

# 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

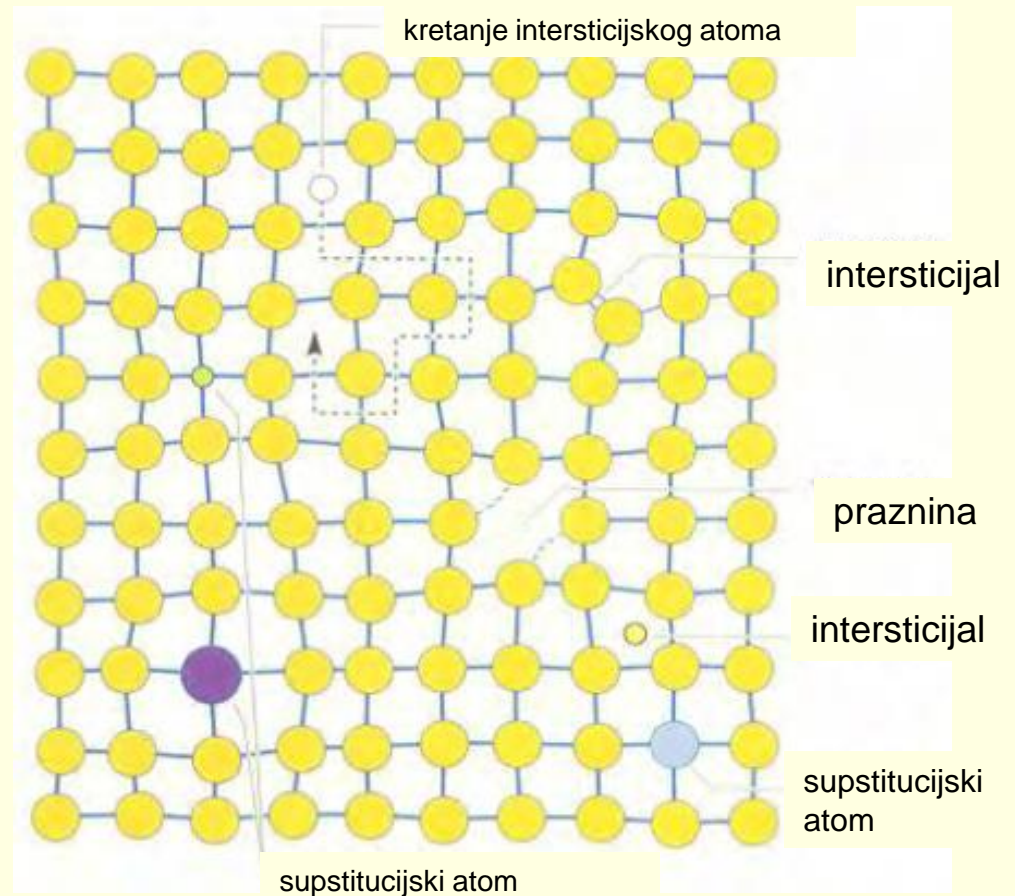
- granice zrna/subzrna
- prsline, uključci, čestice

## Površinske greške

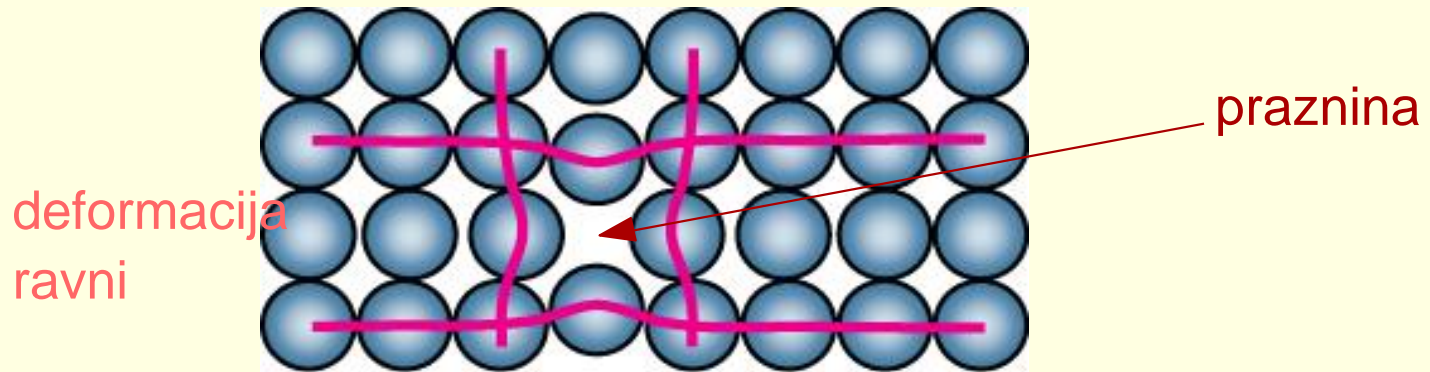
## Zapreminske greške

# 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.**



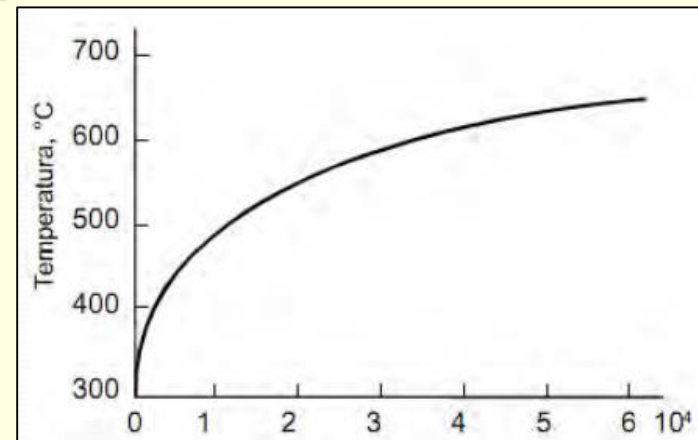
# Tačkaste greške - praznine



**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.



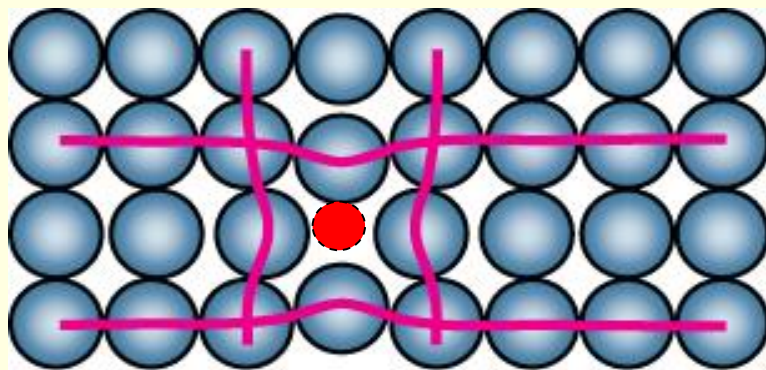
koncentracija praznina

# Tačkaste greške – supstitucijski atom

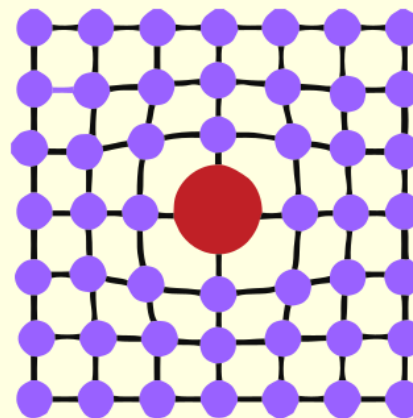
Strani atom (B) može da zauzme mesto zamenom u osnovnoj rešetki elementa A – ova vrsta greške se naziva **supstitucijski atom** (supstitucija znači zamena)

**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  
primiće atome u njegovoj okolini



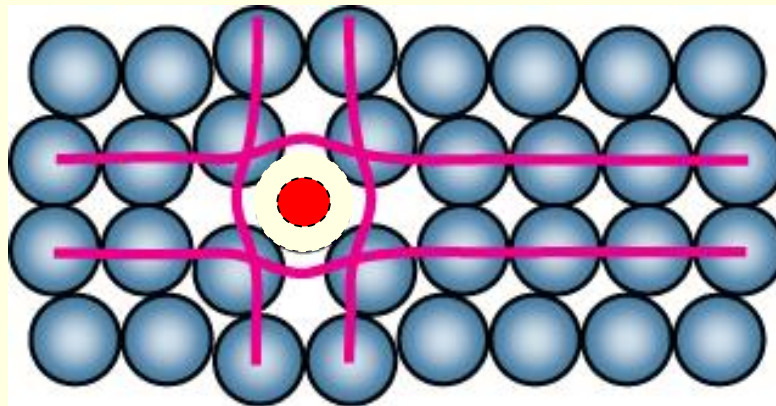
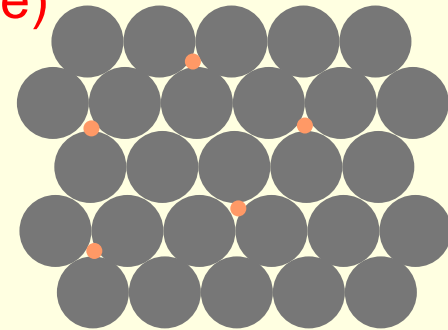
supstitucijski  
atom većeg prečnika  
razmiće atome u njegovoj okolini

# 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**

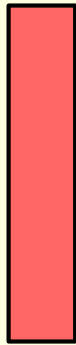


# Linijske greške - dislokacije

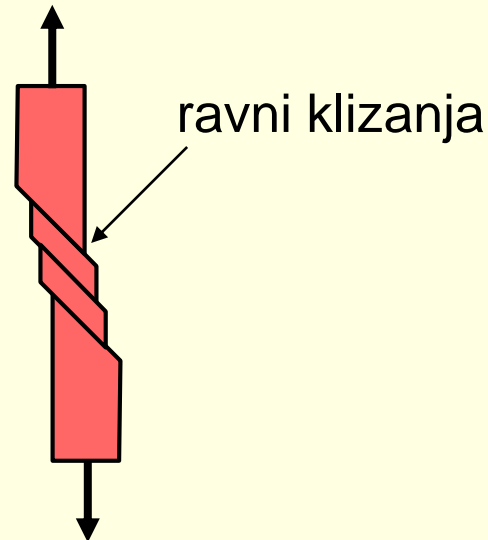
**Dislokacije** – su linijske, jednodimenzionalne greške oko kojih su atomi pomereni sa svojih mesta.

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

Deformacija cinka ZN (HGP rešetka):



- pre deformacije



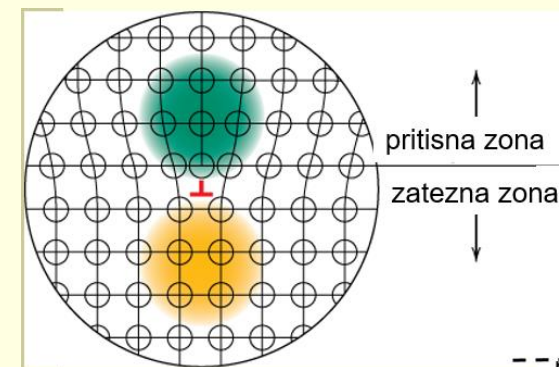
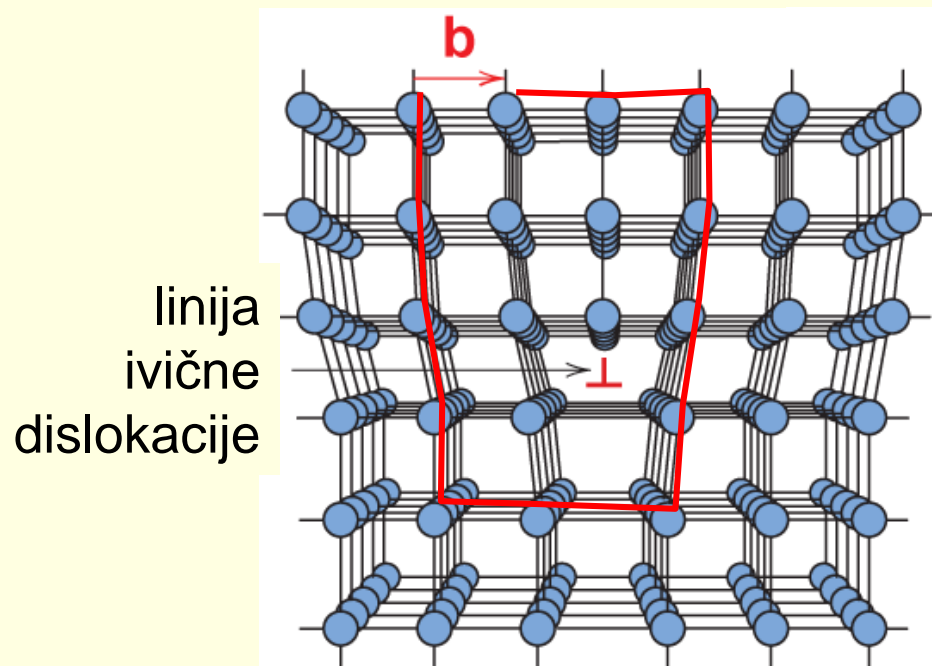
- posle zatezanja





# Dislokacije - Ivična dislokacija

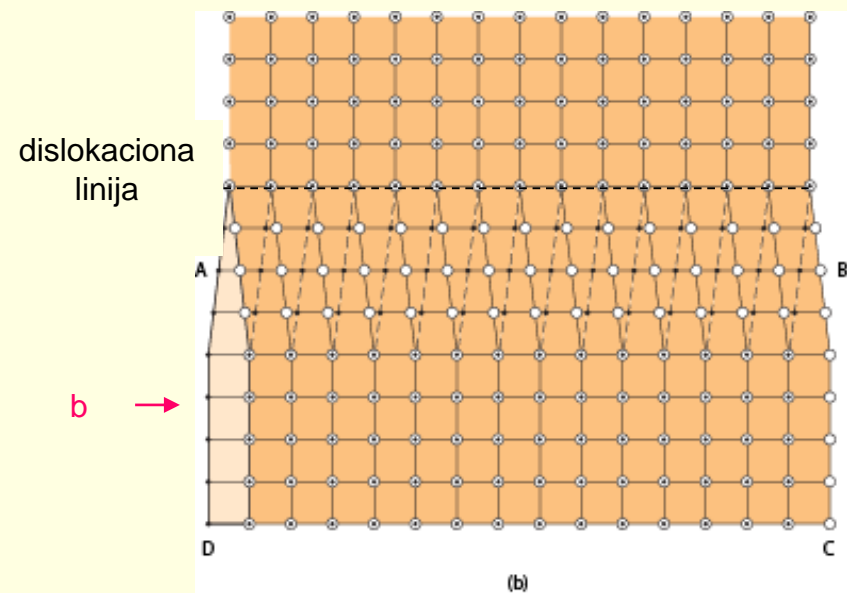
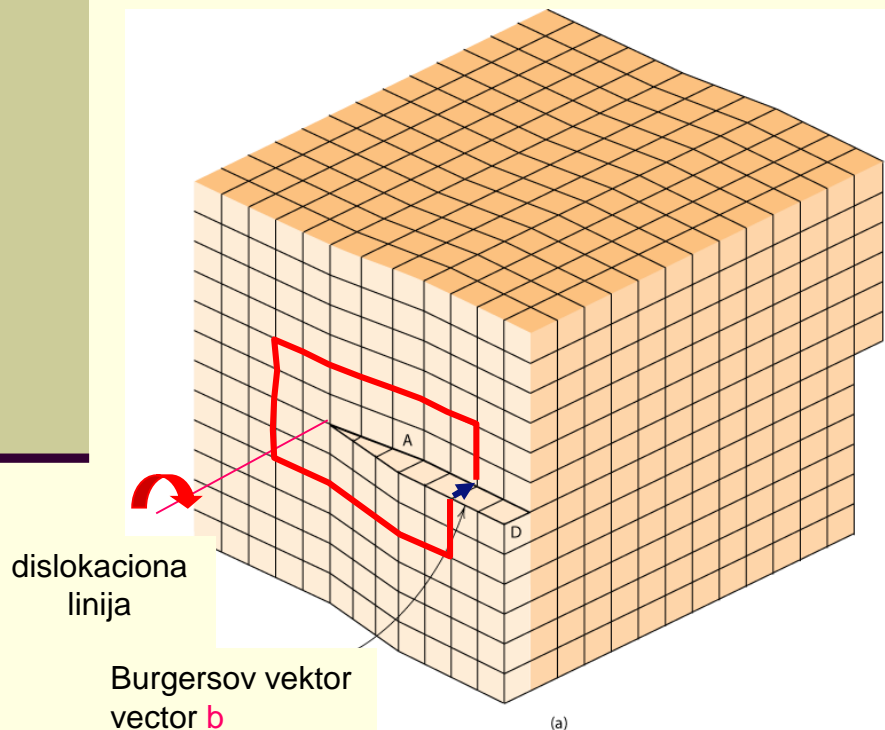
**Dislokacija** – Linijska jednodimenzionalna greška oko koje su atomi izvedeni iz ravnotežnog položaja  
Burgersov vektor



