

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

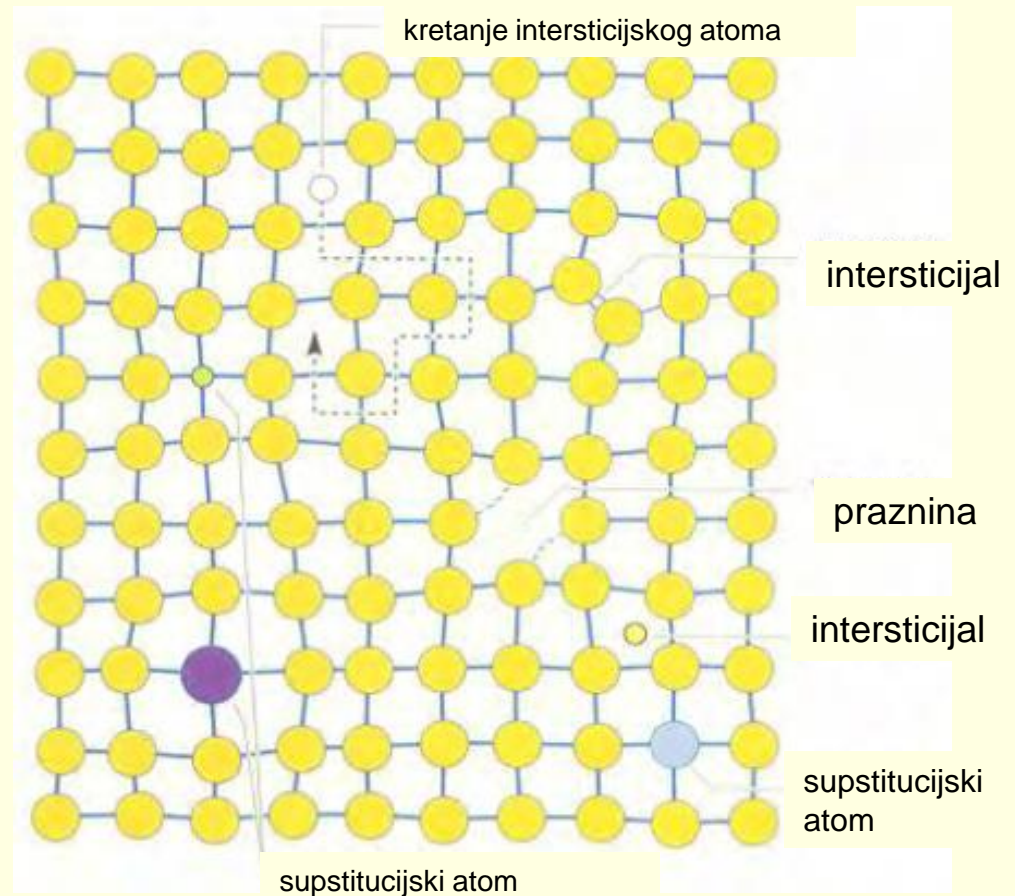
- granice zrna/subzrna
- prsline, uključci, čestice

Površinske greške

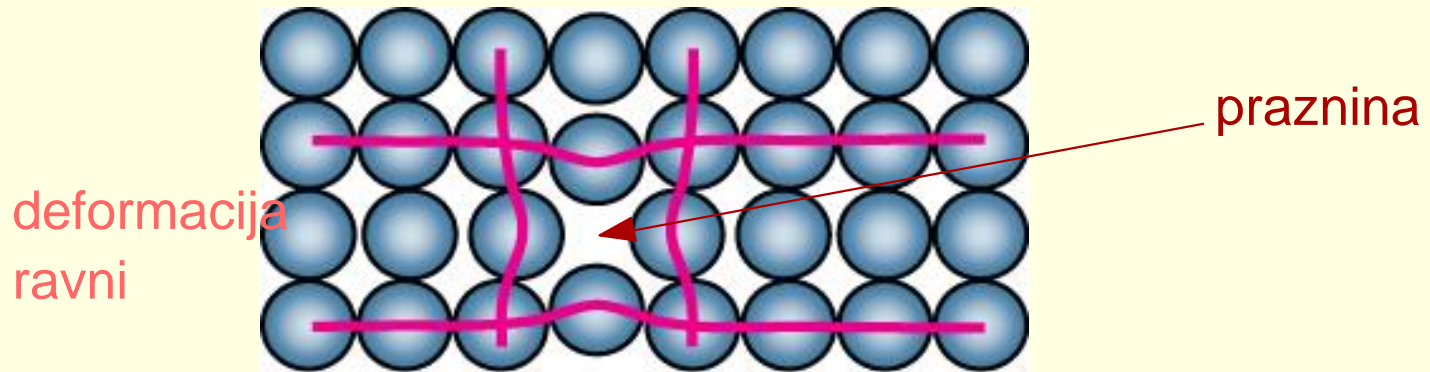
Zapreminske greške

Tačkaste greške

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



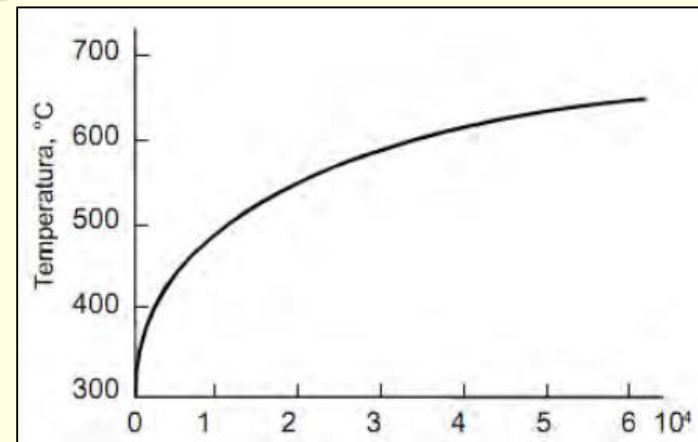
Tačkaste greške - praznine



Praznine su prazna mesta u kristalima

U okolini praznina rešetka se deformiše

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



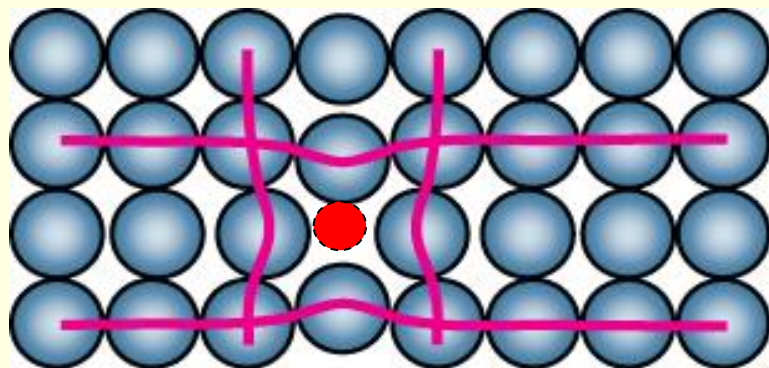
koncentracija praznina

Tačkaste greške – supstitucijski atom

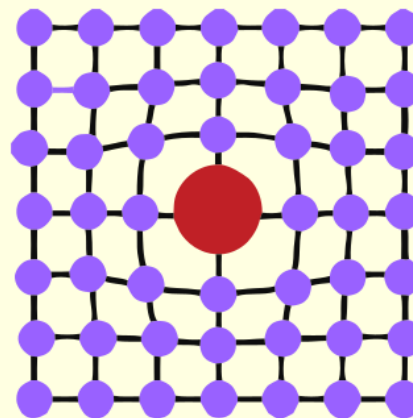
Strani atom (B) može da zauzme mesto zamenom u osnovnoj rešetki elementa A – ova vrsta greške se naziva **supstitucijski atom** (supstitucija znači zamena)

Supstitucijski atomi B su sličnog poluprečnika kao atomi osnovne kristalne rešetke A (max razlika $R < 15\%$)

Zbog razlike u veličini atoma rešetka se na mestu supstitucijskog atoma deformiše.



supstitucijski
atom manjeg prečnika
primiče atome u njegovoj okolini

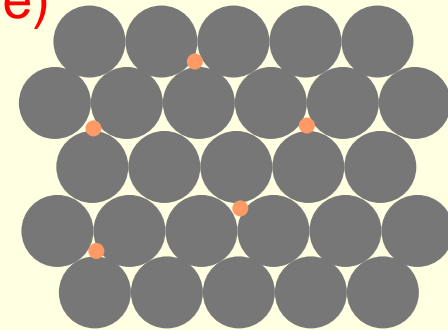


supstitucijski
atom većeg prečnika
razmiče atome u njegovoj okolini

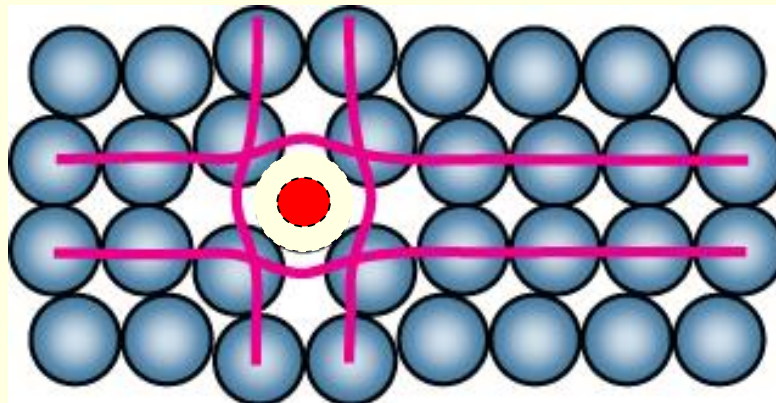
Tačkaste greške – Intersticijski atom

Strani atom (B) može da zauzme prostor između atoma, odnosno da se smesti između atoma u osnovnoj rešetki atoma (A) - ova vrsta greške se naziva **intersticijski atom** (intersticija znači umetanje)

Intersticijski atomi



Intersticijski atomi B su mnogo manjeg poluprečnika od atoma osnovne kristalne rešetke A (min razlika $R > 59\%$)



I u ovom slučaju, zbog razlike u veličini atoma rešetka se na mestu intersticijskog atoma deformiše. **Deformacija je znatno viša u poređenju sa supstitucijskim atomom**

Linijske greške - dislokacije

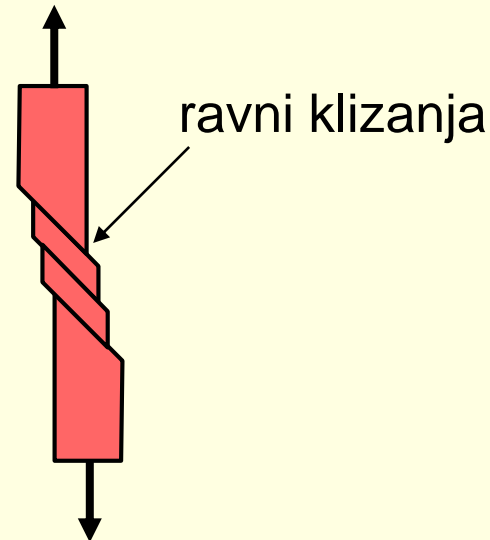
Dislokacije – su linijske, jednodimenzionalne greške oko kojih su atomi pomereni sa svojih mesta.

- Ova vrsta grešaka je **odgovorna za pojavu trajne, plastične deformacije.**

Deformacija cinka ZN (HGP rešetka):



- pre deformacije



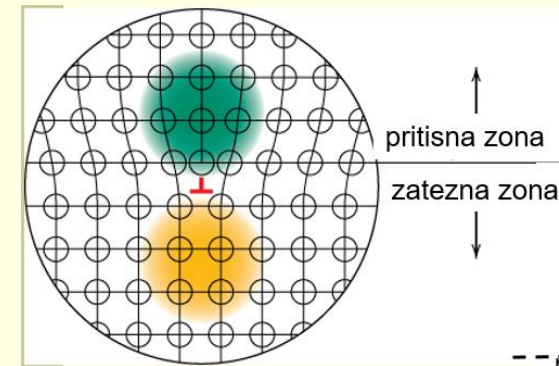
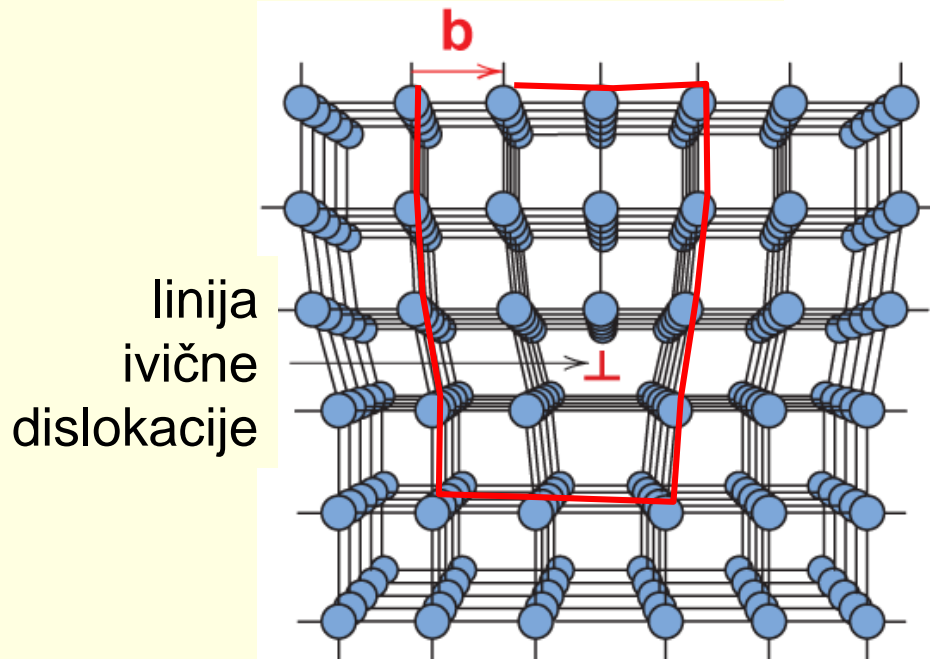
- posle zatezanja



Dislokacije - Ivična dislokacija

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

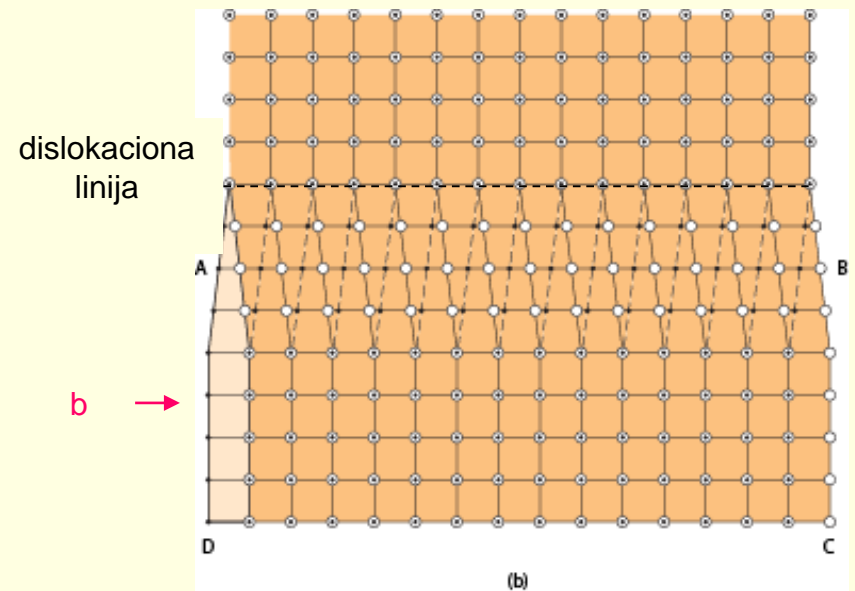
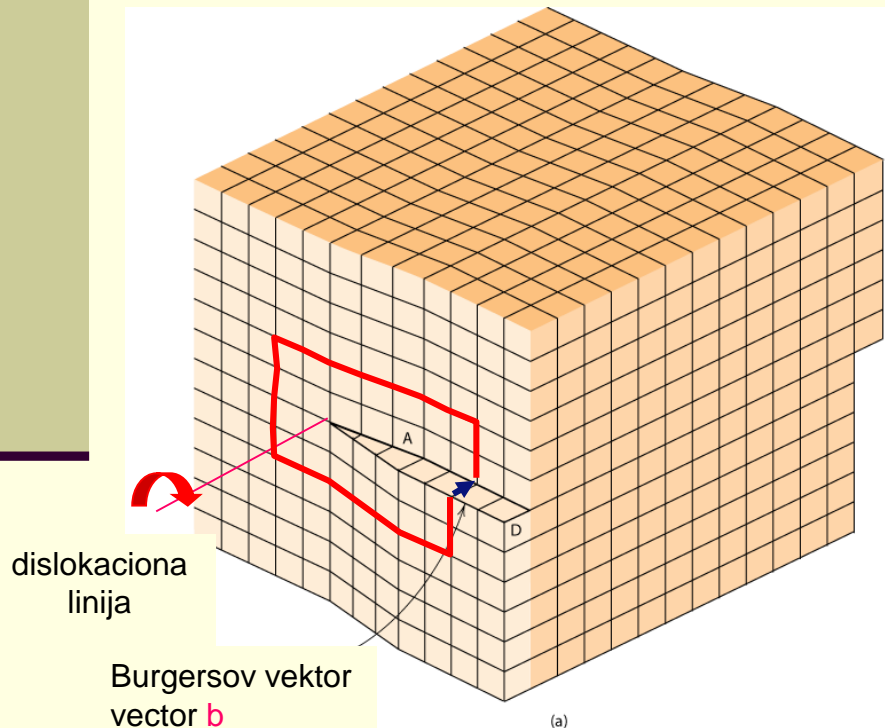
Burgersov vektor



Rešetka se deformiše za jedno međuatomsko mesto – plastična def.
Ova vrednost se naziva Burgersov vektor, $\mathbf{b} \perp$ na ivičnu dislokaciju

