

## Mašinski materijali 3

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

1

1

## 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.

2

2

## Vrste grešaka kristalnih struktura

- praznine
- interstijali
- 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

- prslina, uključci, čestice

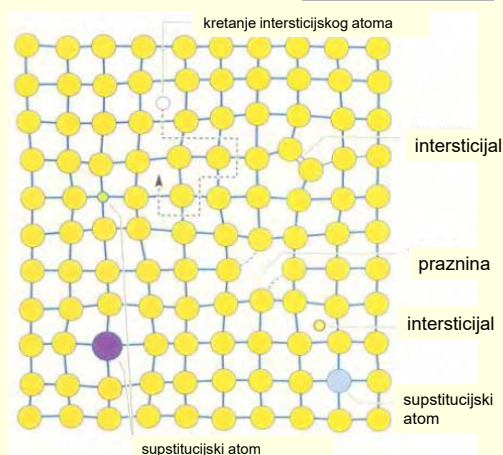
### Zapreminske greške

3

3

## Tačkaste greške

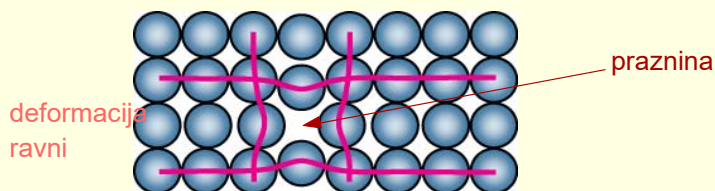
**Tačkaste greške imaju veliki uticaj na fizičke osobine materijala** (npr. na električni otpor) kao i na **mehaničke osobine** (npr. na tvrdoću).  
**Omogućuju difuziju.**



4

4

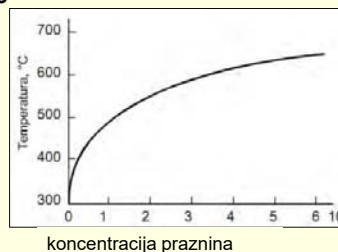
## Tačkaste greške - praznine



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.



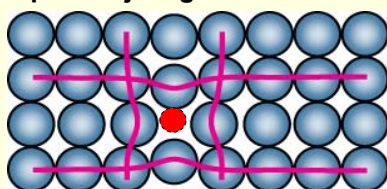
5

## Tačkaste greške – supstitucijski atom

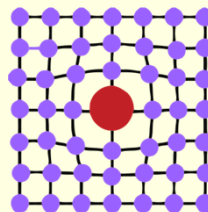
Strani atom (B) može da zazuze mesto zamenom u osnovnoj rešetki elementa A – ova vrsta greške se naziva **supstitucijski atom** (supstitucija znači zamena)

**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

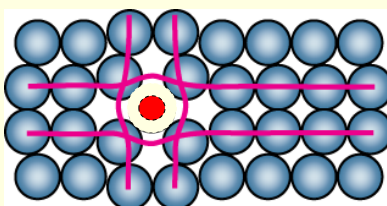
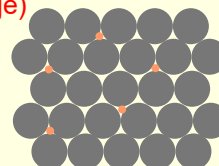
6

## 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 rešetke se na mestu intersticijskog atoma deformiše. **Deformacija je znatno viša u poređenju sa supstitucijskim atomom**