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

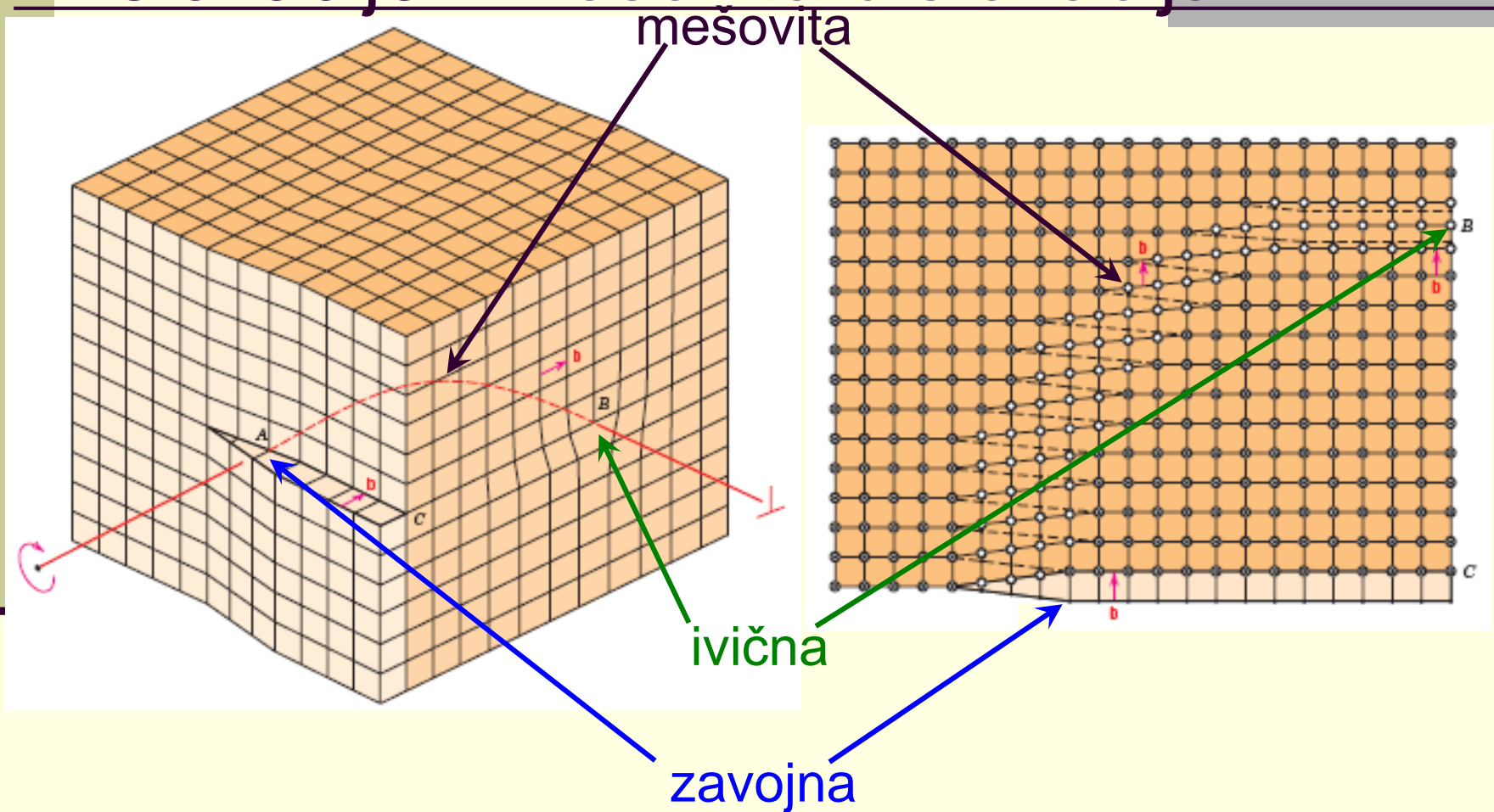
# Dislokacije - Zavojna dislokacija

**Zavojna dislokacija:** nastaje spiralnim pomerenjem ravni usled delovanja smicanja

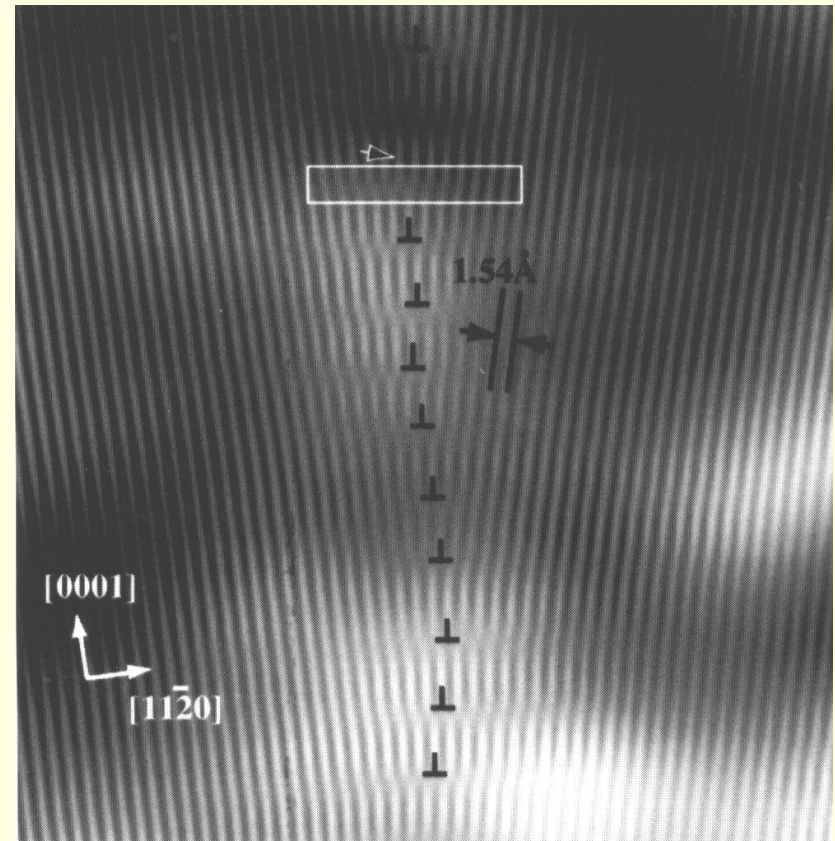
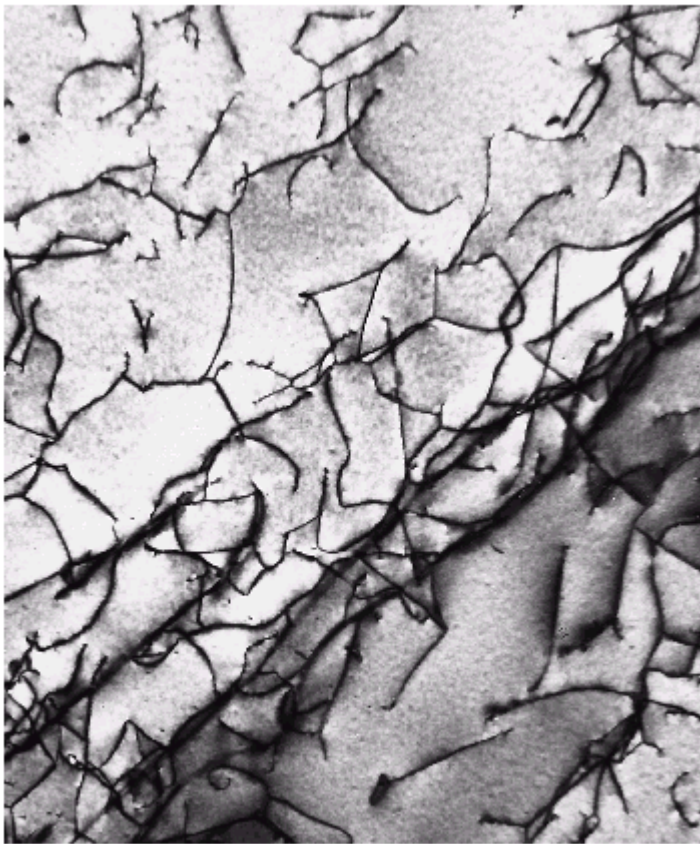


•  $\mathbf{b} \parallel$  je paralelan sa dislokacionom linijom

# Dislokacije - mešovita dislokacija



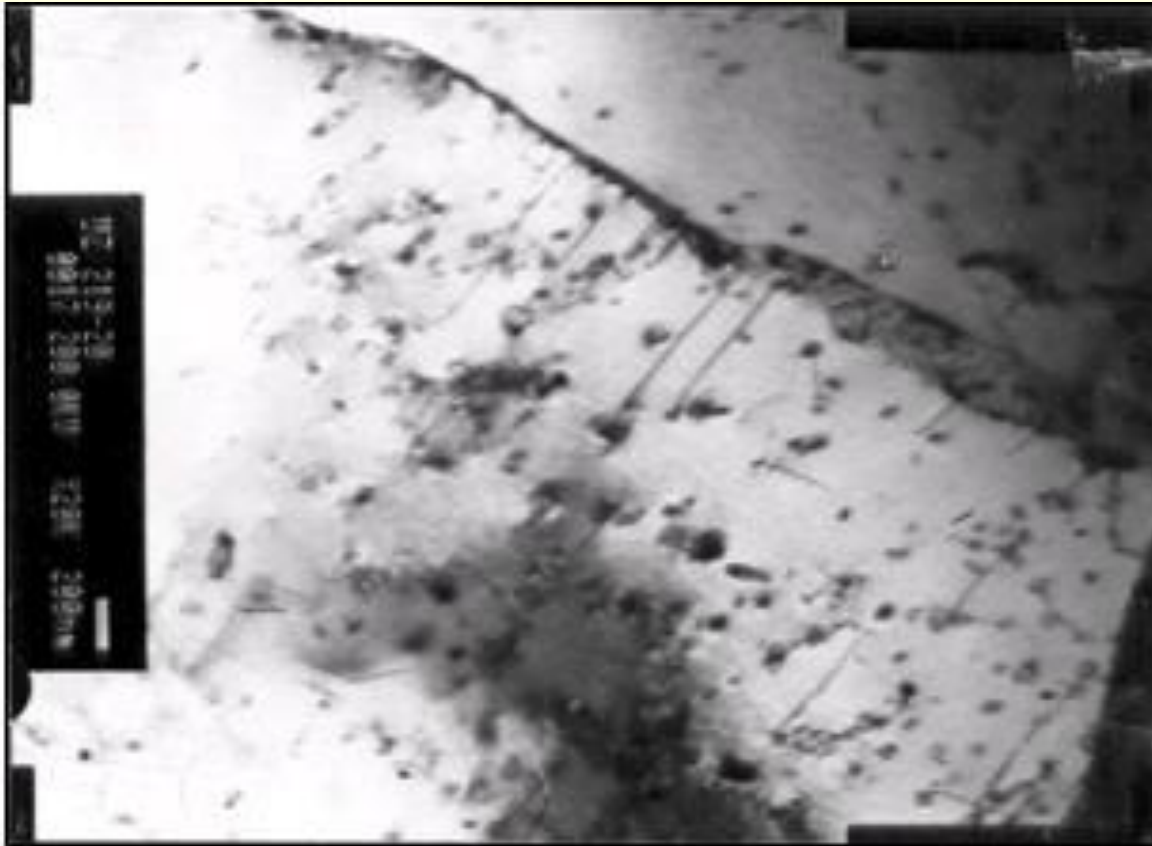
# Dislokacije – izgled u materijalu



Dislokacije: levo – mreža, desno – granica subzrna



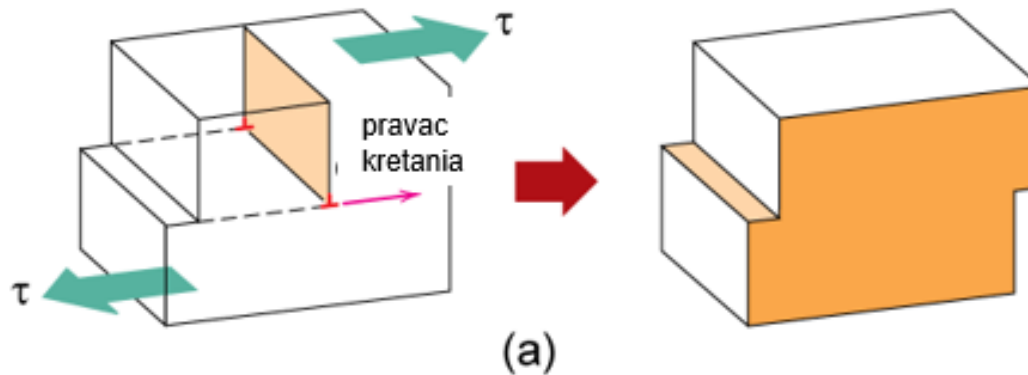
# Dislokacije – izgled u materijalu



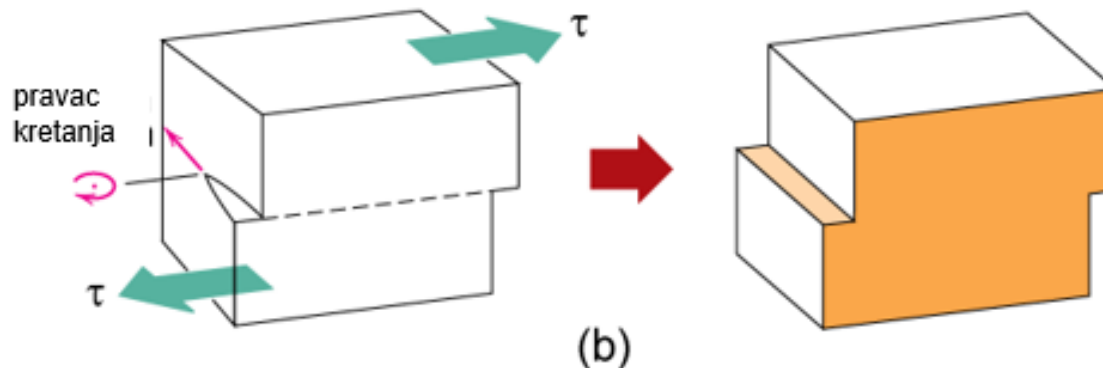
Dislokacije su vidljive pod velikim uvećanjima - elektronski mikroskop (TEM)

# 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



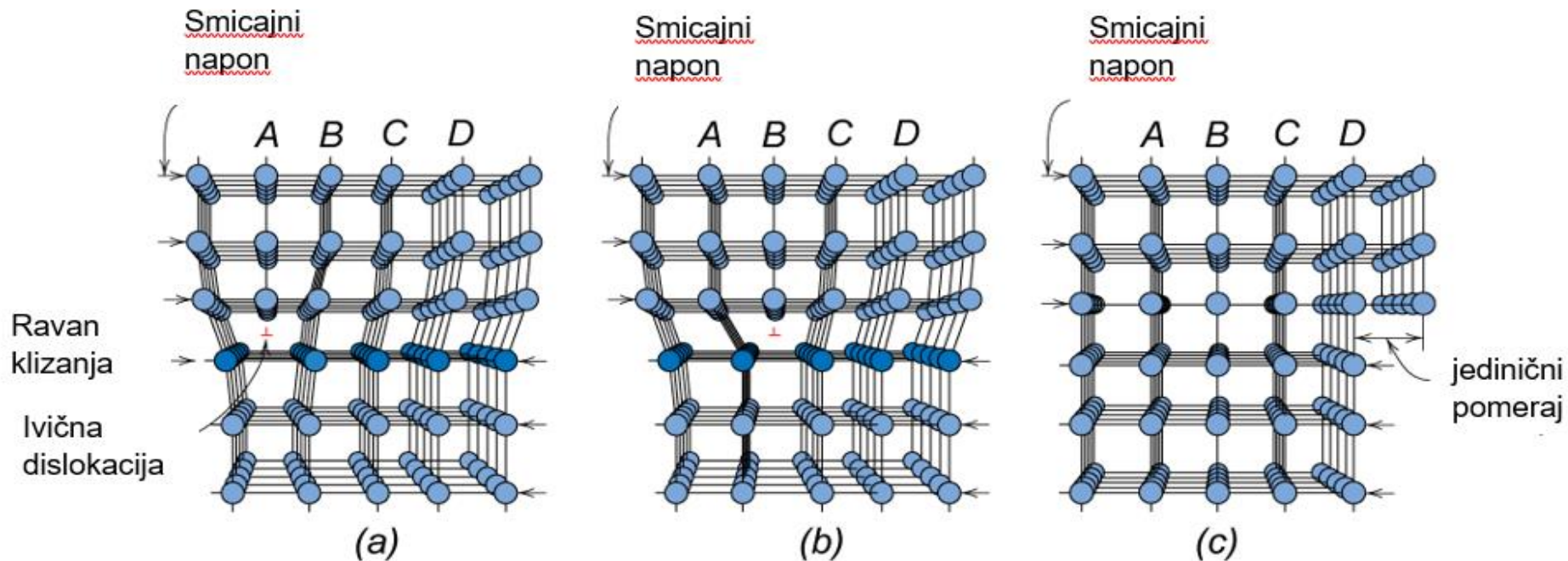
Ivična dislokacija



Zavojna dislokacija

# Klizanje dislokacija

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



Kretanje ivičnih dislokacija još nazivamo **klizanje dislokacija**.

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



# Kretanje dislokacija

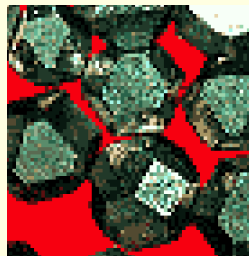
---



# Površinske greške – granice zrna

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

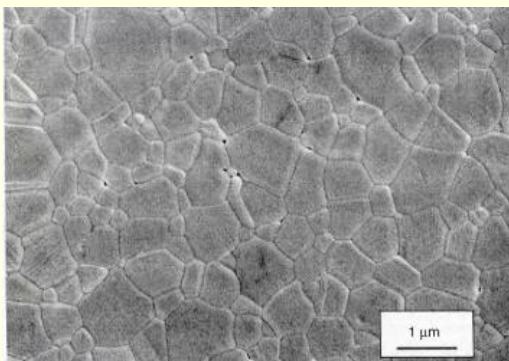
-dijamantski monokristali  
za skidanje površine abrazijom



-lopatice gasnih  
turbina



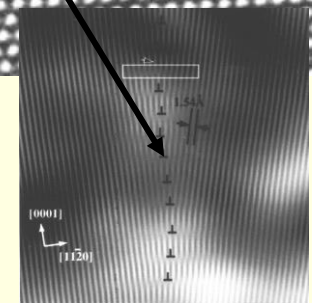
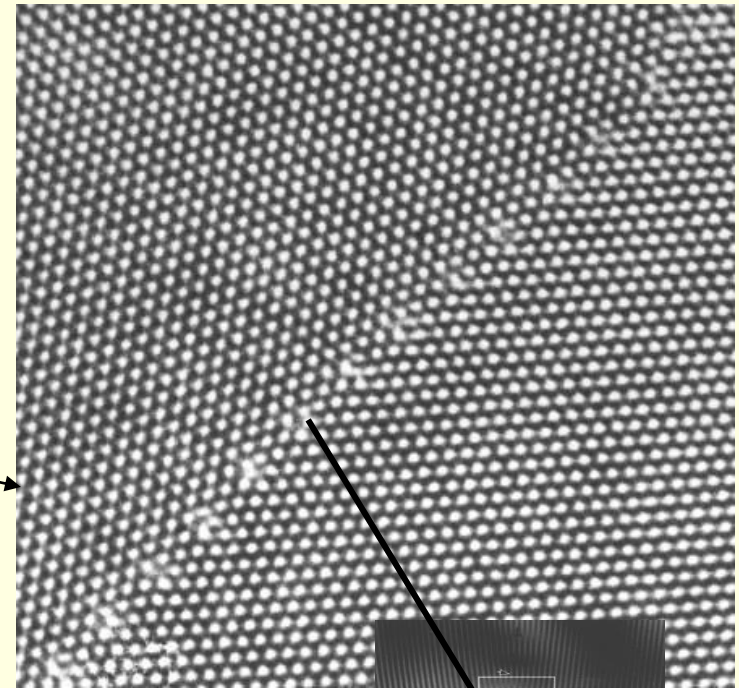
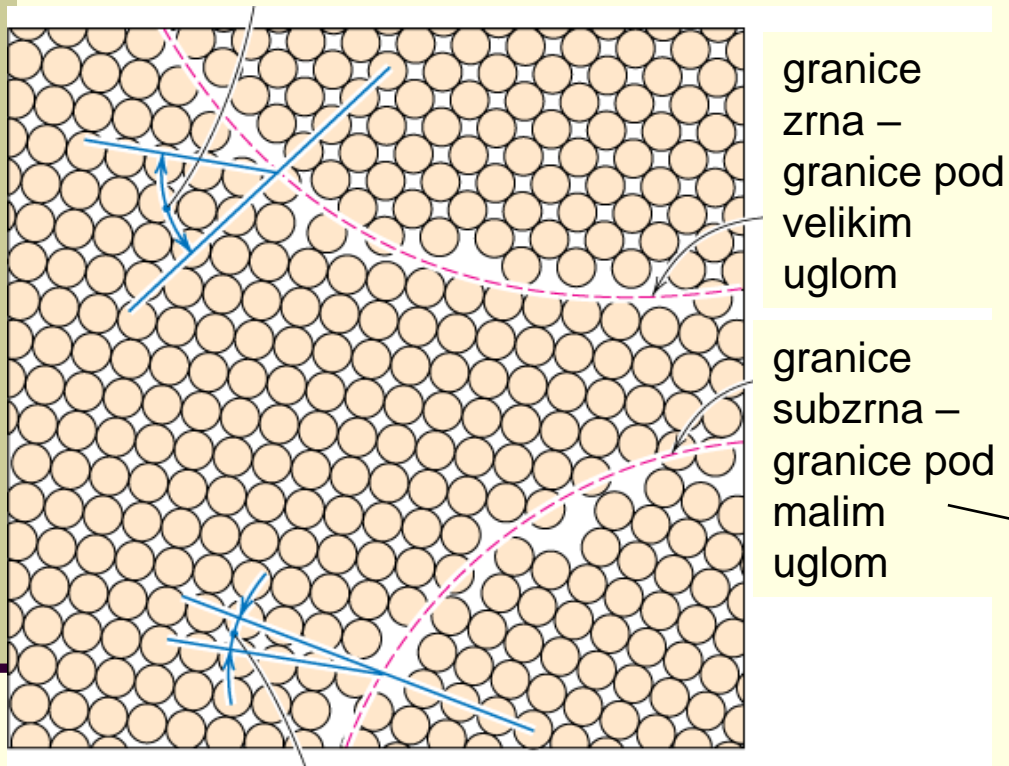
- U svim drugim uslovima materijal kristališe sa velikim brojem zrna, tj velikim brojem oblasti monokristala – **polikristal**



**polikristalni materijali**



# Površinske greške - granice zrna i subzrna

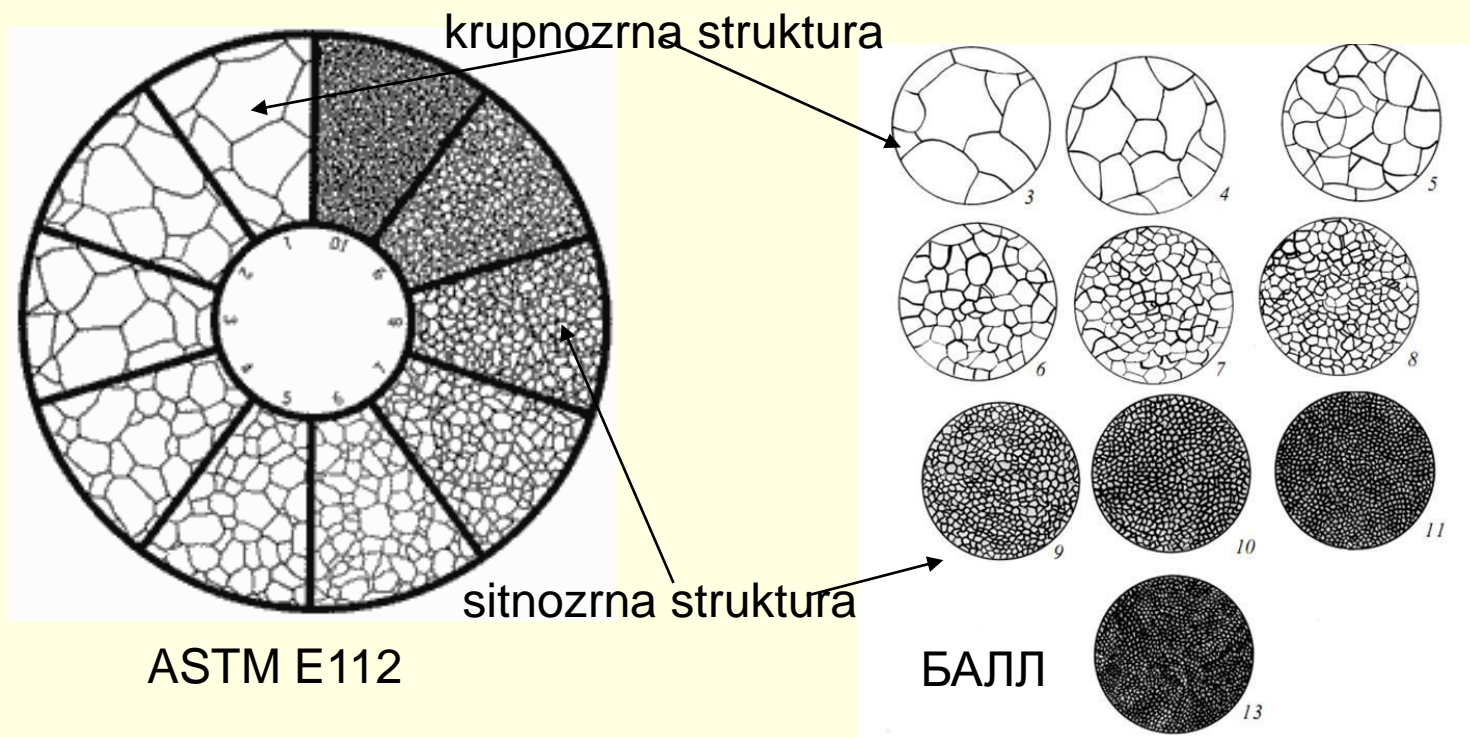


Svako "zrno" je približno jedan monokristal.

