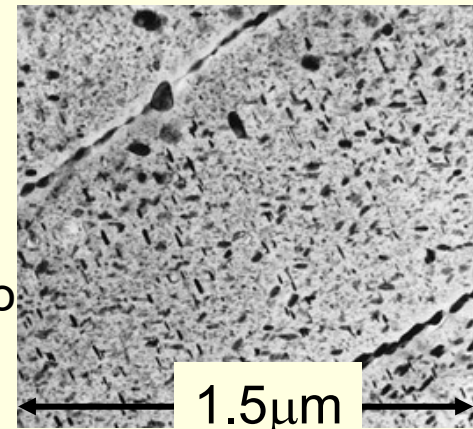
- Tvrde čestice se teško dele kada naiđe na njih dislokacija.
npr: keramike u metalima (neki karbidi kao što je Fe_3C u Fe).



Zavisnost čvrstoće i
rastojanja između čestica :

$$\sigma_y \sim \frac{1}{S}$$

Al legura ojačana čestično

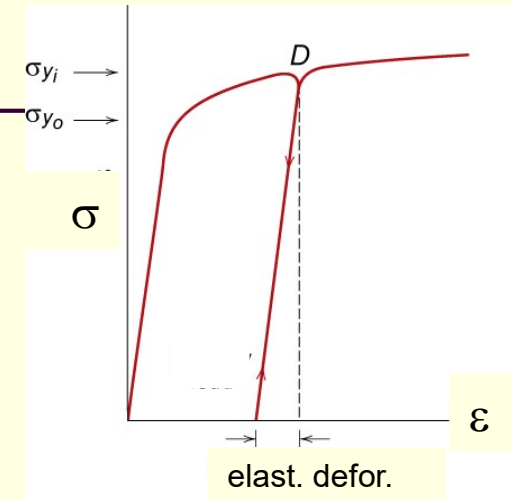
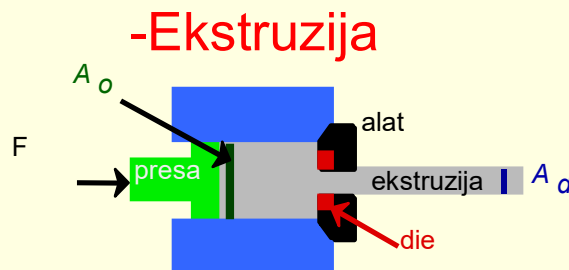
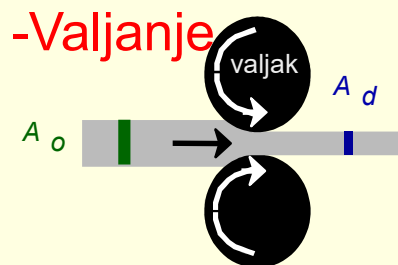
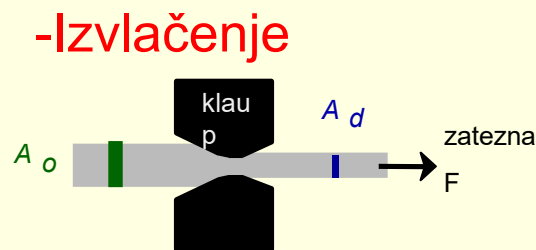
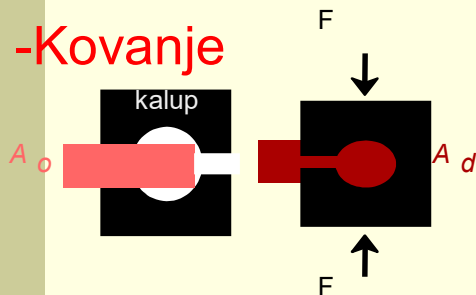


Dislokacije i mehanizmi ojačavanja

4. Deformaciono ojačavanje

Hladna deformacija nastaje ispod T rekristalizacije ili na sobnoj T .

Tokom oblikovanja menja se poprečni presek:



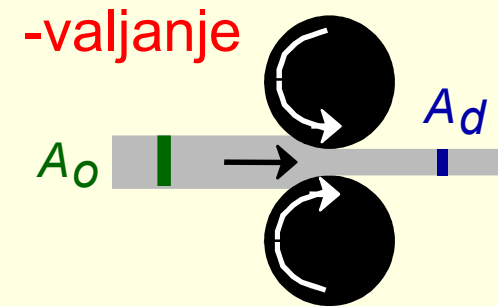
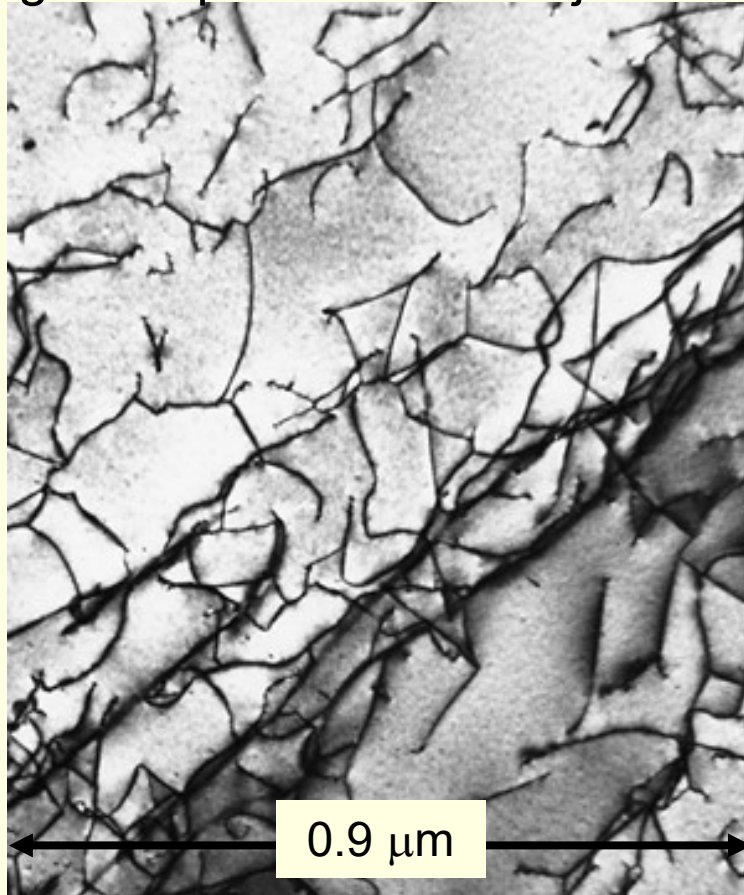
$$\% \text{defor.} = \frac{A_o - A_d}{A_o} \times 100$$

- Tokom hladne deformacije dislokacije se zapliću i koče.
- Stvaraju se nove

Dislokacije i mehanizmi ojačavanja

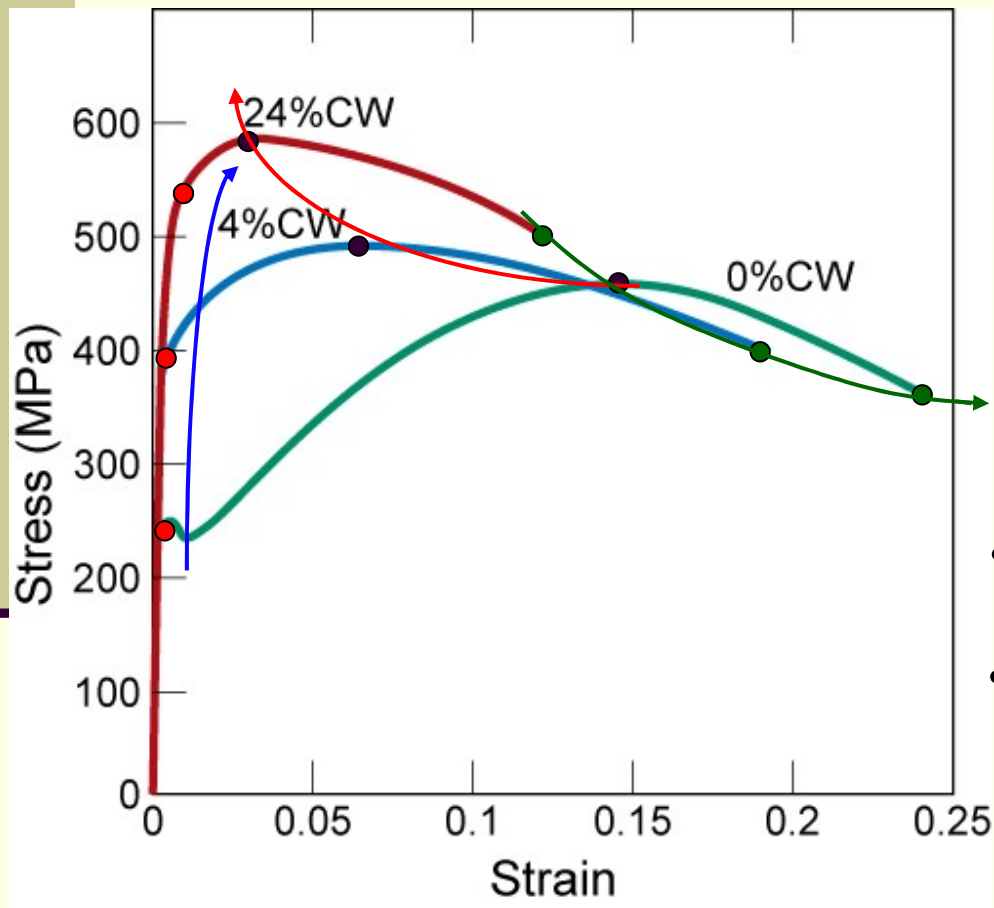
Npr: tokom hladnog valjanja – Deformaciono ojačavanje

- legura Ti posle deformacije na hladno:



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

Dislokacije i mehanizmi ojačavanja



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

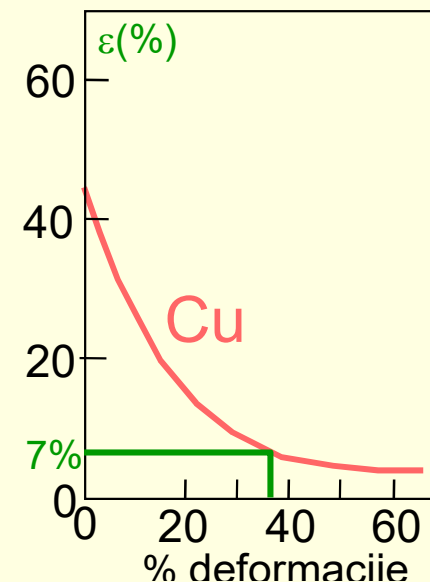
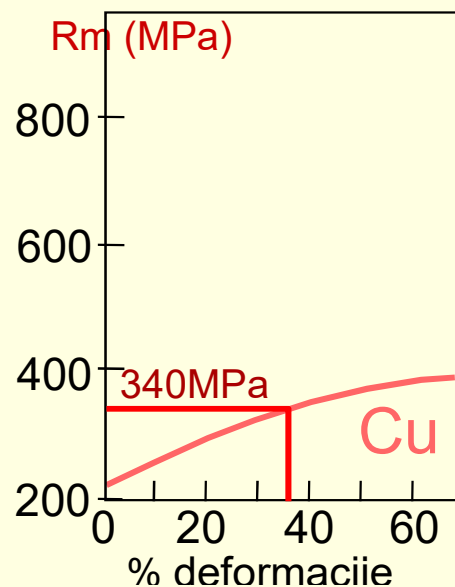
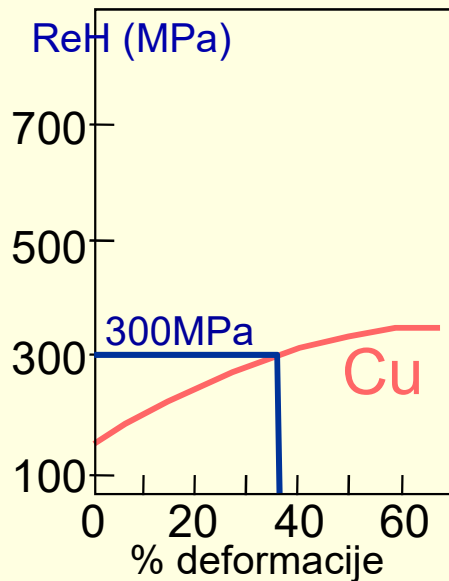
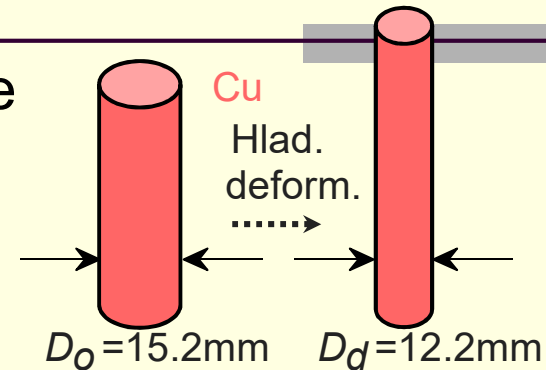
- **napon tečenja** raste.
- **zatezna čvrstoća** raste.
- duktilnost (**%A** i **%Z**) opada.

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

Rezultat hladne deformacije

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

Monokristal

→ $\sim 10^3 \text{ mm}^{-2}$

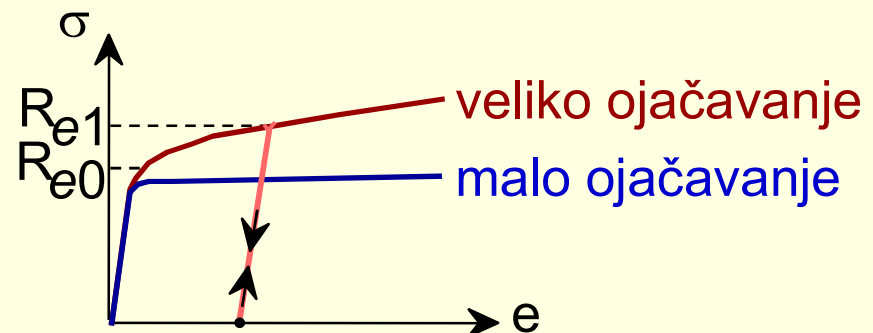
Hladna deformacija uvećava gustinu dislokacija

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

Termička obrada smanjuje gustinu dislokacija

→ $10^5\text{-}10^6 \text{ mm}^{-2}$

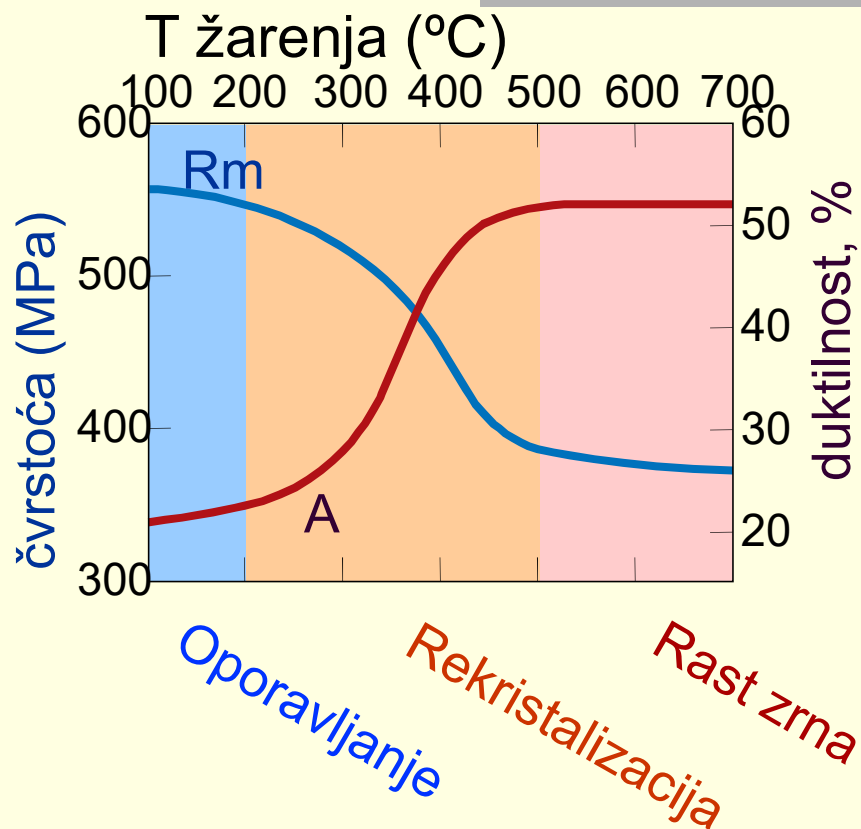
Čvrstoća raste sa %deformacije:



Rekristalizaciono žarenje

Tokom zagrevanja posle hladne deformacije u materijalu se odvijaju sledeći procesi:

- *oporavljanje*
- *rekristalizacija*
- *rast zrna*

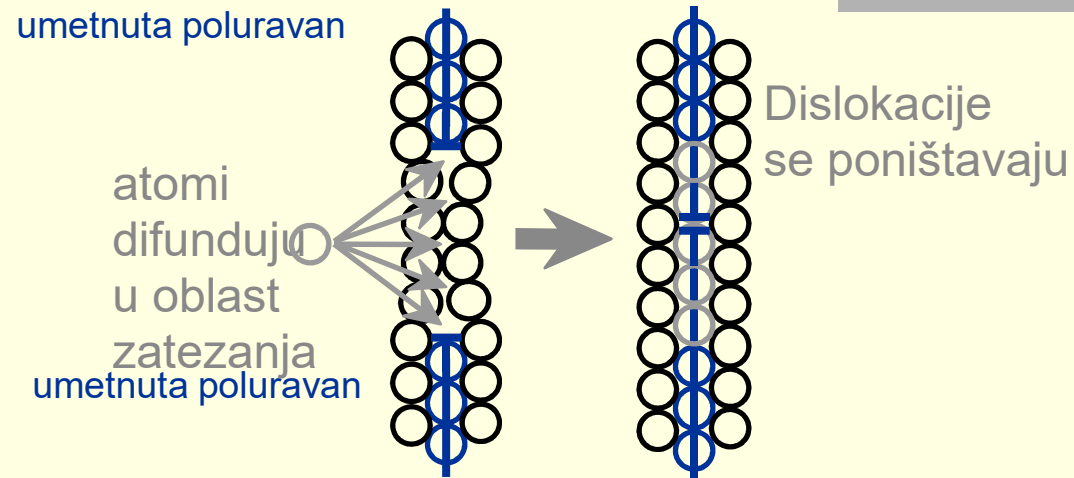


1 h TO na $T_{\text{žarenja}}$ dovodi do smanjenja R_m i ReH i povećanja $A\%$.
Efekat hladne deformacije se poništava!

Oporavljanje

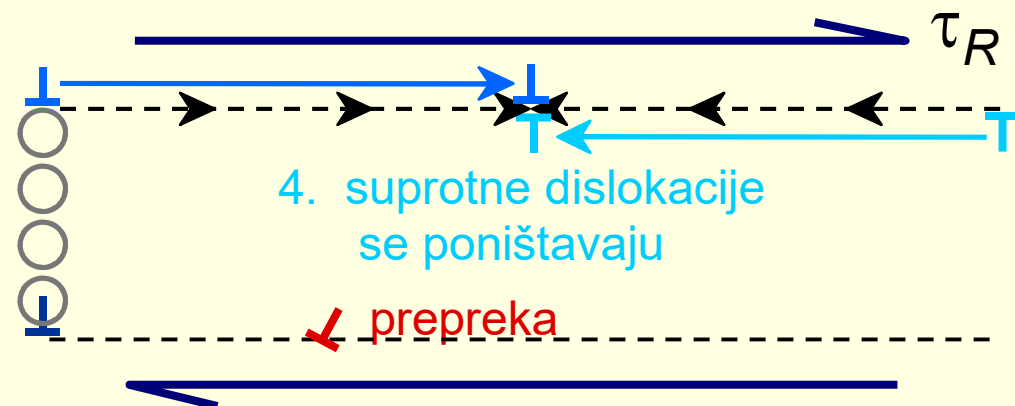
Zbog zagrevanja opada gustina dislokacija – one se poništavaju

- Scenario 1
rezultat
difuzije



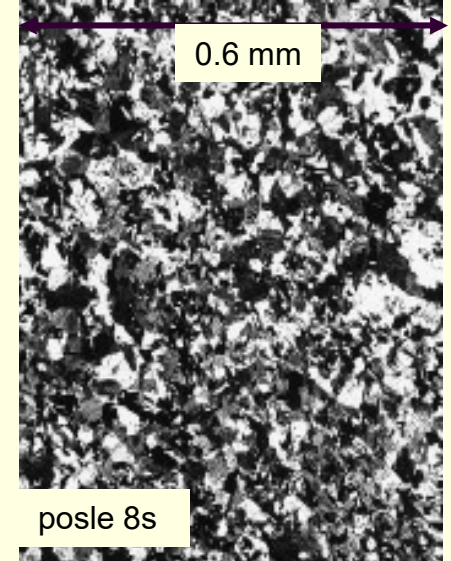
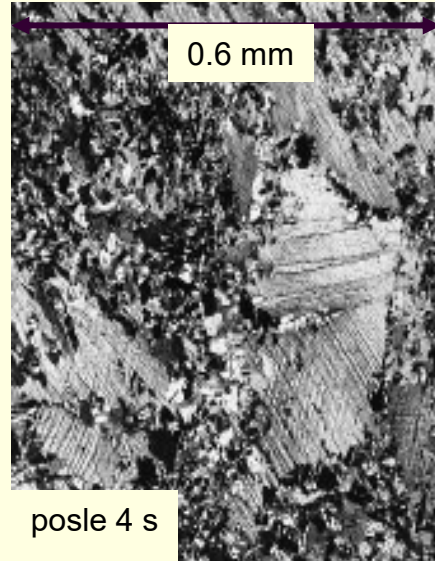
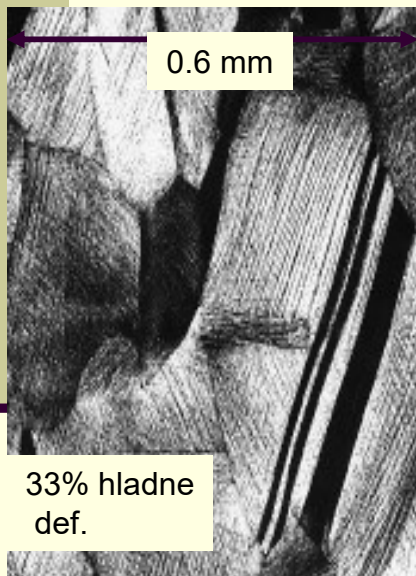
- Scenario 2