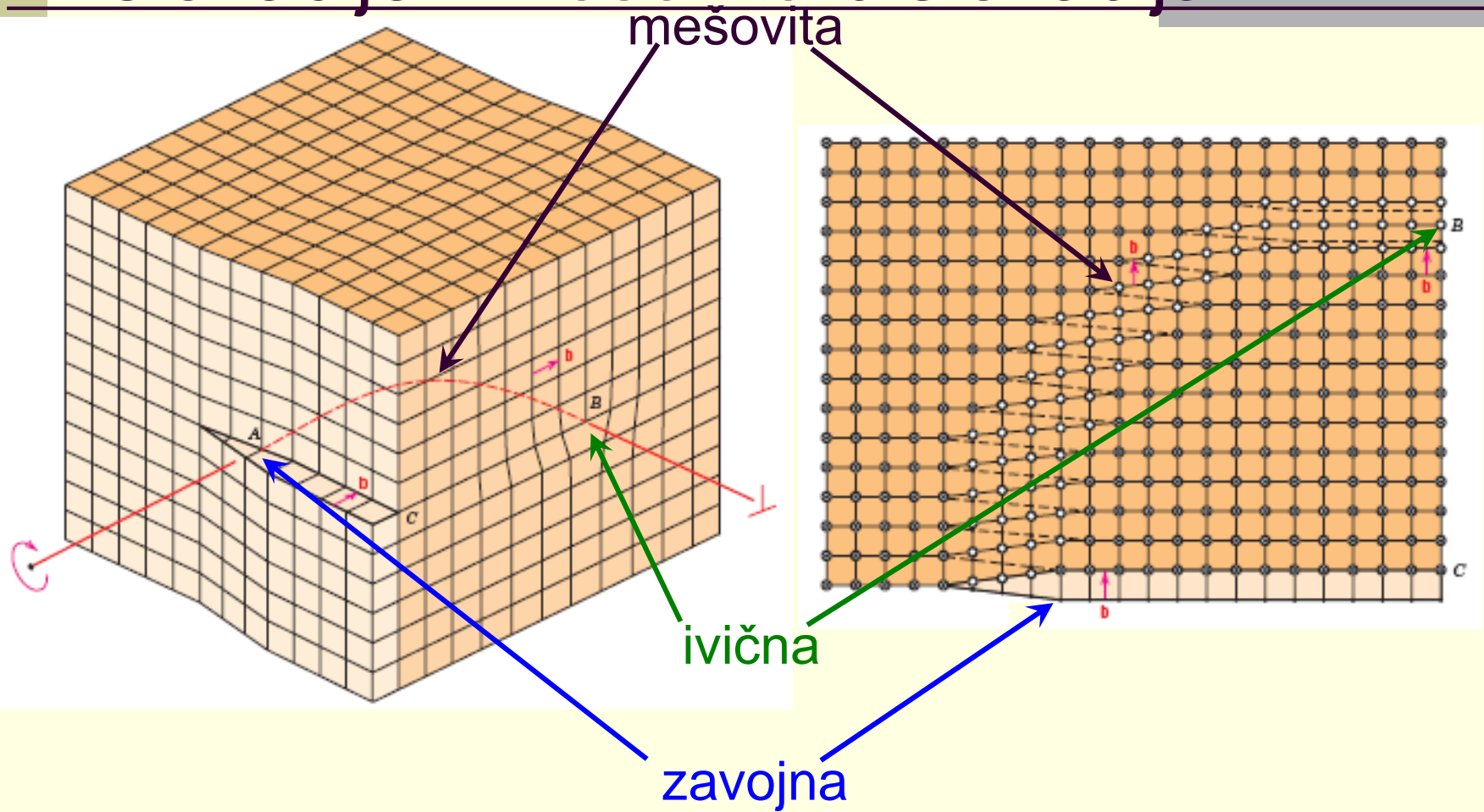
Dislokacije - Zavojna dislokacija

Zavojna dislokacija: nastaje spiralnim pomerenjem ravni usled delovanja smicanja

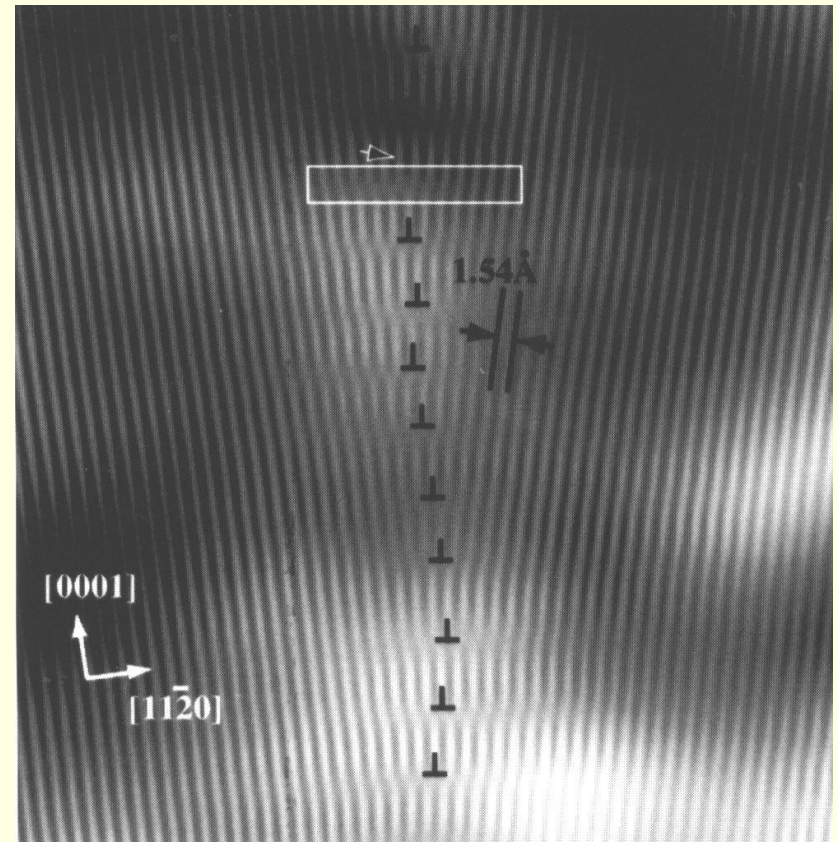


• $b \parallel$ je paralelan sa dislokacijom linijom

Dislokacije - mešovita dislokacija

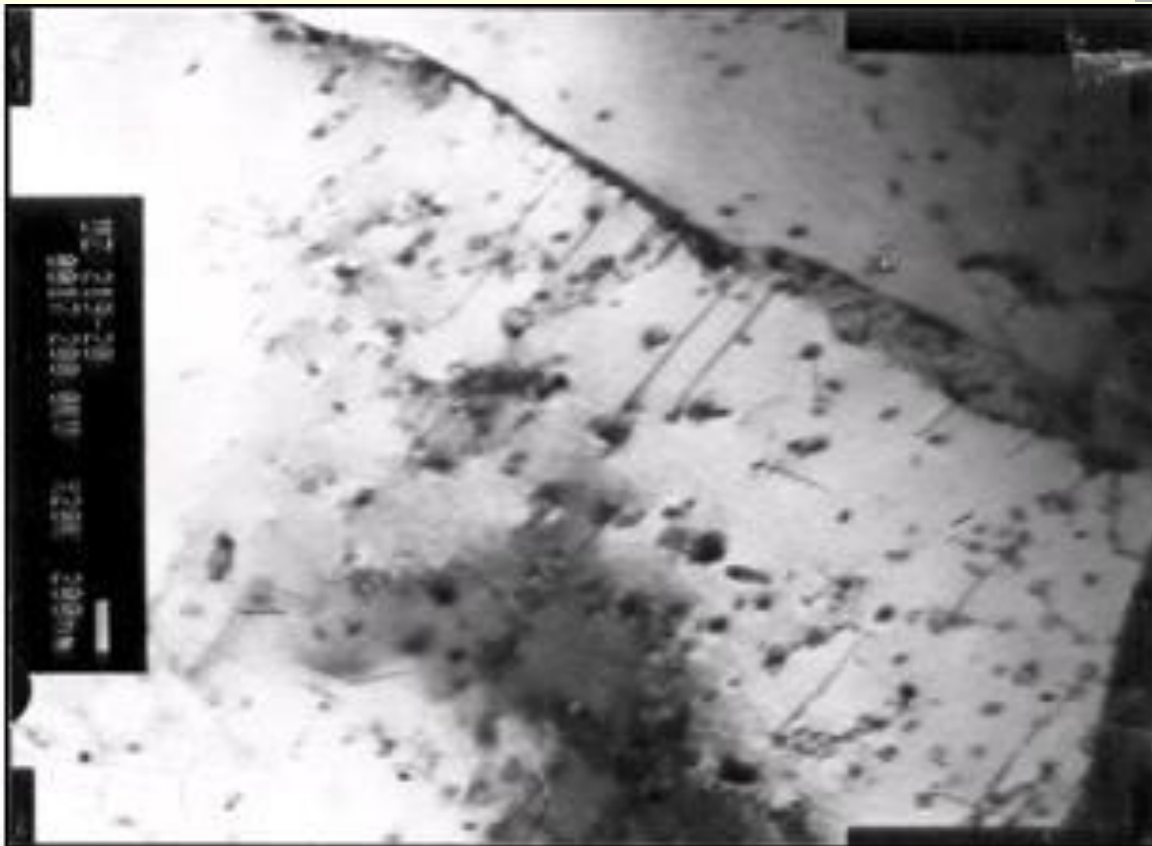


Dislokacije – izgled u materijalu



Dislokacije: levo – mreža, desno – granica subzrna

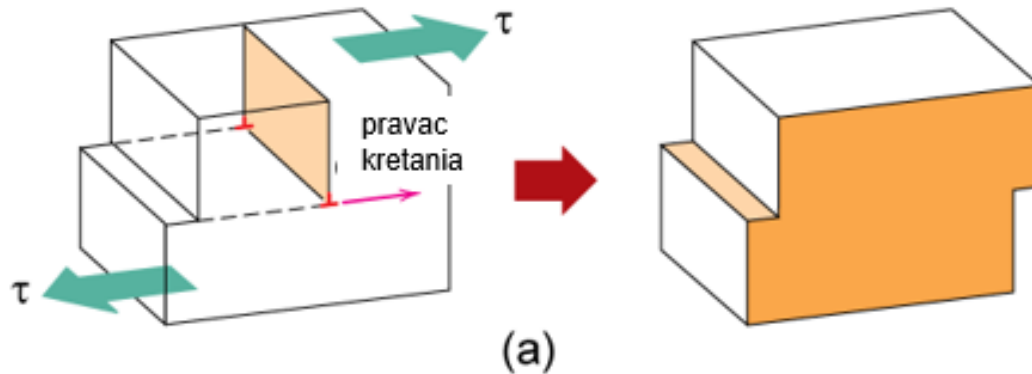
Dislokacije – izgled u materijalu



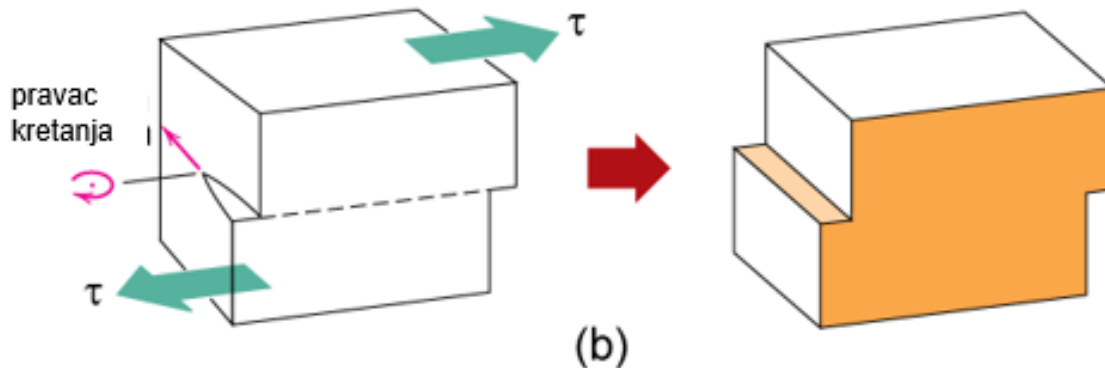
Dislokacije su vidljive pod velikim uvećanjima -
elektronski mikroskop (TEM)

Kako nastaje vidljiva deformacija

- Dislokacije se kreću preko **ravni klizanja** u **pravcu klizanja** normalno na dislokacionu liniju
- Pravac klizanja je isti kao pravac burgersovog vektora



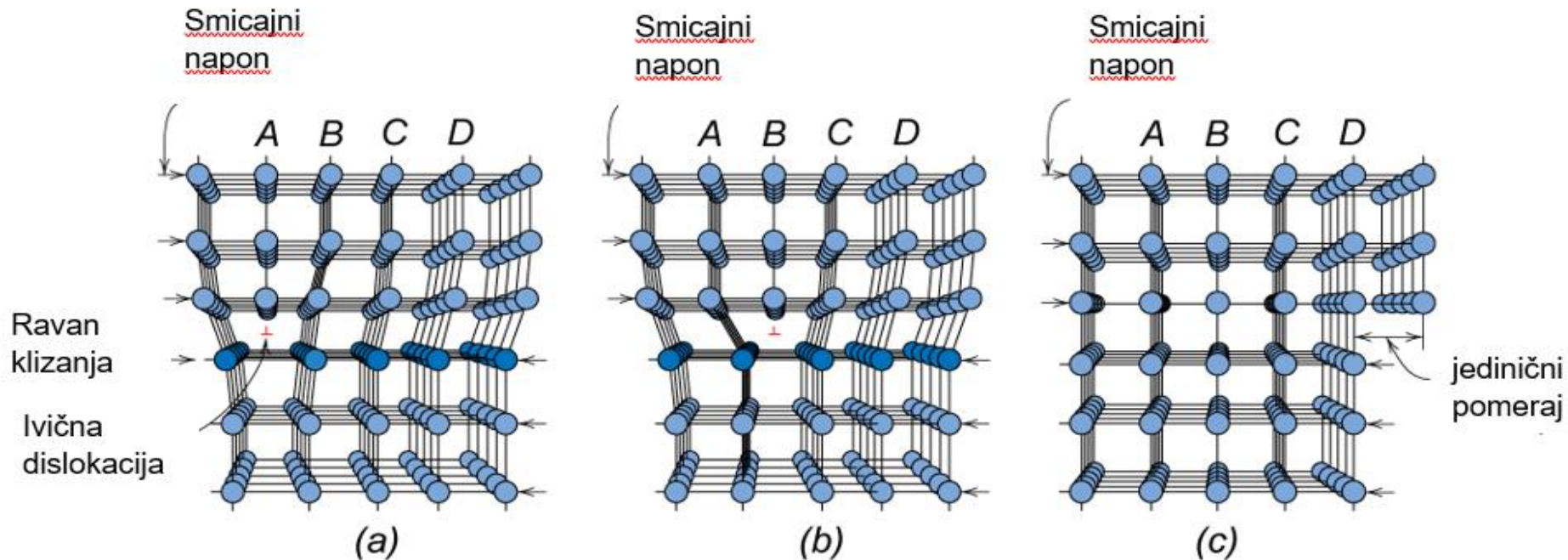
Ivična dislokacija



Zavojna dislokacija

Kliranje dislokacija

- Za pomeranje dislokacije potrebno je uzastopno naletavanje polovine ravni atoma (kod ivične na slici - s leva na desno).
- Veza između atoma se uzastopno prekidaju i uspostavljaju



Kretanje dislokacija još nazivamo **kliranje dislokacija**.

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

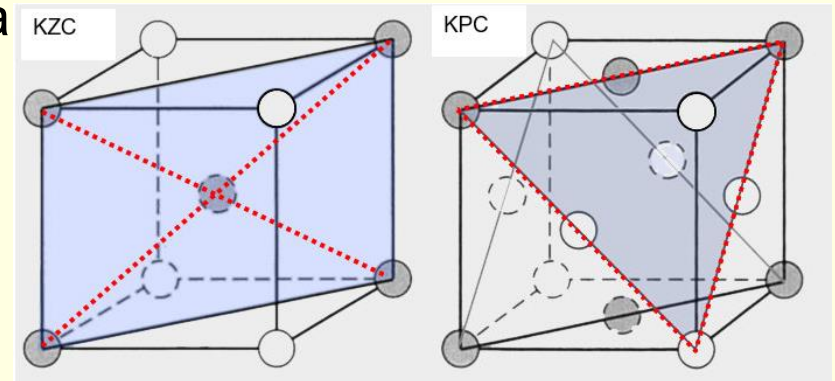
Klizanje dislokacija

Plastična deformacija nastaje dejstvom smicanja kada se mehanizmom dislokacionog klizanja jedna ravan atoma premešta preko susedne ravni.

Burgersov vektor, **b**: mera deformacije rešetke

Sistemi klizanja dislokacija:

- **Ravan klizanja** – ravan u kristalnoj rešetki po kojoj je najlakše klizanje dislokacija – ima najveću gustinu pakovanja atoma
- **Pravac klizanja** – pravac u kome je najlakše klizanje dislokacija - ima najveću gustina pakovanja atoma



- Na primer: KPC rešetka ima najveću gustinu pakovanja u familiji ravni $\{111\}$ i u pravcima $\langle 110 \rangle$ - ukupno 12 sistema klizanja koji se vrlo lako odvijaju – metali sa KPC rešetkom se **lako deformišu**
- KZC ima manju gustinu pakovanja - kao primarne ima ravni klizanja $\{110\}$ ali kod nje mogu da se aktiviraju još dve $\{112\}$ i $\{123\}$ – zbog male gustine pakovanja klizanje je otežano i metali sa KZC rešetkom se **teže deformišu – viša čvrstoća!**
- GSH ima samo 3 sistema klizanja – **krti su**

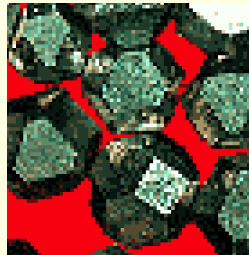
Kretanje dislokacija



Površinske greške – granice zrna

- Pod specijalnim uslovima se tokom očvršćavanja formira jedno zrno, tj u celoj zapremini su pravilno uređene kristalne rešetke – **monokristal**

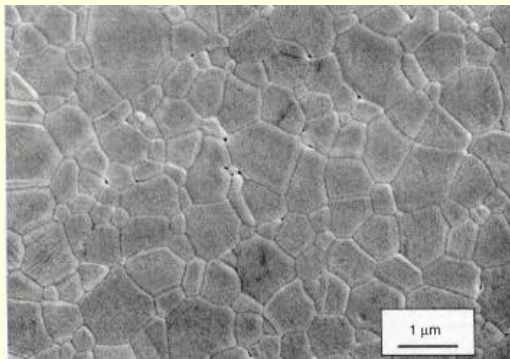
-dijamantski monokristali
za skidanje površine abrazijom



-lopatice gasnih
turbina



- U svim drugim uslovima materijal kristališe sa velikim brojem zrna, tj velikim brojem oblasti monokristala – **polikristal**



polikristalni materijali



Poređenje monokristala i polikristala

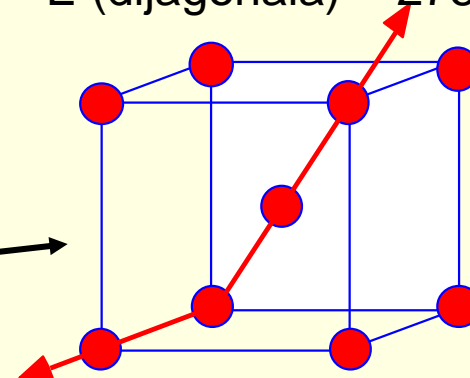
- Monokristal

- Osobine zavise od pravca
anizotropan.

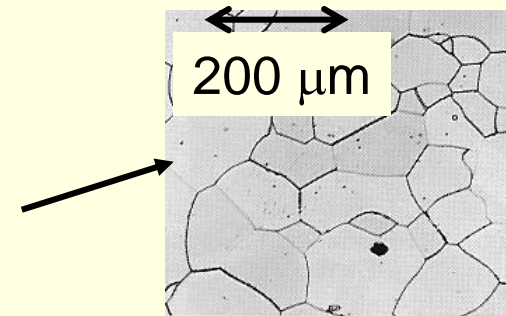
- Npr: modul elastičnosti kod KZC
rešetke Fe



E (dijagonala) = 273 GPa



E (ivica) = 125 GPa

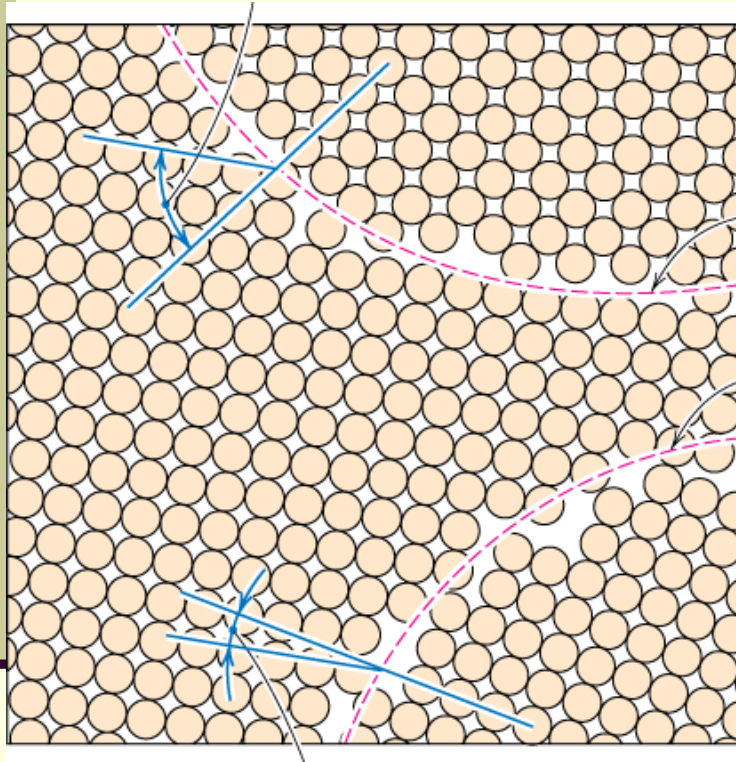


- Polikristali

- Mogu da budu kvaziizotropni

- Ako su zrna nasumično orijentisana –
kvaziizotropna struktura

Površinske greške - granice zrna i subzrna



granice
zrna –
granice pod
velikim
uglom

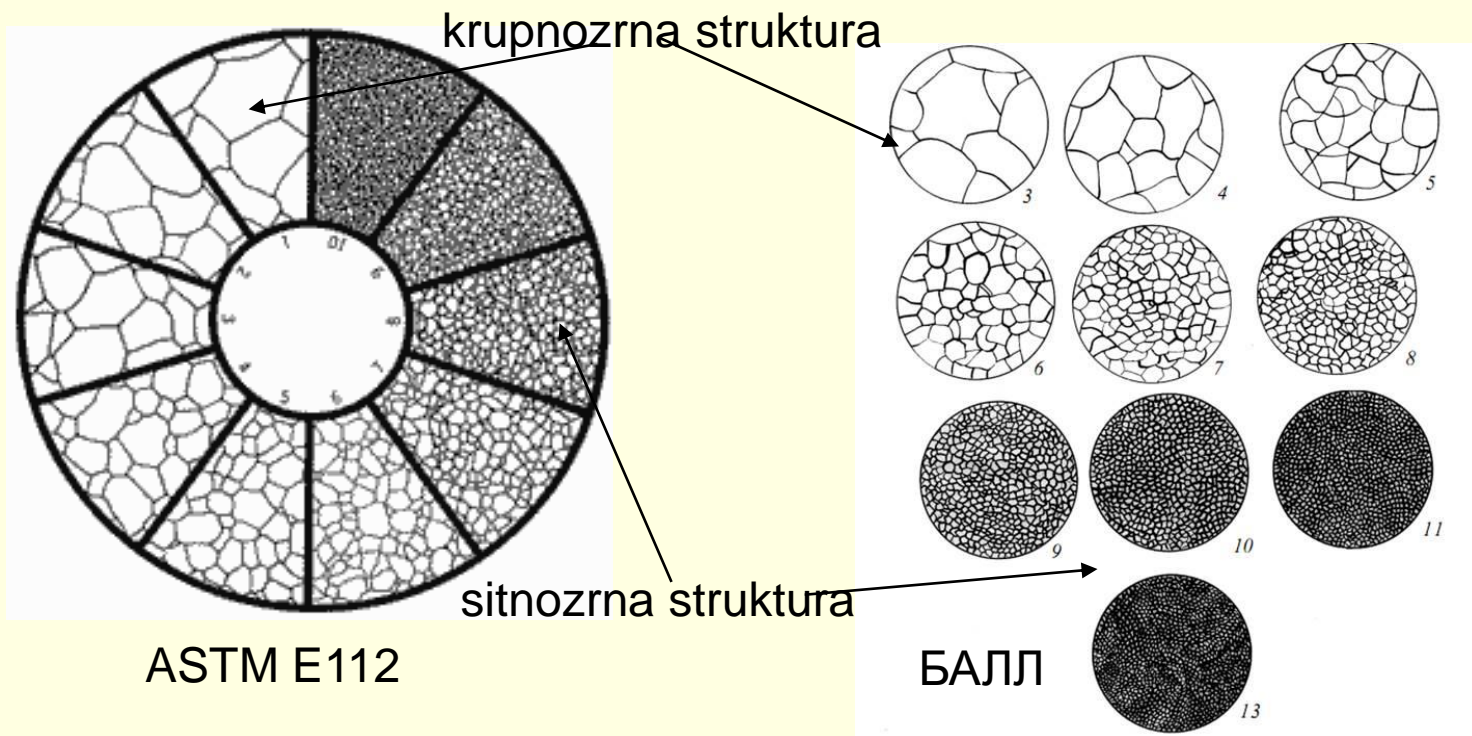
granice
subzrna –
granice pod
malim
uglom



Svako "zrno" je približno jedan monokristal.