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



# Površinske greške – veličina zrna

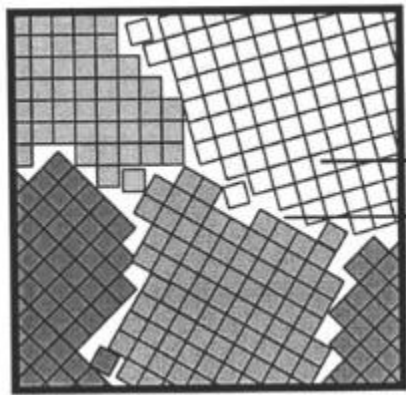


Veličina zrna se određuje posmatranjem pod metalografskim mikroskopom pod uvećanjem od 100x

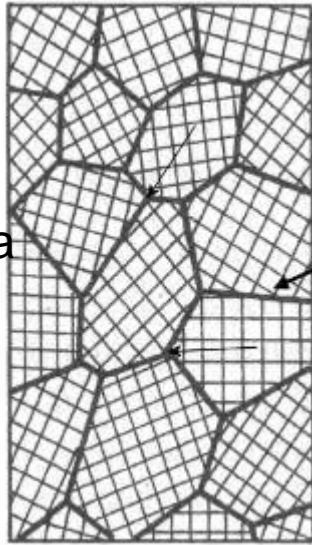
**Što je sitnije zrno više su sve mehaničke osobine – viša je čvrstoća, žilavost, duktilnost, itd.**

# Granice faza – još jedna bitna površinska greška (poređenje sa granicama zrna)

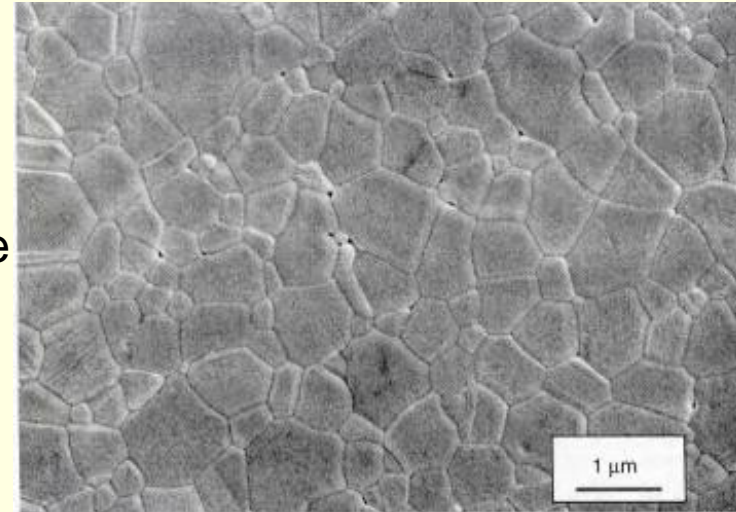
## polikristalni materijali



zrna  
granice zrna



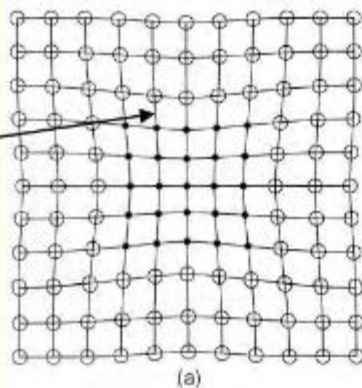
granice  
zrna



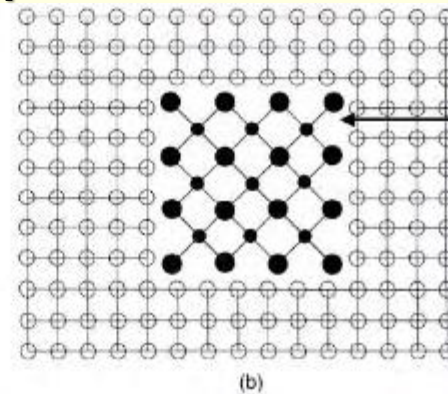
korund -  $\text{Al}_2\text{O}_3$

## Višefazni materijali - zapreminski defekti

Koherentne  
granice



(a)

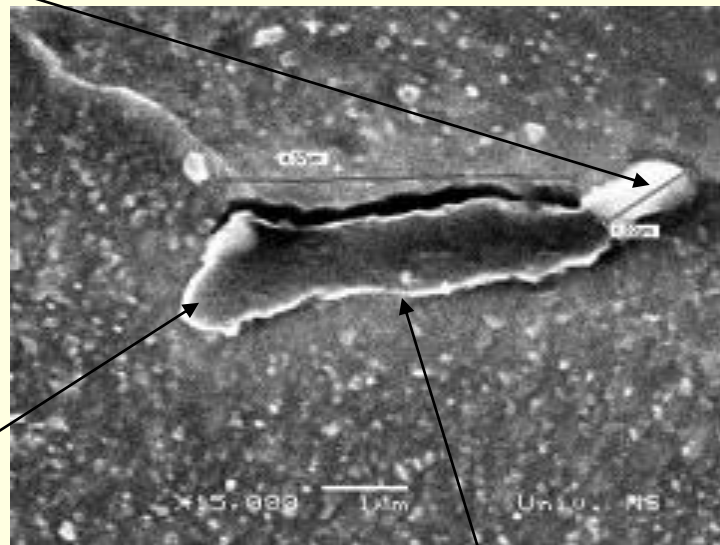
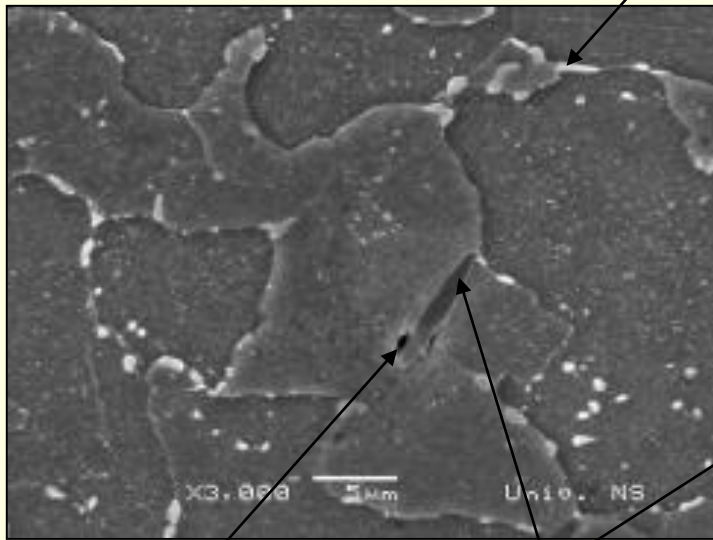


Nekoherentne  
granice

(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 materiali 3

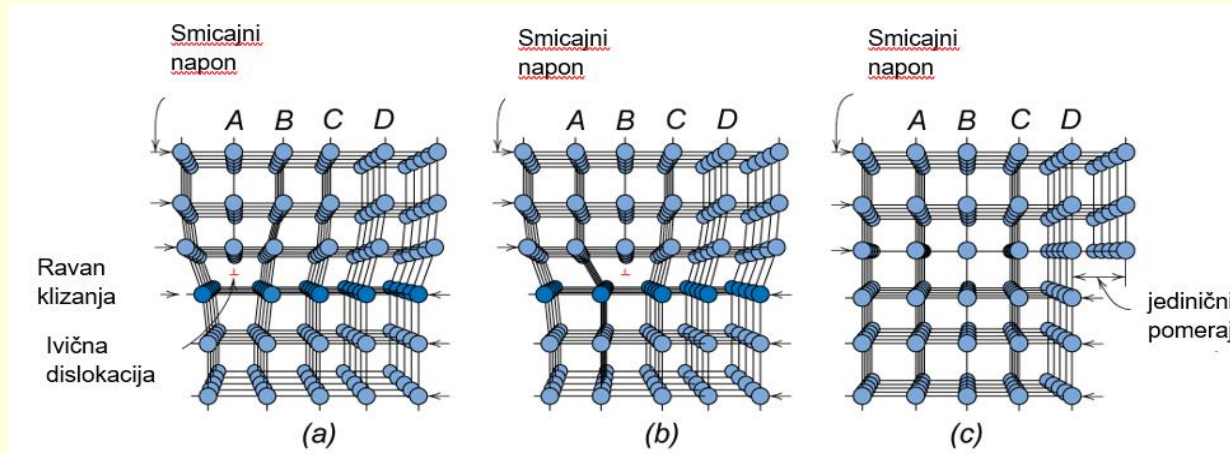
---

## **Mehanizmi ojačavanja**

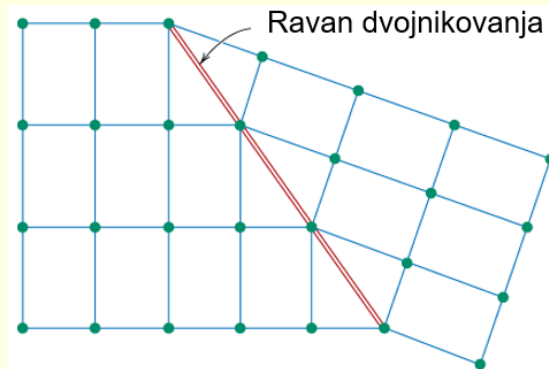


# Naponi koji dovode do klizanja dislokacija

Dva osnovna **mehanizma plastične deformacije i ujedno kretanja dislokacija** su:  
**Klizanje ivičnih dislokacija (već radili) – VAŽNIJI MEHANIZAM**



**Dvojnikovanje – deo kristala formira sliku u ogledalu**



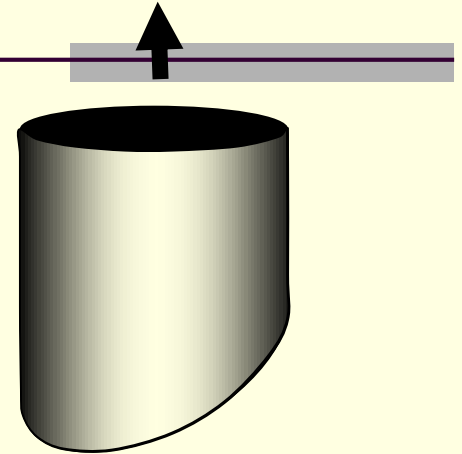
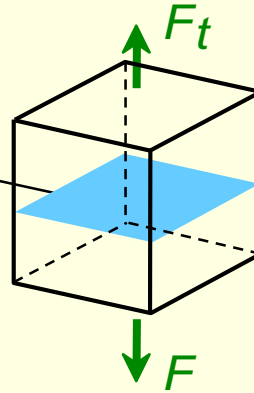
# Naponi koji dovode do klizanja dislokacija

## Kretanje dislokacija usled delovanja napona

- **Zatezni** naponi,  $\sigma$ :

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

površina,  $A$

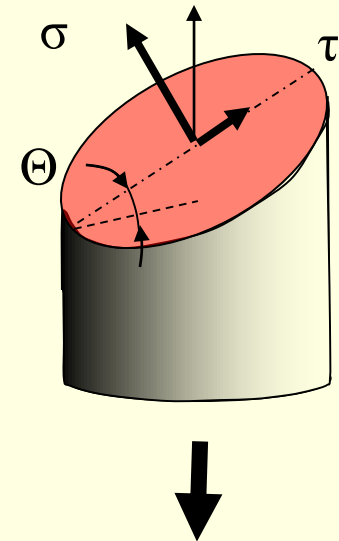
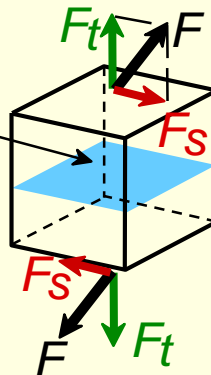


- Smicajni napon se indukuje kod zatezanja u nekom preseku.

- **Smicajni** (tangencijalni) naponi,  $\tau$ :

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

površina,  $A$



# Naponi koji dovode do klizanja dislokacija

## Kretanje dislokacija usled delovanja napona

- Dislokacije klizaju usled **rezultujućeg smicajnog napona,  $\tau_R$** .
- Smicajni napon se indukuje kod zatezanja u nekom preseku.

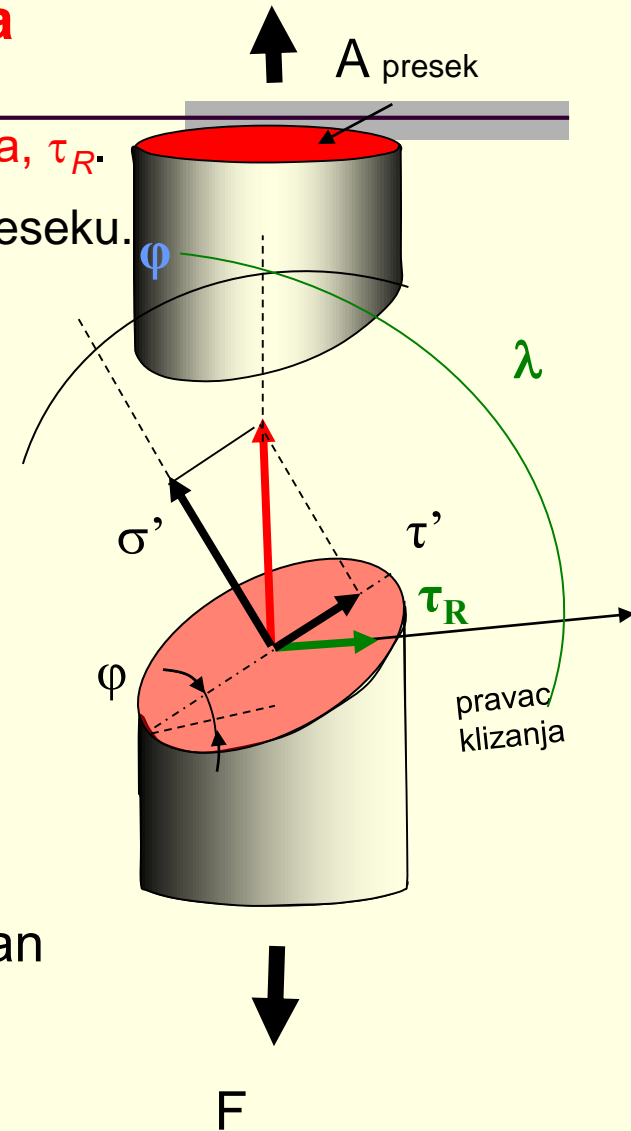
$$\sigma = \frac{F}{A}$$

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

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

$\varphi$  – ugao između sile zatezanja i normale na ravan klizanja

$\lambda$  – ugao između sile zatezanja i pravca klizanja



# Naponi koji dovode do klizanja dislokacija

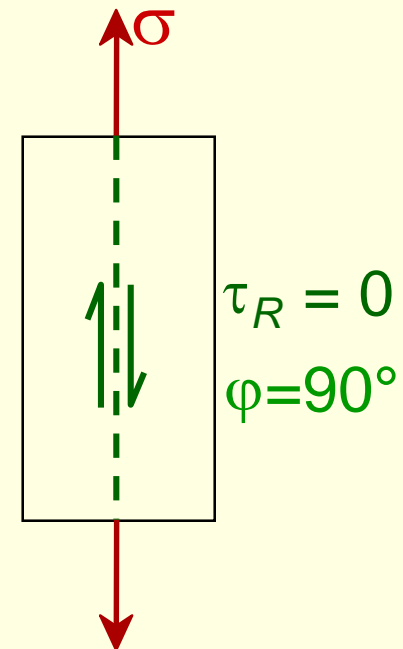
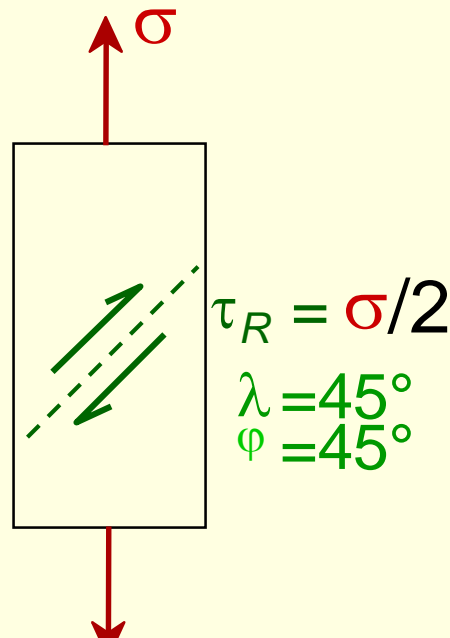
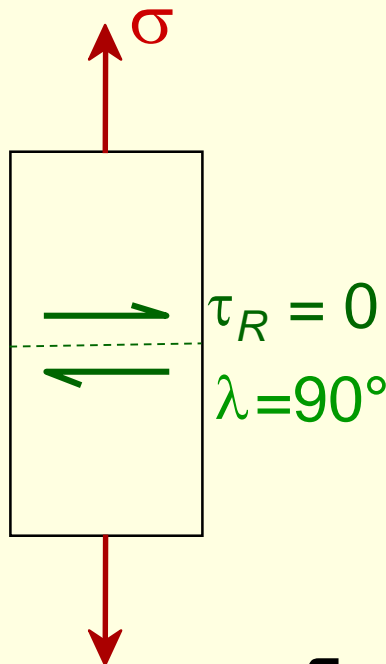
## Kritična veličina smicajnog napona za kretanje dislokacija

Uslov za kretanje dislokacija:

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

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

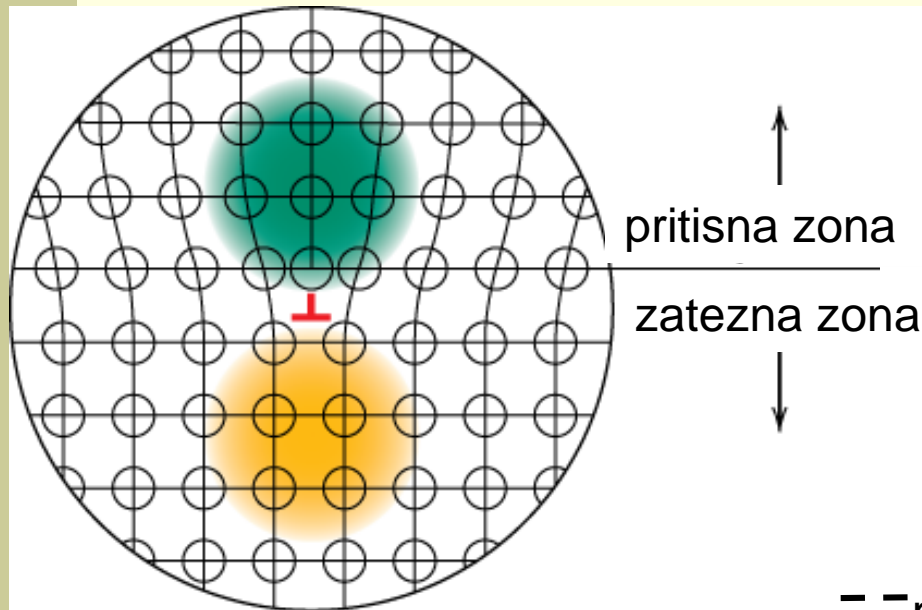
obično oko  $10^{-4}$  GPa -  $10^{-2}$  GPa



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

Orijentacija kristala olakšava ili otežava kretanje dislokacija

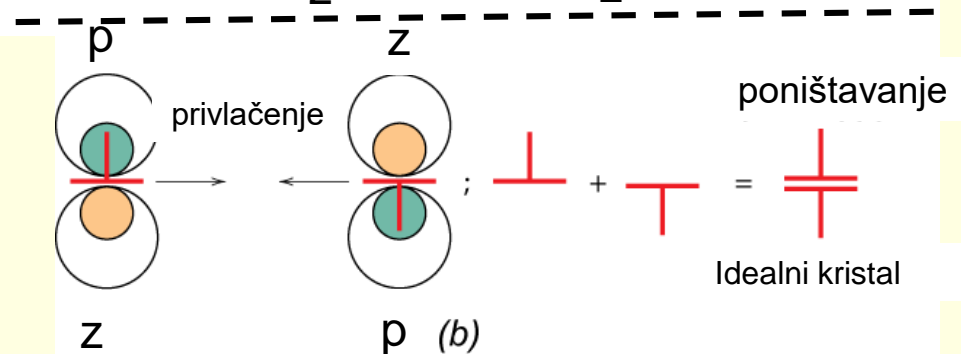
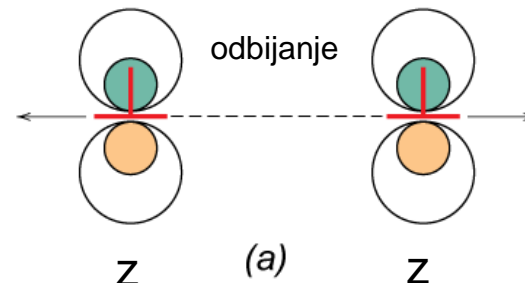
# Koncentracija napona na dislokacijama



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

## Reakcije dislokacija

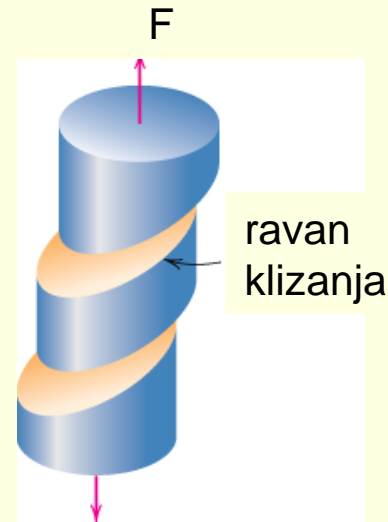
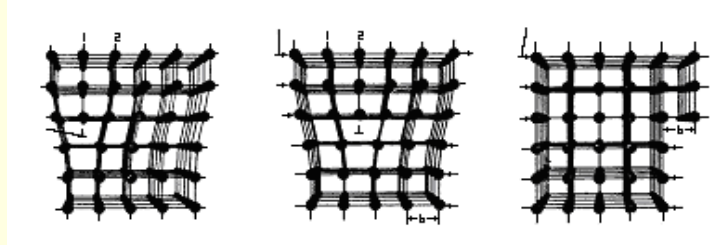
**Dislokacije istog znaka se odbijaju**