1. blokirana dislokacija
2. sivi atomi difunduju mehanizmom praznina i disl. se premesti
3. "Uspinjanje" disl. na novu ravan



Rekristalizacija

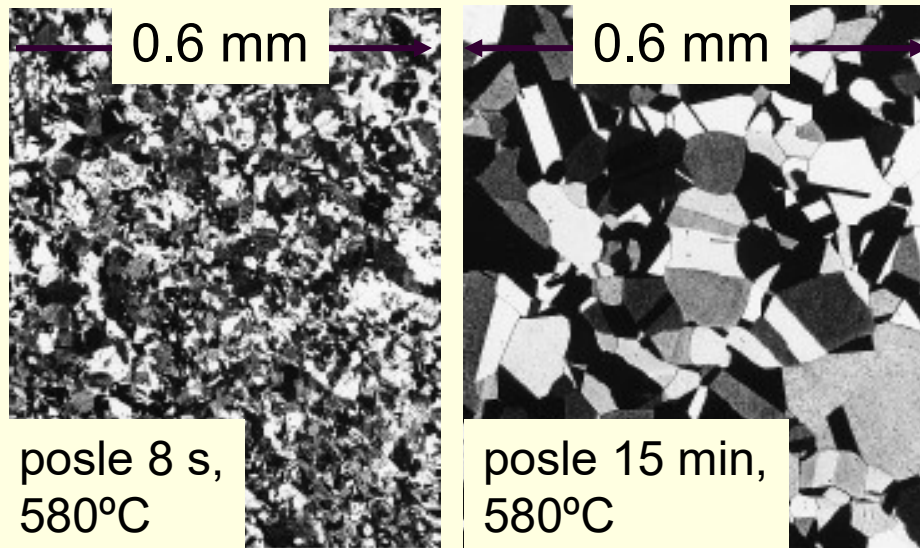
- Tokom rekristalizacije se formiraju nova zrna:
 - nova zrna imaju malu gustinu dislokacija
 - zrna su sitna
 - nastaju na račun hladno deformisanih zrna.



Materijal: mesing

Rast zrna

- Tokom dužeg zagrevanja, **velika zrna rastu na račun malih.**
- Razlog je to što se sa smanjenjem granica zrna, smanjuje energija sistema

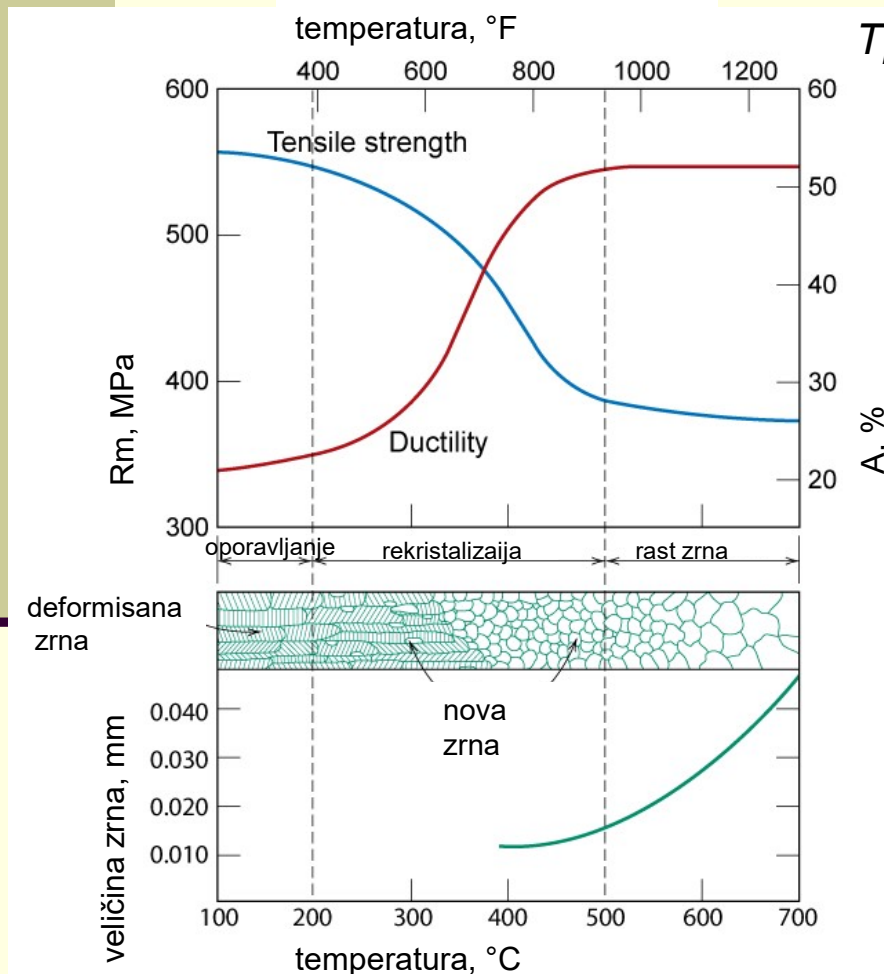


- Empirijska relacija:

$$d^n - d_o^n = Kt$$

$n \sim 2$
 prečnik zrna u trenutku t → d^n → koef. koji zavisi od T i materijala. (points to K)
 proteklo vreme (points to t)

Rekristalizacija



T_R = temperatura rekristalizacije (tada je najveća brzina promena osobina)

- Generalno - $T_R \approx 0.3-0.6 T_t$ (K)
- Za tehnički čiste metale $T_R \approx 0.3-0.4 \cdot T_t$
- Čisti metali imaju niže T_R zbog olakšanog kretanja dislokacija
- Za legure tipa čvrstog rastvora $T_R \approx 0.6 \cdot T_t$;

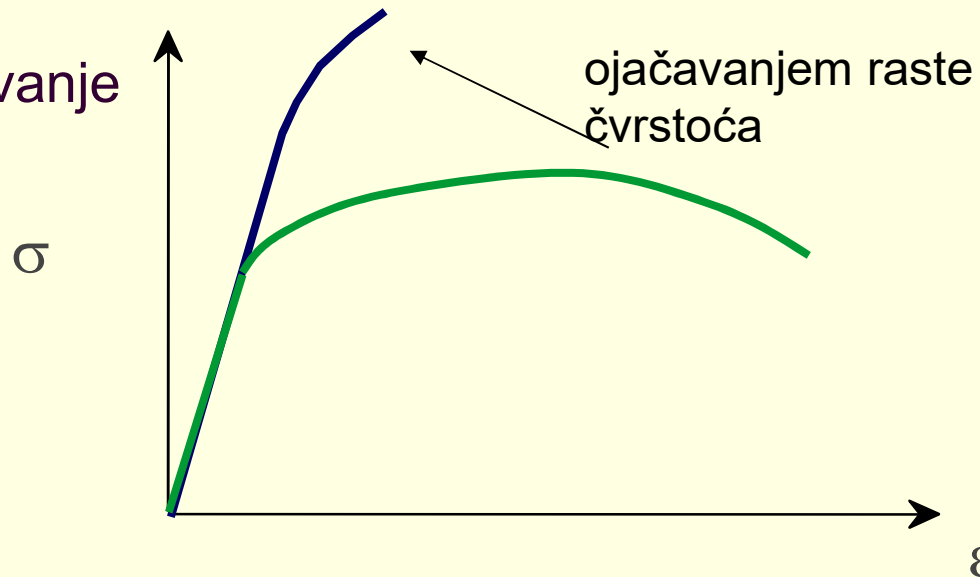
Zbog procesa difuzije vreme žarenja i temperatura T_R su u korelaciji:

- kraće vreme žarenja => viša T_R
- veći % deformacije => niža T_R

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

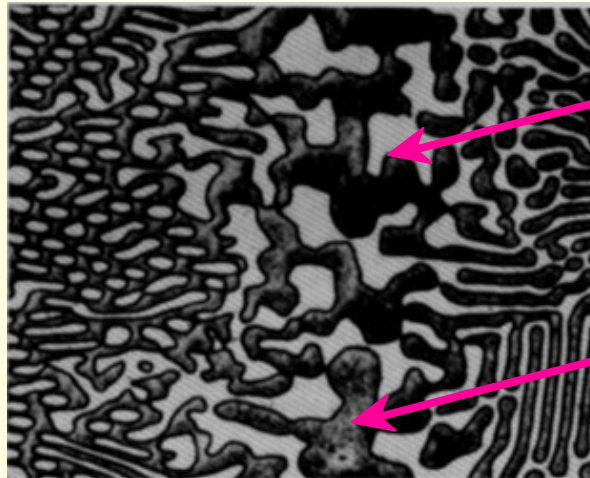


Fazni dijagrami – dijagrami stanja

Retko se koriste jednokomponentni materijali

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

dvofazna legura



(svetla faza)

(tamna faza)