Tipična veličina zrna može da bude 1 nm - 2 cm!
(tj., od nekoliko do milion atomskih slojeva).

Površinske greške – veličina zrna

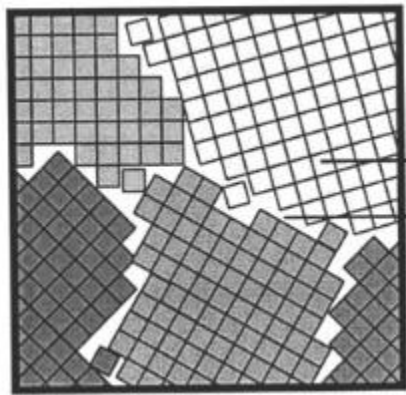


Veličina zrna se određuje posmatranjem pod metalografskim mikroskopom pod uvećanjem od 100x

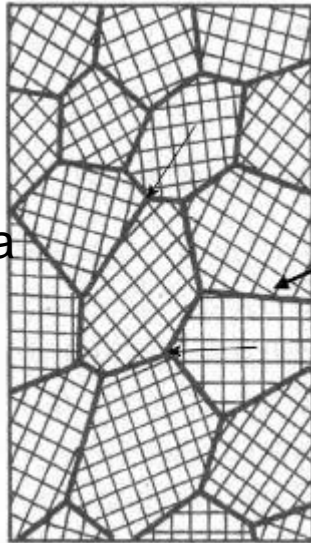
Što je sitnije zrno više su sve mehaničke osobine – viša je čvrstoća, žilavost, duktilnost, itd.

Granice zrna i granice faza –još jedna bitna površinska greška

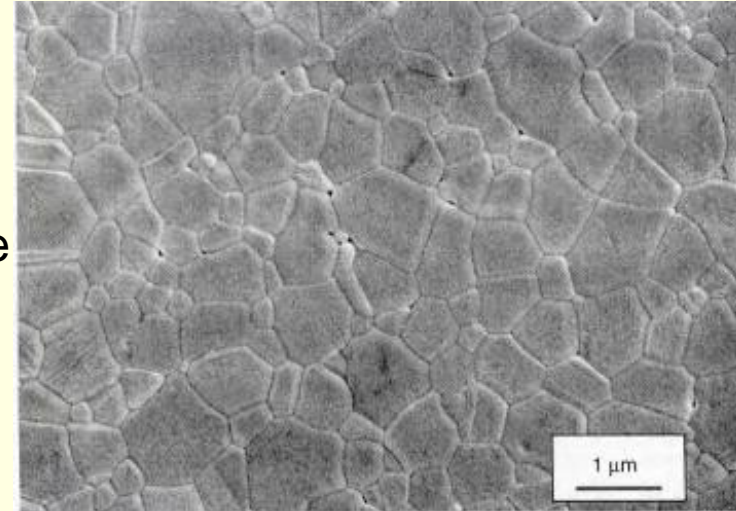
polikristalni materijali



zrna
granice zrna



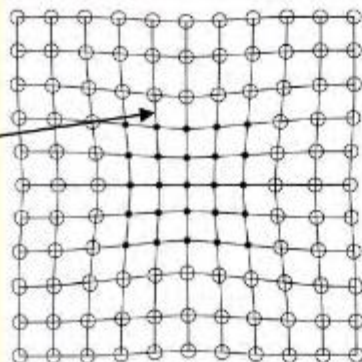
granice
zrna



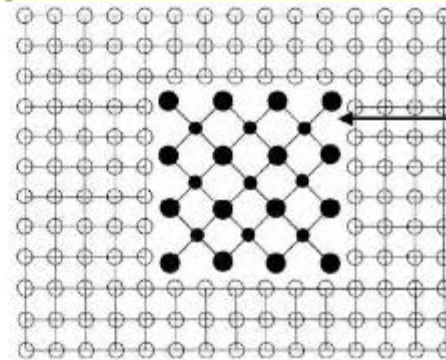
korund - Al_2O_3

Višefazni materijali - zapreminski defekti

Koherentne
granice



(a)

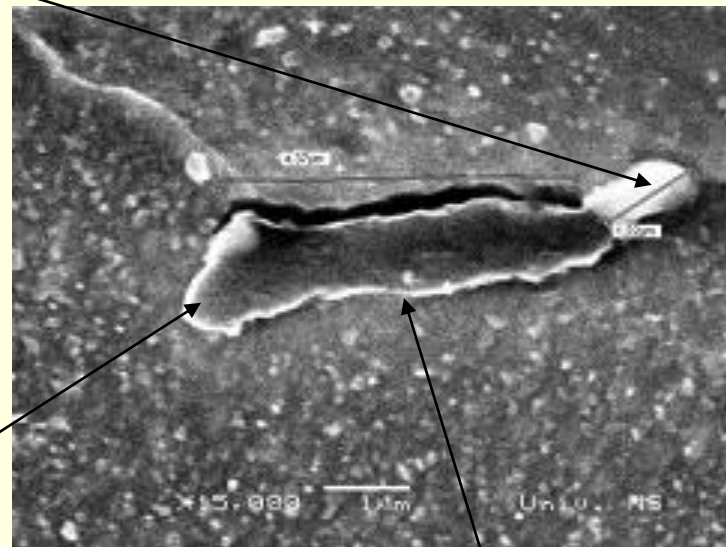
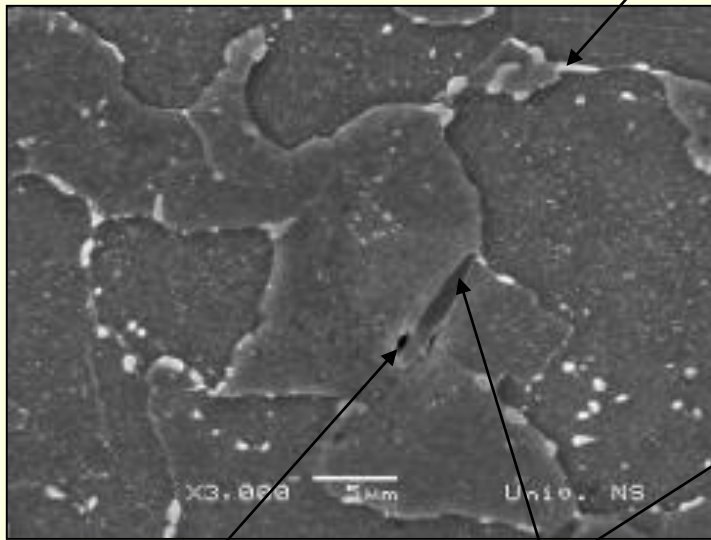


Nekoherentne
granice

(b)

Zapreminske greške

sekundarne faze



šupljine uključci

prslina

Šupljine, uključci i prslina nepovoljno utiču na mehaničke osobine

Sekundarne faze kod legura

povoljno utiču na mehaničke osobine

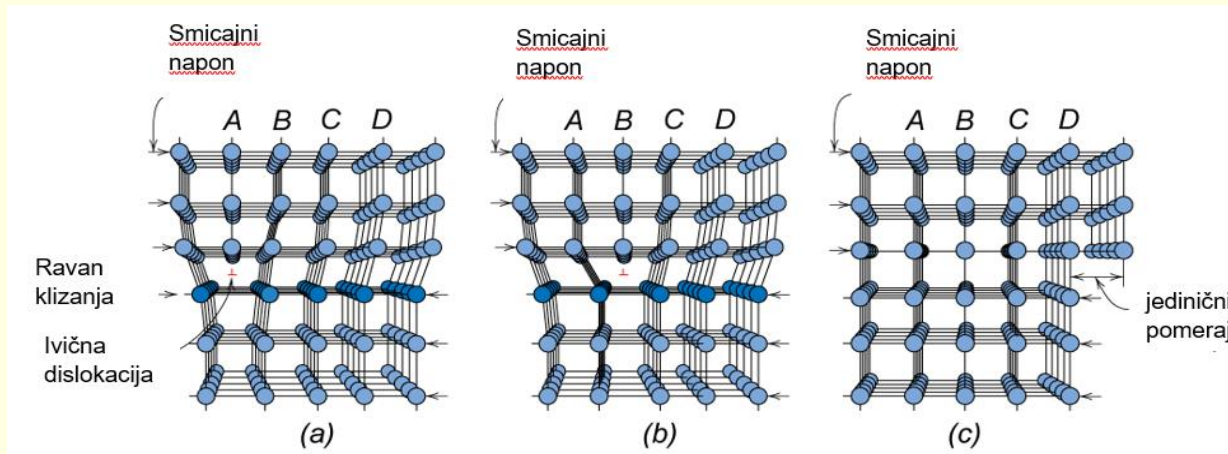
Mašinski materijali 3

Mehanizmi ojačavanja

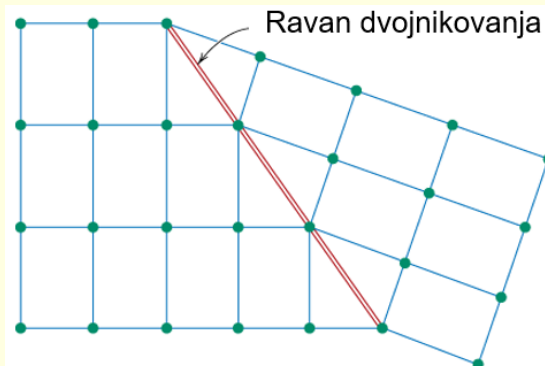
Značaj dislokacija na ojačavanje

Dva osnovna **mehanizma plastične deformacije i ujedno kretanja dislokacija** su:

Klizanje ivičnih dislokacija (već radili) – VAŽNIJI MEHANIZAM



Dvojnikovanje – deo kristala formira sliku u ogledalu

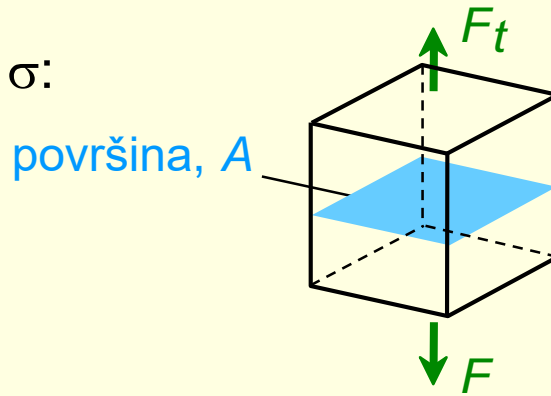


Dislokacije i mehanizmi ojačavanja

Kretanje dislokacija usled delovanja napona

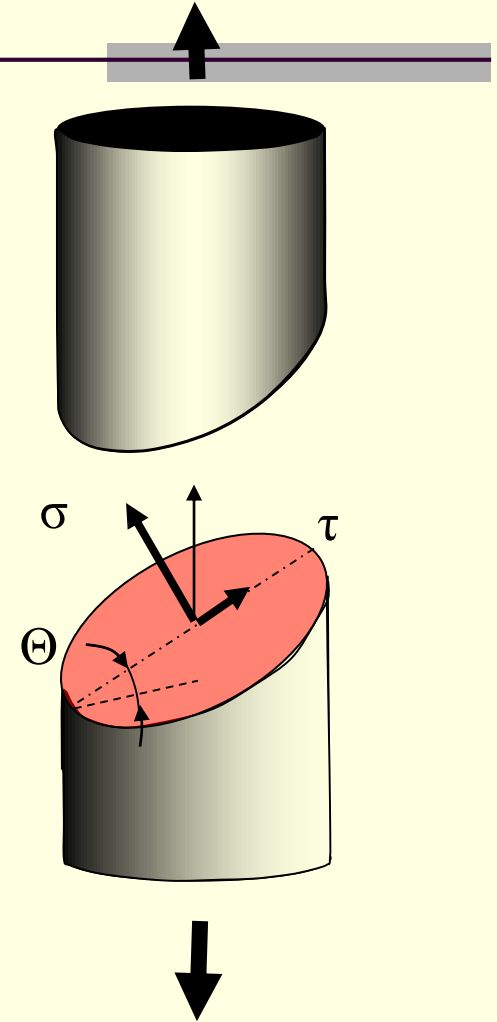
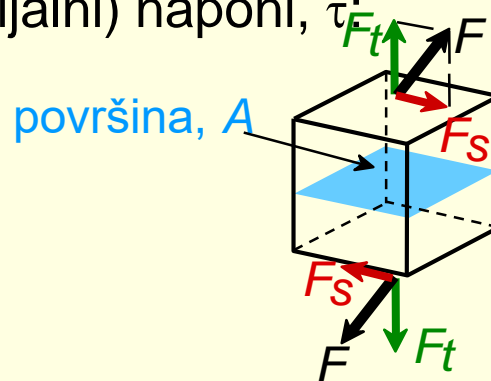
- **Zatezni** naponi, σ :

$$\sigma = \frac{F_t}{A_0}$$



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

$$\tau = \frac{F_s}{A_0}$$



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

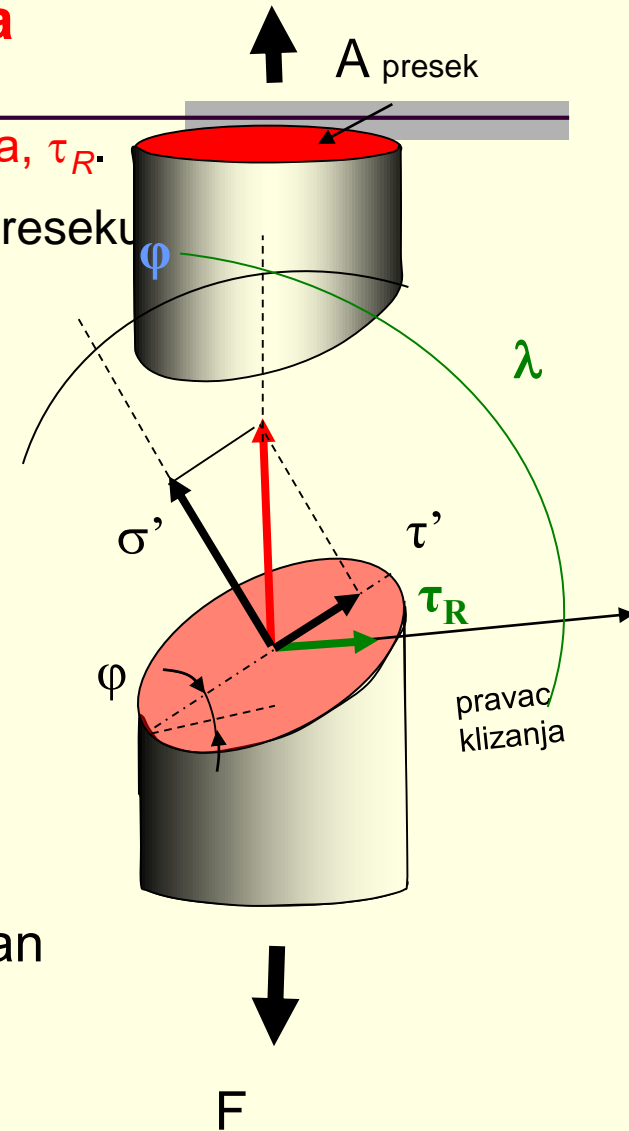
$$\sigma = \frac{F}{A}$$

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

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

φ – ugao između sile zatezanja i normale na ravan klizanja

λ – ugao između sile zatezanja i pravca klizanja



Dislokacije i mehanizmi ojačavanja

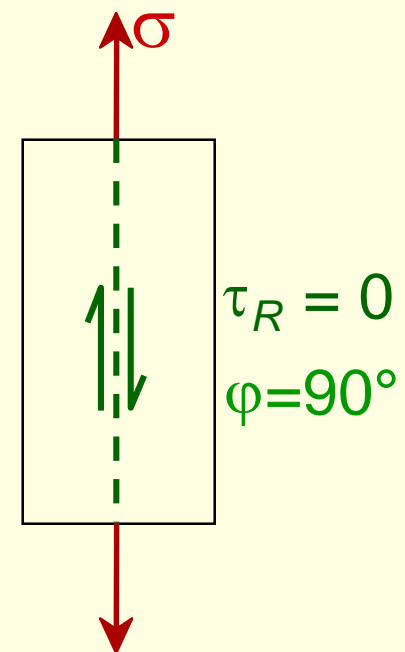
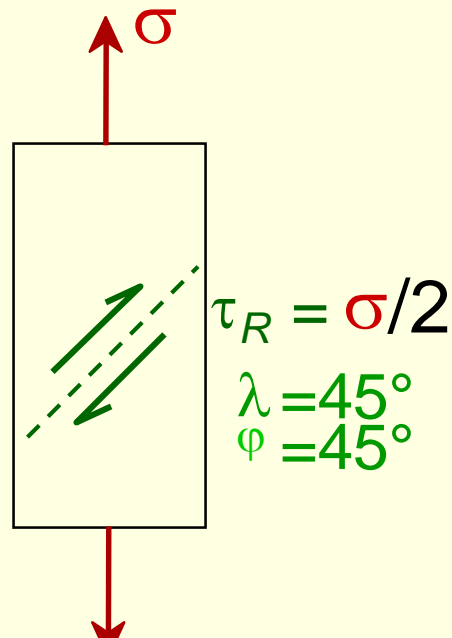
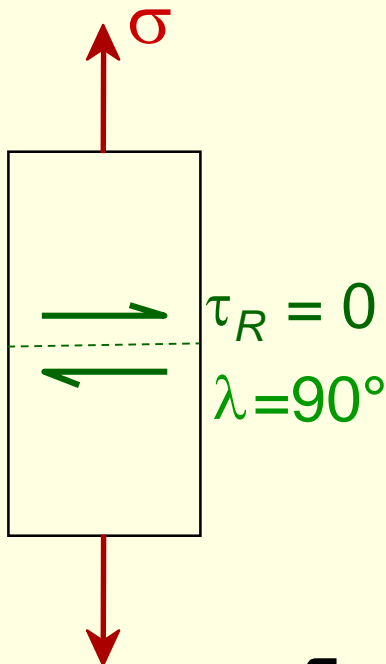
Kritična veličina smicajnog napona za kretanje dislokacija

Uslov za kretanje dislokacija:

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

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

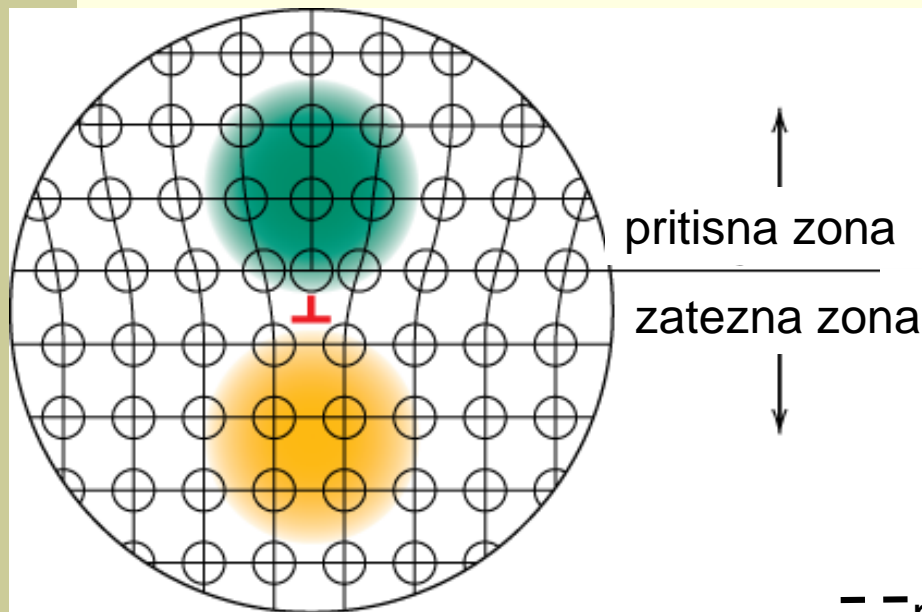
↑
obično oko 10^{-4} GPa - 10^{-2} GPa



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

Orijentacija kristala olakšava ili otežava kretanje dislokacija

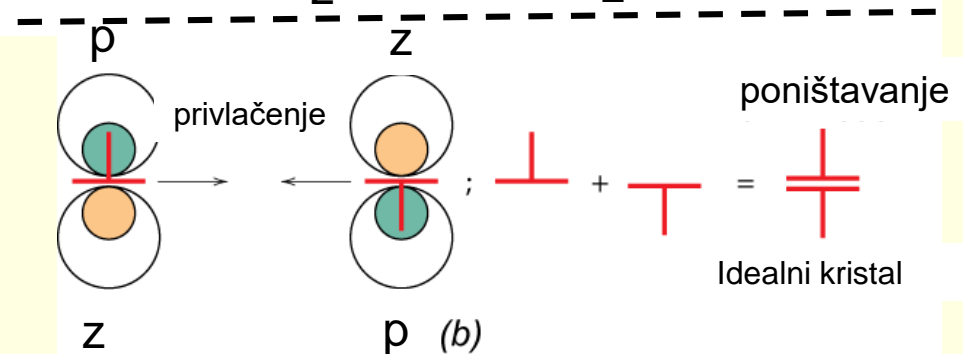
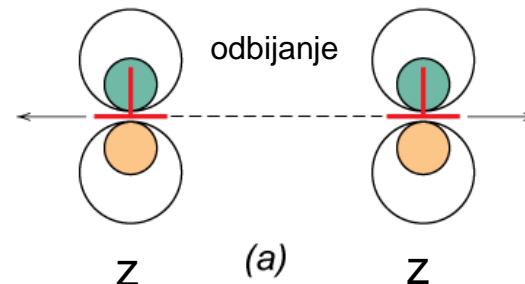
Koncentracija napona na dislokacijama



Otežavanjem kretanja dislokacija, imajući na umu i reakcije, podižemo čvrstoću

Reakcije dislokacija

Dislokacije istog znaka se odbijaju

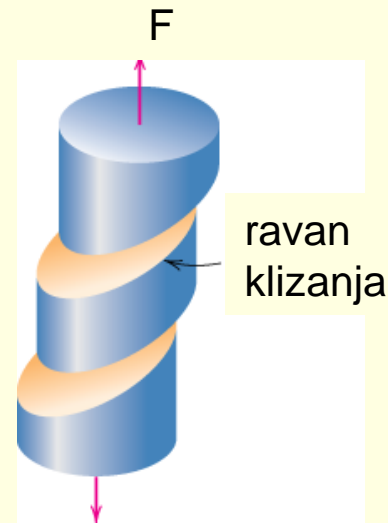
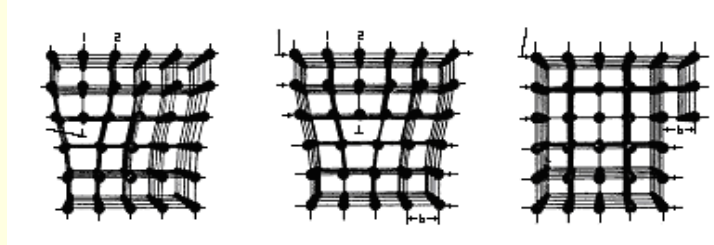


Dislokacije suprotnog znaka se privlače

Dislokacije i mehanizmi ojačavanja

Klizanje dislokacija

Klizanje kod monokristala



Klizanje kod polikristala

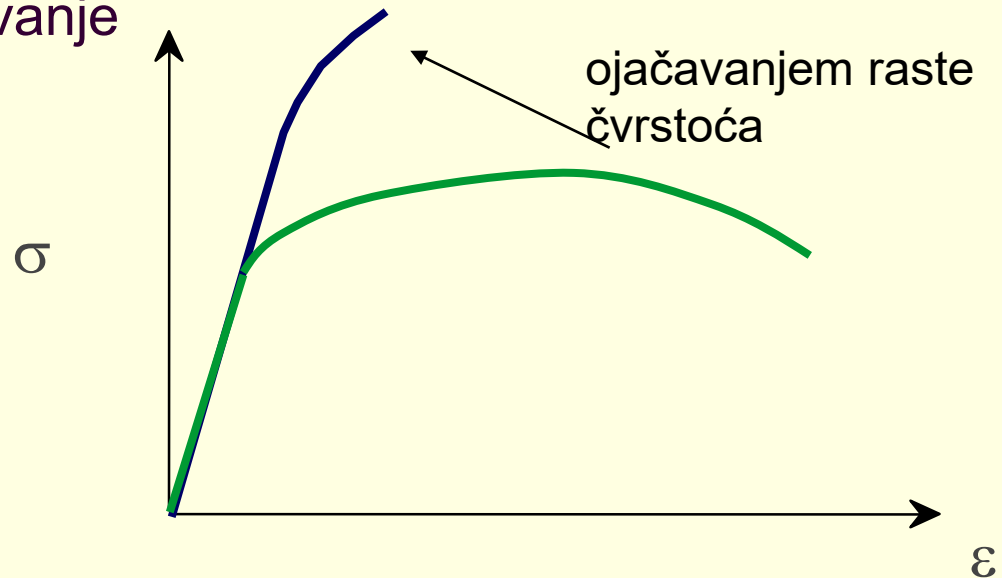


- Viša čvrstoća – granice zrna koče dislokacije
- Pravac i ravan klizanja dislokacija se menjaju od zrna do zrna – dodatana energija.
- τ_R se menja od kristala do kristala tako da se prvo deformišu zrna koja imaju najviši smicajni napon, dok se ostala deformišu kasnije

Dislokacije i mehanizmi ojačavanja

4 Strategije za ojačavanje metala:

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

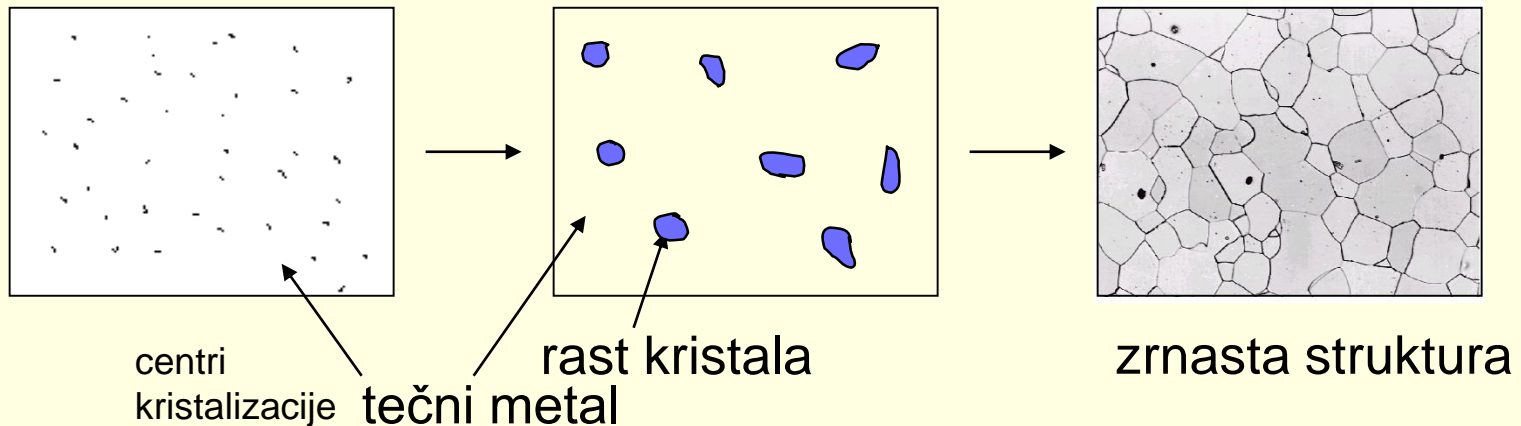


Sve strategije otežavaju kretanje dislokacija!

Dislokacije i mehanizmi ojačavanja

1. Smanjenje veličine zrna

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



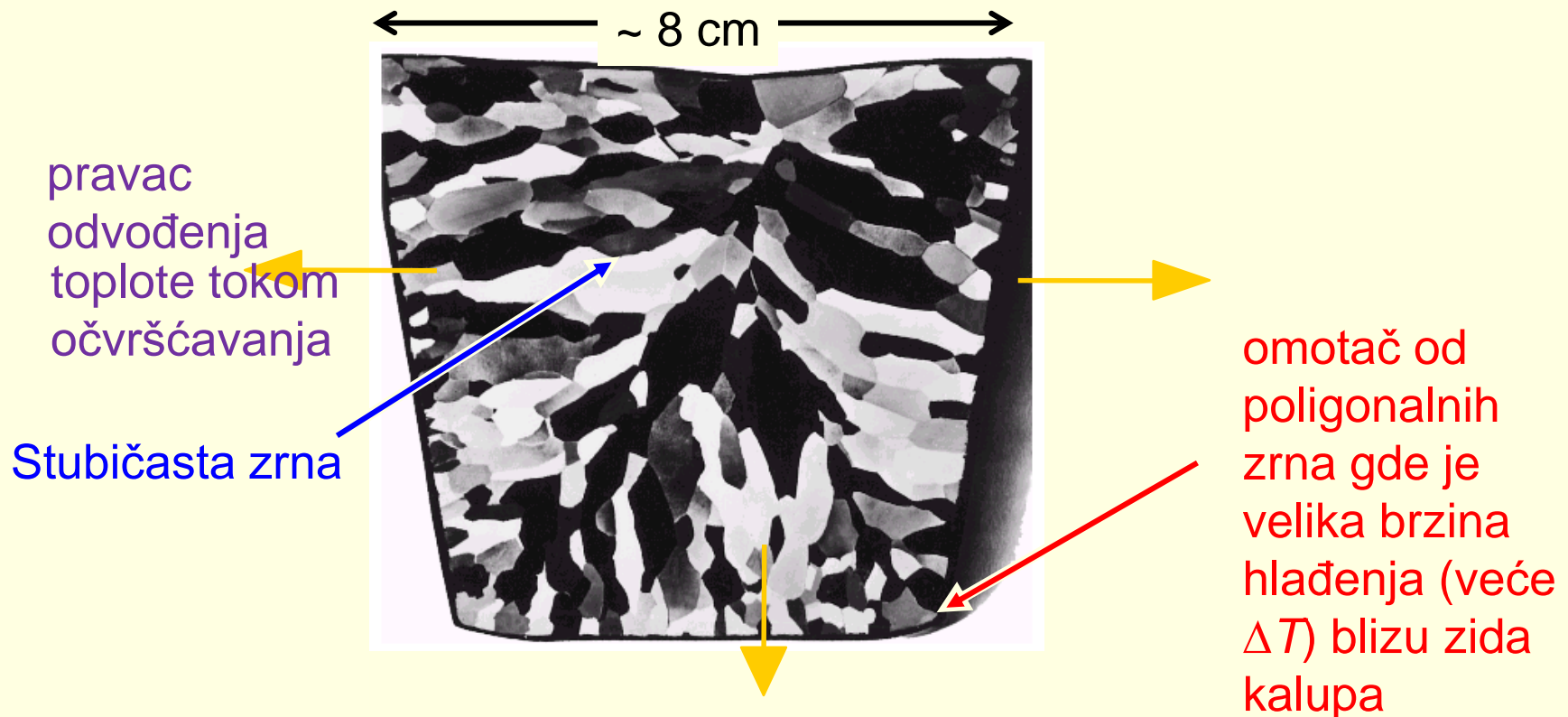
- **Kristali rastu sve dok se ne sudare sa susednim**

Dislokacije i mehanizmi ojačavanja

Očvršćavanje

1. Smanjenje veličine zrna

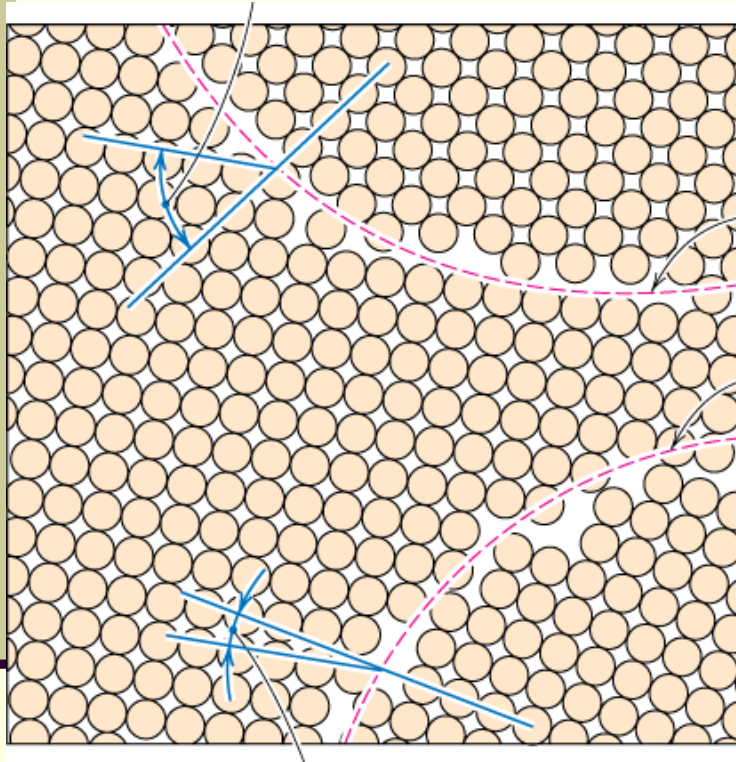
- Zrna mogu biti
- poligonalna (približno iste veličine u svim pravcima)
 - stubičasta (kolumnarna ili izdužena zrna)



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



Smanjenjem veličine zrna i subzrna raste dužina granica – prepreke za kretanje dislokacija

Dislokacije i mehanizmi ojačavanja

1. Smanjenje veličine zrna

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

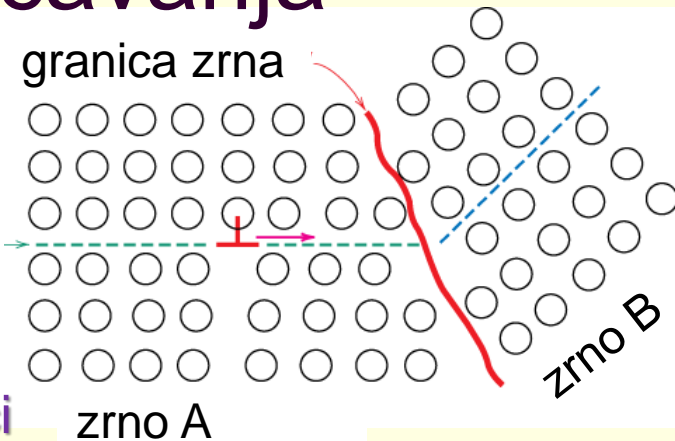
- Hall-Petch jednačina:

$$R_{eH} = \sigma_0 + k_y d^{-1/2}$$

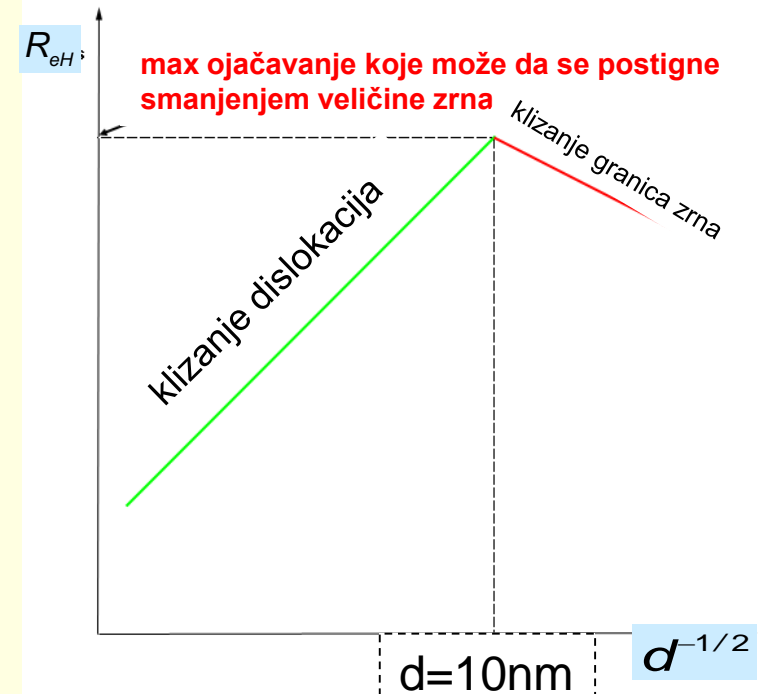
k_y konstanta za materijal
 d - veličina zrna

σ_0 - napon za pokretanje dislokacija

ravan klizanja



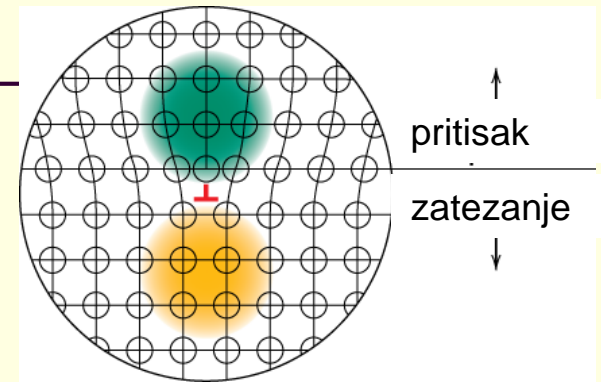
Granično ojačavanje



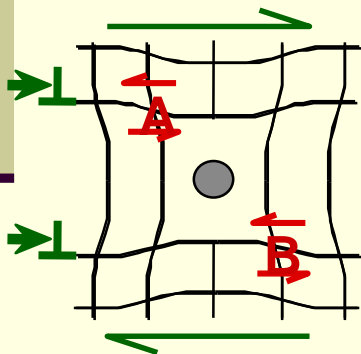
Dislokacije i mehanizmi ojačavanja

2. Ojačavanje čvrstim rastvorom

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

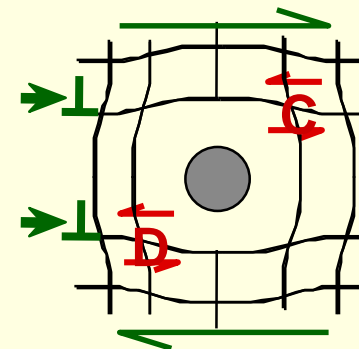


supstitucijski atom manjeg prečnika



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

supstitucijski atom većeg prečnika

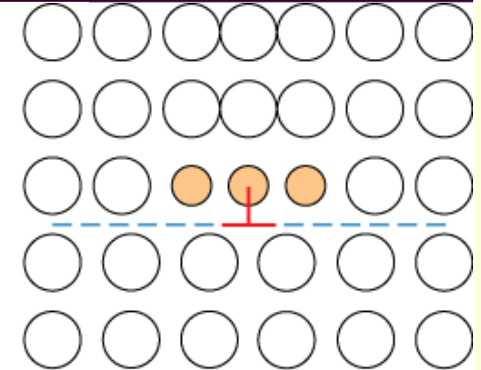
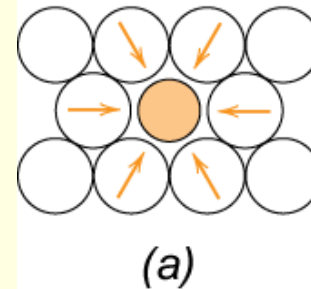


Supstitucijski atomi generišu lokalne napone na mestima **C** i **D** koji se suprotstavljaju kretanju dislokacija u desno

Dislokacije i mehanizmi ojačavanja

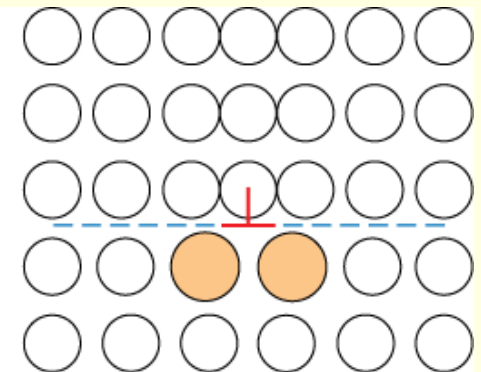
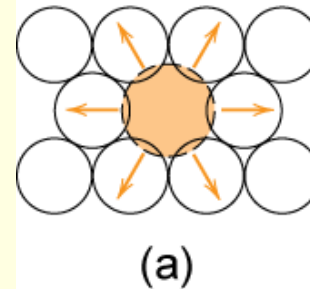
2. Ojačavanje čvrstim rastvorom

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



(b)