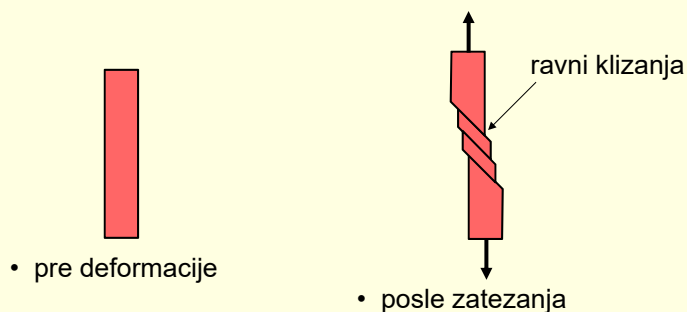
7

## 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):

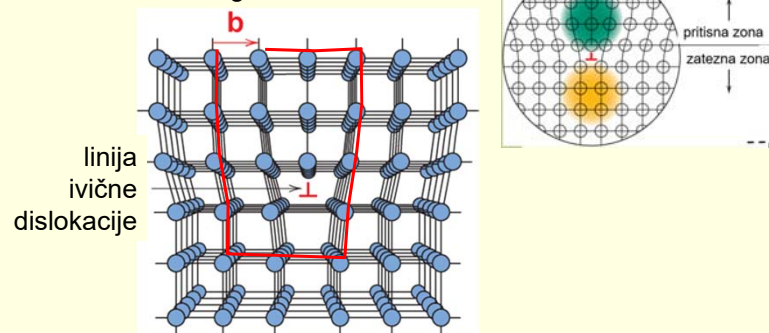


8

## Dislokacije - Ivična dislokacija

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

Burgersov vektor

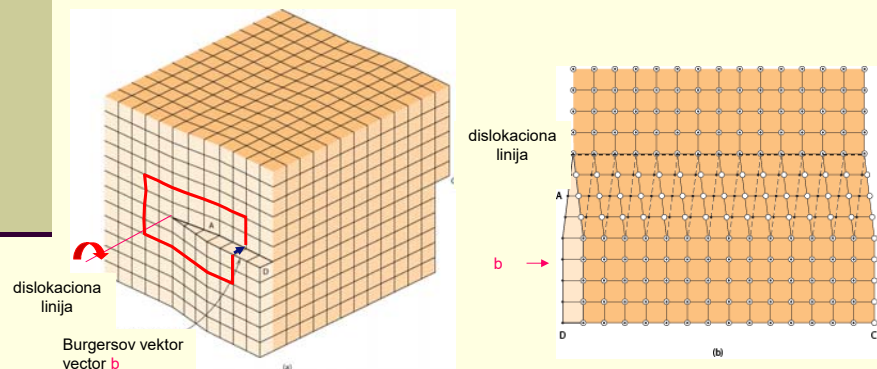


Rešetka se deformiše za jedno međuatomsko mesto – plastična def. Ova vrednost se naziva Burgersov vektor,  $\mathbf{b} \perp$  na ivičnu dislokaciju

9

## Dislokacije - Zavojna dislokacija

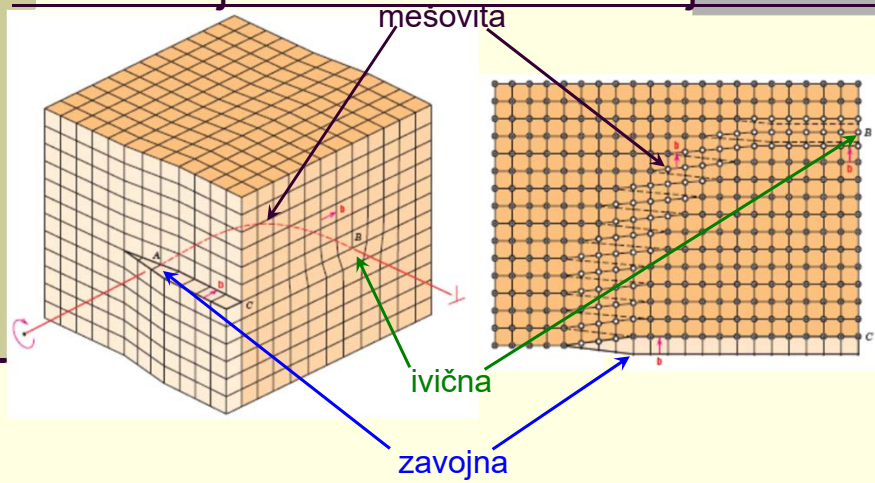
**Zavojna dislokacija:** nastaje spiralnim pomeranjem ravni usled delovanja smicanja