Reakcije u čvrstom stanju

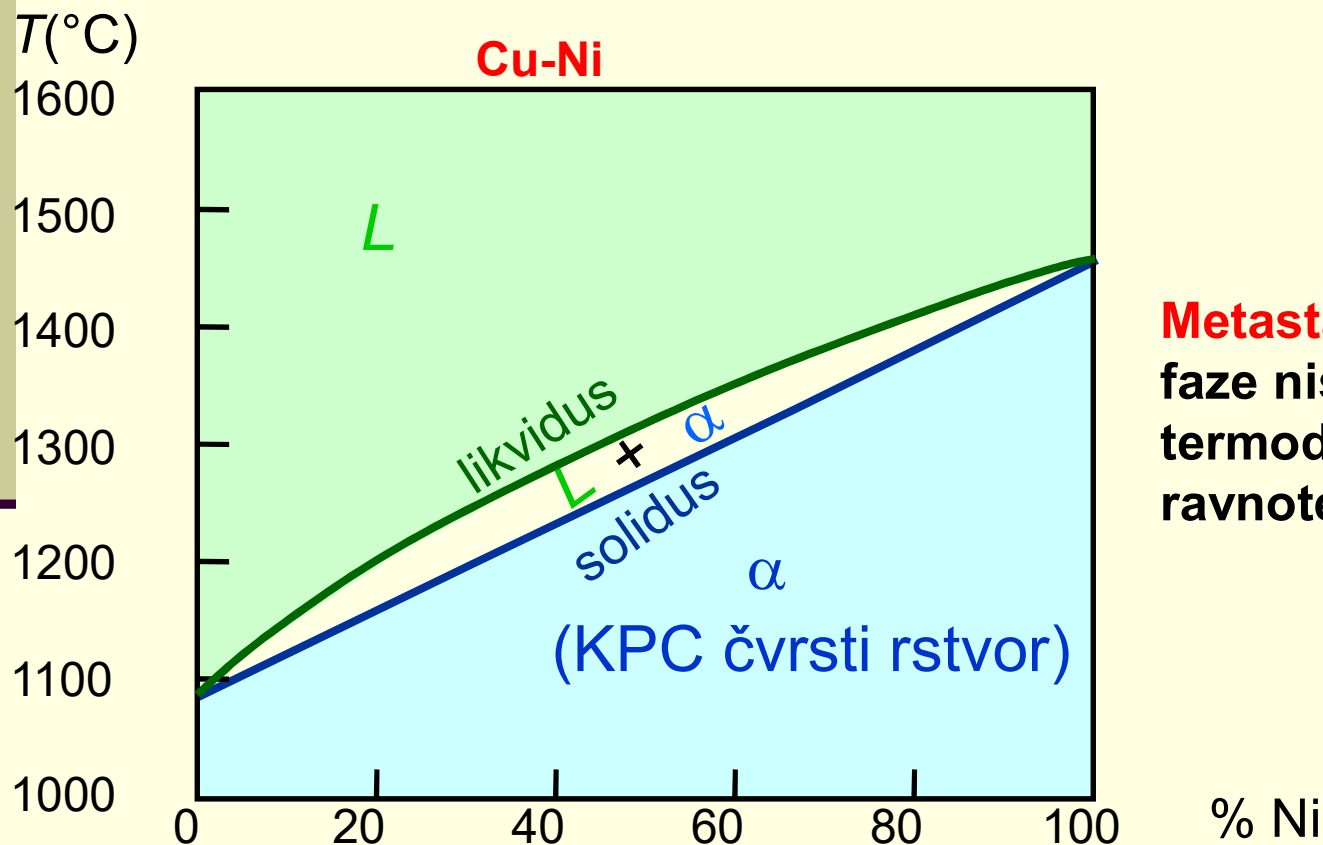
Čvrsti rastvori: Intersticijski i supstitucijski

Mehaničke smeše

Hemijska jedinjenja

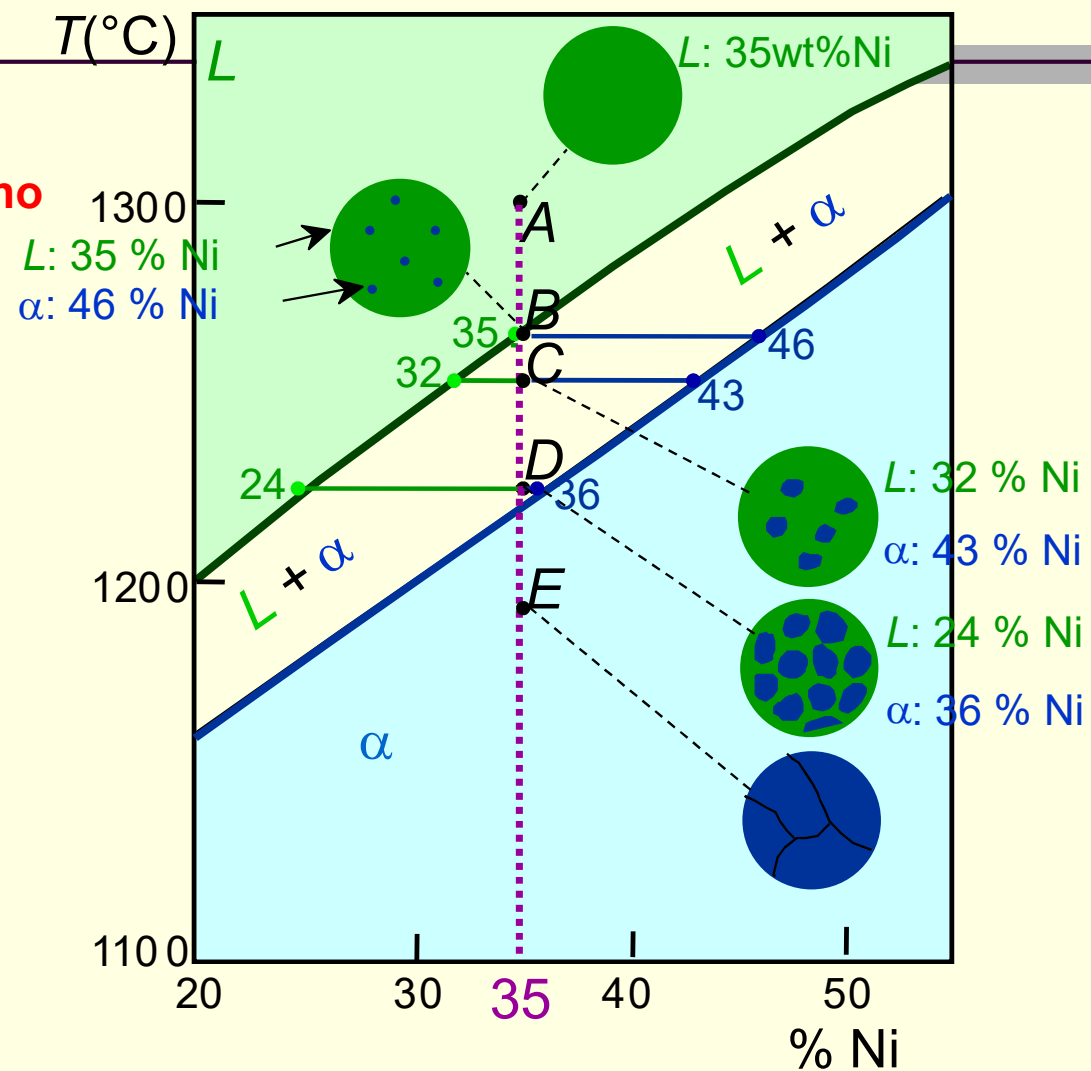
Dijagrami stanja

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



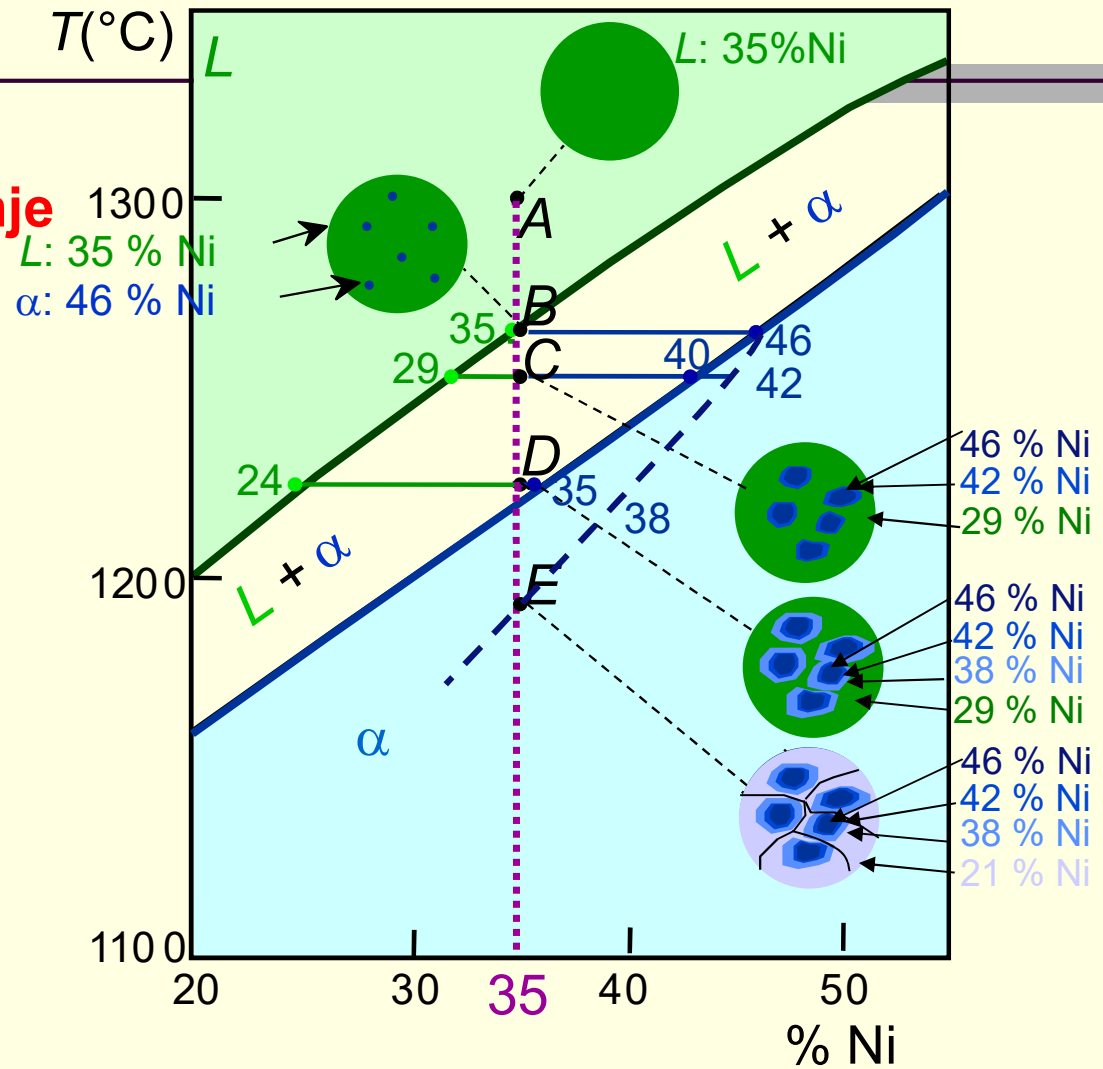
Metastabilni dijagrami
faze nisu u
termodinamičkoj
ravnoteži