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



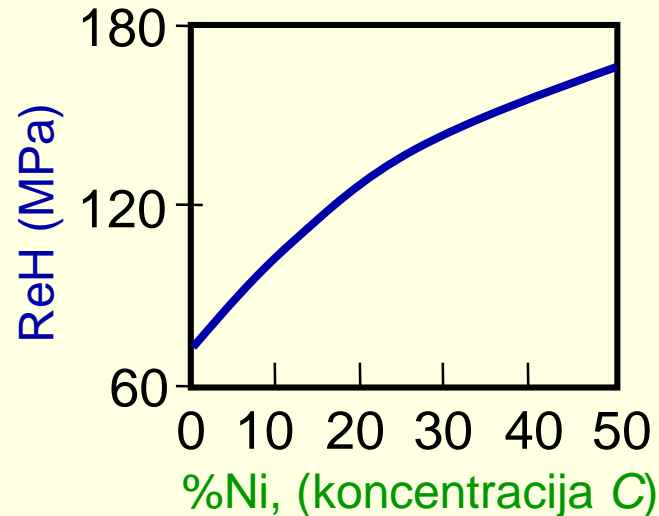
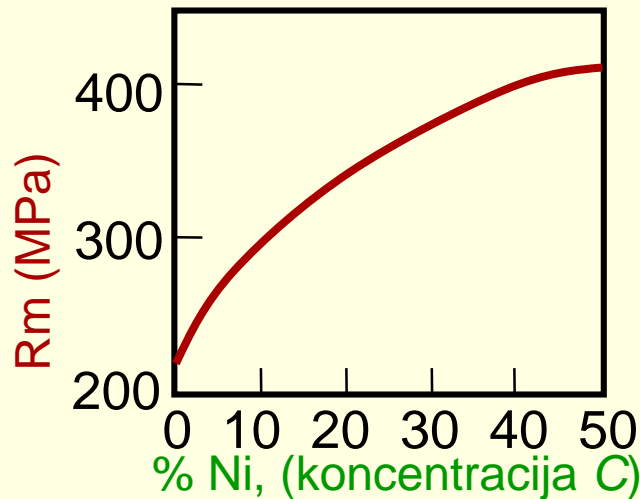
(b)

strani atomi koče dislokacije ∴ raste čvrstoća

Dislokacije i mehanizmi ojačavanja

npr: ojačavanje čvrstim rastvorom bakra Cu

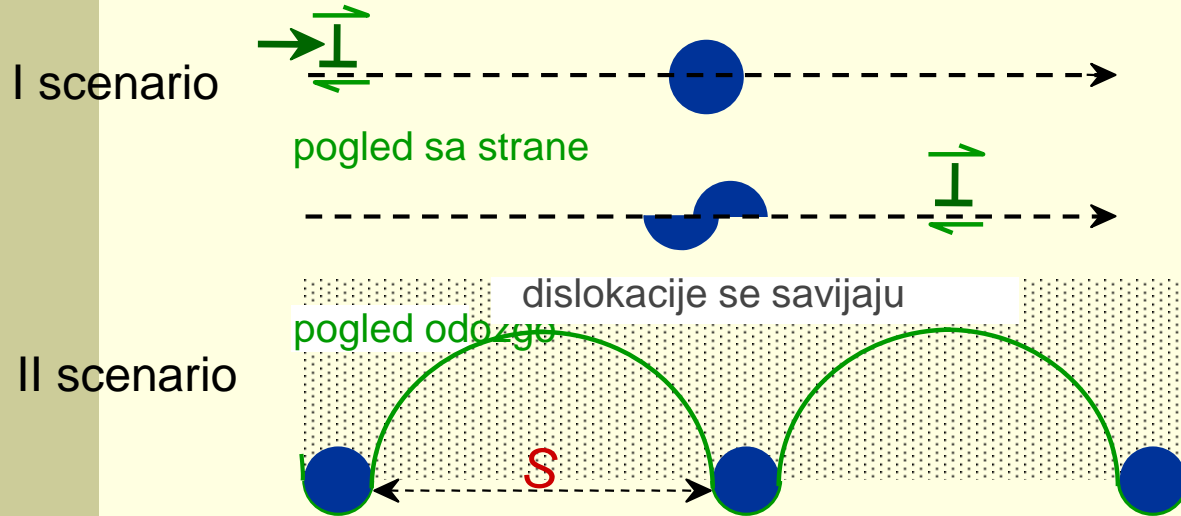
- R_m & R_{eH} rastu sa % Ni kod legure CU-Ni.



- 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



veliki smicajni napon je potreban da bi dislokacija podelila česticu

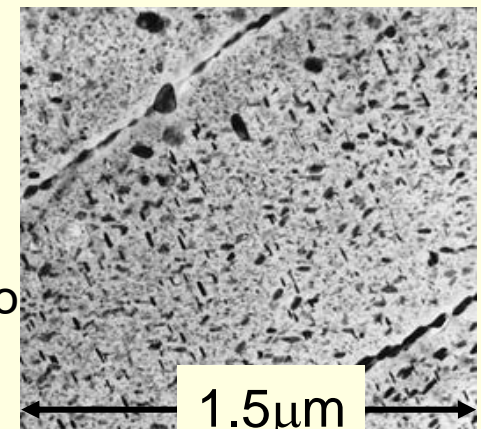
dislokacije se kreću, ali ih čestice koče u funkciji njihovog rastojanja S

- Tvrde čestice se teško dele kada naiđe na njih dislokacija – bitniji II scenario.

Zavisnost čvrstoće i rastojanja između čestica :

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

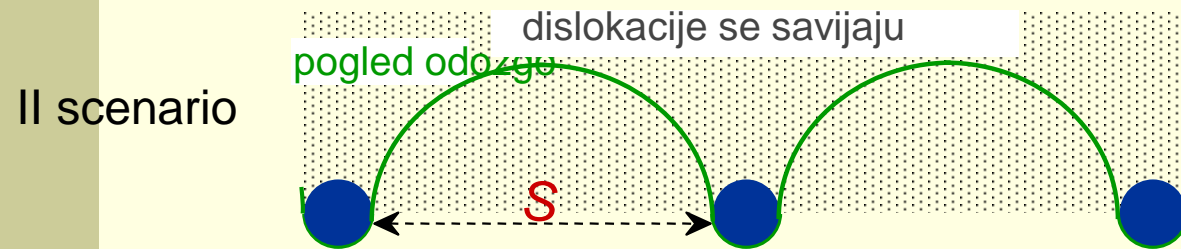
Al legura ojačana čestično



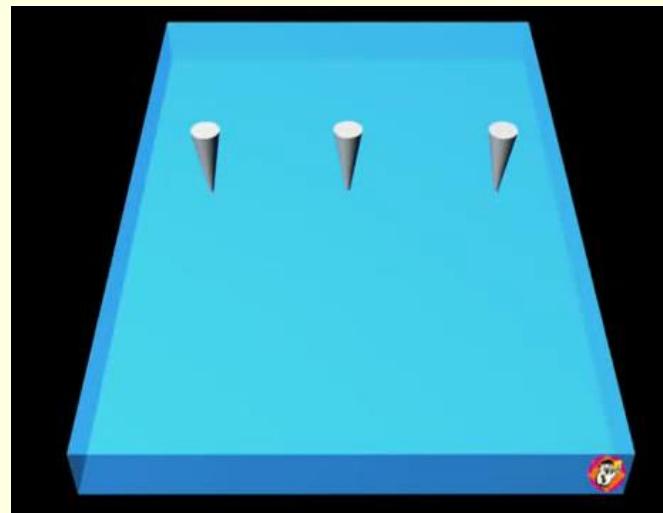
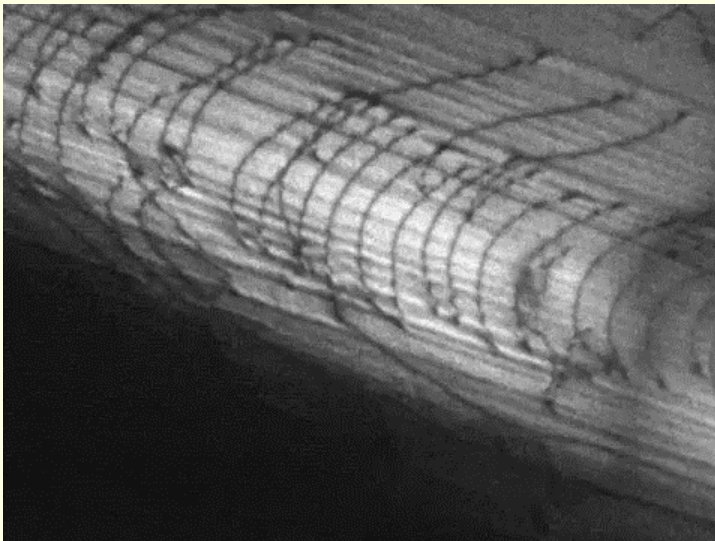
Čestično ojačavanje



veliki smicajni napon je potreban da bi dislokacija podelila česticu



dislokacije se kreću, ali ih čestice koče u funkciji njihovog rastojanja S



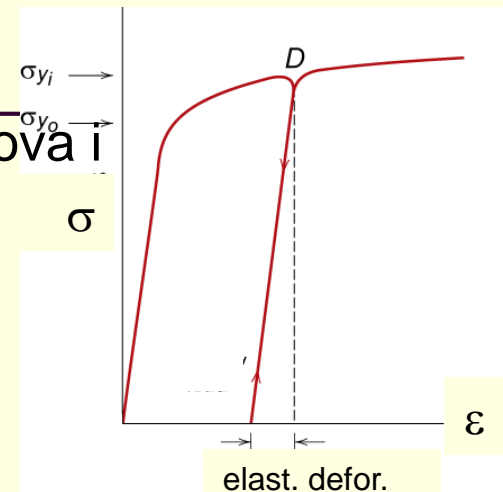
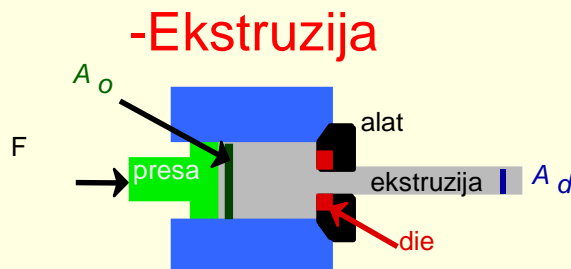
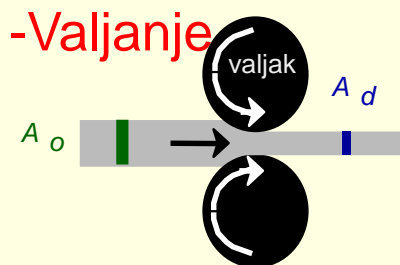
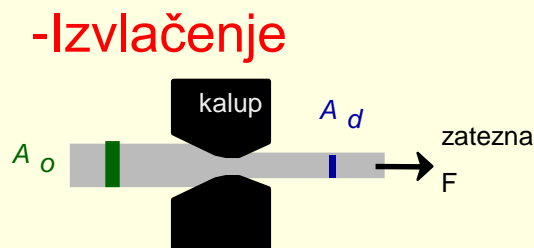
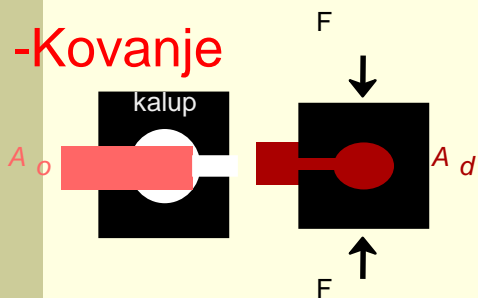
Dislokacije se savijaju oko čestica i prave petlje – tzv. Orovanove petlje

Dislokacije i mehanizmi ojačavanja

4. Deformaciono ojačavanje

Tokom oblikovanja menja se poprečni presek delova i to se postiže nekom od termomehaničkih obrada: Hladna deformacija nastaje ispod T rekristalizacije ili na sobnoj T .

Tokom oblikovanja menja se poprečni presek:



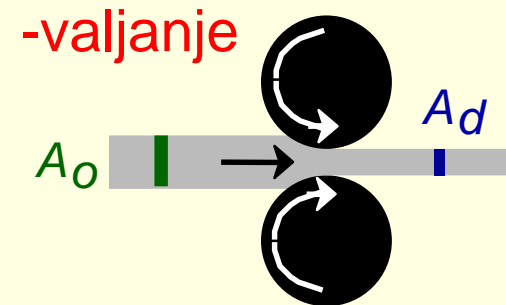
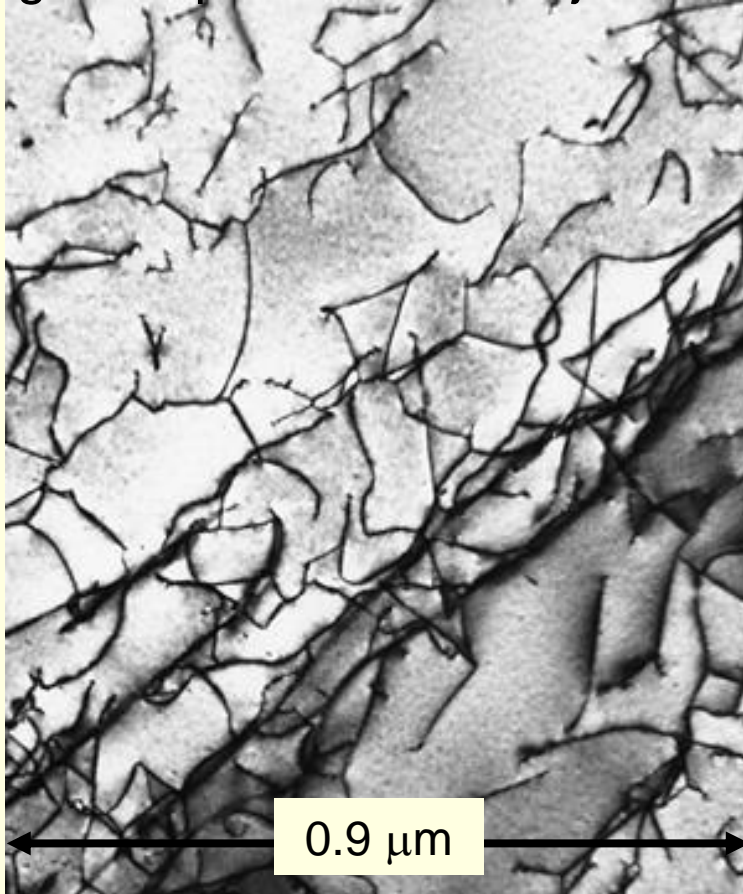
$$\% \text{defor.} = \frac{A_o - A_d}{A_o} \times 100$$

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

Dislokacije i mehanizmi ojačavanja

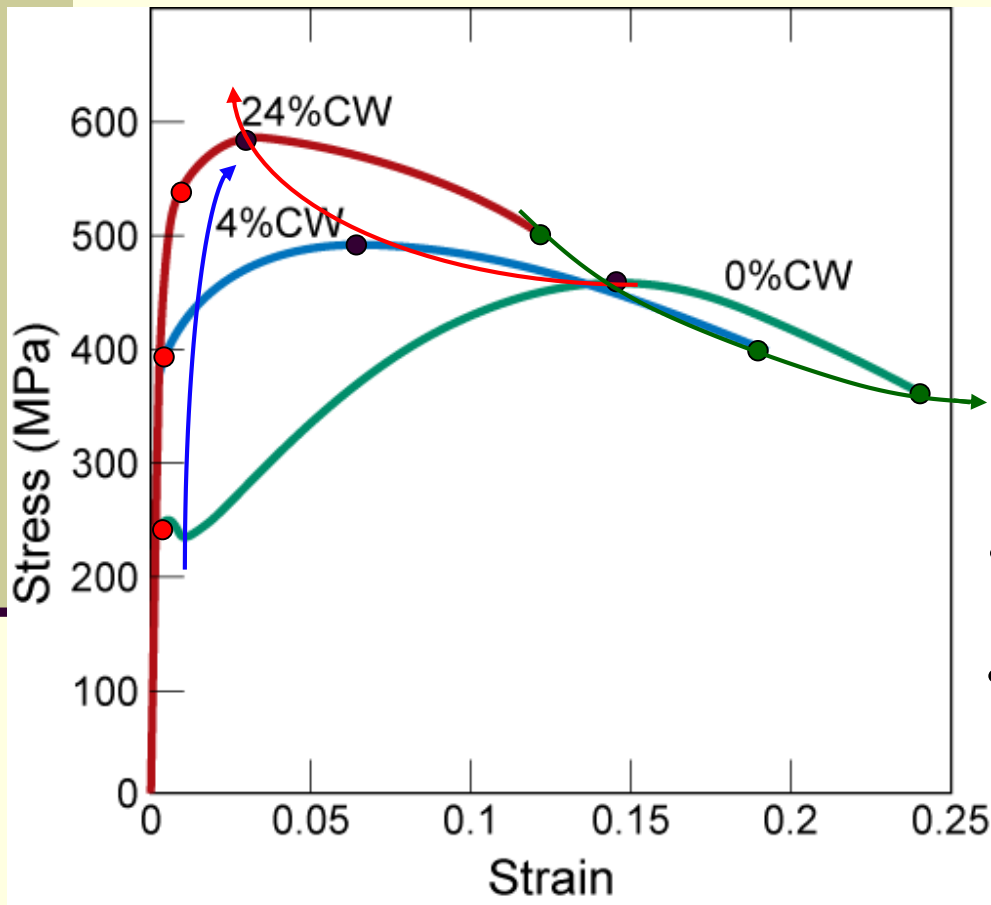
Npr: tokom hladnog valjanja – **Deformaciono ojačavanje**

- 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)

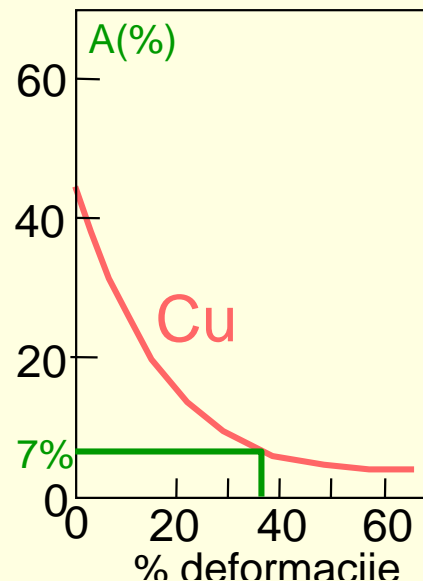
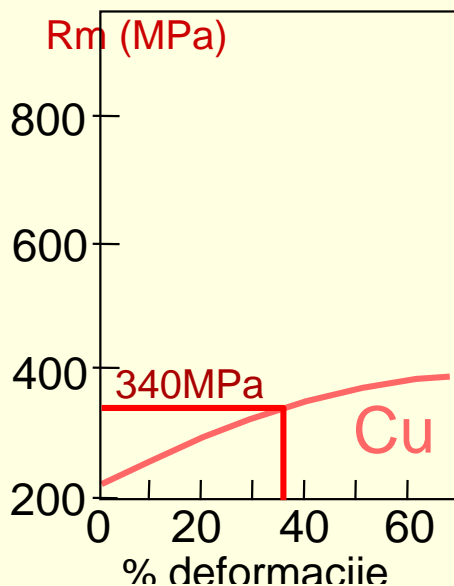
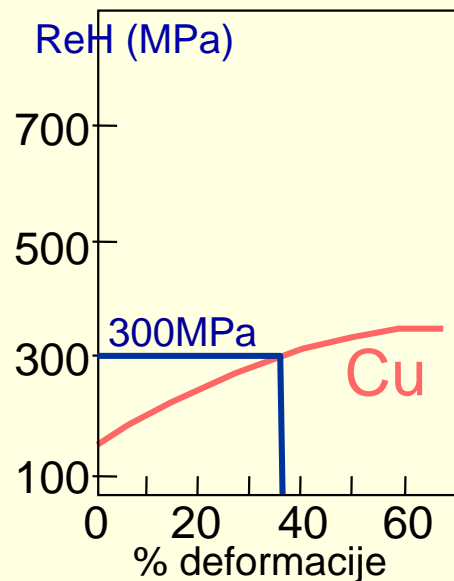
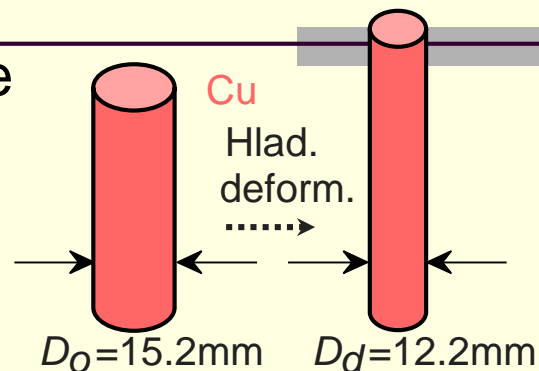
- **napon tečenja** raste.
- **zatezna čvrstoća** raste.
- **duktilnost (%A i %Z)** opada.