$\mathbf{b} \parallel$  je paralelan sa dislokacijom linijom

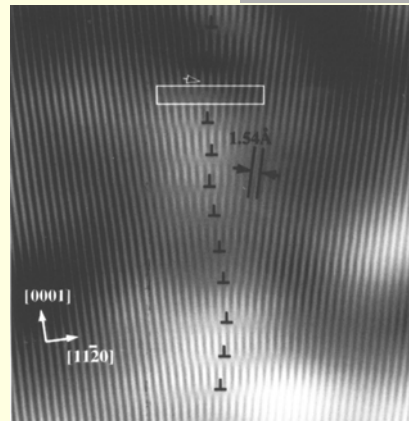
10

## Dislokacije - mešovita dislokacija



11

## Dislokacije – izgled u materijalu



Dislokacije: levo – mreža, desno – granica subzrna

12

## Dislokacije – izgled u materijalu



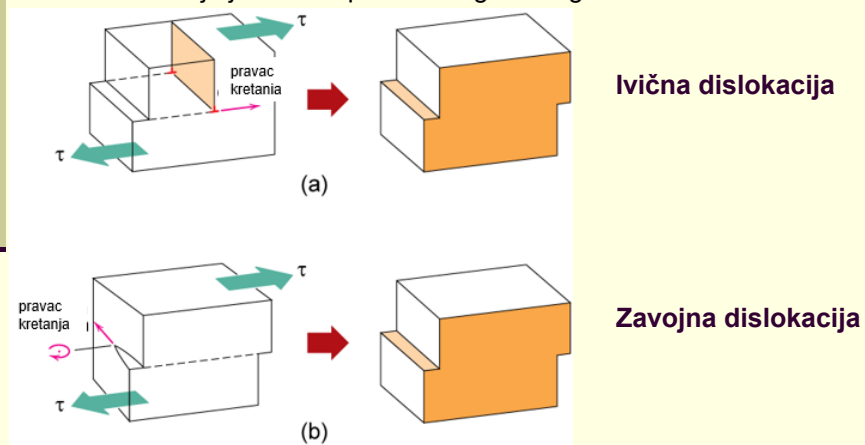
Dislokacije su vidljive pod velikim uvećanjima - elektronski mikroskop (TEM)

13

13

## Kako nastaje vidljiva deformacija

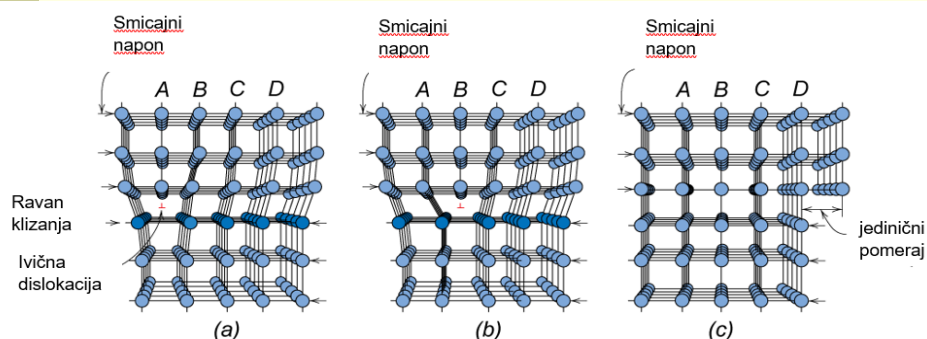
- Dislokacije se kreću preko **ravni klizanja** u **pravcu klizanja** normalno na dislokacionu liniju
- Pravac klizanja je isti kao pravac burgersovog vektora



14

## Klizanje 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 **klizanje dislokacija**.

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

15

## Klizanje dislokacija

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

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

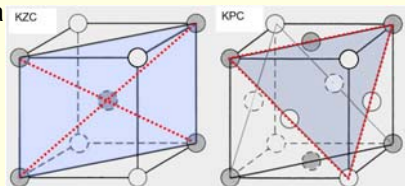
16

16



## Sistemi klizanja dislokacija:

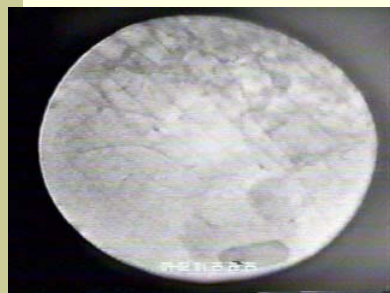
- **Ravan klizanja** – ravan u kristalnoj rešetki po kojoj je najlakše klizanje dislokacija – ima najveću gustinu pakovanja atoma
- **Pravac klizanja** – pravac u kome je najlakše klizanje dislokacija - ima najveću gustinu pakovanja atoma



- 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**

17

## Kretanje dislokacija



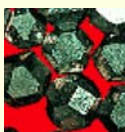
18

18

## Površinske greške – granice zrna

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

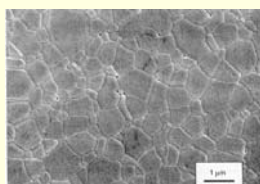
-dijamantski monokristali  
za skidanje površine abrazijom



-lopatice gasnih  
turbina



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



polikristalni materijali



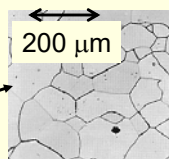
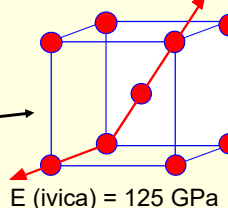
19

19

## Poređenje monokristala i polikristala

- Monokristal
  - Osobine zavise od pravca  
**anizotropan**.
  - Npr: modul elastičnosti kod KZC  
rešetke Fe
- Polikristali
  - Mogu da budu kvaziizotropni
  - Ako su zrna nasumično orijentisana –  
**kvaziizotropna struktura**