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



Neravnotežno hlađenje

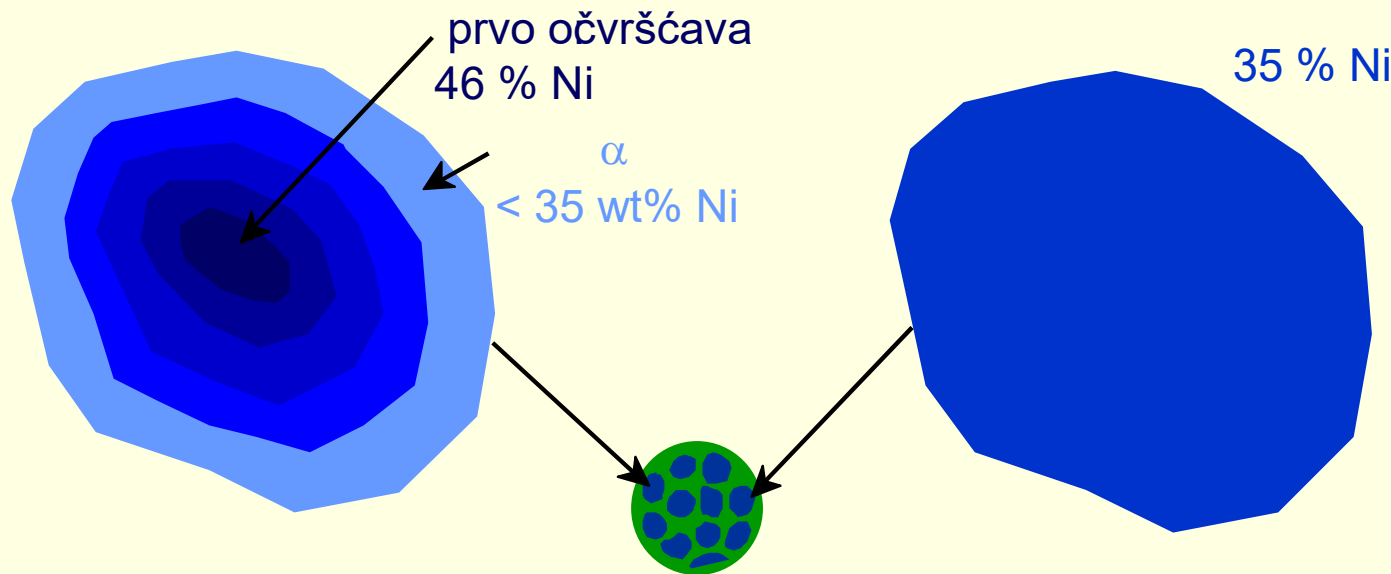
Metastabilni dijagram



Metastabilno i ravnotežno hlađenje - razlike

- Brzo hlađenje:
segregacija

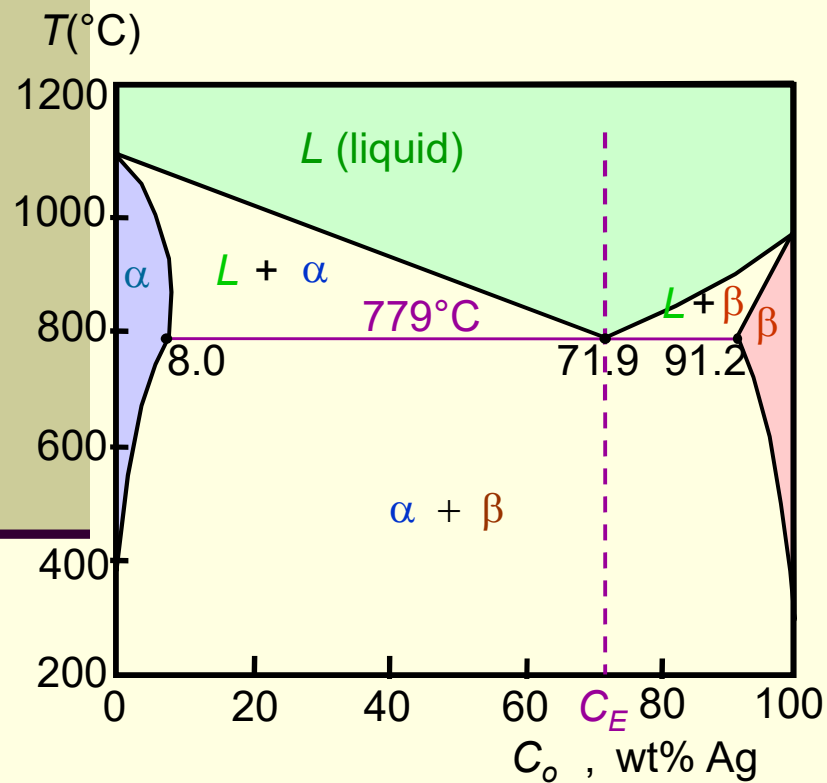
- sporo hlađenje:
homogena struktura



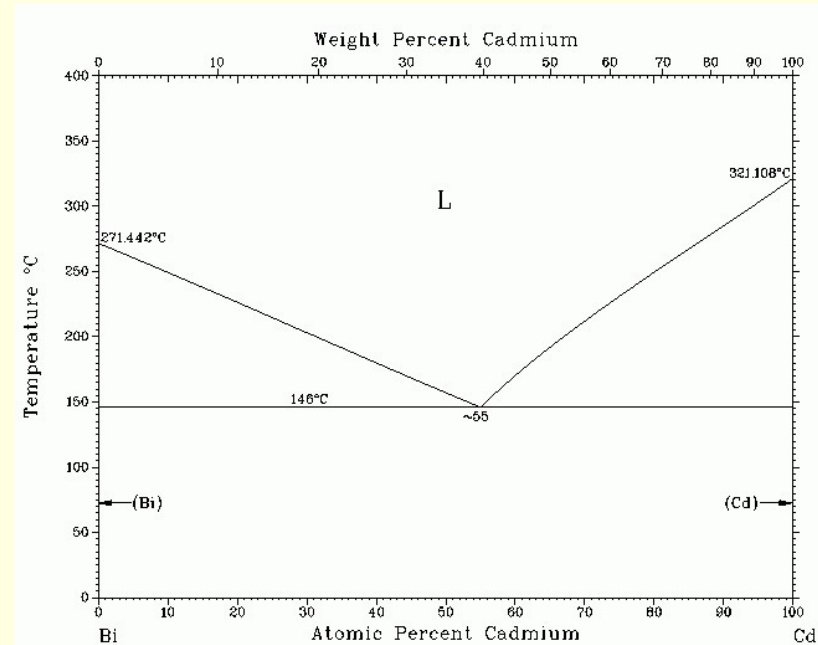
Dijagrami stanja

potpune nerastvorljivosti i delimične rastvorljivosti u čvrstom stanju

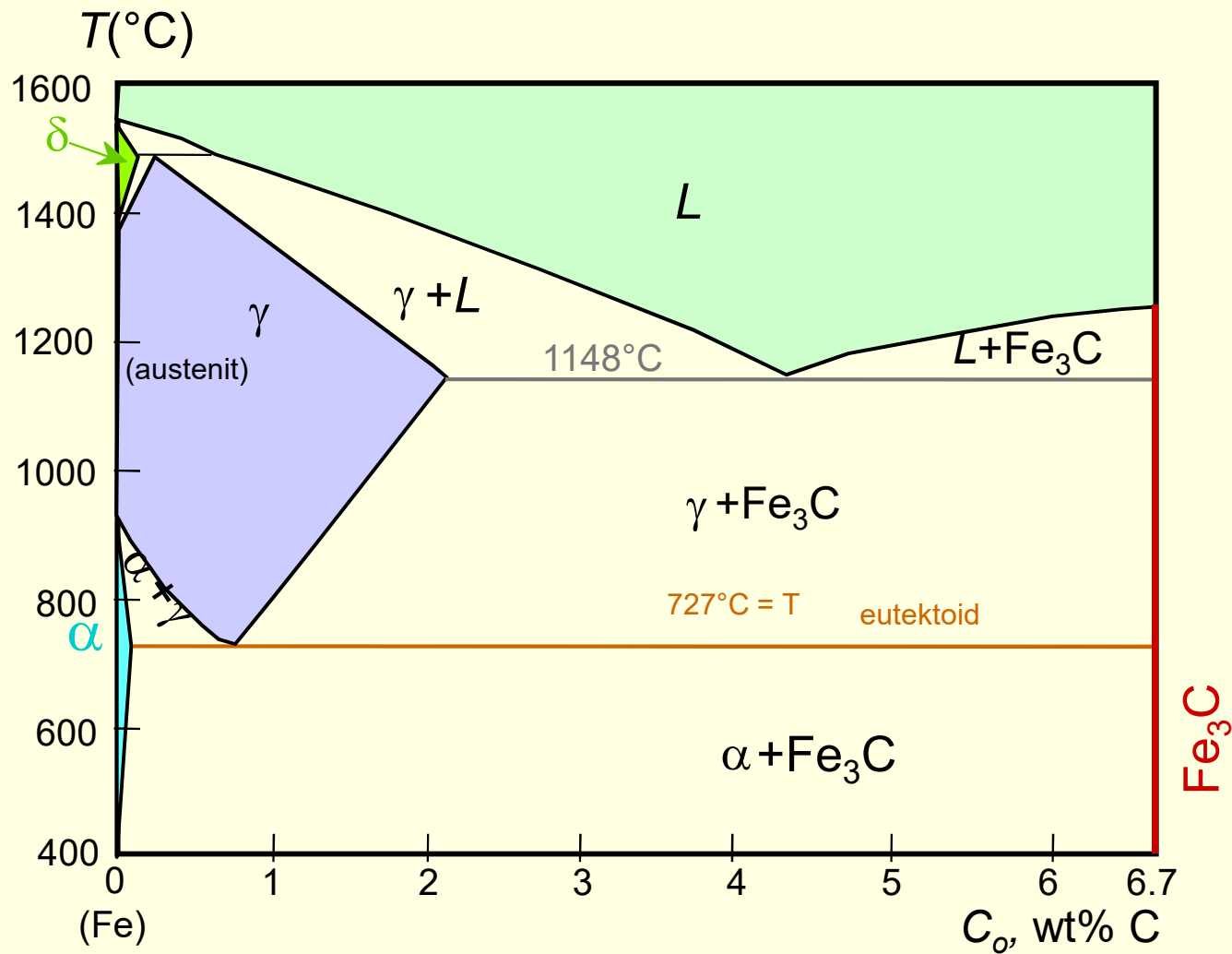
Cu-Ag



Cd-Bi



Dijagram stanja Fe-C



Polimorfija Fe

Železo (Fe) se, u f-ji od temperature, u čvrstom stanju javlja u 2 polimorfna oblika: - α (i δ) železo, sa **Z**apreminski **C**entriranom **K**ubnom **R**ešetkom (ZCKR)

- γ železo, sa **P**ovršinski **C**entriranom **K**ubnom **R**ešetkom (PCKR).