Dislokacije i mehanizmi ojačavanja

primer: ojačavanje Cu hladnom deformacijom

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

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



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

→ $\sim 10^3 \text{ mm}^{-2}$

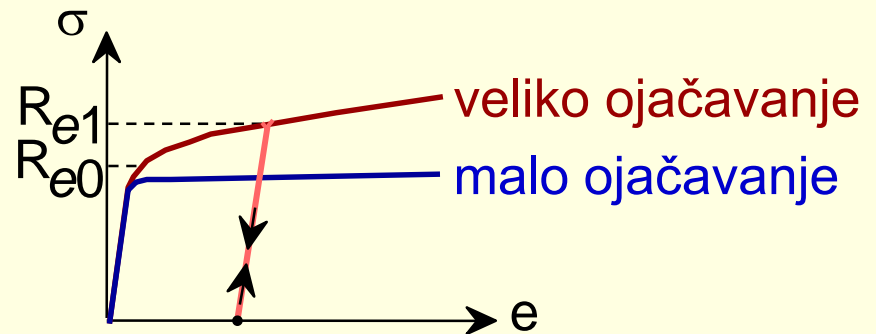
Hladna deformacija uvećava gustinu dislokacija

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

Termička obrada smanjuje gustinu dislokacija

→ $10^5\text{-}10^6 \text{ mm}^{-2}$

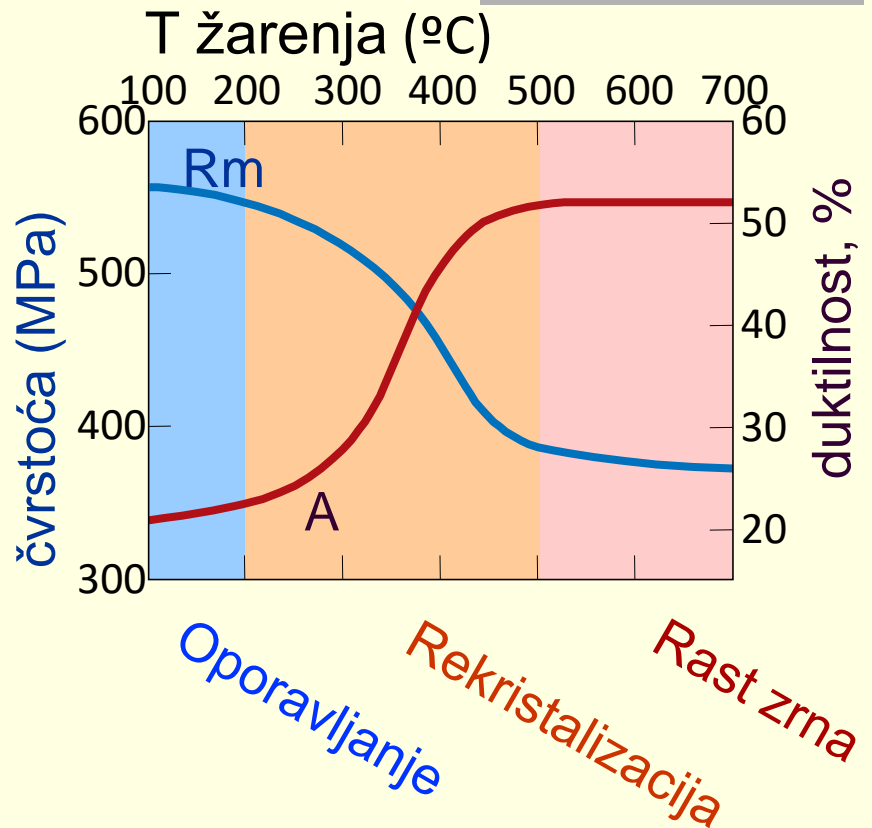
Čvrstoća raste sa %deformacije:



Rekristalizaciono žarenje

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

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

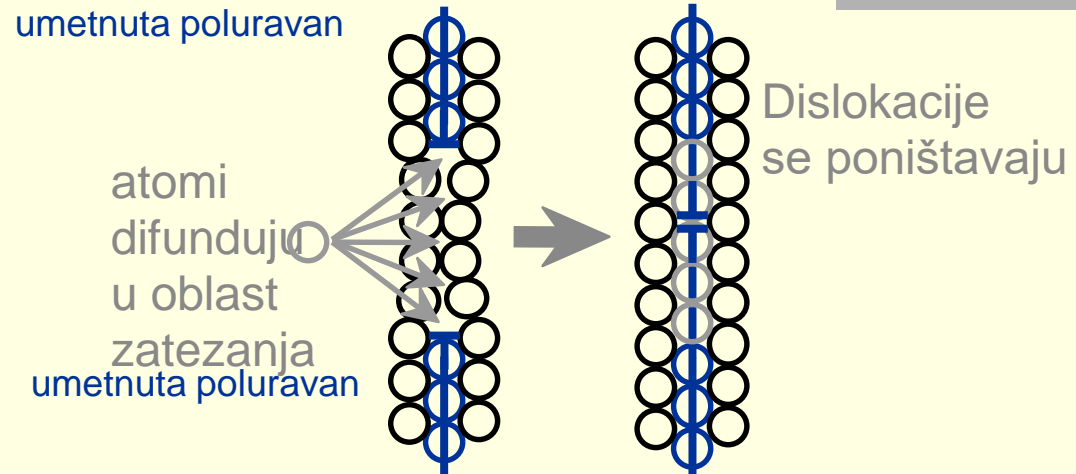


1 h TO na $T_{\text{žarenja}}$ dovodi do smanjenja R_m i ReH i povećanja $A\%$.
Efekat hladne deformacije se poništava!

Oporavljanje:

Zbog zagrevanja gustina dislokacija opada – one se poništavaju

- Scenario 1
rezultat
difuzije

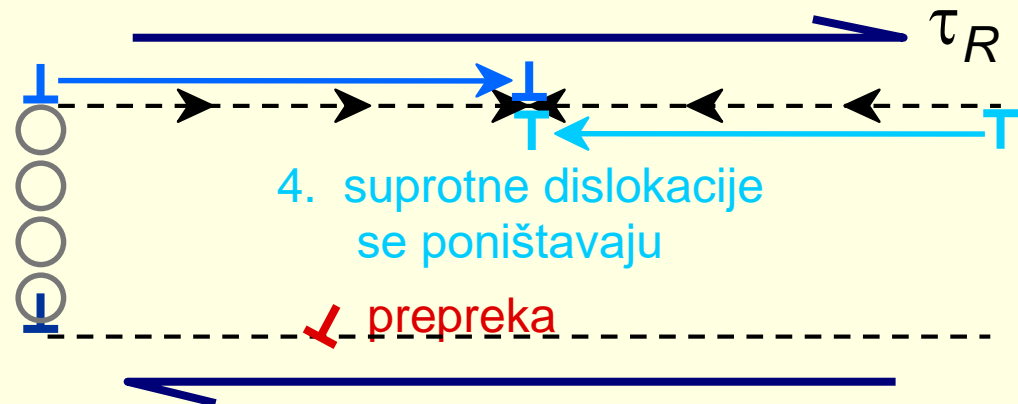


- Scenario 2

3. "Uspinjanje" disl.
na novu ravan

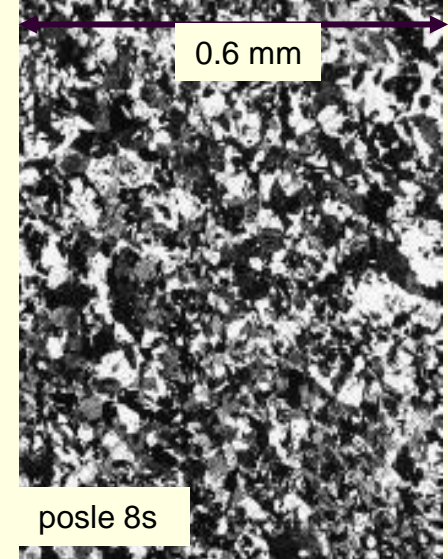
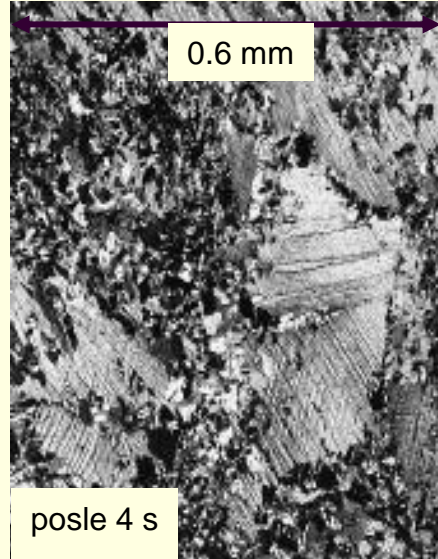
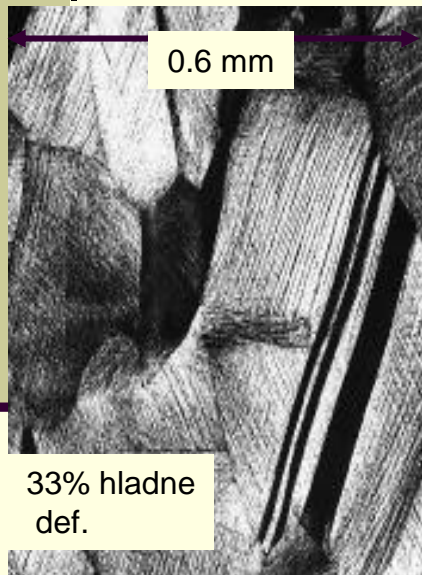
2. sivi atomi difunduju
mehanizmom praznina
i disl. se premesti

1. blokirana dislokacija



Rekristalizacija:

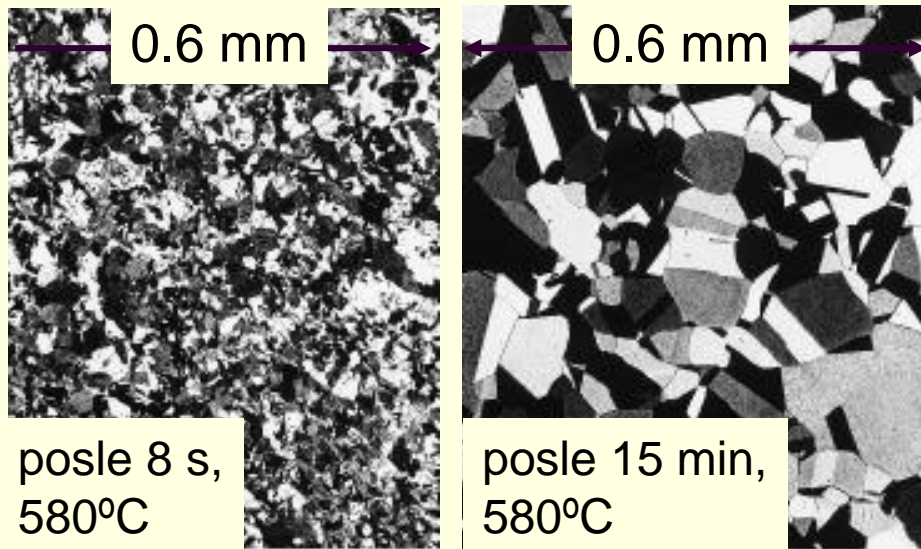
- Tokom rekristalizacije se formiraju nova zrna:
 - zrna su sitna
 - nastaju na račun hladno deformisanih zrna
 - nova zrna imaju malu gustinu dislokacija



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:

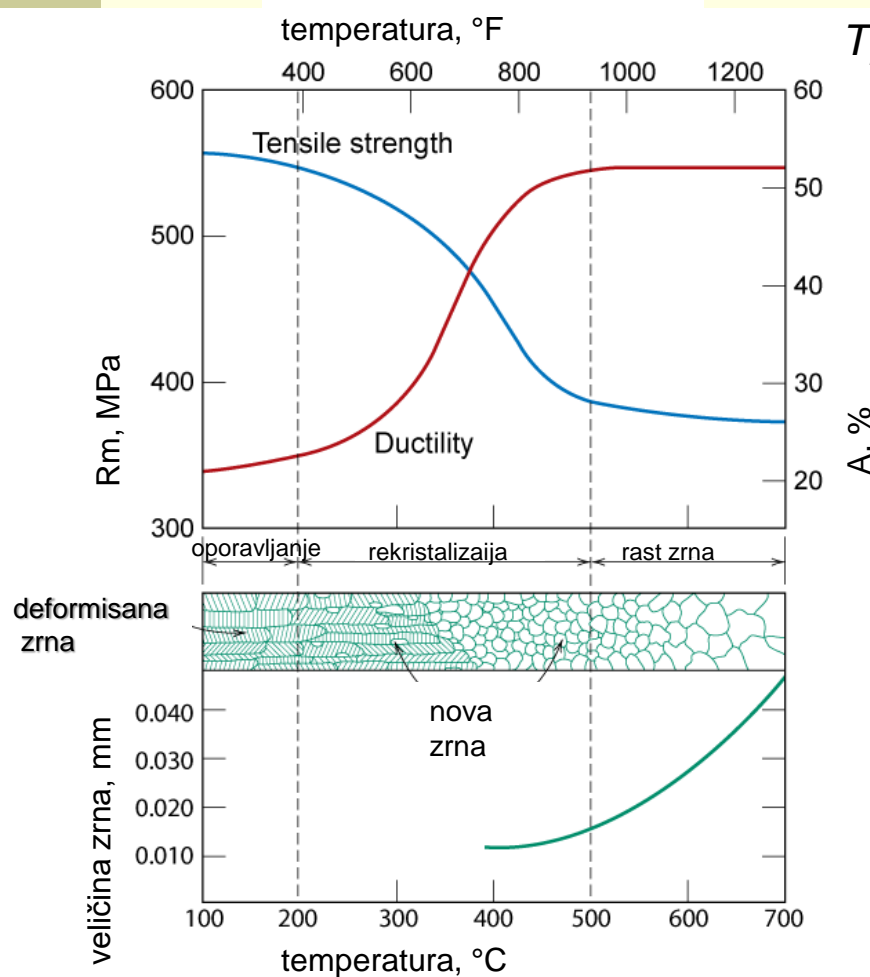
$$\text{pre\u010dnik zrna u trenutku } t \rightarrow d^n - d_o^n = Kt$$

$n \sim 2$

koef. koji zavisi od T i materijala.

proteklo vreme

Rekristalizacija



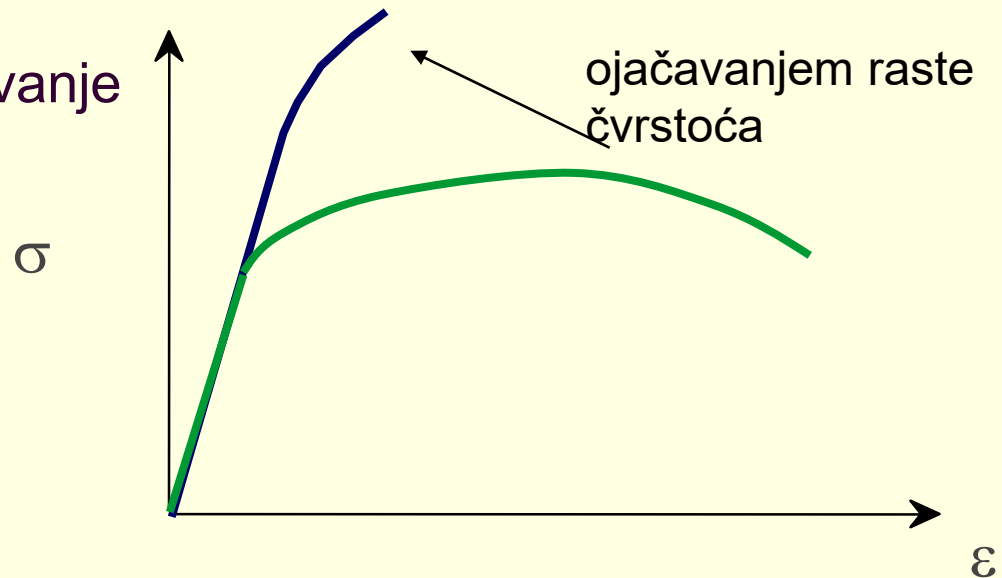
T_R = temperatura rekristalizacije (tada je najveća brzina promena osobina)

- 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

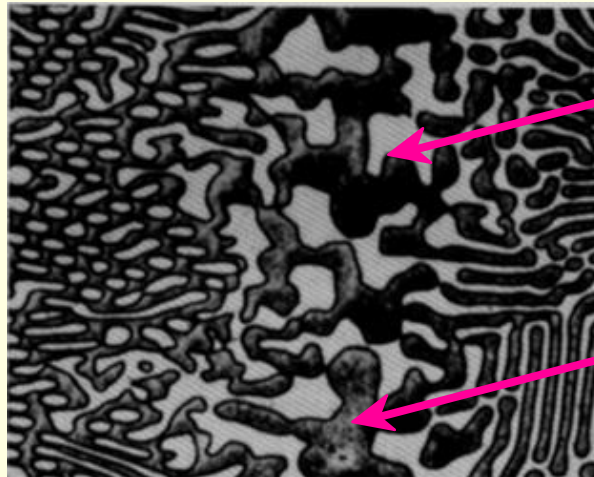


Fazni dijagrami – dijagrami stanja

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

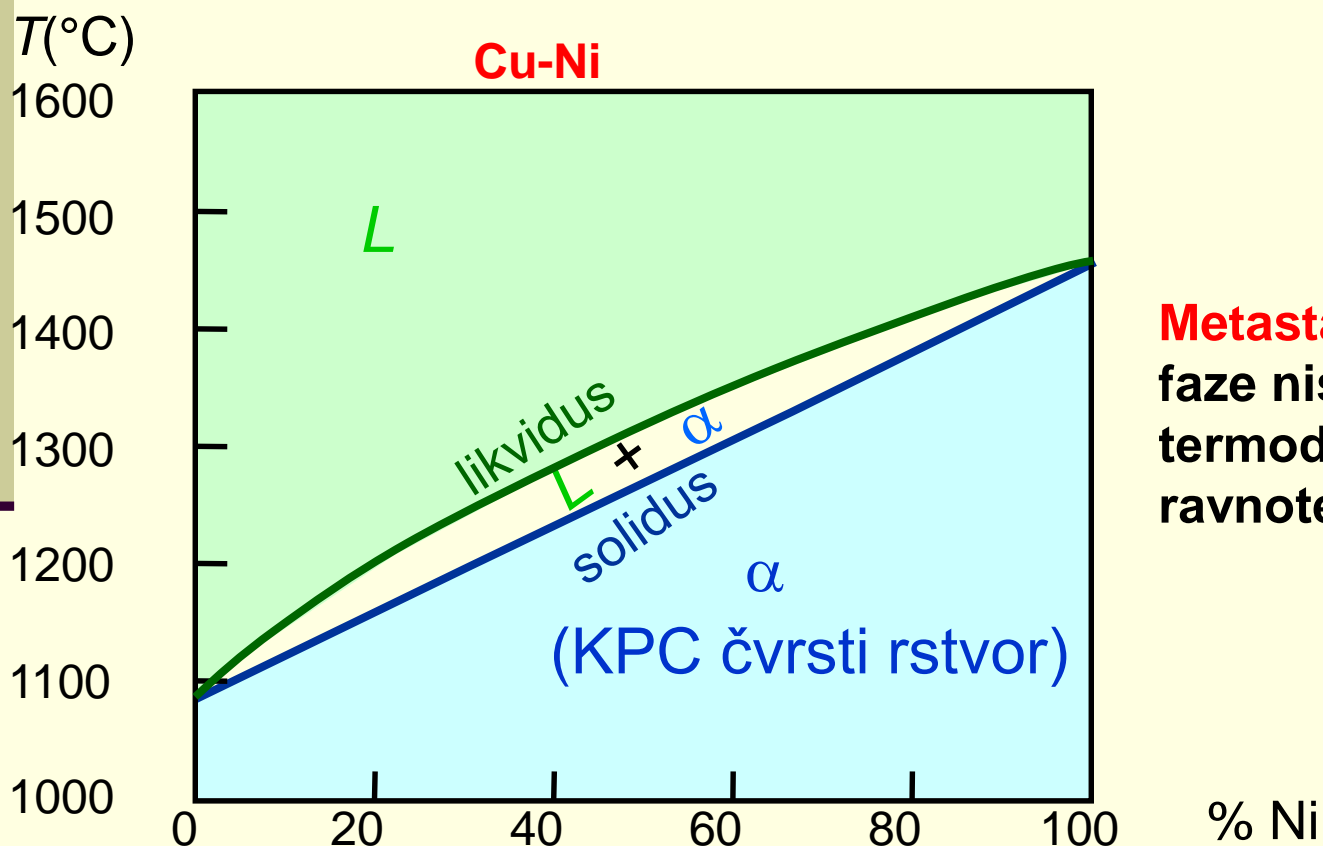
Čvrsti rastvori: Intersticijski i supstitucijski