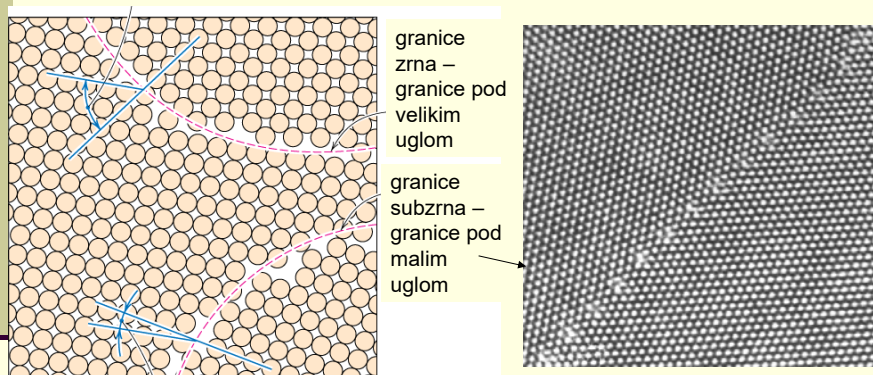
$E$  (dijagonala) = 273 GPa



20

20

## Površinske greške - granice zrna i subzrna



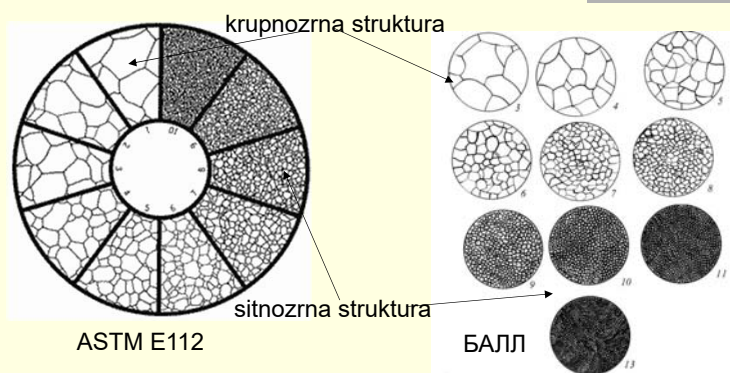
Svako "zrno" je približno jedan monokristal.

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

21

21

## Površinske greške – veličina zrna



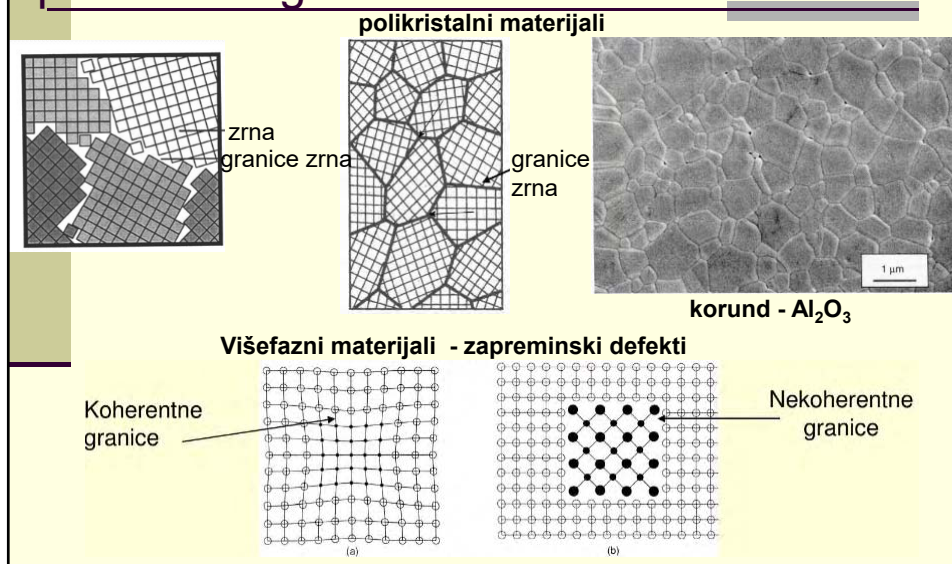
Veličina zrna se određuje posmatranjem pod metalografskim mikroskopom pod uvećanjem od 100x