➤ α železo (α -Fe):

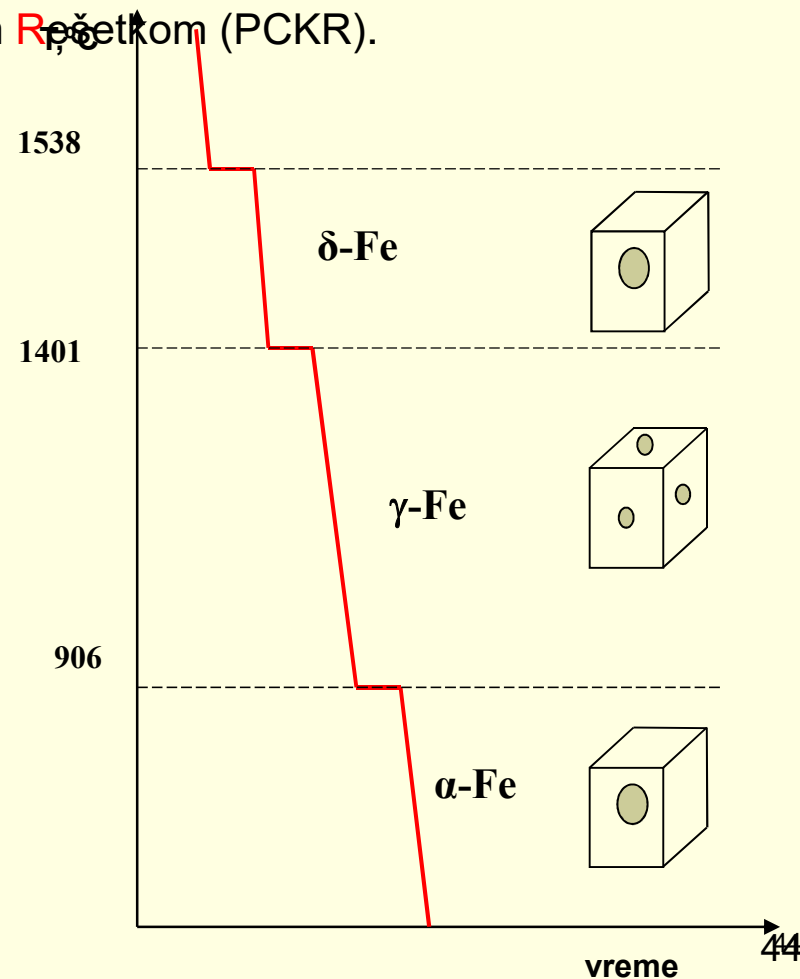
- KZC;
 - $T=20-906\text{ }^{\circ}\text{C}$;
 - fizičke osobine (magnetičnost):
 - $T=20-769\text{ }^{\circ}\text{C} \rightarrow$ feromagnetično α -Fe,
 - $T=769-906\text{ }^{\circ}\text{C} \rightarrow$ paramagnetično β -Fe.
- (α -Fe, β -Fe = ZCKR)

➤ γ železo (γ -Fe):

- KPC;
- $T=906-1401\text{ }^{\circ}\text{C}$.

➤ δ železo (δ -Fe):

- KZC;
- $T=1401-1538\text{ }^{\circ}\text{C}$ (T_{top}).
- značajno za visoko legirane čelike;
- stabilnost na visokim T.



Dijagram stanja Fe-C

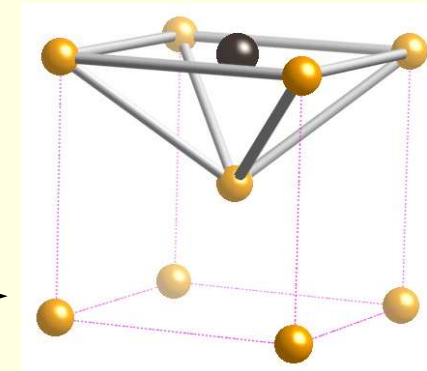
Na metastabilnom dijagramu stanja Fe-Fe₃C javljaju se 3 osnovne interakcije u čvrstom stanju:

1. **Intersticijski čvrsti rastvori C u Fe**: FERIT(α), AUSTENIT (γ) i δ -Ferit(δ).
2. **Hemijsko jedinjenje**: CEMENTIT (Fe₃C)
3. **Mehaničke smeše**, kao kombinacija prethodne 2 faze: Perlit (**P**) i Ledeburit (**L**).

1. INTERSTICIJSKI ČVRSTI RASTVORI C u Fe:

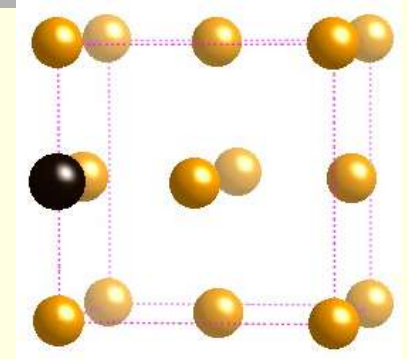
- **FERIT (α)** je intersticijski čvrsti rastvor **C** u **α -Fe**.

- KZC;
- HB 80;
- $R_m = 280 \text{ N/mm}^2$;
- Rastvorljivost **C** u **α** : max = 0,025 %C (na 727°C),
min = 0,0025 %C (na 20°C).



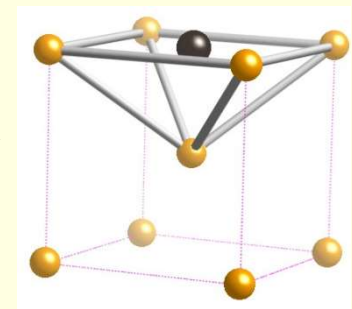
- **AUSTENIT (γ)** je intersticijski čvrsti rastvor **C** u γ -Fe.

- KPC;
- HB 180;
- $R_m = 200-800 \text{ N/mm}^2$;
- Max-rastvorljivost C u γ je 2,14 %C (na 1147°C).
- Postojanost na $t_{\min} = 727^\circ\text{C}$.



- **δ-FERIT** je intersticijski čvrsti rastvor **C** u δ -Fe.

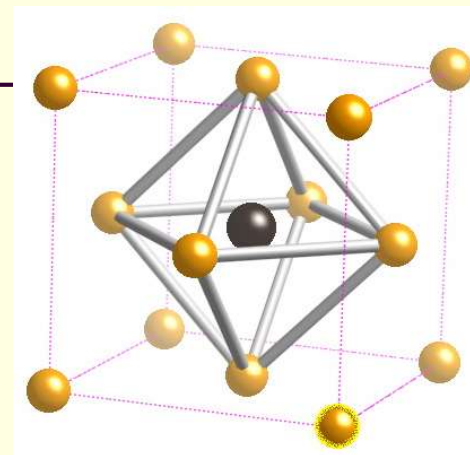
- KZC;
- Max-rastvorljivost C u δ je 0,09 %C (na 1493°C).
- Postojanost na $t_{\min} = 1394^\circ\text{C}$.



2. HEMIJSKO JEDINJENJE:

- **CEMENTIT (Fe_3C)** je ~~intermedijalno jedinjenje Fe i C,~~ sa sadržajem C=6,67 % (karbid železa).

- Složena, ortorombična kristalna rešetka;
- HV 800;
- $R_m=30-50 \text{ N/mm}^2$;
- Jako tvrdo i krto jedinjenje.



3. MEHANIČKE SMEŠE (kombinacija prethodnih faza):

- **LEDEBURIT (L)** je mehanička smeša **austenita (γ)** i **cementita (Fe_3C)**!

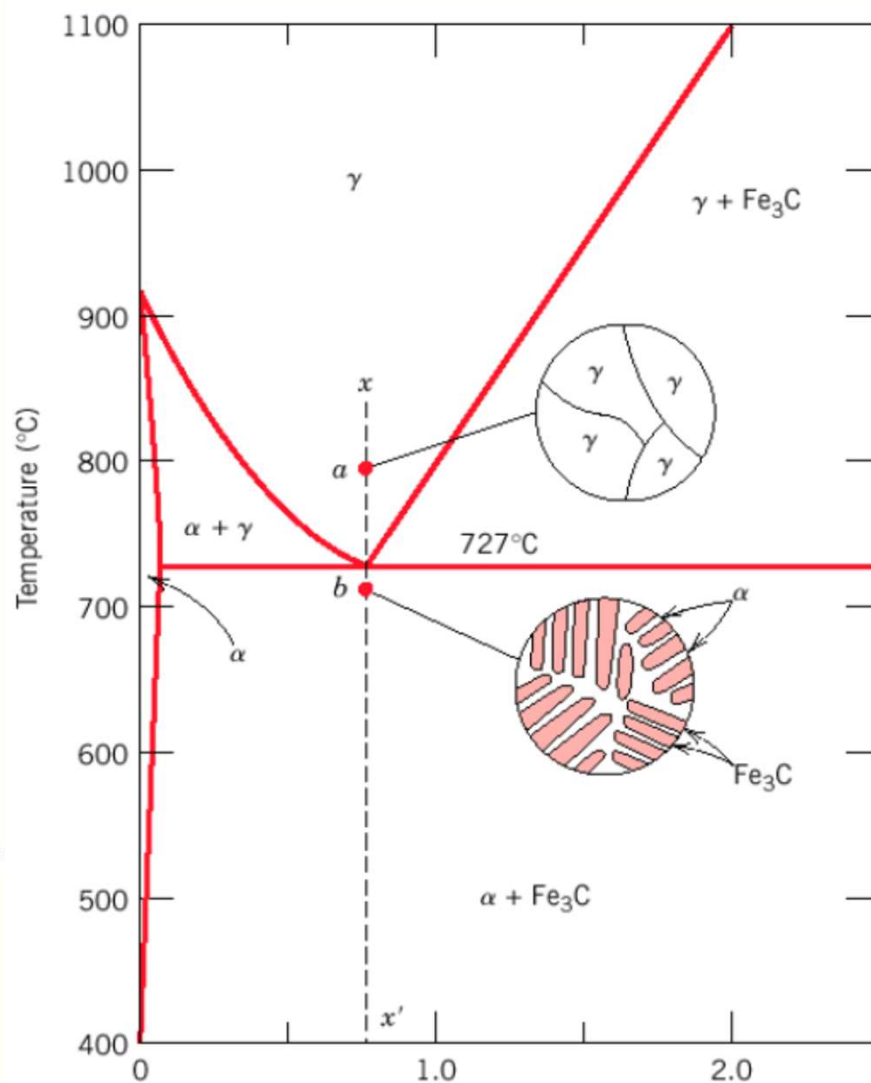
Nastaje eutektičkom reakcijom: $R \xrightarrow{1147^\circ\text{C}; 4,3\% \text{C}} L(\gamma_{2,14\% \text{C}} + \text{Fe}_3\text{C}_{6,67\% \text{C}})$

- napomena: $R \rightarrow L_I \Rightarrow L_I \xrightarrow{727^\circ\text{C}; 4,3\% \text{C}} L_{II}(P_{0,8\% \text{C}} + \text{Fe}_3\text{C}_{6,67\% \text{C}})$

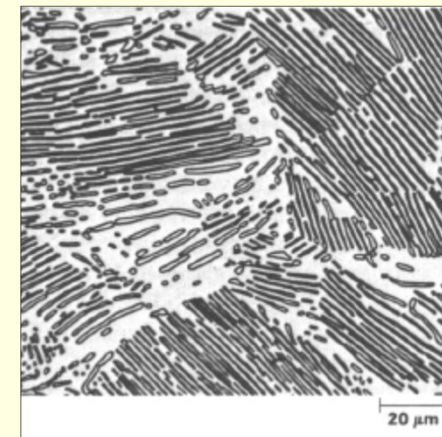
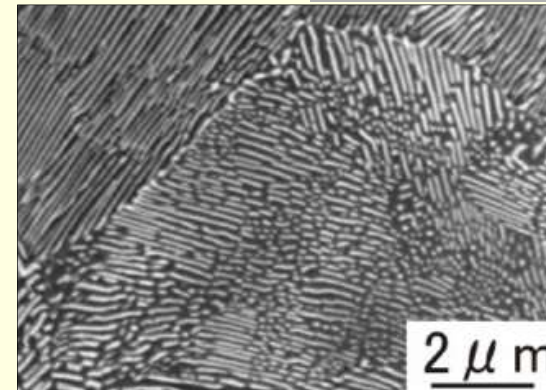
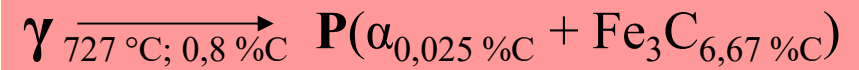
- **PERLIT (P)** je mehanička smeša **ferita (α)** i **cementita (Fe_3C)**!