**Dislokacije suprotnog znaka se privlače**

# Klizanje dislokacija

## Klizanje kod monokristala



## Klizanje kod polikristala

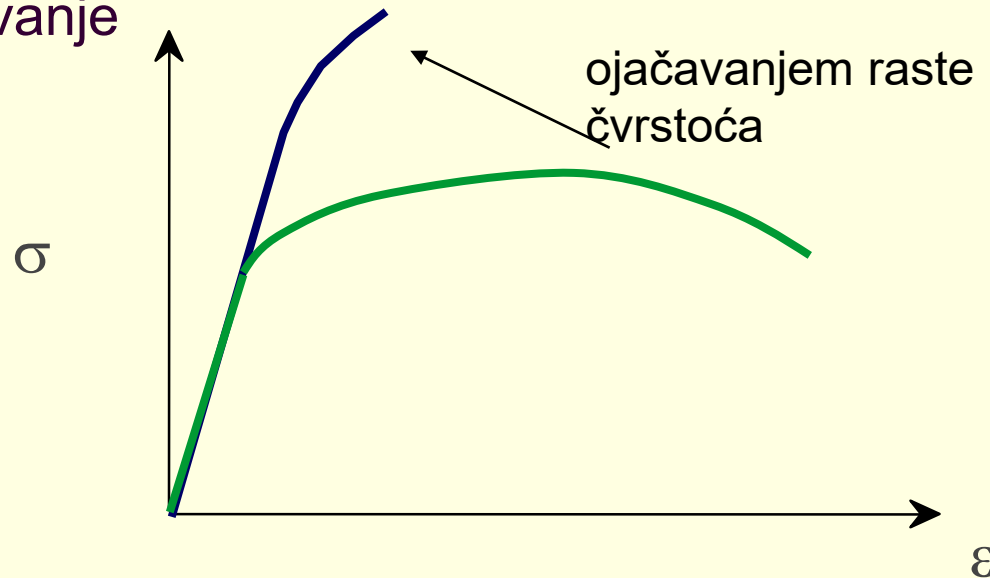


- Viša čvrstoća – granice zrna koče dislokacije
- Pravac i ravan klizanja dislokacija se menjaju od zrna do zrna – dodatana energija.
- $\tau_R$  se menja od kristala do kristala tako da se prvo deformišu zrna koja imaju najviši smicajni napon, dok se ostala deformišu kasnije

# Dislokacije i mehanizmi ojačavanja

## 4 Strategije za ojačavanje metala:

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



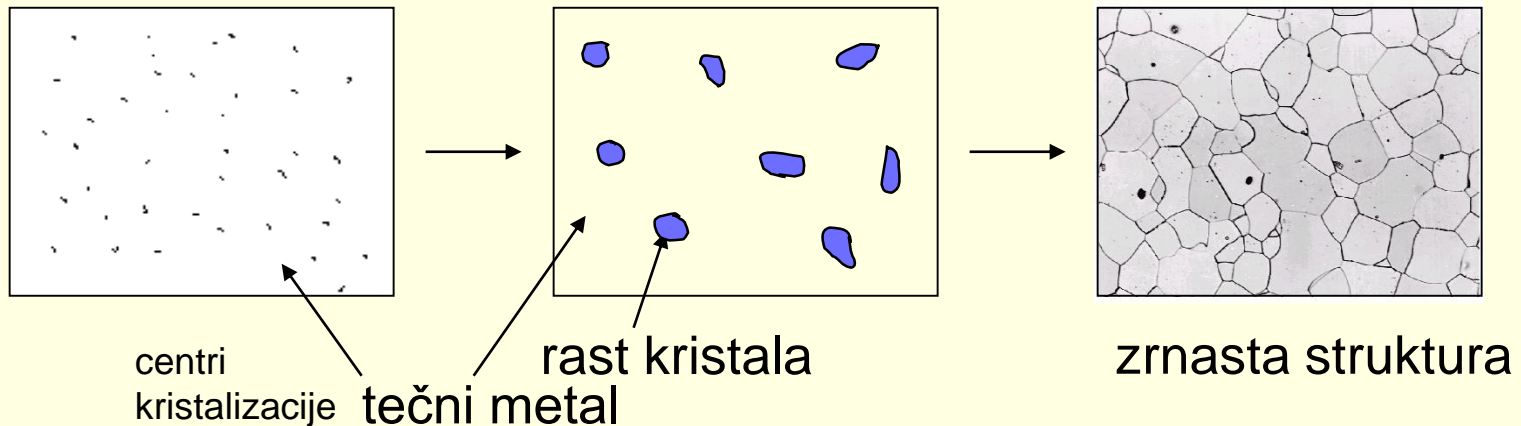
**Sve strategije otežavaju kretanje dislokacija!**



# Dislokacije i mehanizmi ojačavanja

## 1. Smanjenje veličine zrna

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



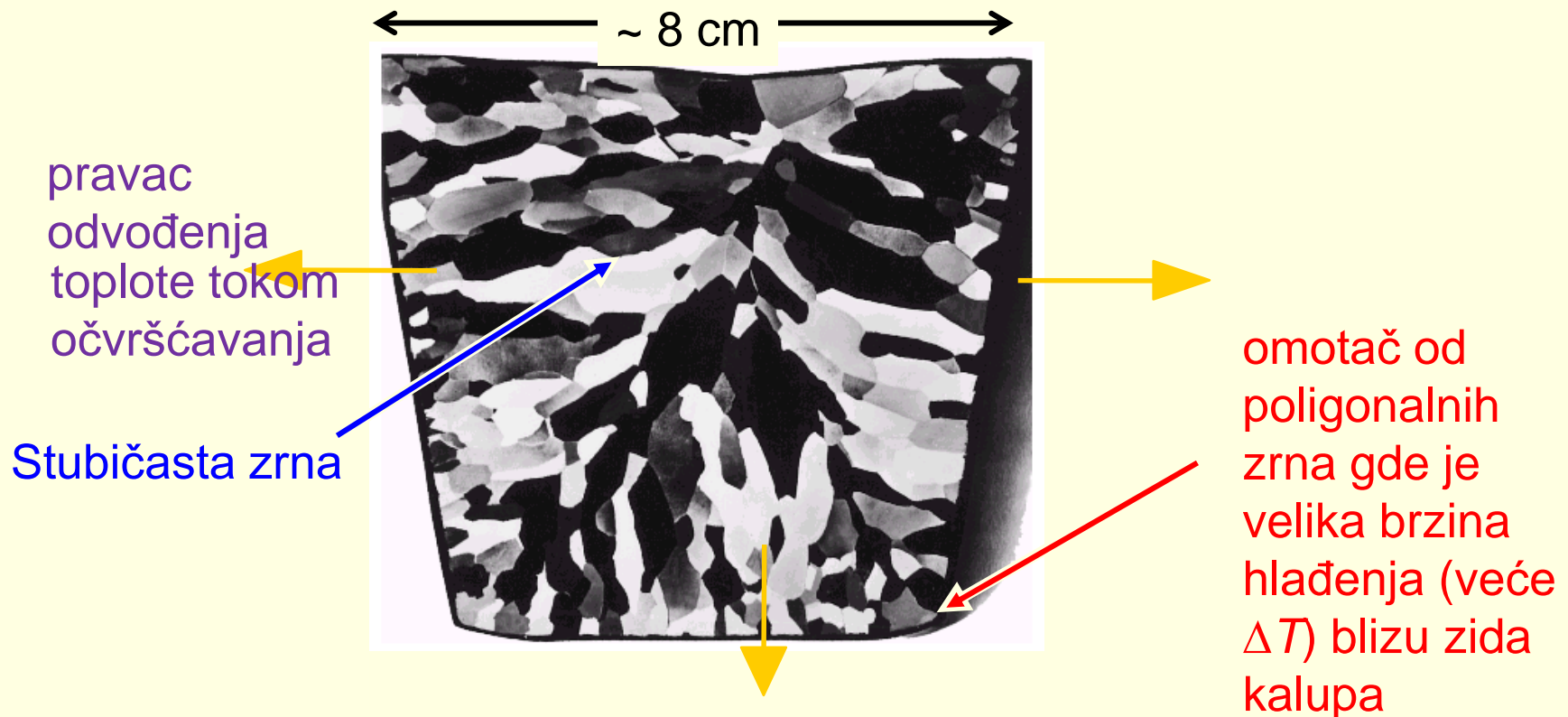
- **Kristali rastu sve dok se ne sudare sa susednim**

# Dislokacije i mehanizmi ojačavanja

## Očvršćavanje

### 1. Smanjenje veličine zrna

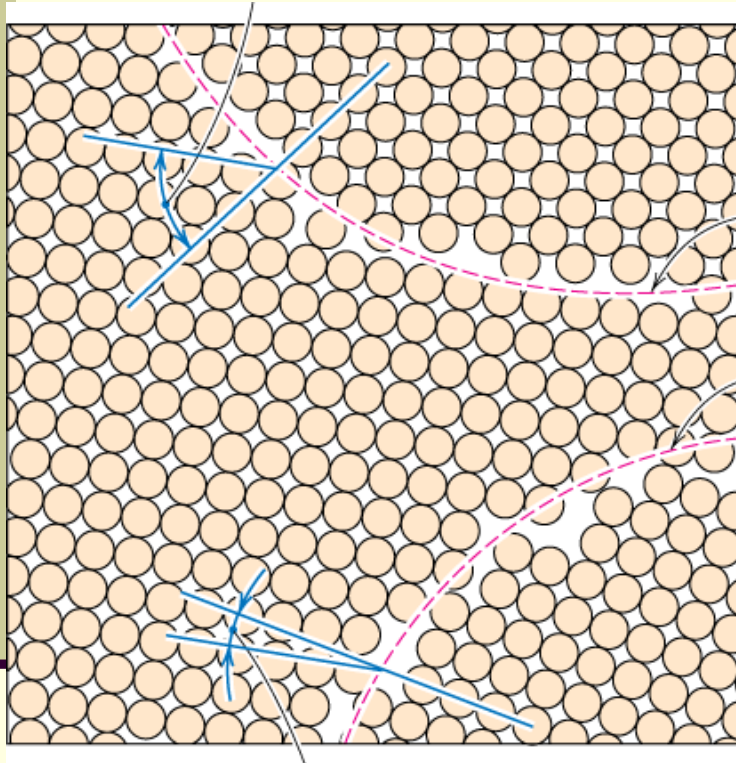
- Zrna mogu biti
- poligonalna (približno iste veličine u svim pravcima)
  - stubičasta (kolumnarna ili izdužena zrna)



**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:

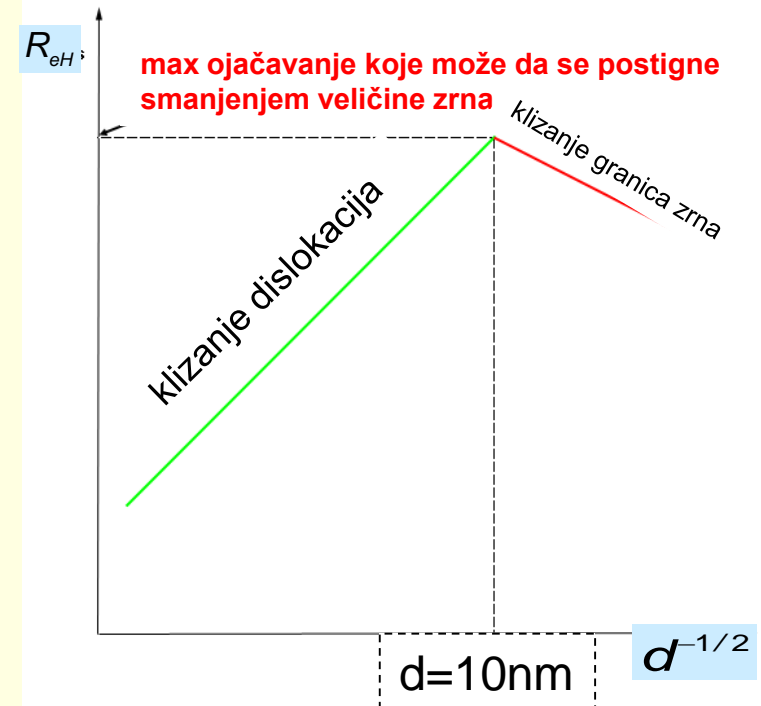
$$R_{eH} = \sigma_o + k_y d^{-1/2}$$

$k_y$  konstanta za materijal  
 $d$  - veličina zrna

$\sigma_o$  – napon za pokretanje dislokacija



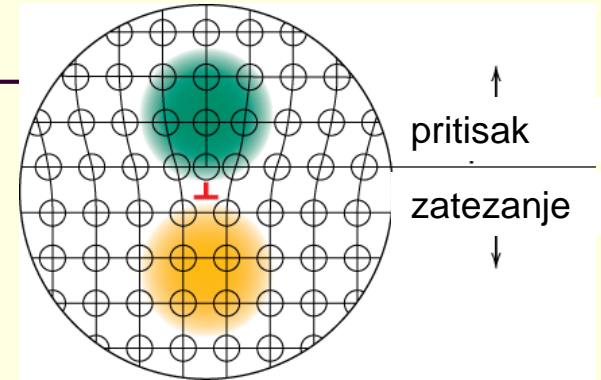
### Granično ojačavanje



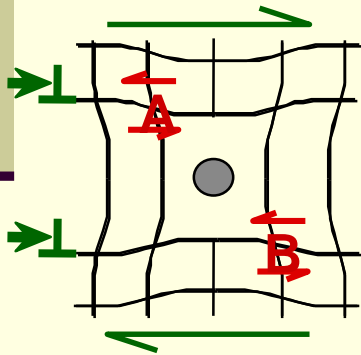
# Dislokacije i mehanizmi ojačavanja

## 2. Ojačavanje čvrstim rastvorom

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

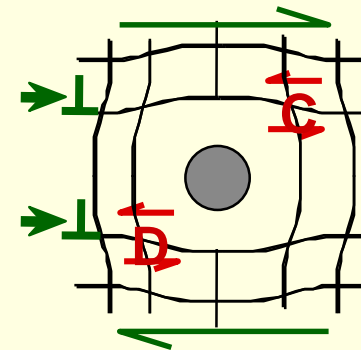


supstitucijski atom manjeg prečnika



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

supstitucijski atom većeg prečnika

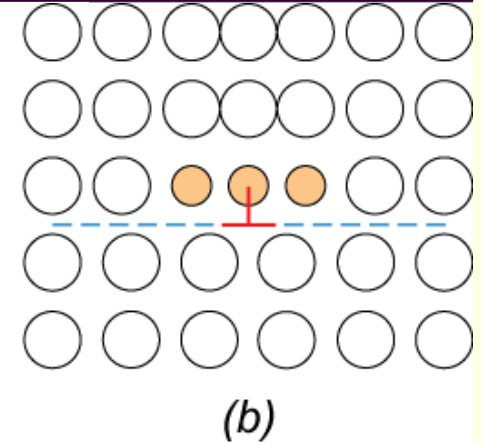
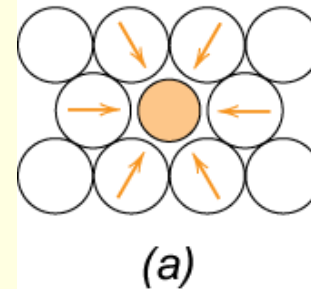


Supstitucijski atomi generišu lokalne napone na mestima **C** i **D** koji se suprotstavljaju kretanju dislokacija u desno

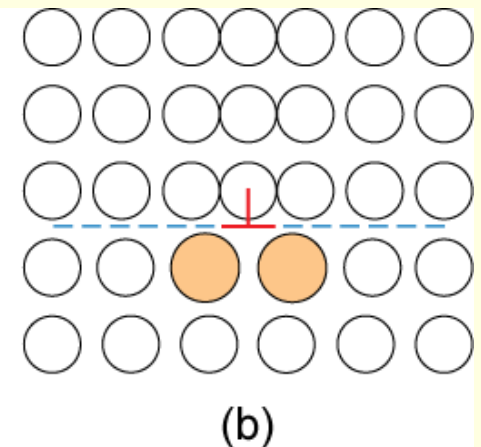
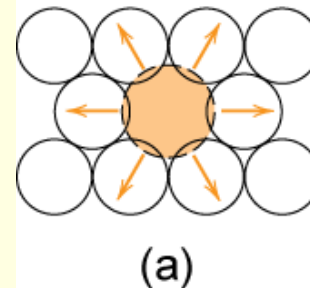
# Dislokacije i mehanizmi ojačavanja

## 2. Ojačavanje čvrstim rastvorom

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



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



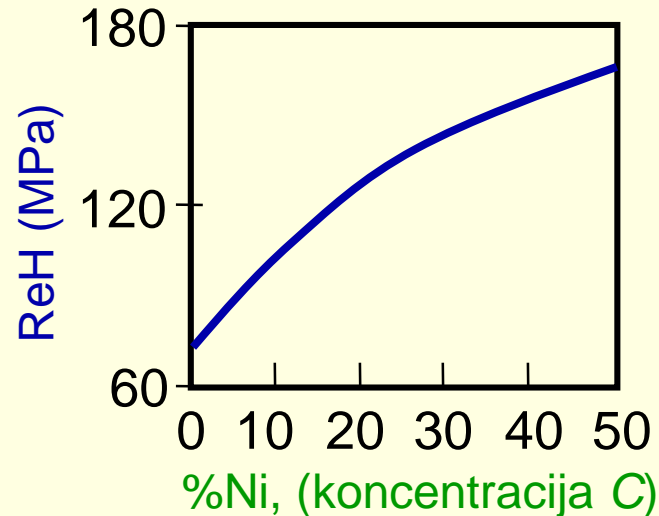
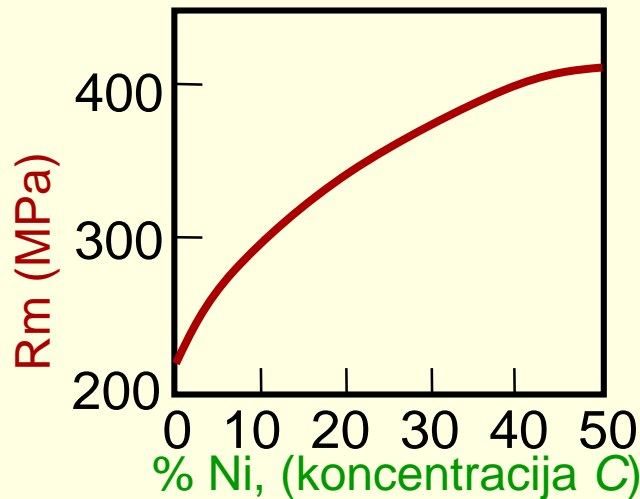
**strani atomi koče dislokacije  $\therefore$  raste čvrstoća**



# Dislokacije i mehanizmi ojačavanja

npr: ojačavanje čvrstim rastvorom bakra Cu

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

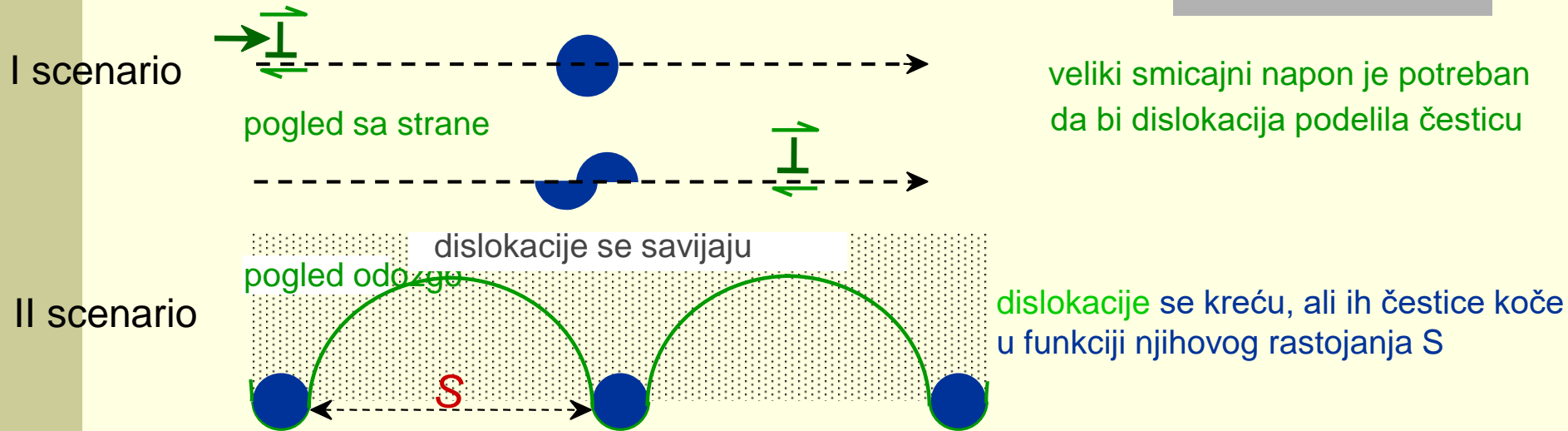


- Empirijska zavisnost čvrstoće od koncentracije:  $\sigma_y \sim C^{1/2}$
- Legiranjem raste  $R_{eH}$  and  $R_m$ .