Mehaničke smeše

Hemijska jedinjenja

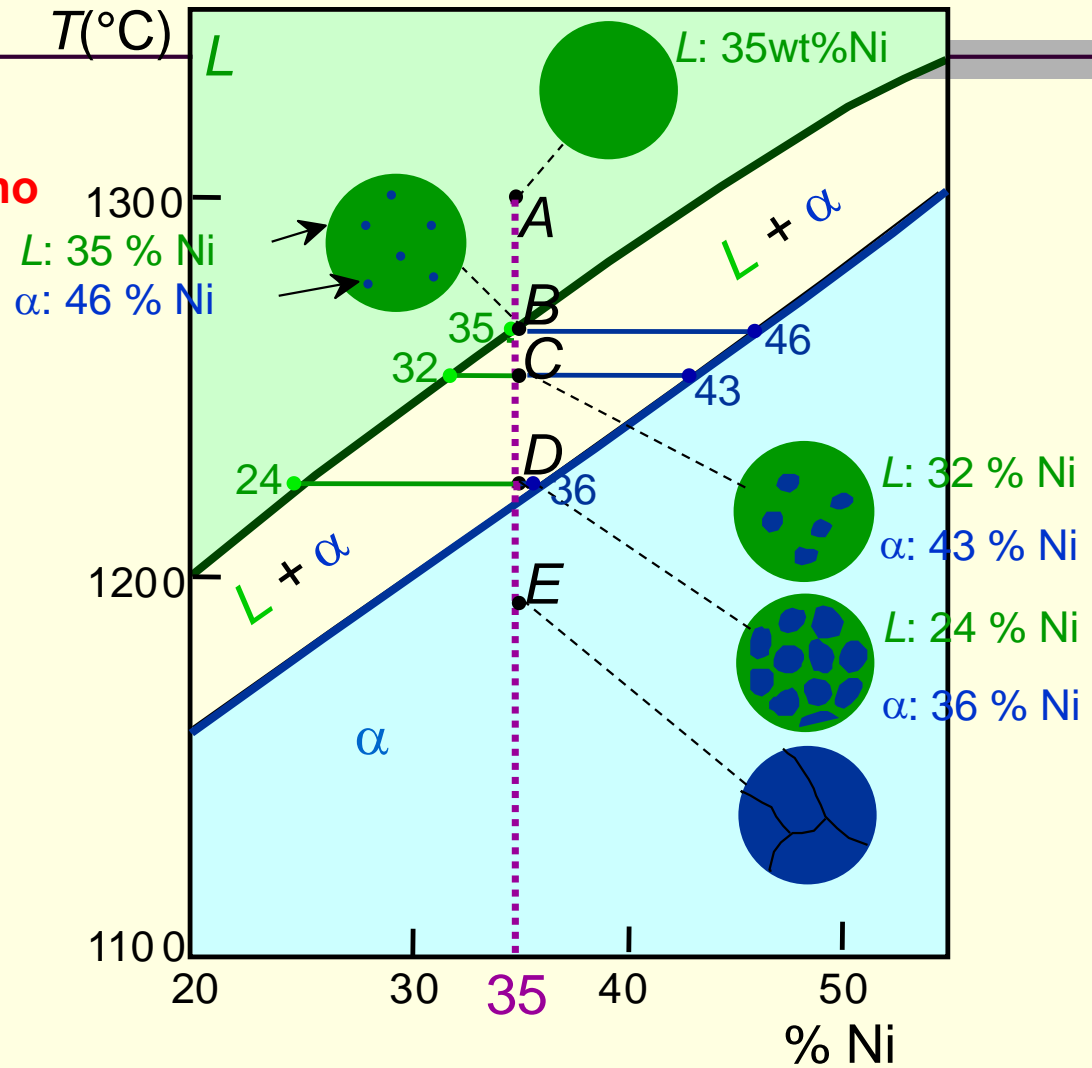
Dijagrami stanja

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



Metastabilni dijagrami
faze nisu u
termodinamičkoj
ravnoteži

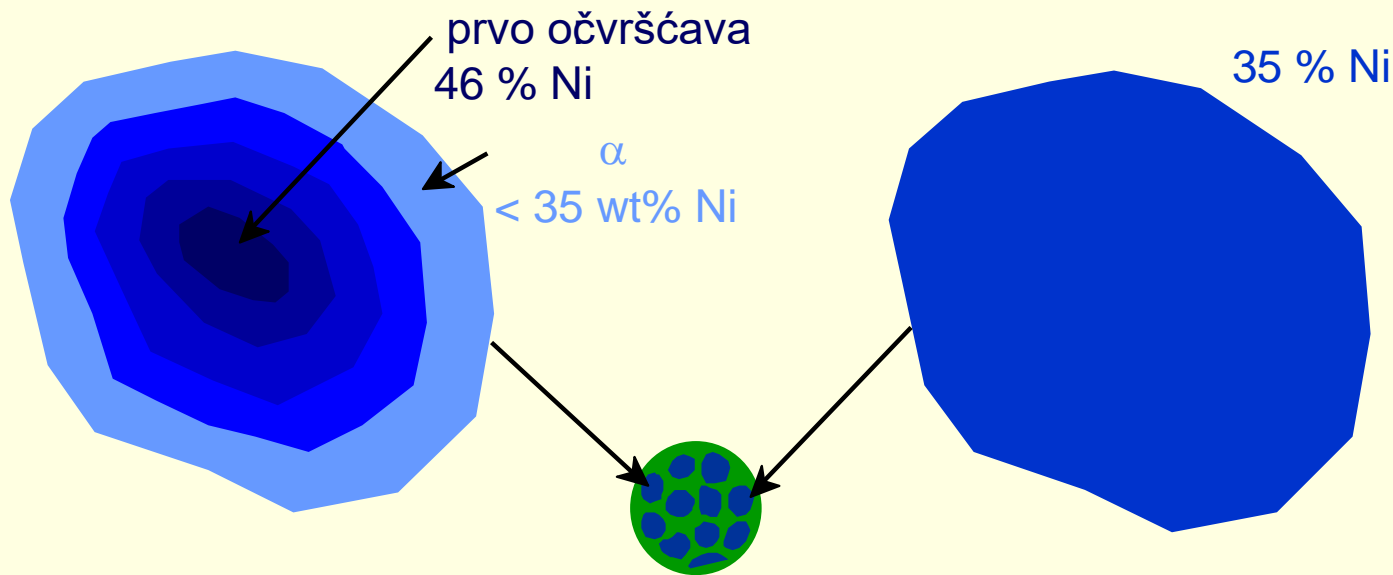
ravnotežno hlađenje Cu-Ni
legure
Kristalizacija teče ujednačeno



Metastabilno i ravnotežno hlađenje - razlike

- Brzo hlađenje:
segregacija

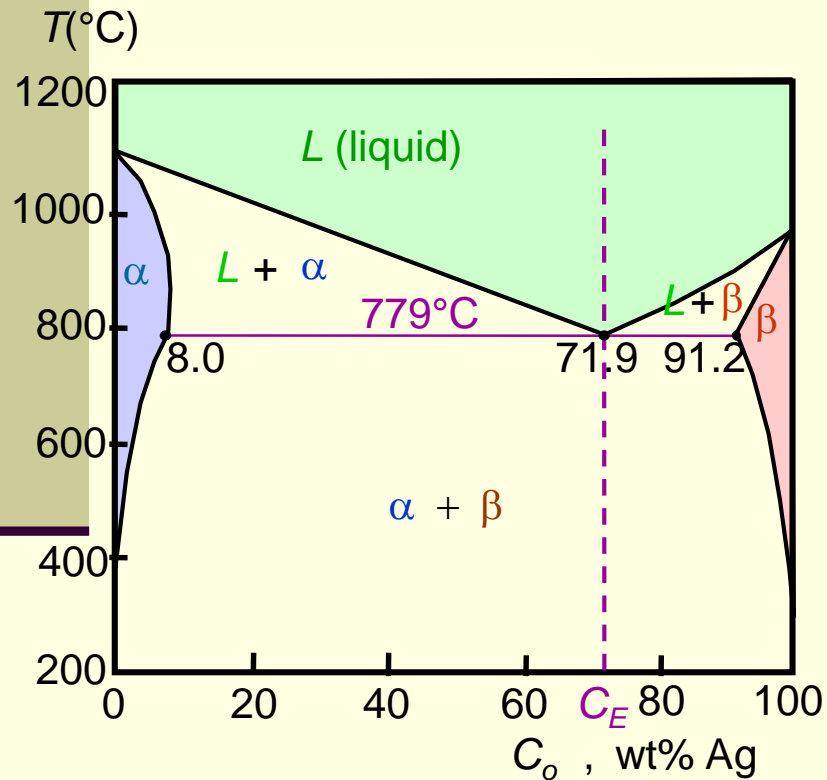
- sporo hlađenje:
homogena struktura



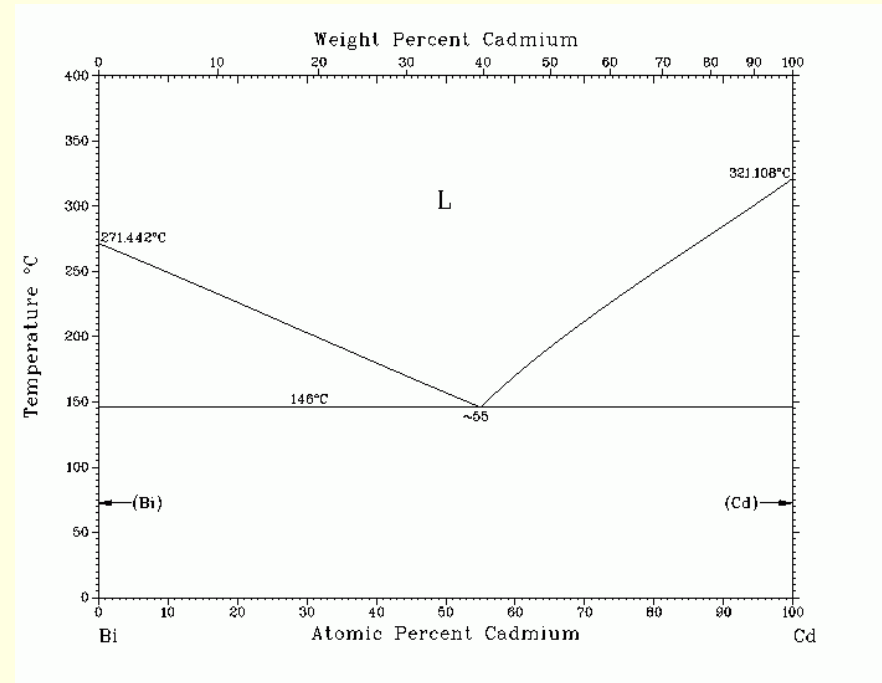
Dijagrami stanja

potpune nerastvorljivosti i delimične rastvorljivosti u čvrstom stanju

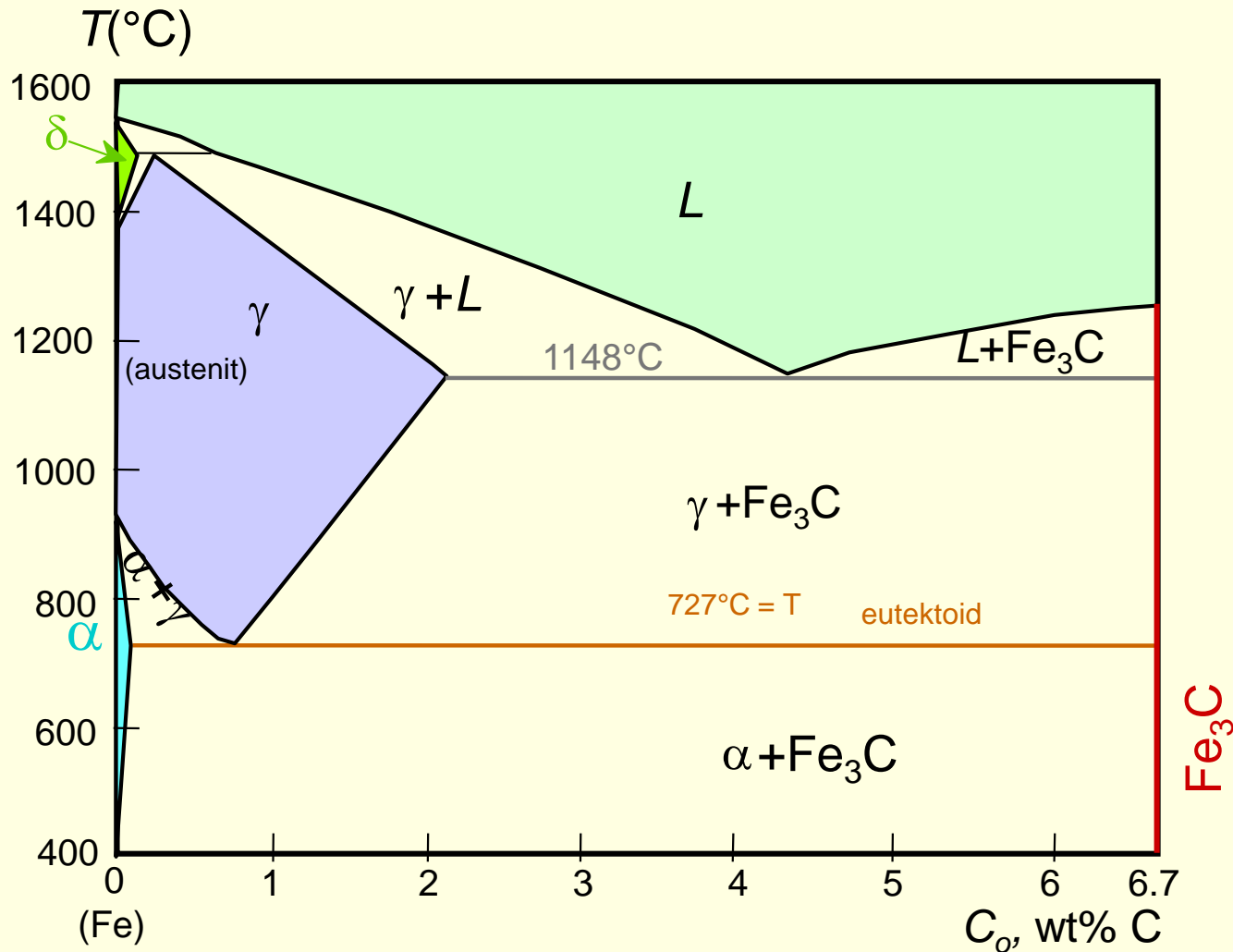
Cu-Ag



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 Zapreminski Centriranom Kubnom Rešetkom (ZCKR)

- γ železo, sa Površinski Centriranom Kubnom Rešetkom (PCKR).

➤ α železo (α -Fe):

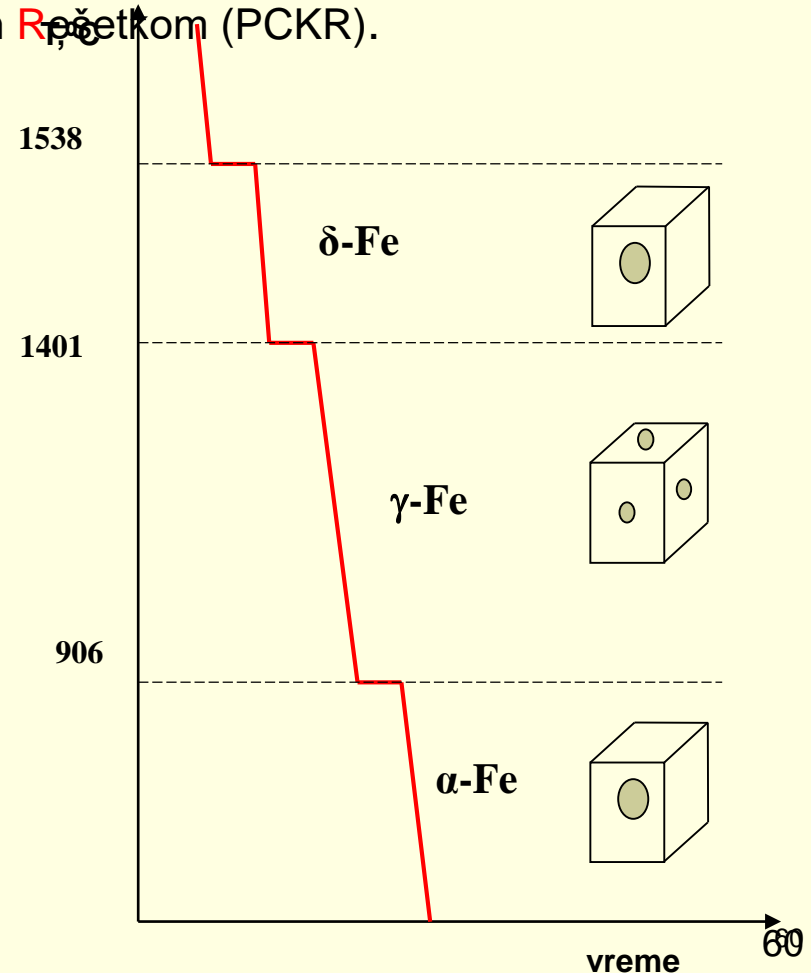
- KZC;
 - $T=20-906$ °C;
 - fizičke osobine (magnetičnost):
 - $T=20-769$ °C → feromagnetično α -Fe,
 - $T=769-906$ °C → paramagnetično β -Fe.
- (α -Fe, β -Fe = ZCKR)

➤ γ železo (γ -Fe):

- KPC;
- $T=906-1401$ °C.

➤ δ železo (δ -Fe):

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



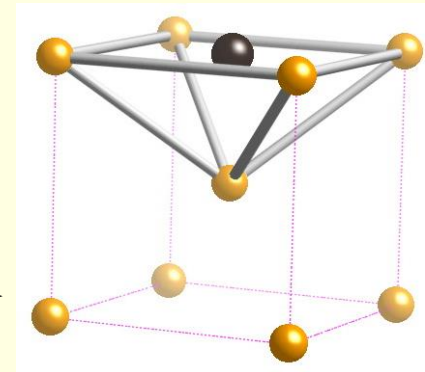
Dijagram stanja Fe-C

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**).

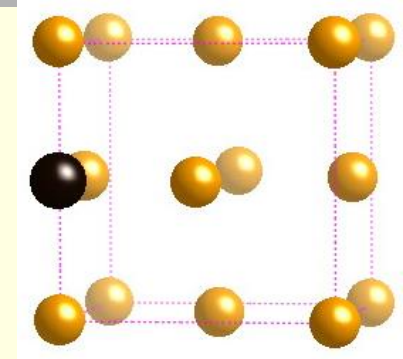
1. INTERSTICIJSKI ČVRSTI RASTVORI C u Fe:

- **FERIT (α)** je intersticijski čvrsti rastvor **C** u **α -Fe**.
 - KZC;
 - HB 80;
 - Rm=280N/mm²;
 - Rastvorljivost **C** u **α** : max = 0,025 %C (na 727°C),
min = 0,0025 %C (na 20°C).



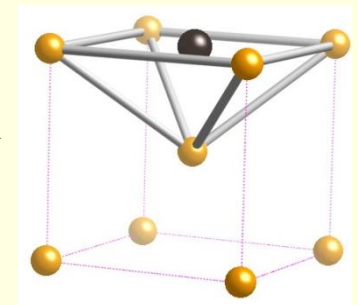
- **AUSTENIT (γ)** je intersticijski čvrsti rastvor **C** u γ -Fe.

- 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.

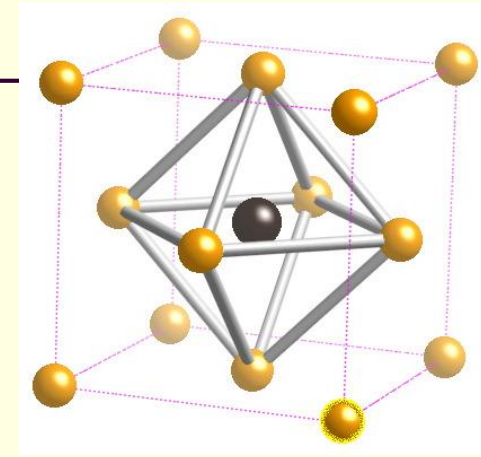
- KZC;
- Max-rastvorljivost **C** u δ je 0,09 %C (na 1493°C).
- Postojanost na $t_{\min} = 1394^\circ\text{C}$.



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;
- Rm=30-50 N/mm²;
- Jako tvrdo i krto jedinjenje.