Nastaje eutektoidnom reakcijom: $\gamma \xrightarrow{727^\circ\text{C}; 0,8\% \text{C}} P(\alpha_{0,025\% \text{C}} + \text{Fe}_3\text{C}_{6,67\% \text{C}})$

EUTEKTOIDNI ČELICI

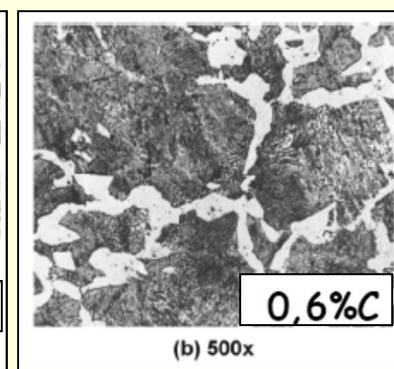
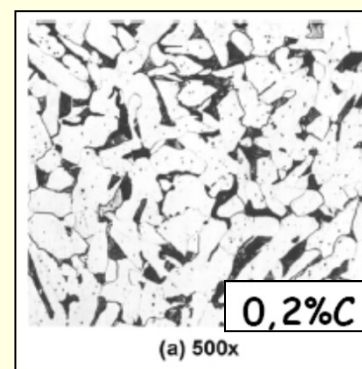
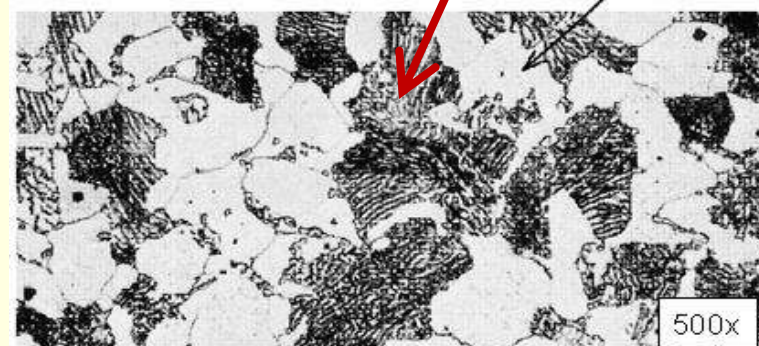
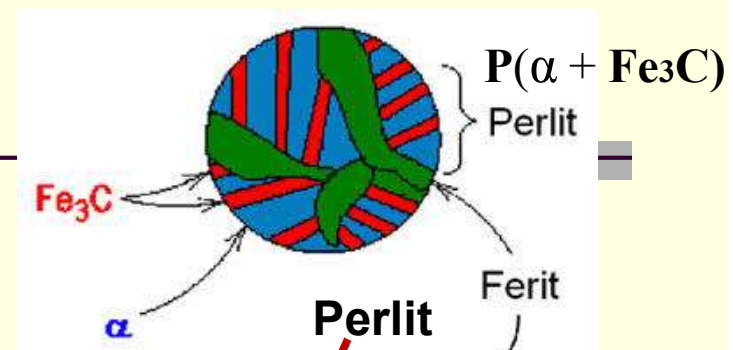
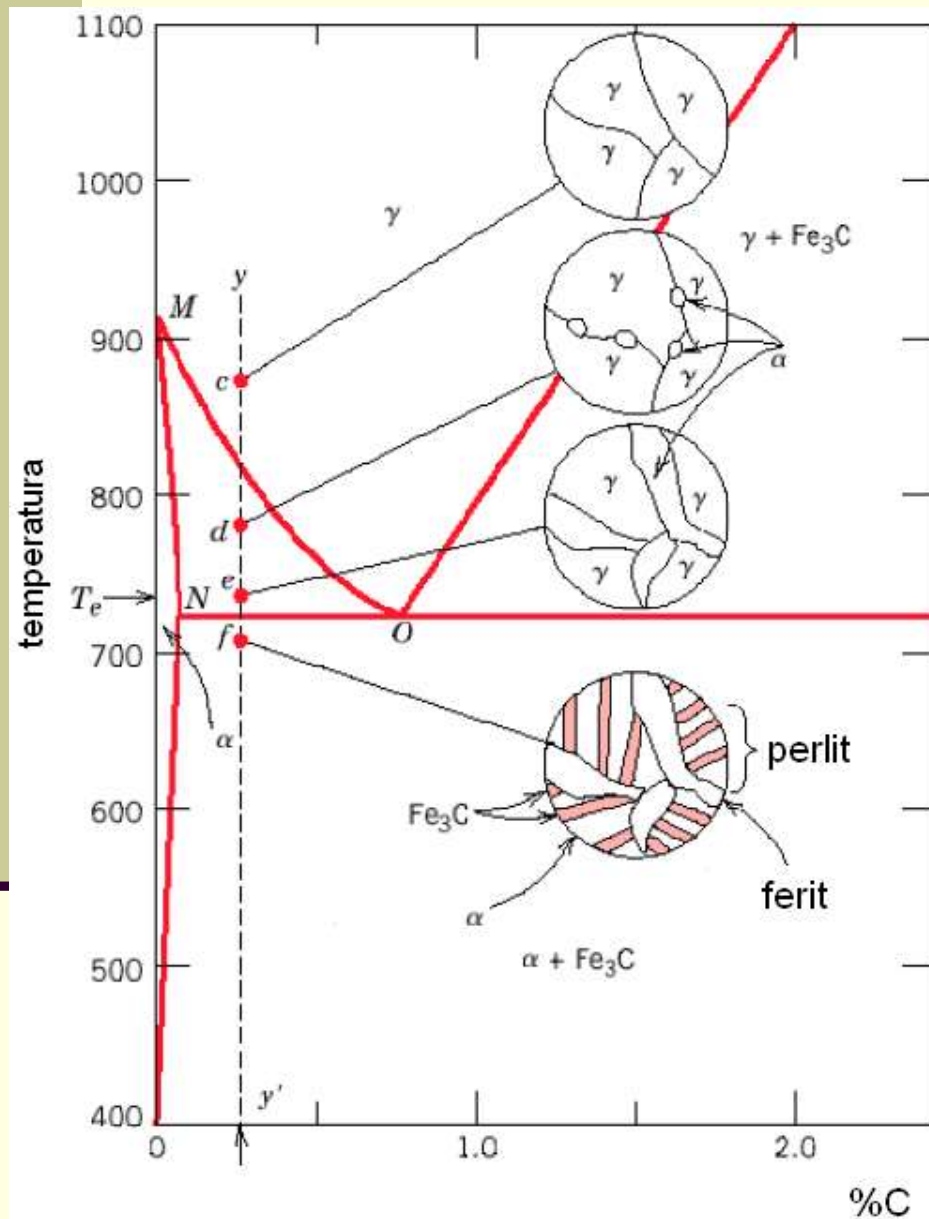


PERLIT



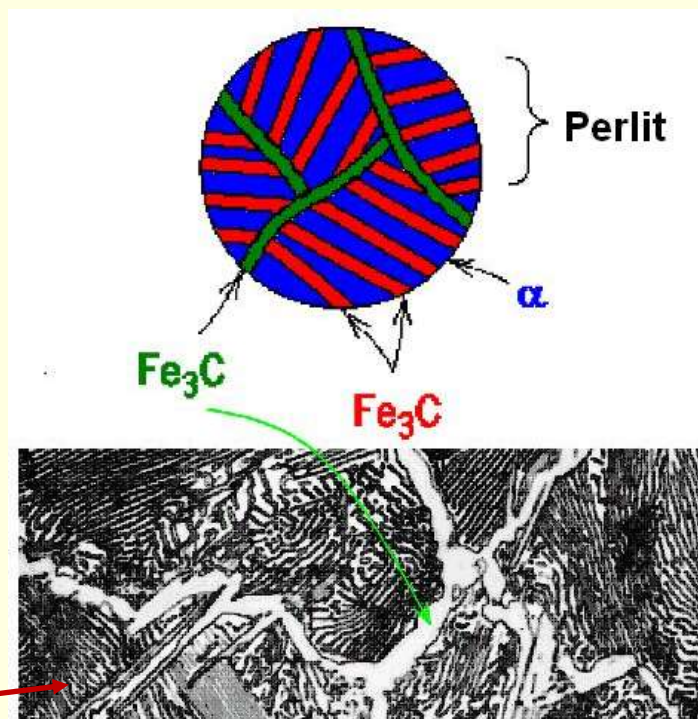
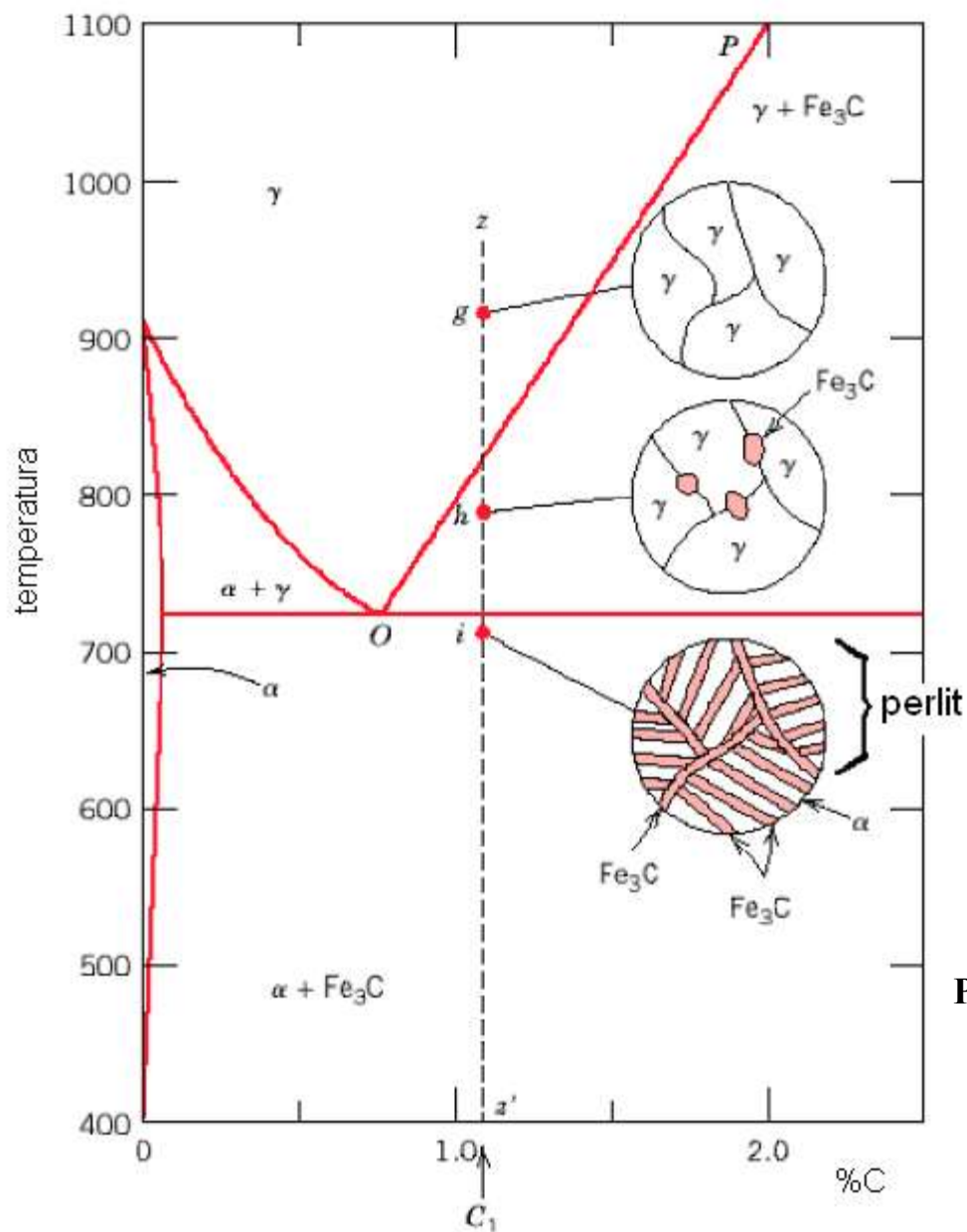
Mikrostruktura perlita