# Dislokacije i mehanizmi ojačavanja

## 3. Čestično ojačavanje



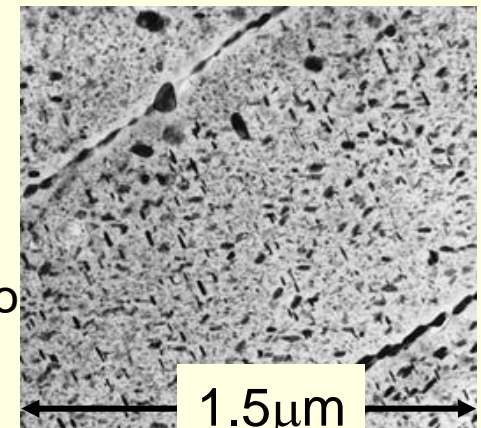
- Tvrde čestice se teško dele kada naiđe na njih dislokacija – bitniji II scenario.

Zavisnost čvrstoće i

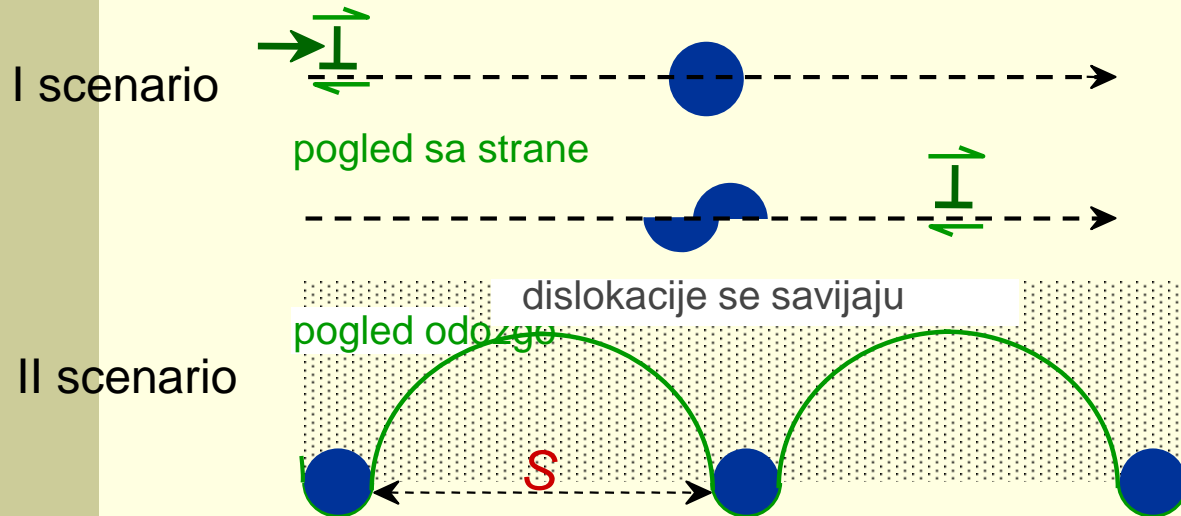
rastojanja između čestica :

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

Al legura ojačana čestično

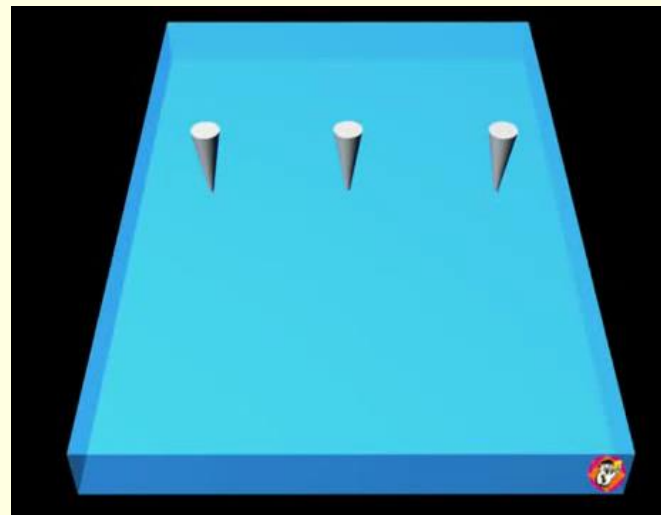
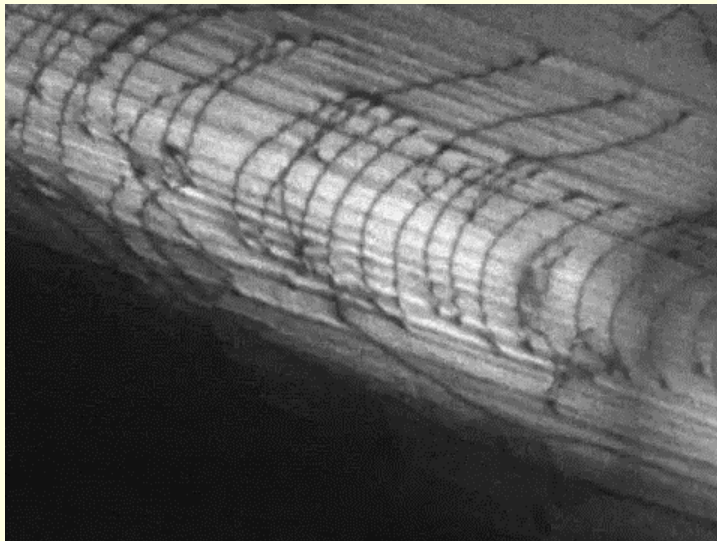


# Čestično ojačavanje



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**

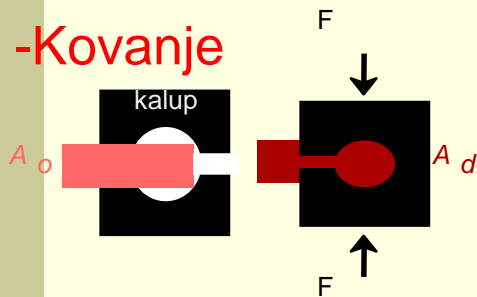
# Dislokacije i mehanizmi ojačavanja

## 4. Deformaciono ojačavanje

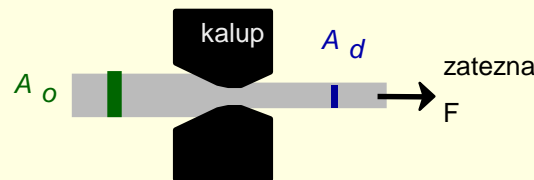
Tokom oblikovanja menja se poprečni presek delova i to se postiže nekom od termomehaničkih obrada: Hladna deformacija nastaje ispod  $T$  rekristalizacije ili na sobnoj  $T$ .

Tokom oblikovanja menja se poprečni presek:

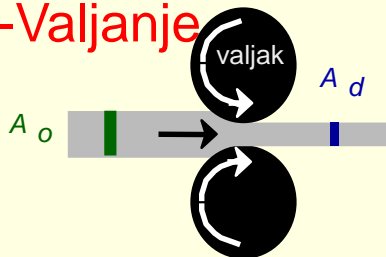
### -Kovanje



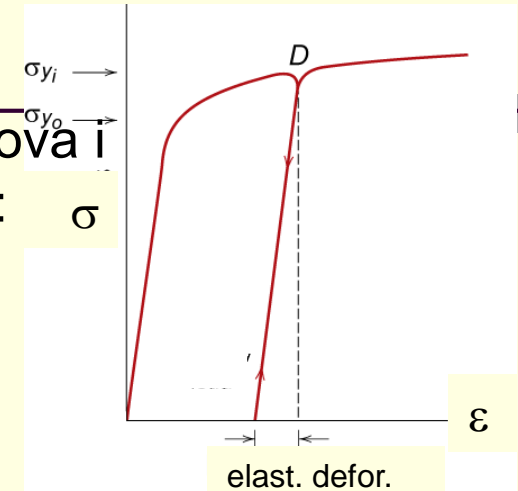
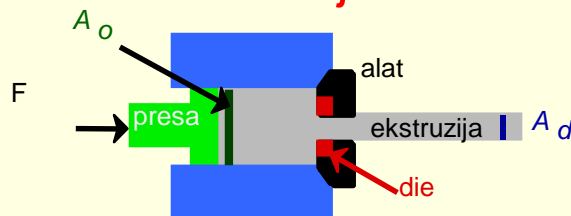
### -Izvlačenje



### -Valjanje



### -Ekstruzija



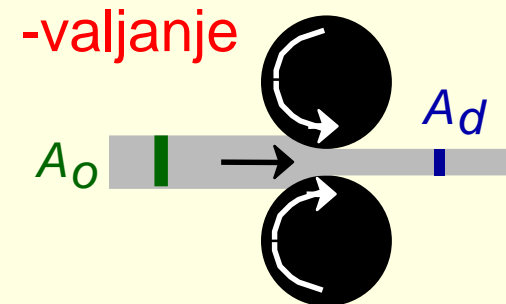
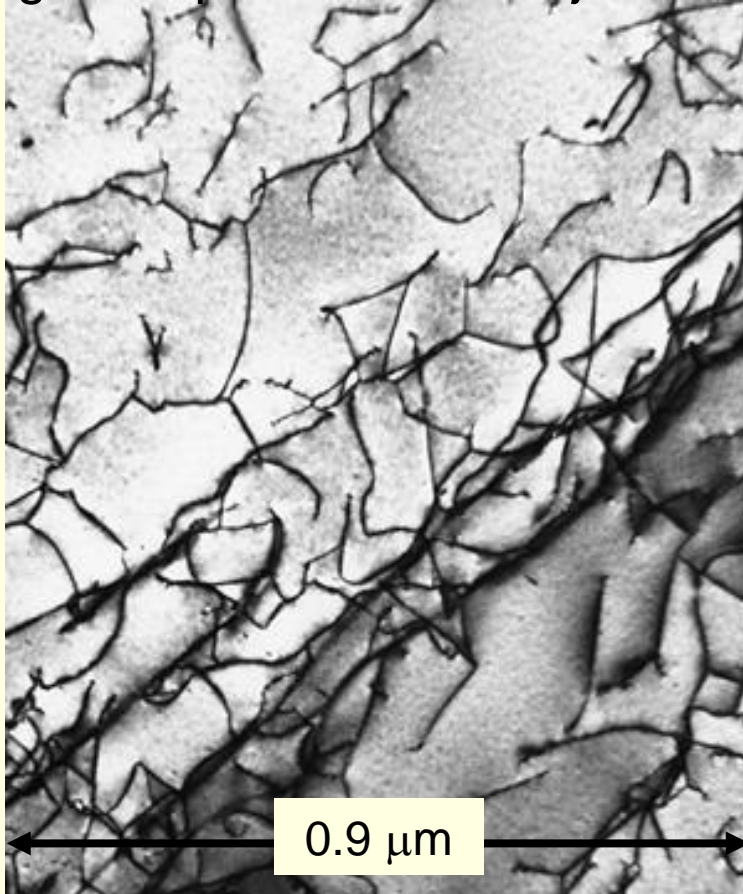
$$\% \text{deform.} = \frac{A_o - A_d}{A_o} \times 100$$

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

# Dislokacije i mehanizmi ojačavanja

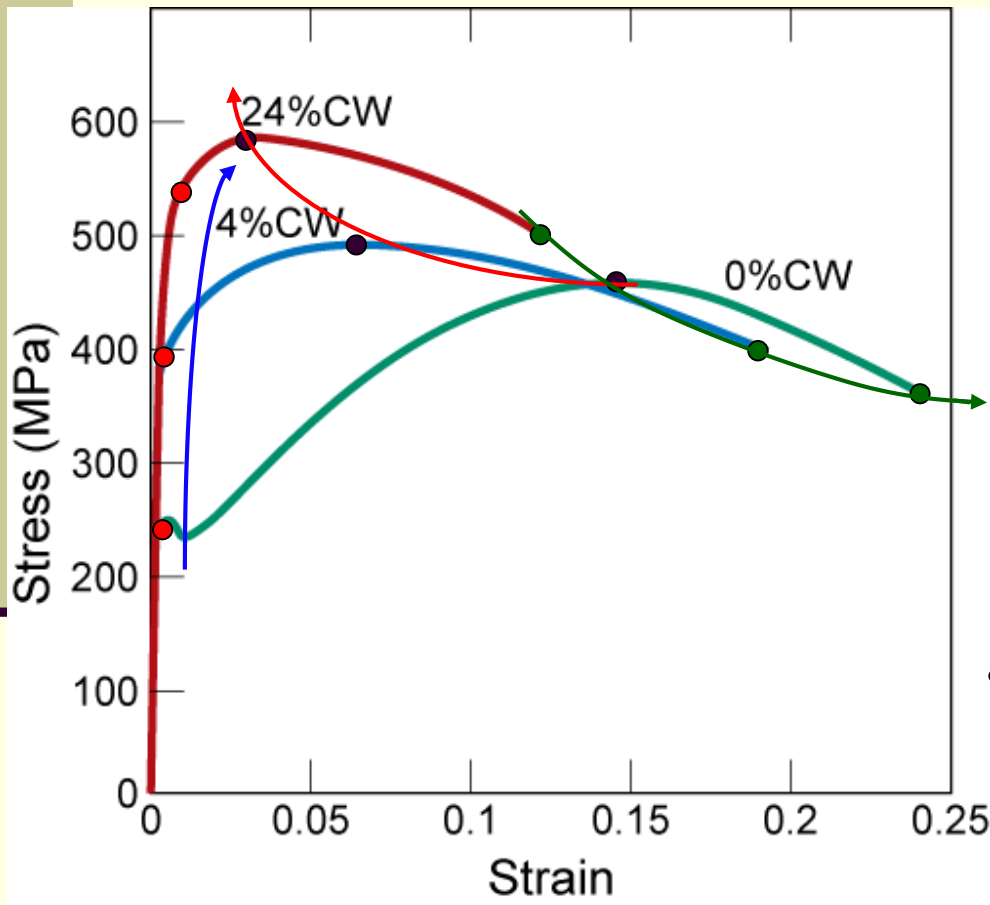
Npr: tokom hladnog valjanja – Deformaciono ojačavanje

- legura Ti posle deformacije na hladno:



- Dislokacije se koče međusobno tokom hladne deformacije i stvaraju nove.
- 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.

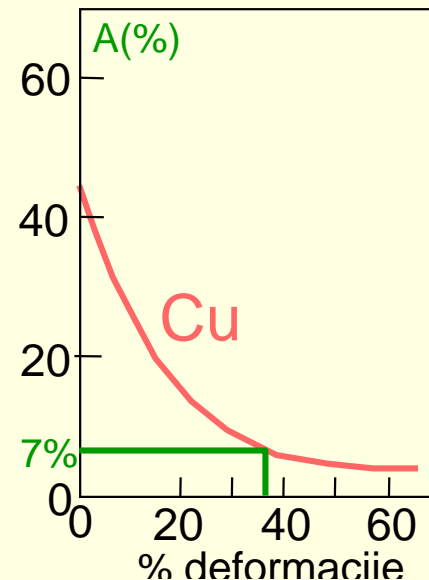
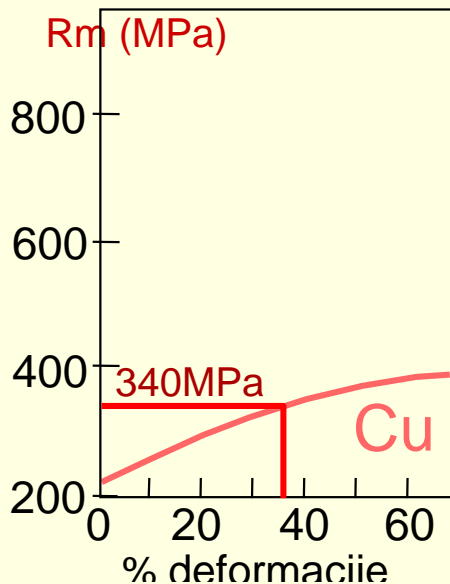
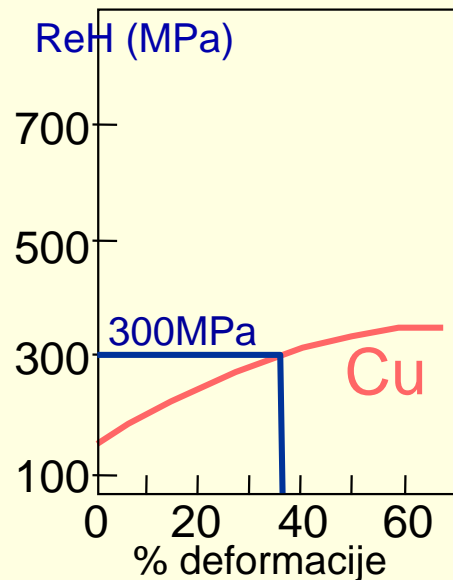
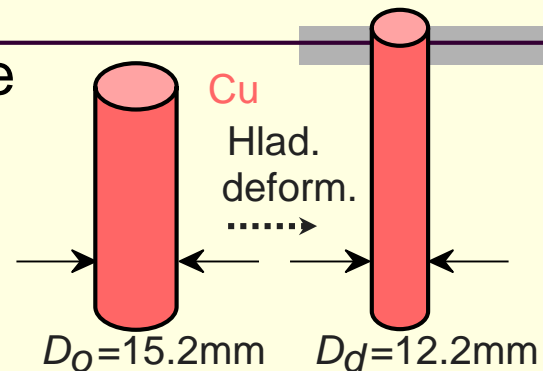


# Dislokacije i mehanizmi ojačavanja

## primer: ojačavanje Cu hladnom deformacijom

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

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



# Dislokacije i mehanizmi ojačavanja

## Rezultat hladne deformacije

■ Gustina dislokacija =  $\frac{\text{ukupna dužina dislokacija}}{\text{jed. zapremnine (ili površine)}} \quad \frac{\text{mm}}{\text{Mm}^3(\text{ili } 2)}$

Monokristal

→  $\sim 10^3 \text{ mm}^{-2}$

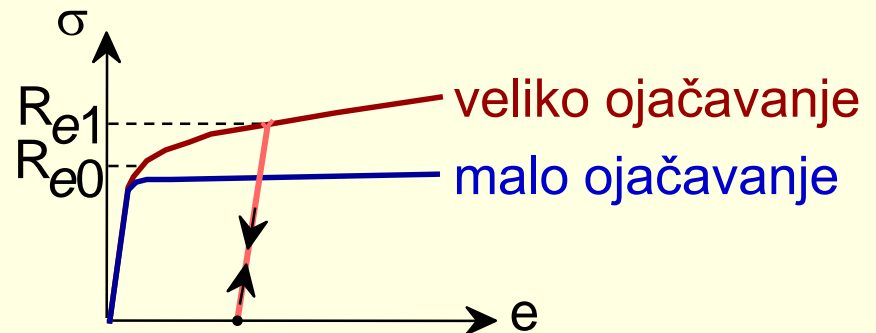
Hladna deformacija uvećava gustinu dislokacija

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

Termička obrada smanjuje gustinu dislokacija

→  $10^5\text{-}10^6 \text{ mm}^{-2}$

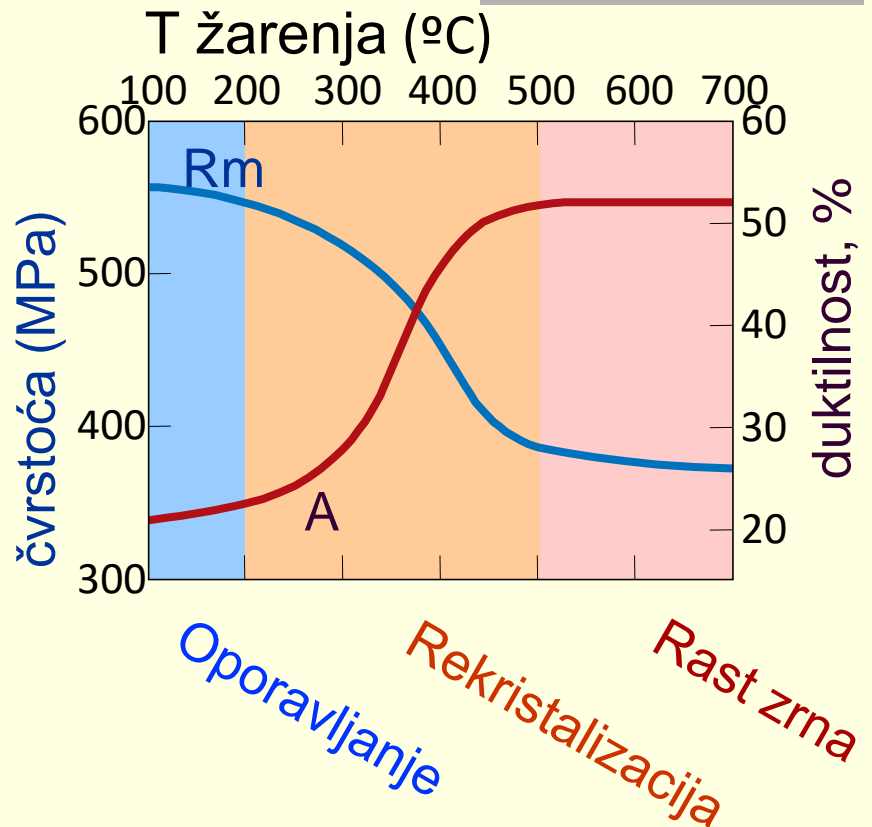
Čvrstoća raste sa %deformacije:



# Rekristalizaciono žarenje

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

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

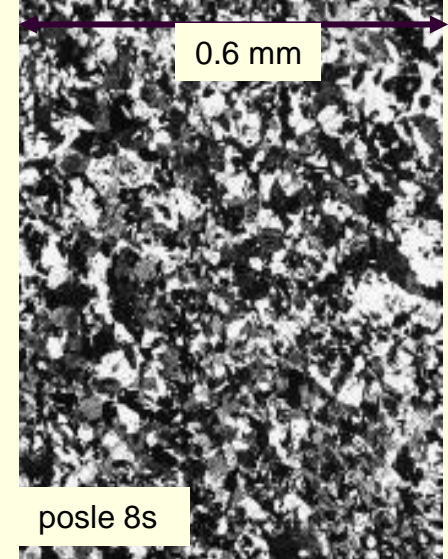
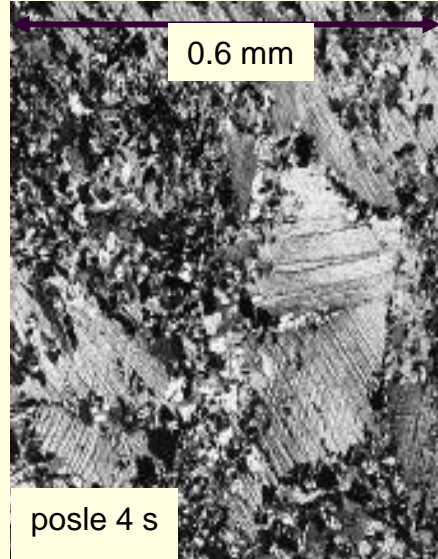
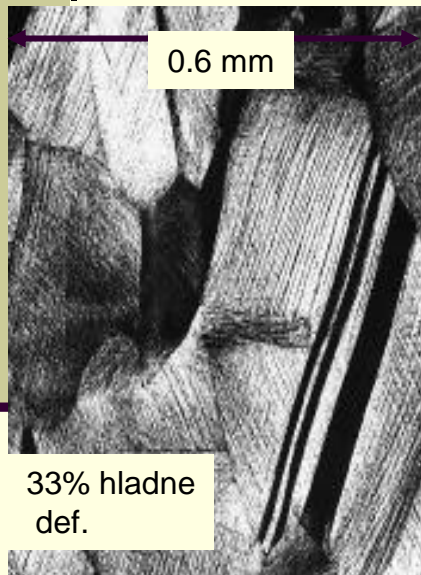


1 h TO na  $T_{\text{žarenja}}$  dovodi do smanjenja  $R_m$  i  $ReH$  i povećanja  $A\%$ .  
Efekat hladne deformacije se poništava!