3. MEHANIČKE SMEŠE (kombinacija prethodnih faza):

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

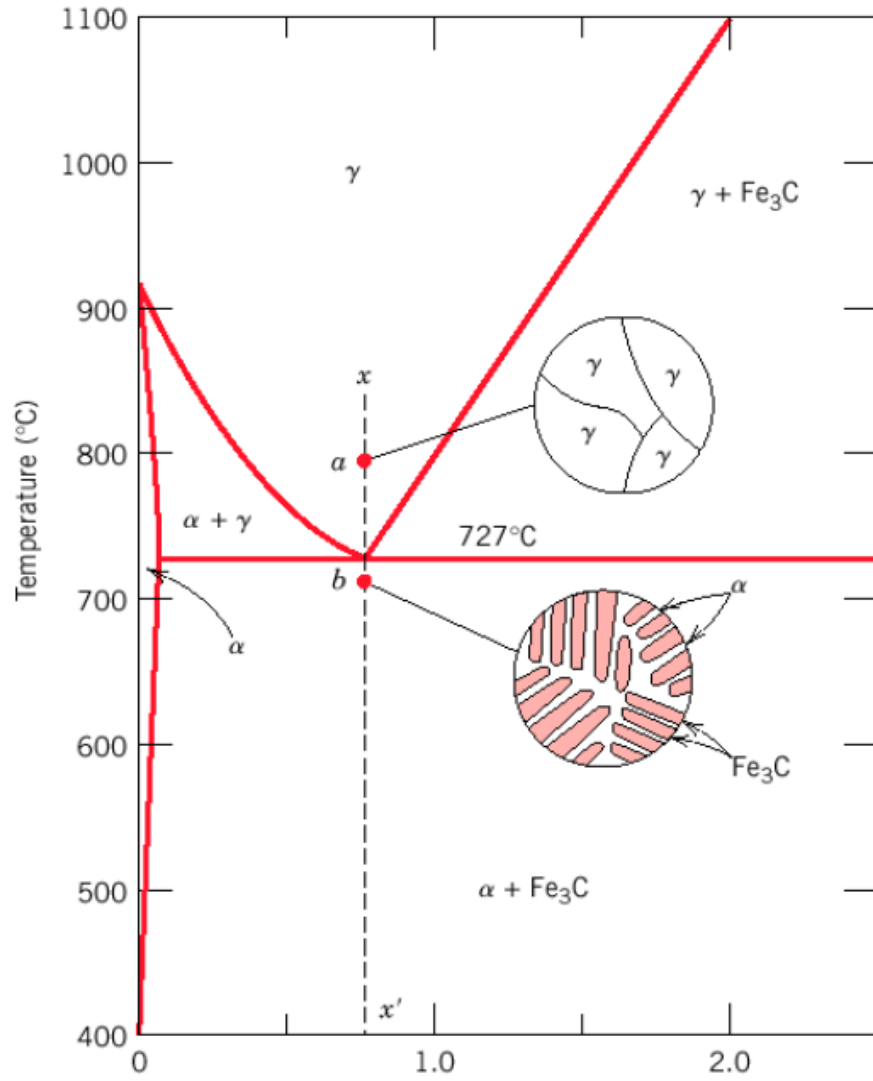
Nastaje **eutektičkom** reakcijom: $R \xrightarrow{1147^{\circ}C; 4,3\%C} L(\gamma_{2,14\%C} + Fe_3C_{6,67\%C})$

- napomena: $R \rightarrow L_I \Rightarrow L_I \xrightarrow{727^{\circ}C; 4,3\%C} L_{II}(P_{0,8\%C} + Fe_3C_{6,67\%C})$

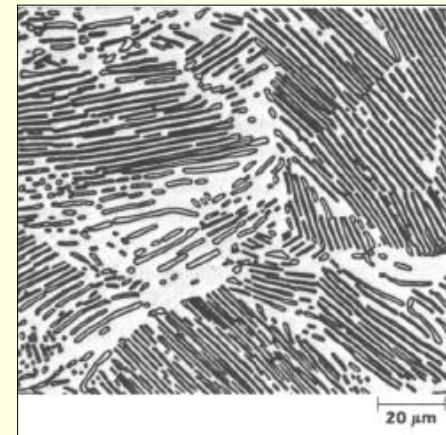
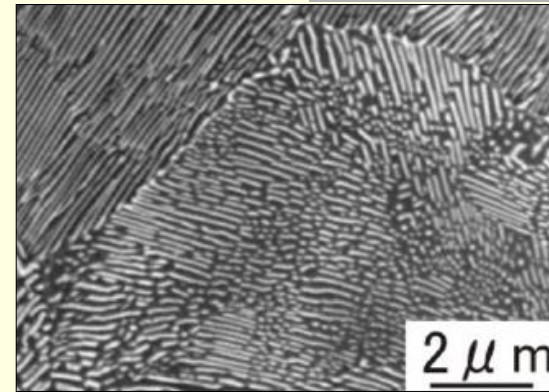
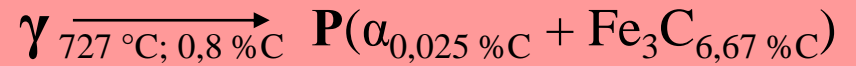
- **PERLIT (P)** je mehanička smeša ferita (α) i cementita (Fe_3C)!

Nastaje **eutektoidnom** reakcijom: $\gamma \xrightarrow{727^{\circ}C; 0,8\%C} P(\alpha_{0,025\%C} + Fe_3C_{6,67\%C})$

EUTEKTOIDNI ČELICI

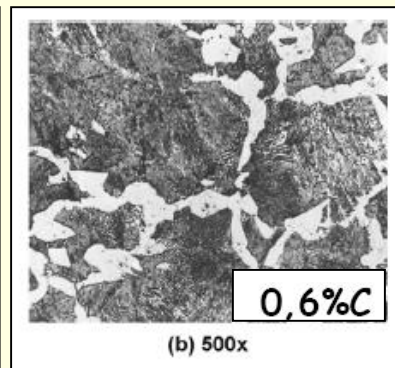
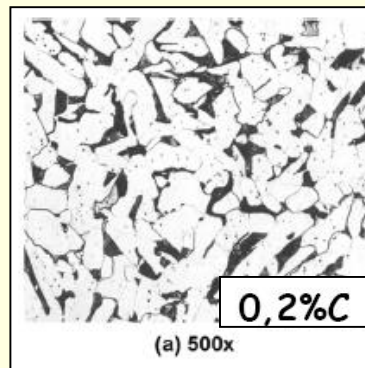
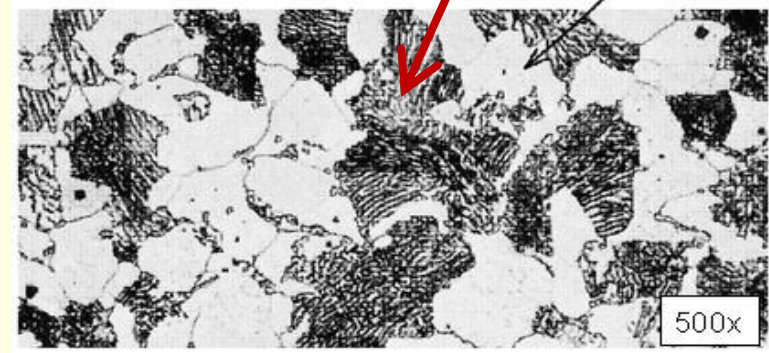
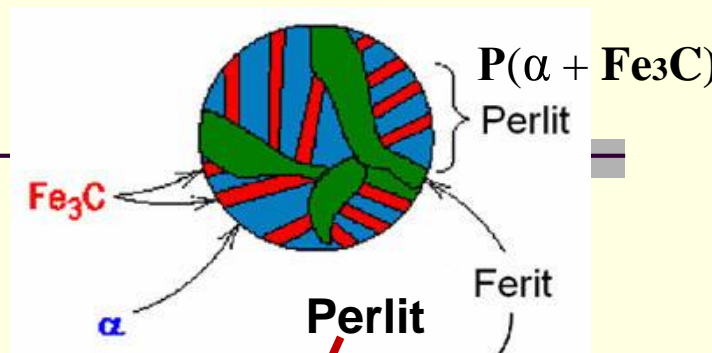
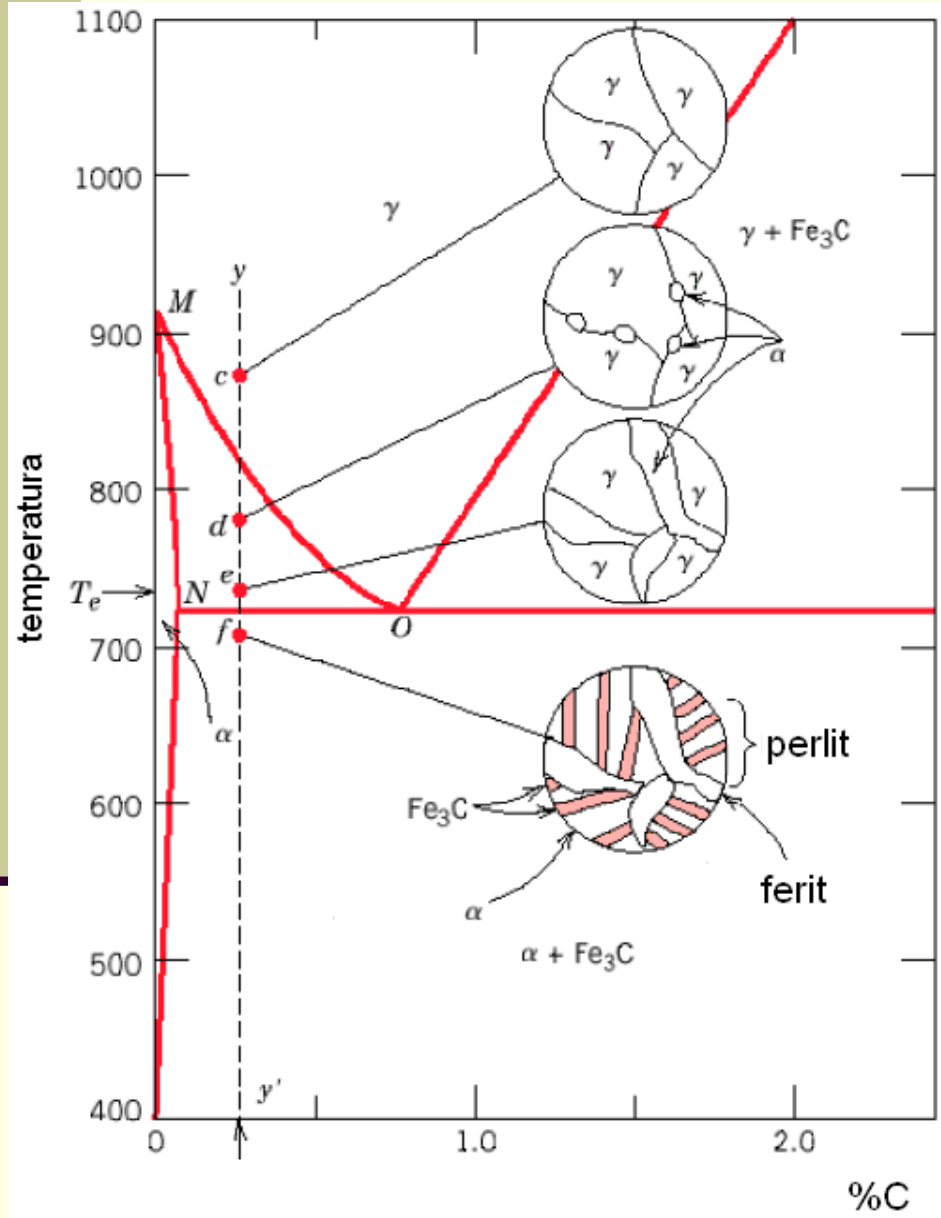
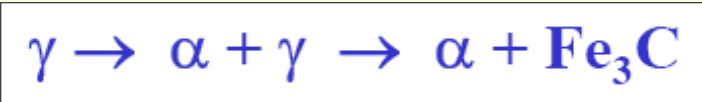


PERLIT



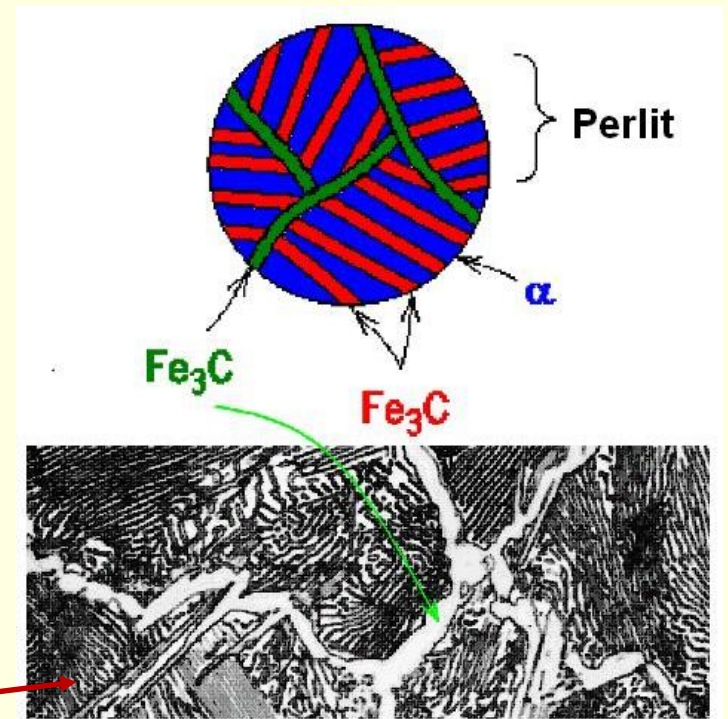
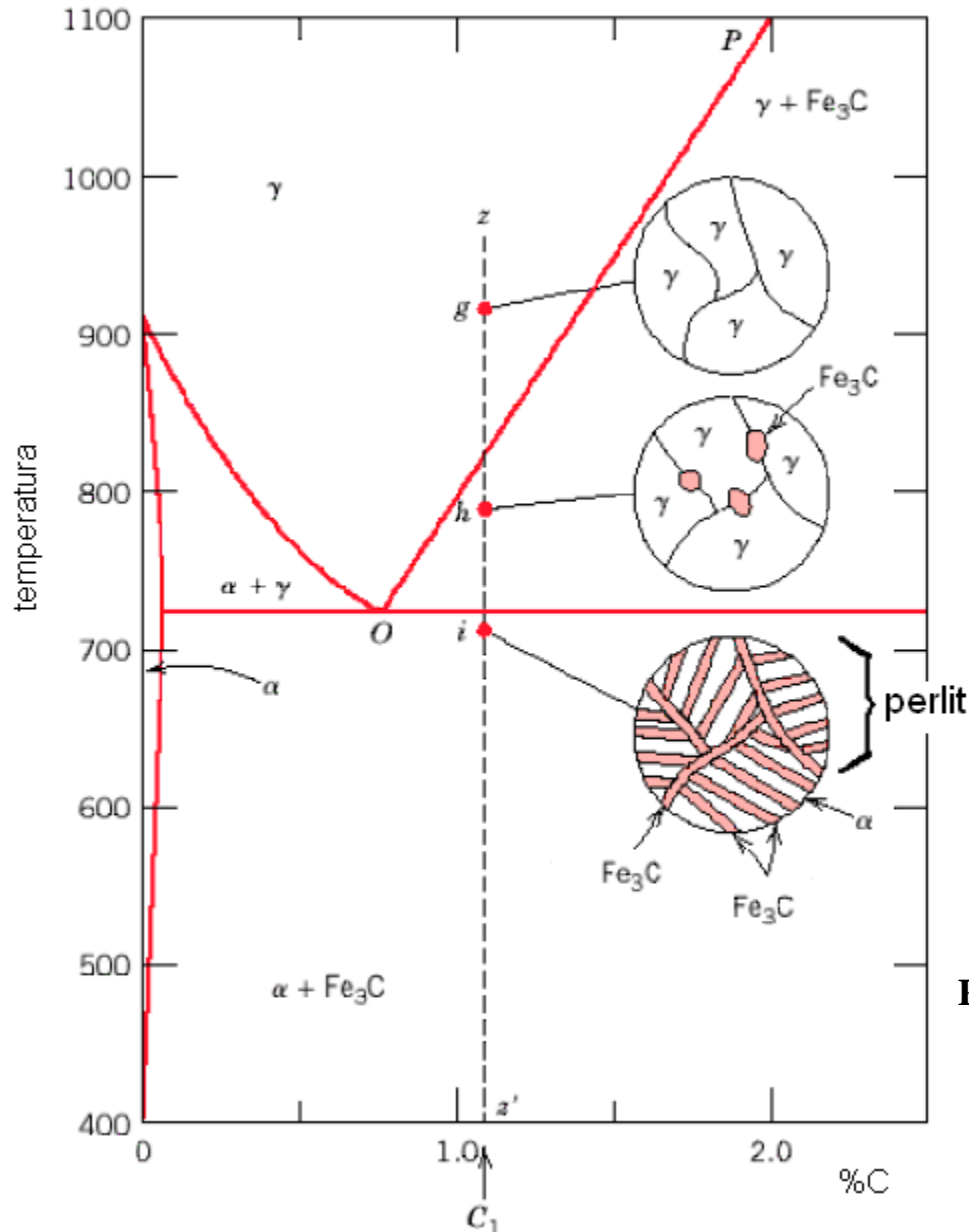
Mikrostruktura perlita

PODEUTEKTOIDNI ČELICI

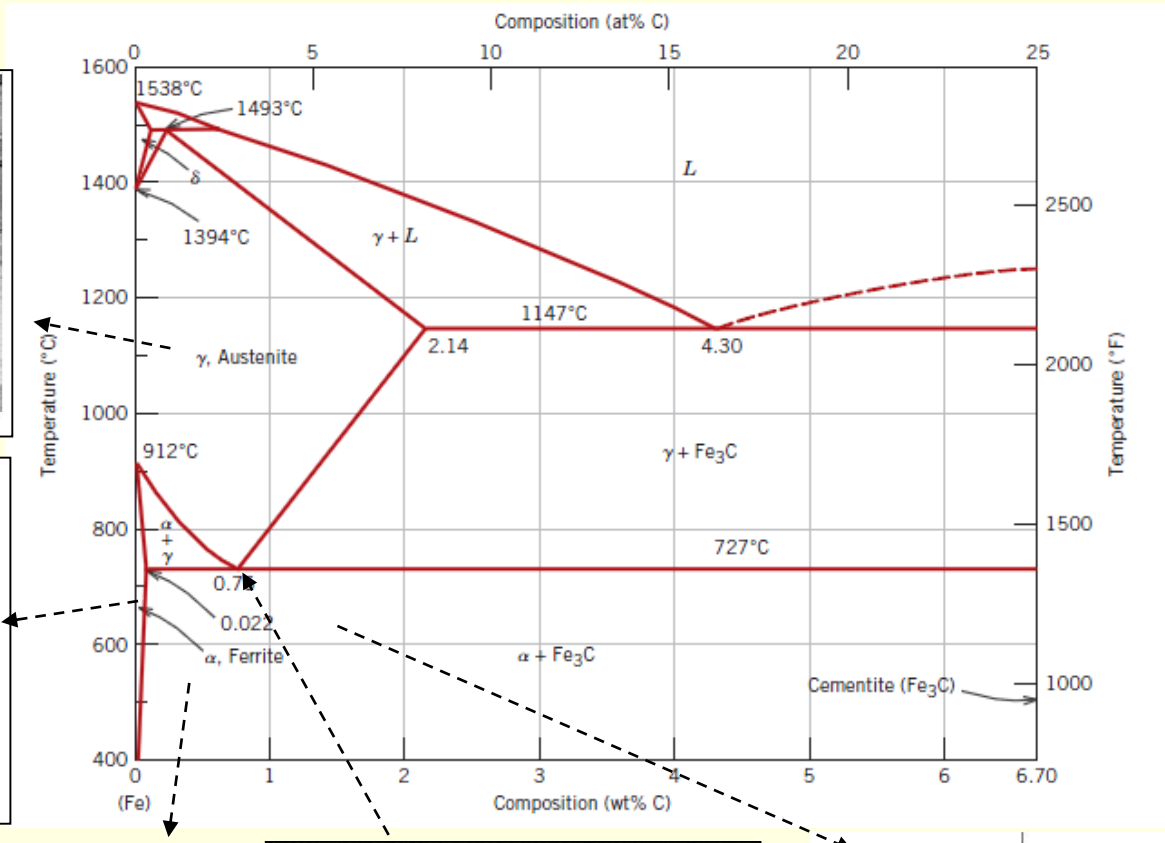
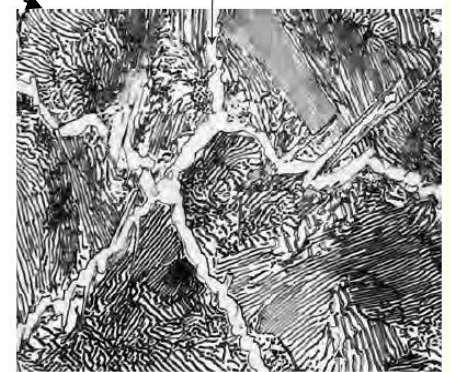
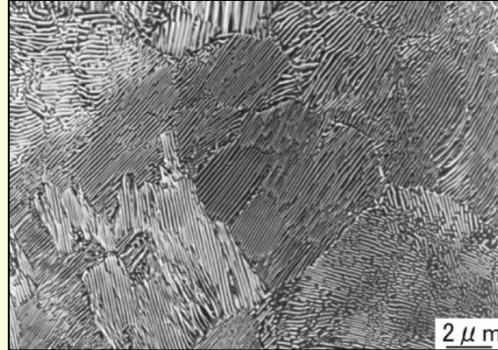
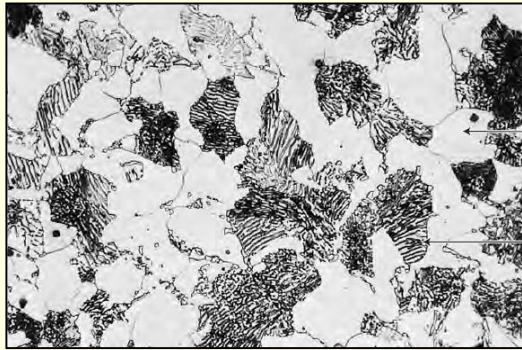
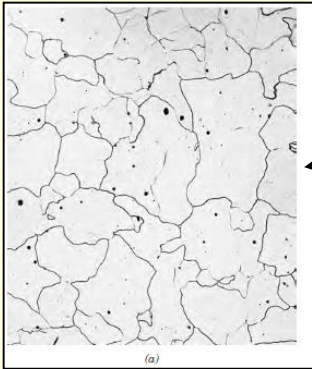
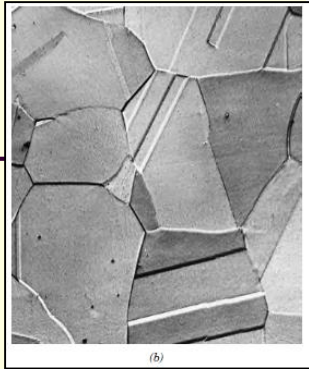


Mikrostrukture podeutektoidnih čelika

NADEUTEKTOIDNI ČELICI



Mikrostruktura nadeutektoidnog čelika



■ Hvala na pažnji 😊