PODEUTEKTOIDNI ČELICI

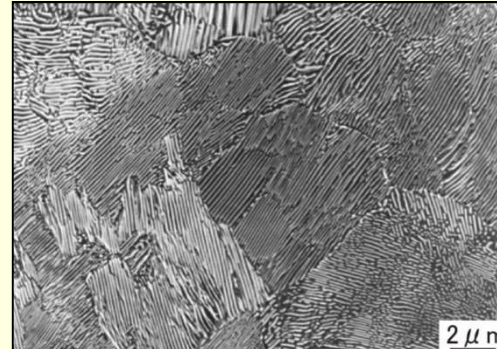
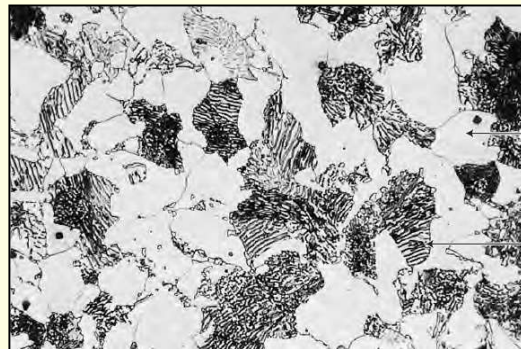
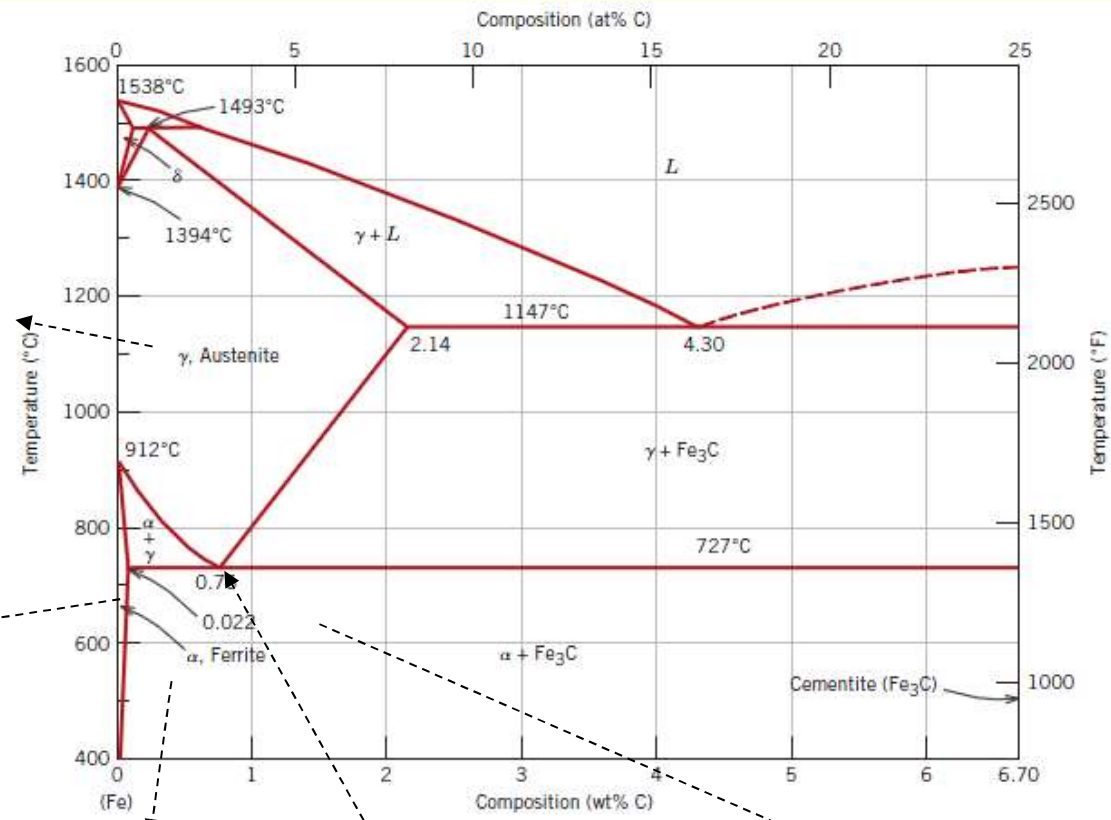
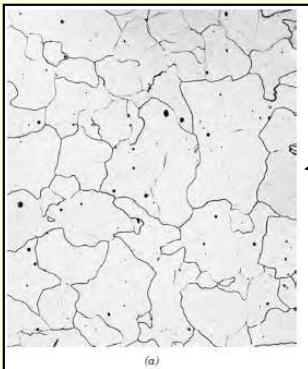
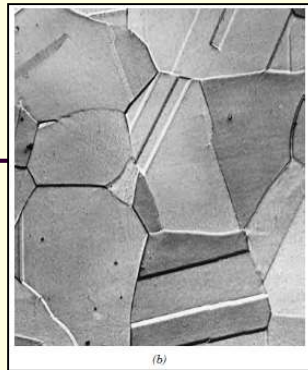


Mikrostrukture podeutektoidnih čelika

NADEUTEKTOIDNI ČELICI

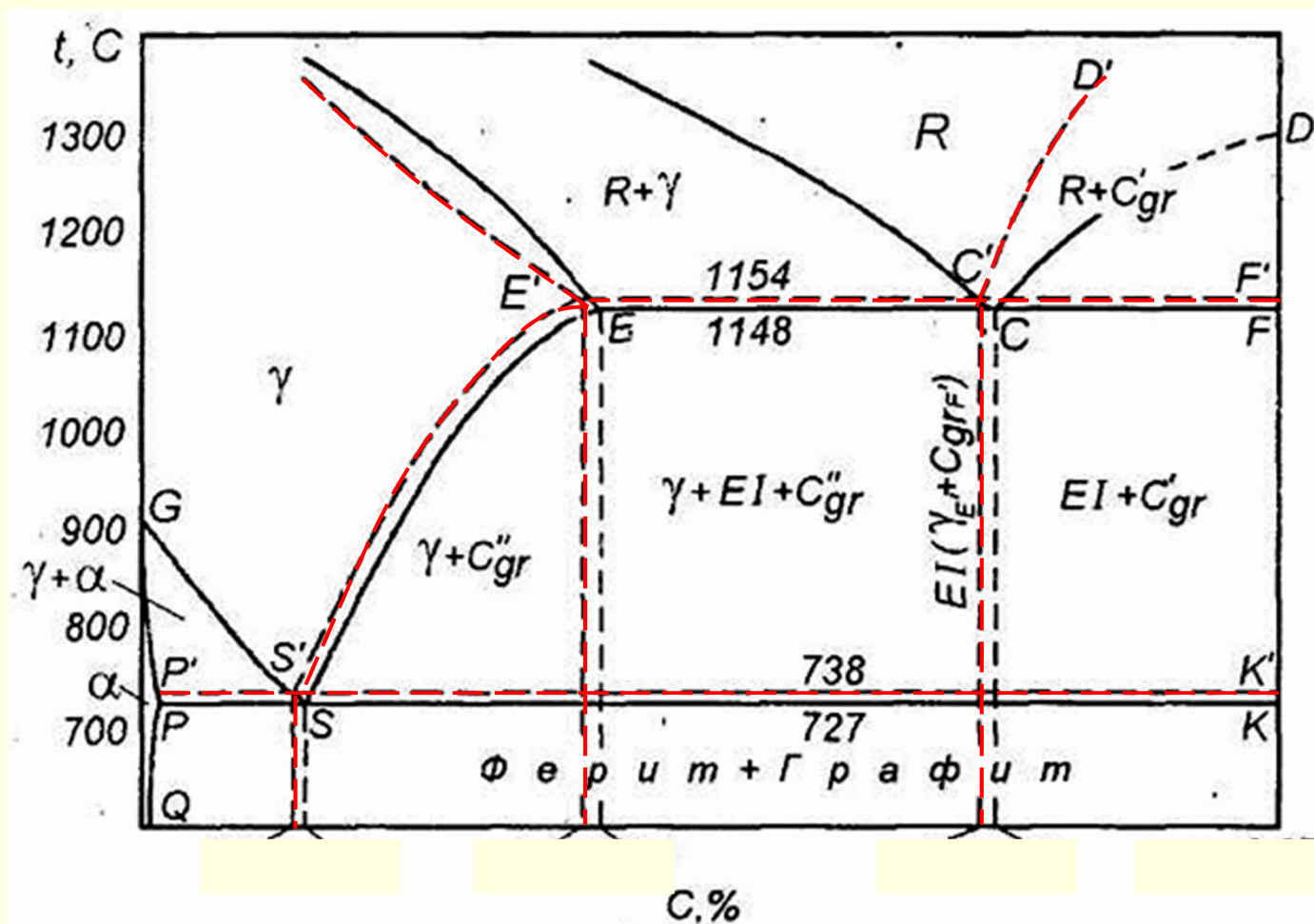


Mikrostruktura nadeutektoidnog čelika



Stabilni dijagram stanja (Fe-C)

Tačka	E'	C'	S'
Sadržaj ugljenika - %	2,08	4,26	0,68
Temperatura - °C	1154	1154	738



■ Hvala na pažnji😊