## Rekristalizacija:

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

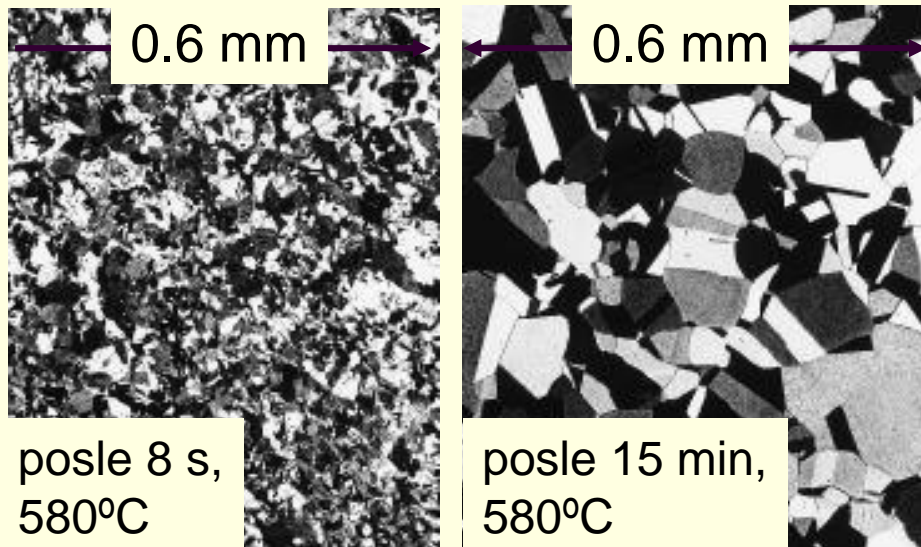


Materijal: mesing



## 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:

prečnik zrna  
u trenutku t

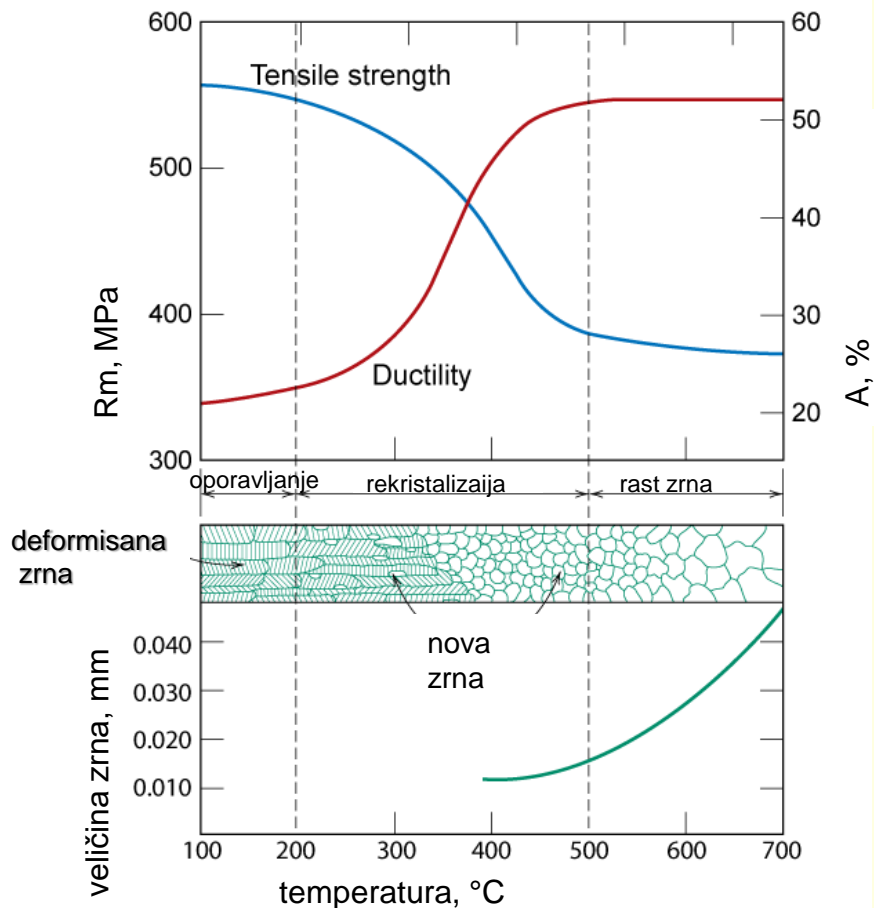
$n \sim 2$

$d^n - d_o^n = Kt$

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  $T_R \approx 0.6 \cdot T_t$ ;

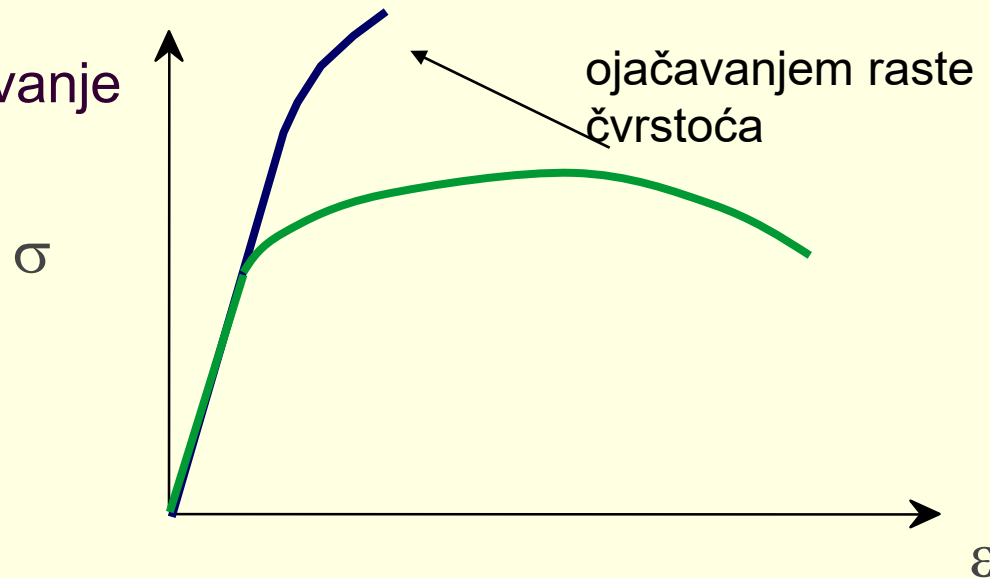
■ Zbog procesa difuzije vreme žarenja i temperatura  $T_R$  su u korelaciji:

- 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

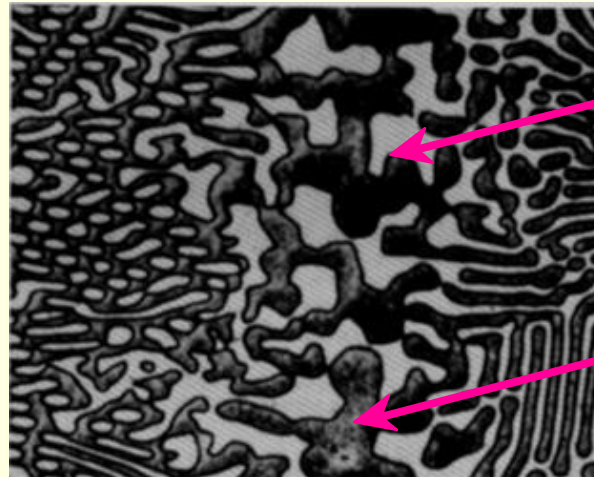


# Fazni dijagrami – dijagrami stanja

Retko se koriste jednokomponentni materijali

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

dvofazna legura



(svetla faza)

(tamna faza)

Reakcije u čvrstom stanju

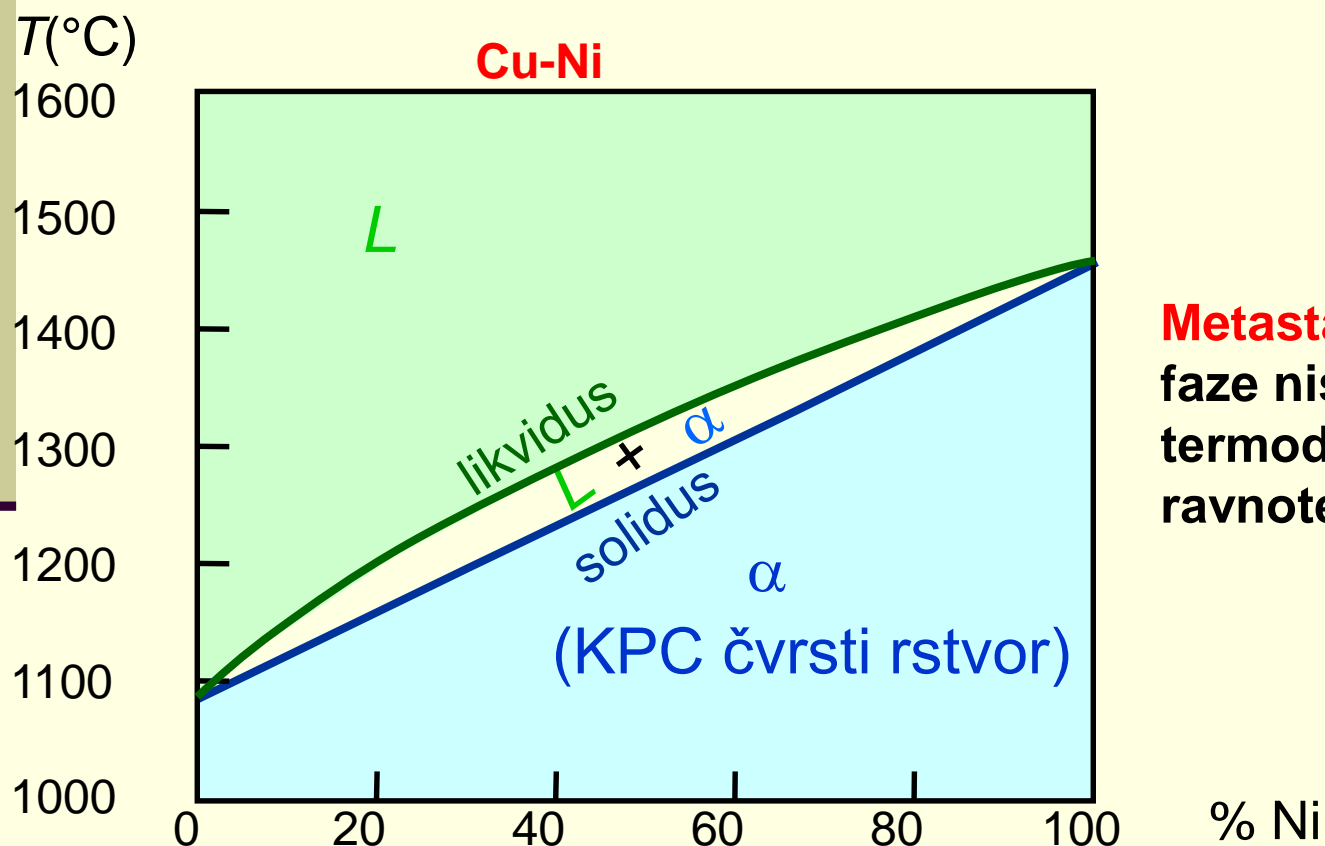
Čvrsti rastvori: Intersticijski i supstitucijski

Mehaničke smeše

Hemijska jedinjenja

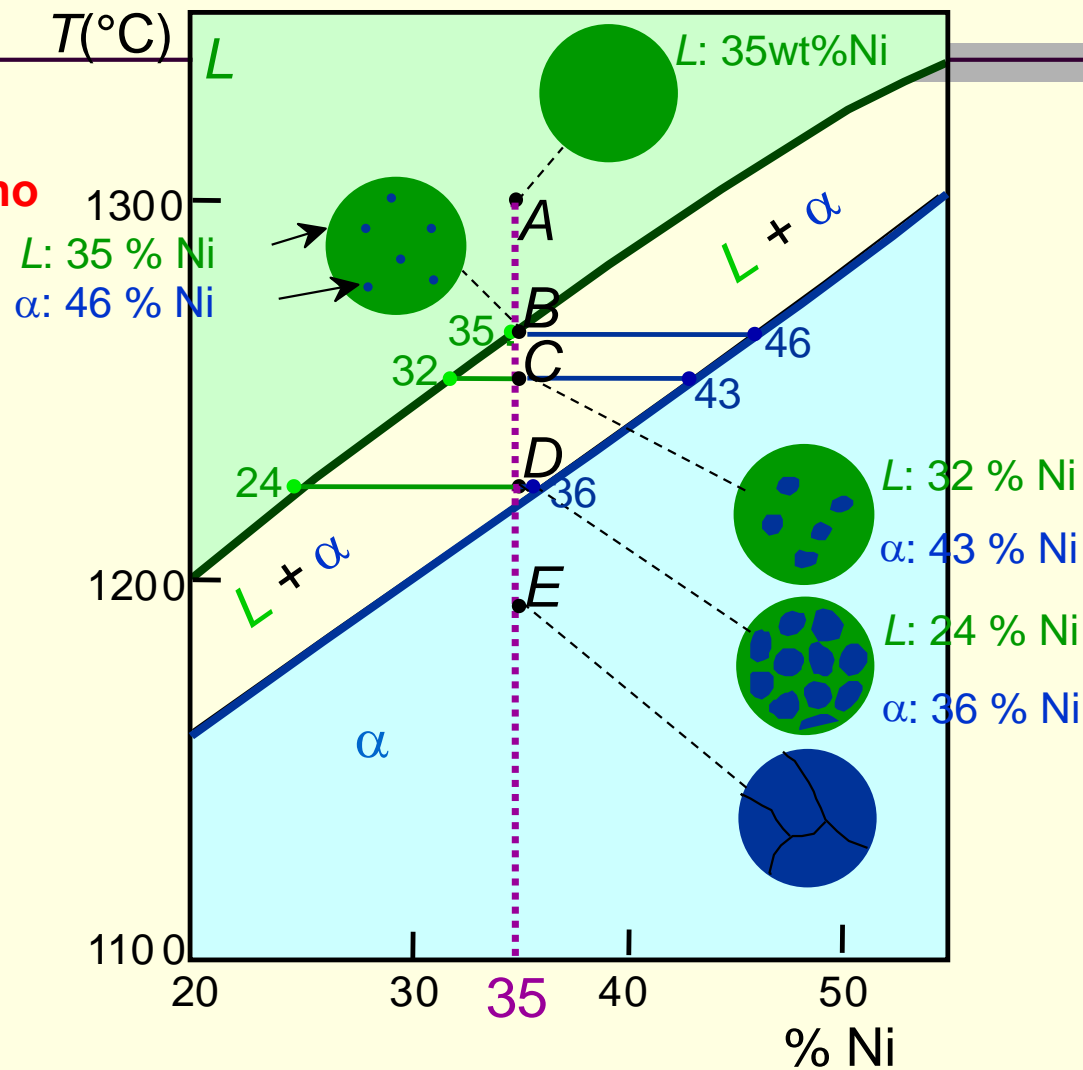
# Dijagrami stanja

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



**Metastabilni dijagrami**  
faze nisu u  
termodinamičkoj  
ravnoteži

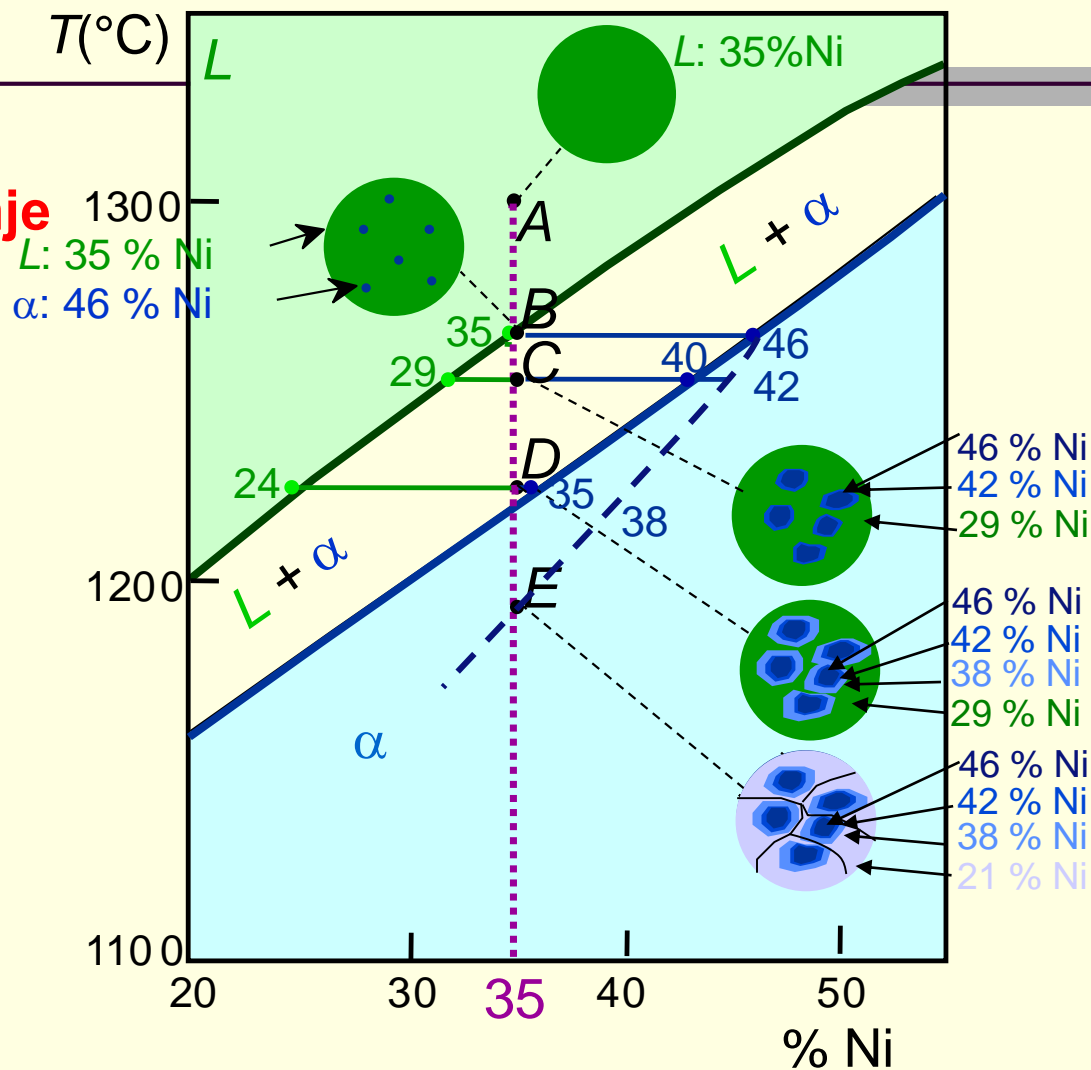
**ravnotežno hlađenje Cu-Ni  
legure  
Kristalizacija teče ujednačeno**





# Neravnotežno hlađenje

## Metastabilni dijagram

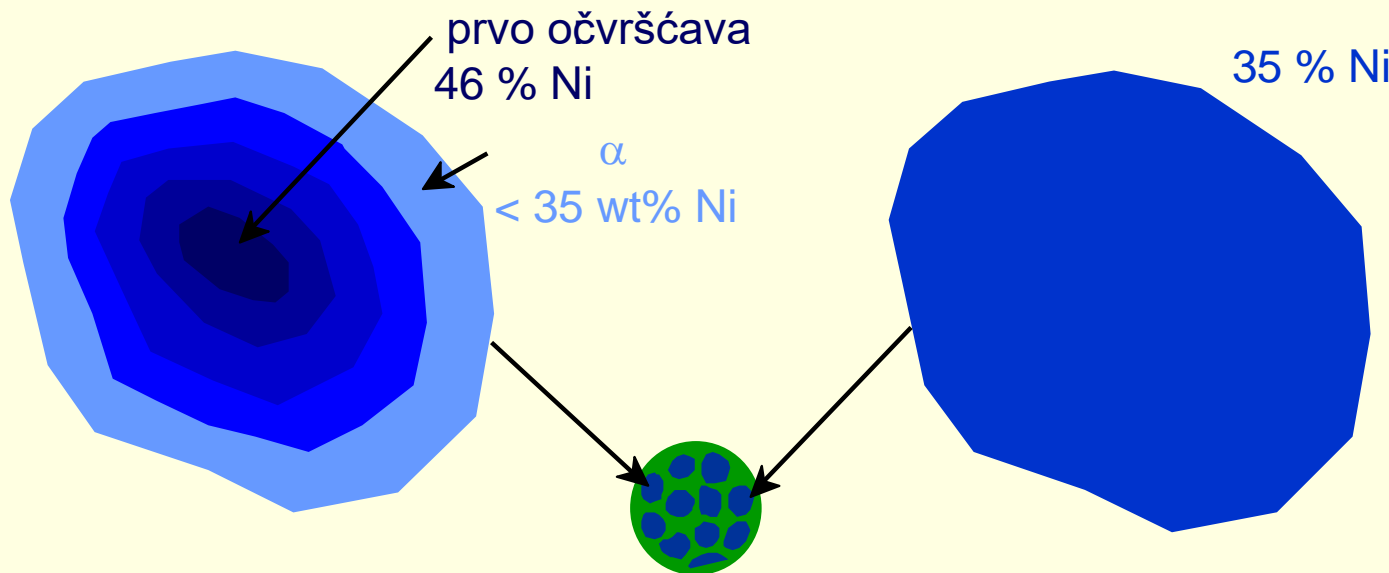


# Metastabilno i ravnotežno hlađenje - razlike

- Brzo hlađenje:  
segregacija

- sporo hlađenje:  
homogena struktura

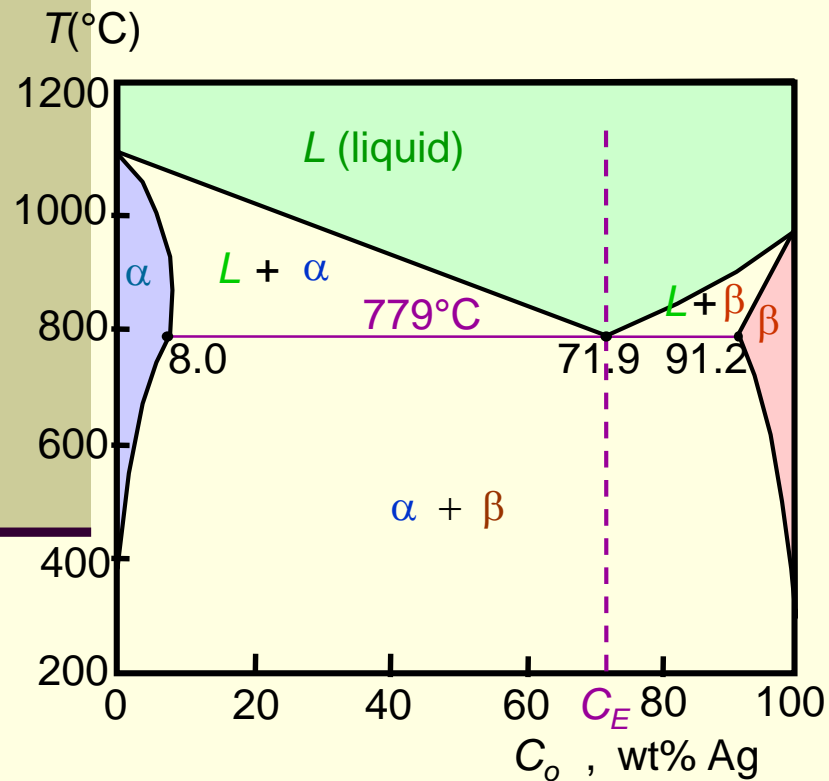
:



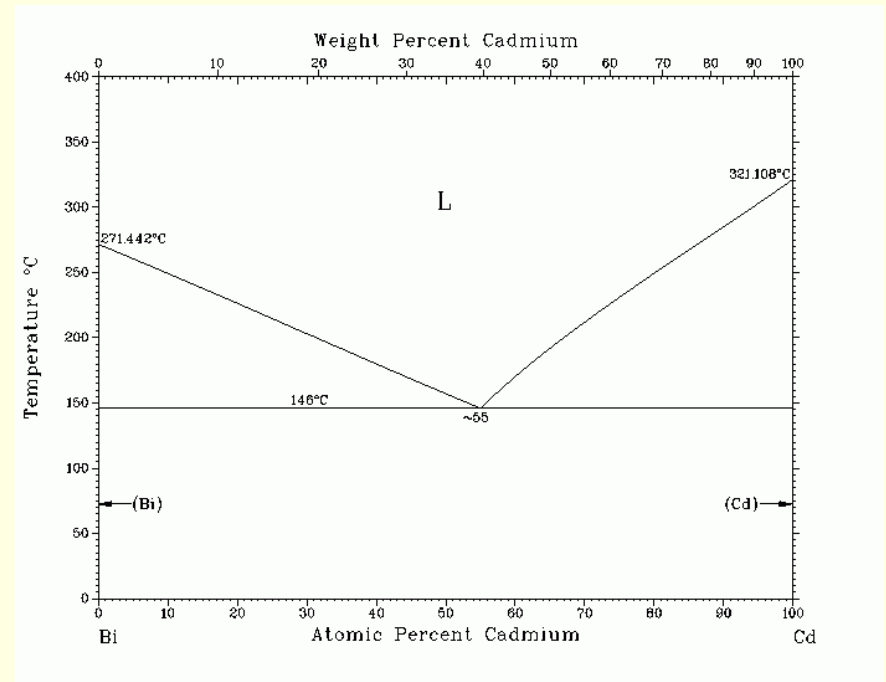
# Dijagrami stanja

potpune nerastvorljivosti i delimične rastvorljivosti u čvrstom stanju

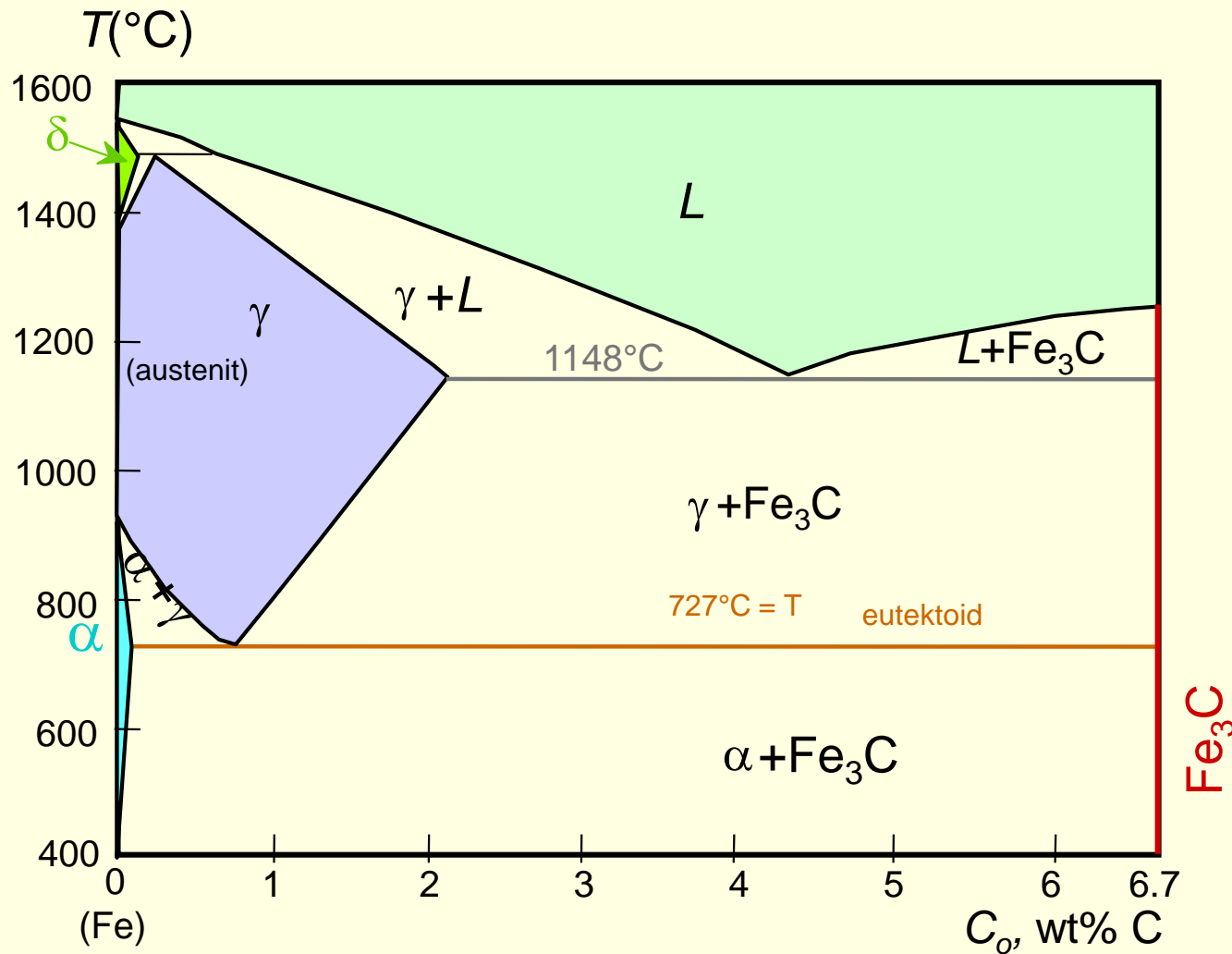
## Cu-Ag



## Cd-Bi



# Dijagram stanja Fe-C



# Polimorfija Fe

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

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

➤  $\alpha$  železo ( $\alpha$ -Fe):

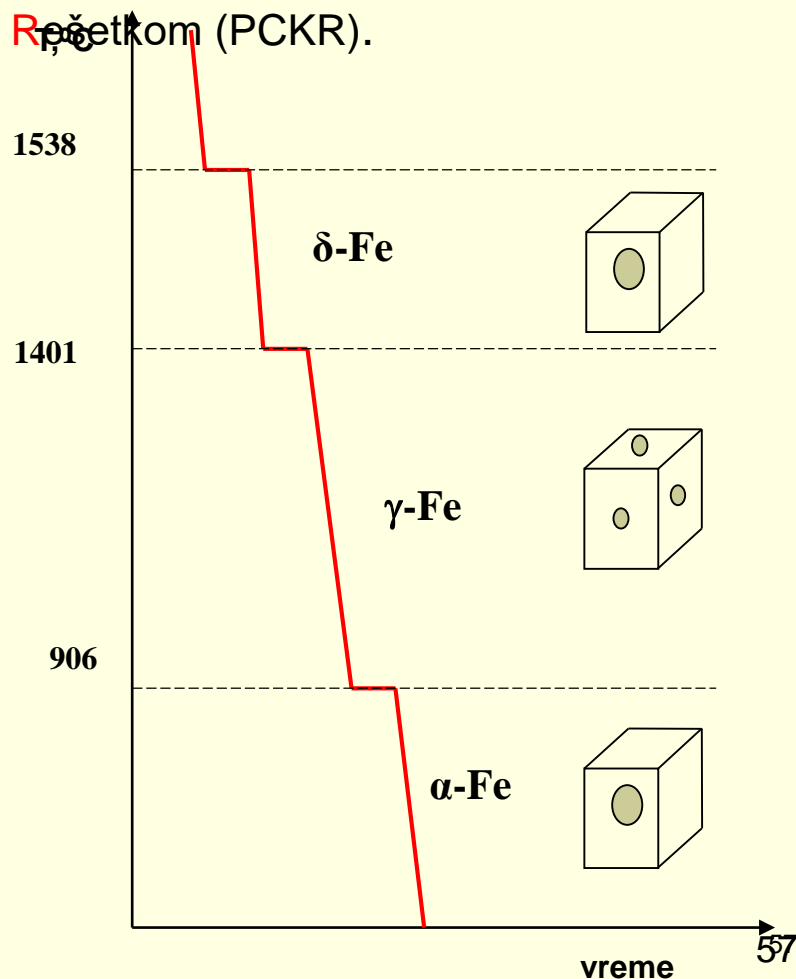
- KZC;
  - $T=20-906\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;
  - fizičke osobine (magnetičnost):
    - $T=20-769\text{ }^{\circ}\text{C} \rightarrow$  feromagnetično  $\alpha$ -Fe,
    - $T=769-906\text{ }^{\circ}\text{C} \rightarrow$  paramagnetično  $\beta$ -Fe.
- ( $\alpha$ -Fe,  $\beta$ -Fe = ZCKR)

➤  $\gamma$  železo ( $\gamma$ -Fe):

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

➤  $\delta$  železo ( $\delta$ -Fe):

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



# Dijagram stanja Fe-C

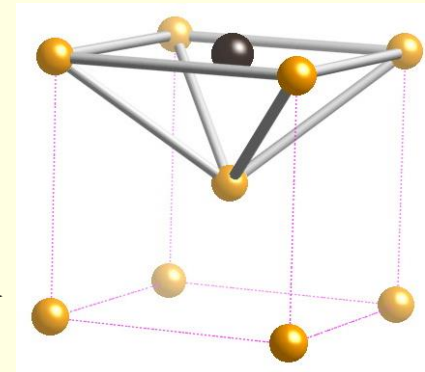
Na metastabilnom dijagramu stanja Fe-Fe<sub>3</sub>C javljaju se 3 osnovne interakcije u čvrstom stanju:

1. **Intersticijski čvrsti rastvori C u Fe:** FERIT( $\alpha$ ), AUSTENIT ( $\gamma$ ) i  $\delta$ -Ferit( $\delta$ ).
2. **Hemijsko jedinjenje:** CEMENTIT (Fe<sub>3</sub>C)
3. **Mehaničke smeše**, kao kombinacija prethodne 2 faze: Perlit (**P**) i Ledeburit (**L**).

## 1. INTERSTICIJSKI ČVRSTI RASTVORI C u Fe:

- **FERIT ( $\alpha$ )** je intersticijski čvrsti rastvor **C** u  **$\alpha$ -Fe**.

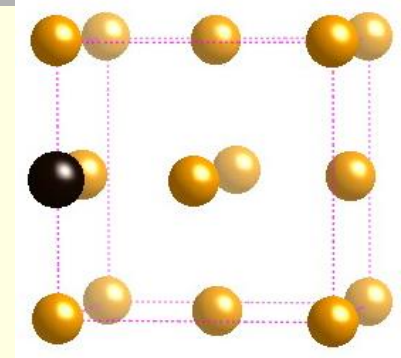
- KZC;
- HB 80;
- $R_m = 280 \text{ N/mm}^2$ ;
- Rastvorljivost **C** u  **$\alpha$** : max = 0,025 %C (na 727°C),  
min = 0,0025 %C (na 20°C).





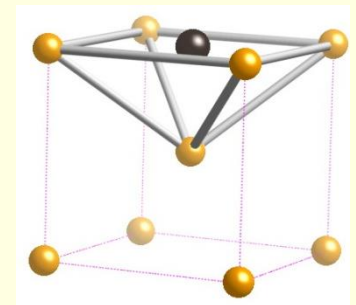
- **AUSTENIT ( $\gamma$ )** je intersticijski čvrsti rastvor **C** u  $\gamma$ -Fe.

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



- **$\delta$ -FERIT** je intersticijski čvrsti rastvor **C** u  $\delta$ -Fe.

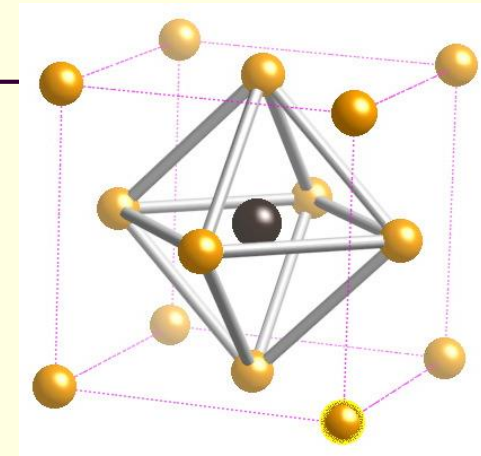
- KZC;
- Max-rastvorljivost **C** u  $\delta$  je 0,09 %C (na 1493°C).
- Postojanost na  $t_{\min} = 1394^\circ\text{C}$ .



## 2. HEMIJSKO JEDINJENJE:

- **CEMENTIT ( $\text{Fe}_3\text{C}$ )** 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 ( $\gamma$ )** i **cementita ( $\text{Fe}_3\text{C}$ )**!

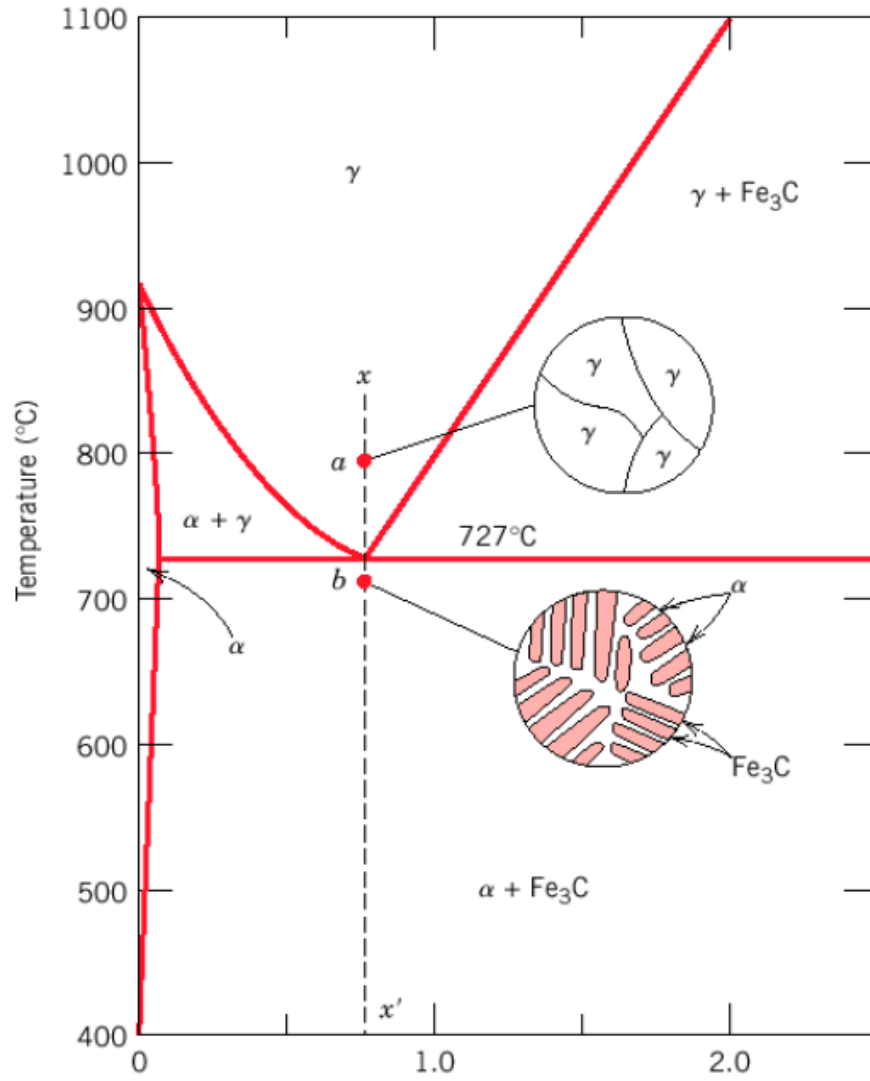
Nastaje eutektičkom reakcijom:  $R \xrightarrow{1147^\circ\text{C}; 4,3\% \text{C}} L(\gamma_{2,14\% \text{C}} + \text{Fe}_3\text{C}_{6,67\% \text{C}})$

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

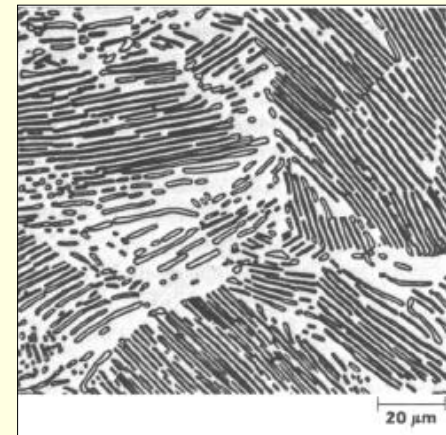
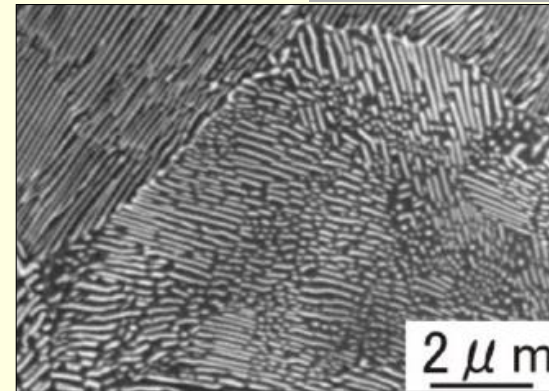
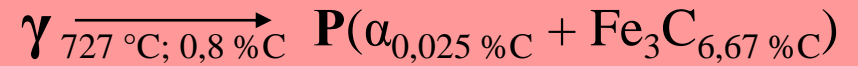
- **PERLIT (P)** je mehanička smeša **ferita ( $\alpha$ )** i **cementita ( $\text{Fe}_3\text{C}$ )**!

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

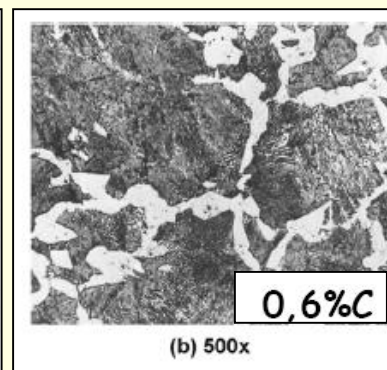
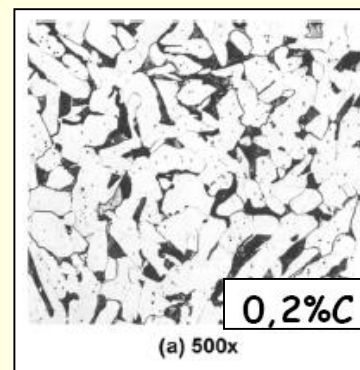
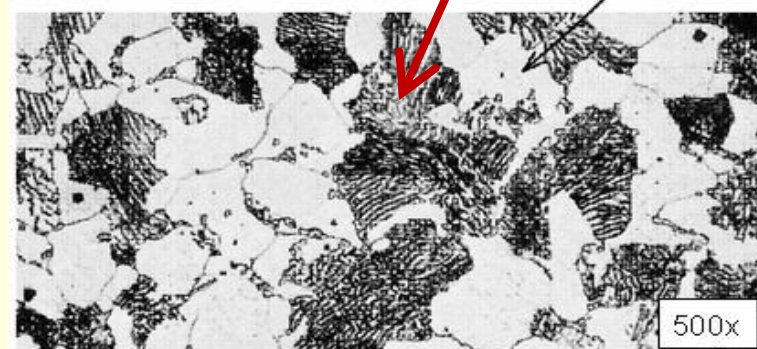
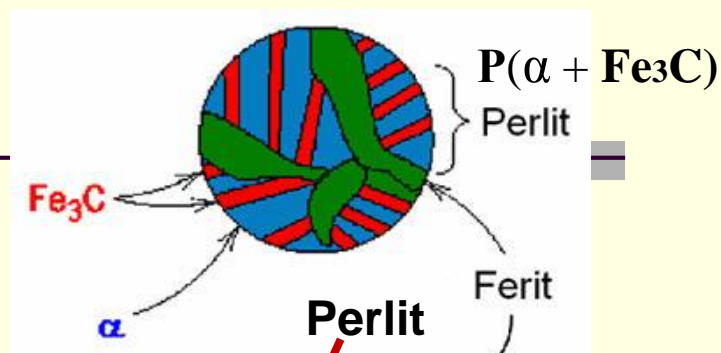
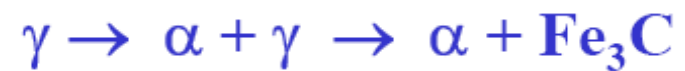
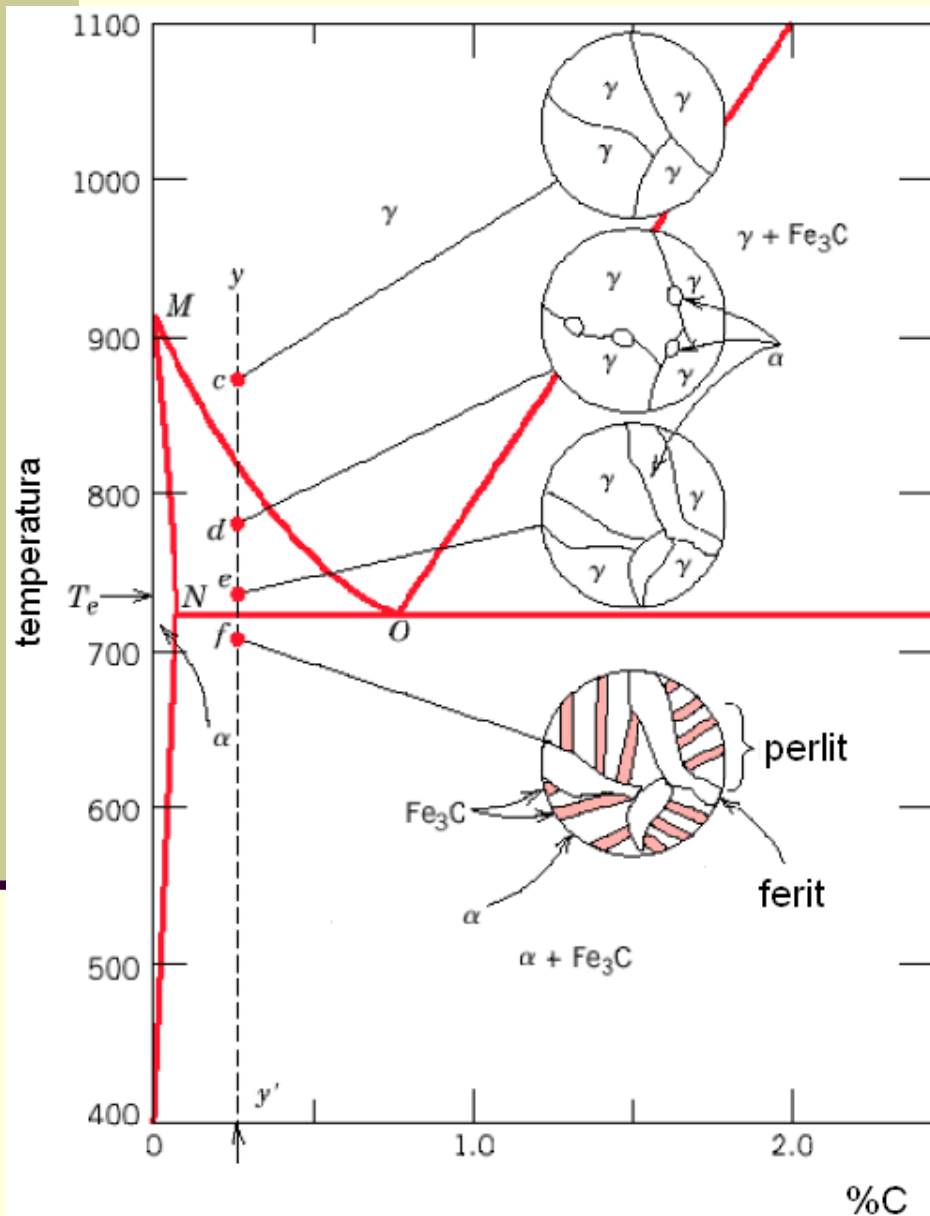


## PERLIT



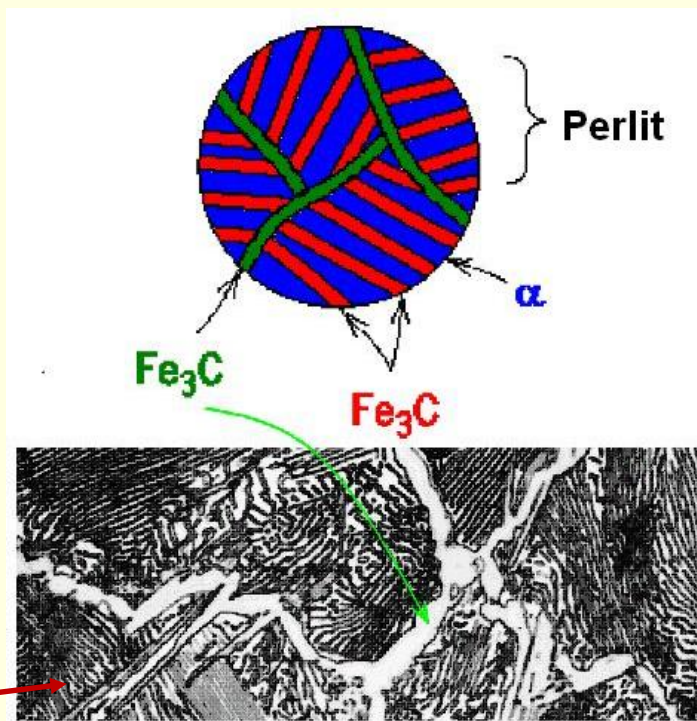
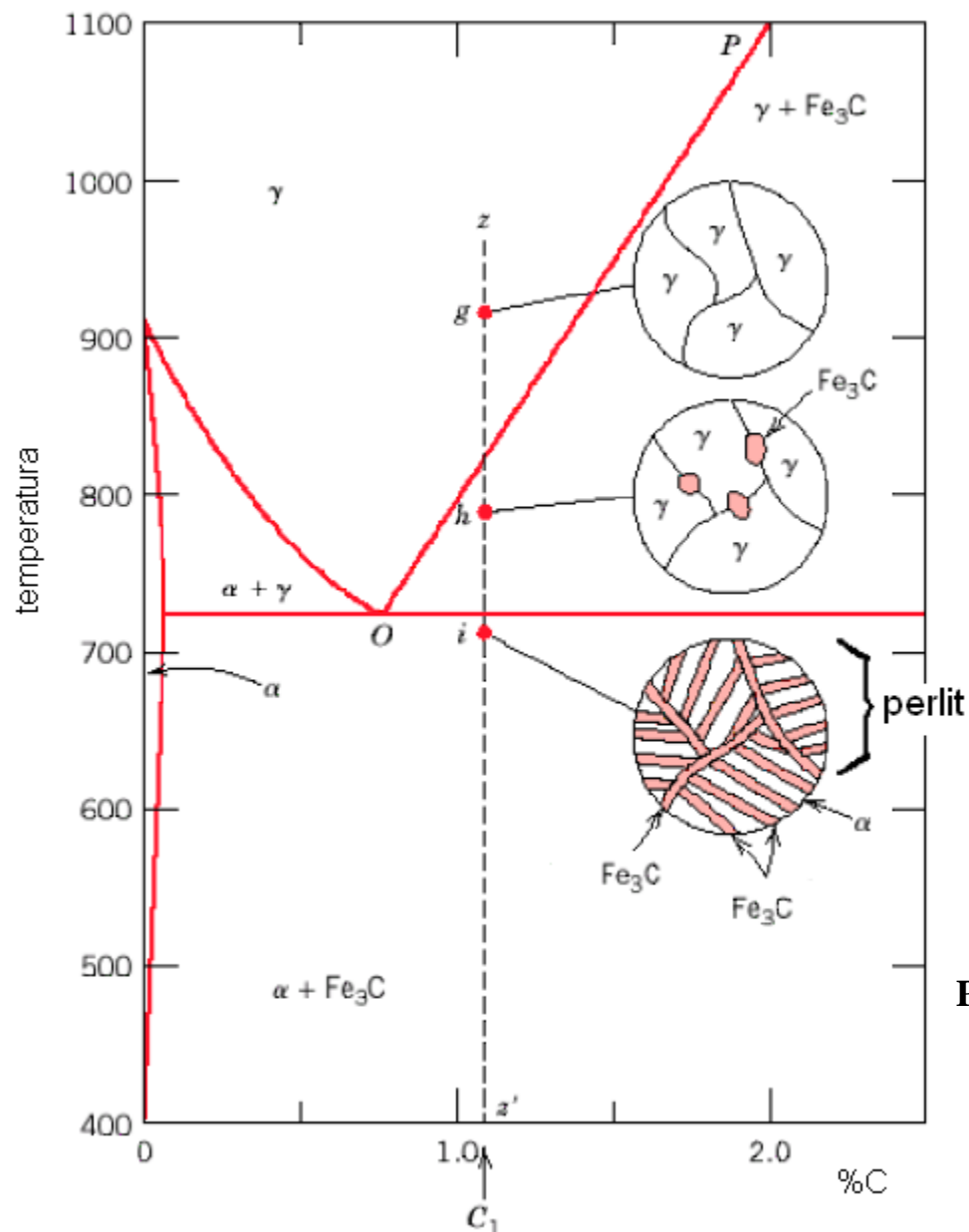
**Mikrostruktura perlita**

# PODEUTEKTOIDNI ČELICI



Mikrostrukture podeutektoidnih čelika

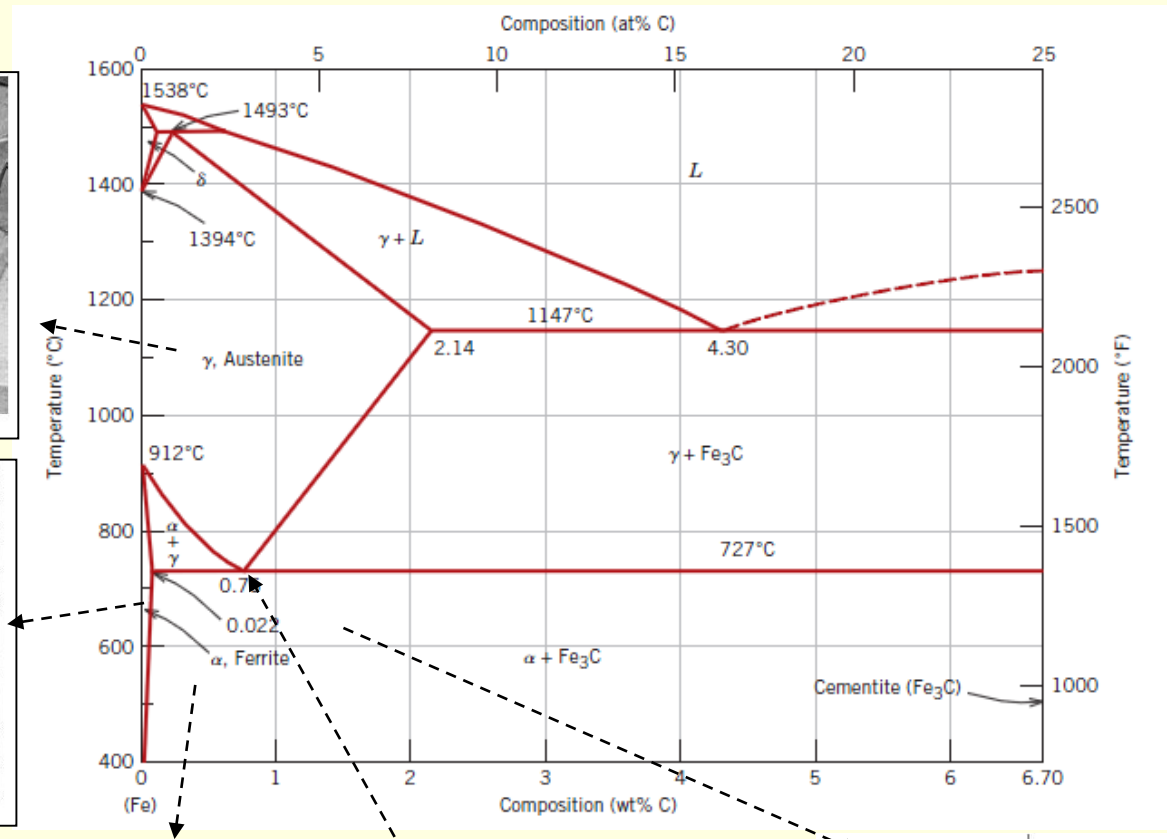
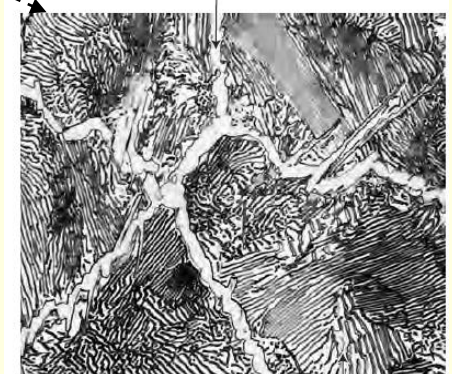
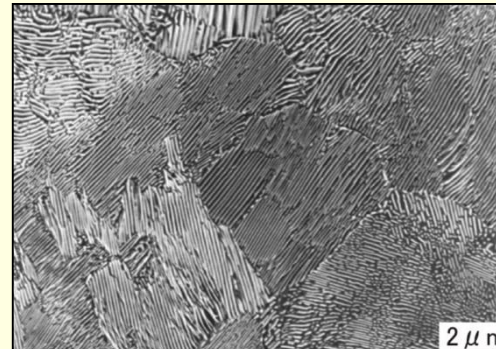
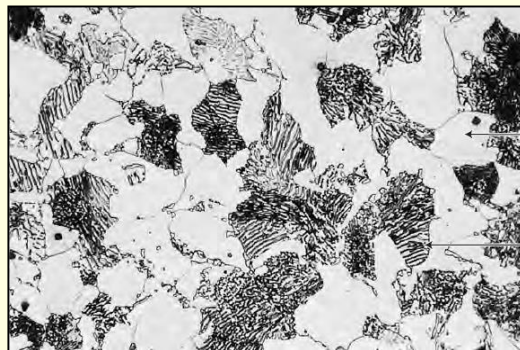
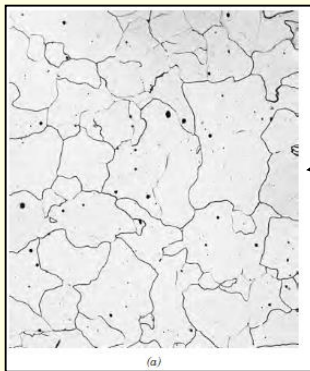
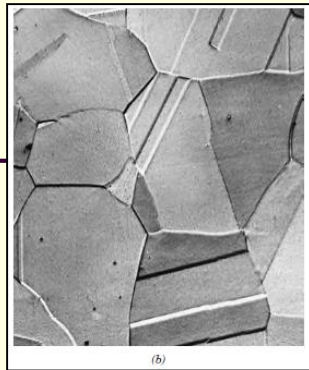
# NADEUTEKTOIDNI ČELICI



Perlit

Mikrostruktura nadeutektoidnog čelika

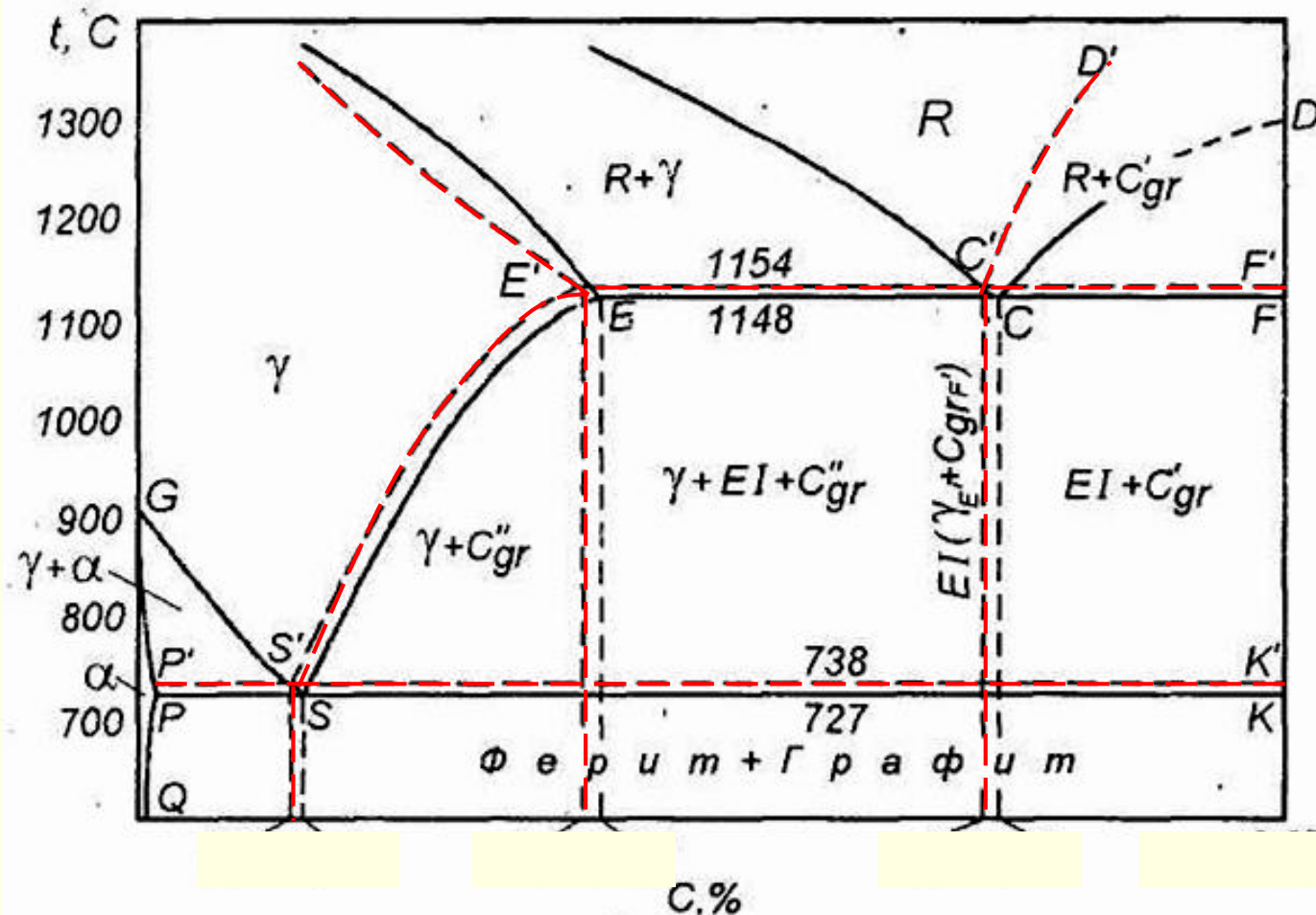






## Stabilni dijagram stanja (Fe-C)

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



---

■ Hvala na pažnji😊