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

22

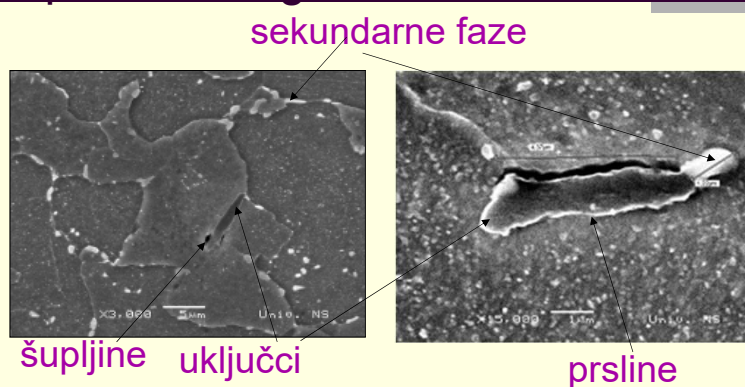
22

## Granice zrna i granice faza –još jedna bitna površinska greška



23

## Zapreminske greške



Šupljine, uključci i prslina nepovoljno utiču na mehaničke osobine

**Sekundarne faze kod legura**  
povoljno utiču na mehaničke osobine

24

24

# Mašinski materijali 3

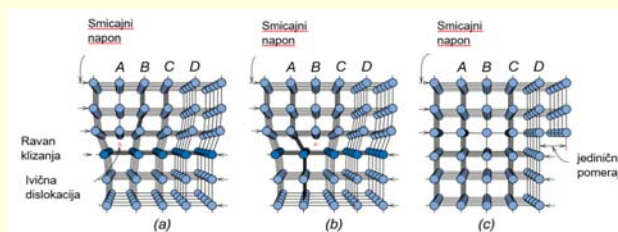
## Mehanizmi ojačavanja

25

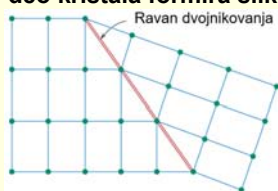
25

## 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



26

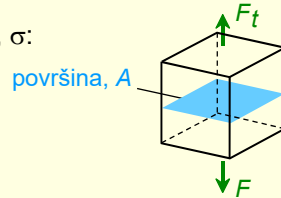
26

## Dislokacije i mehanizmi ojačavanja

### Kretanje dislokacija usled delovanja napona

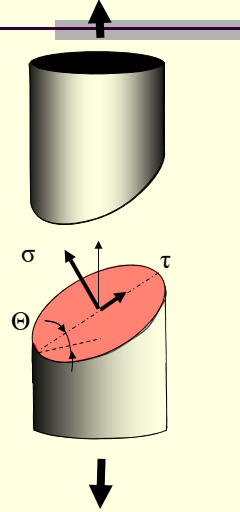
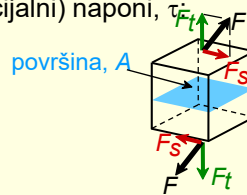
- **Zatezni** naponi,  $\sigma$ :

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



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

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



27

27

## Dislokacije i mehanizmi ojačavanja

### Kretanje dislokacija usled delovanja napona

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

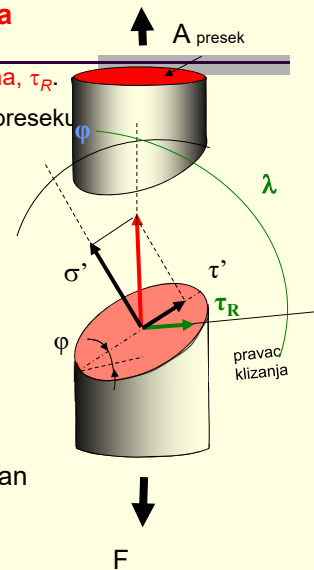
$$\sigma = \frac{F}{A}$$

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

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

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

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



28

28

## Dislokacije i mehanizmi ojačavanja

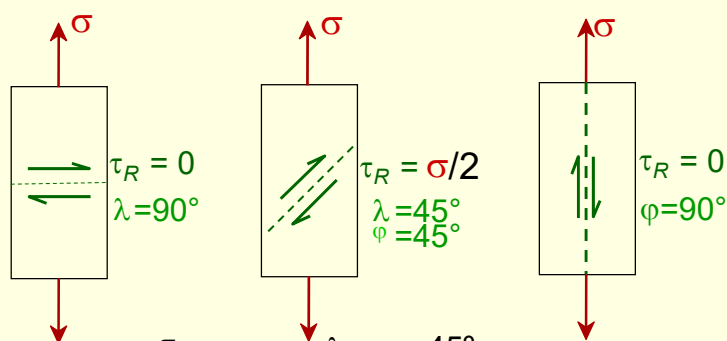
### Kritična veličina smicajnog napona za kretanje dislokacija

Uslov za kretanje dislokacija:

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

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

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



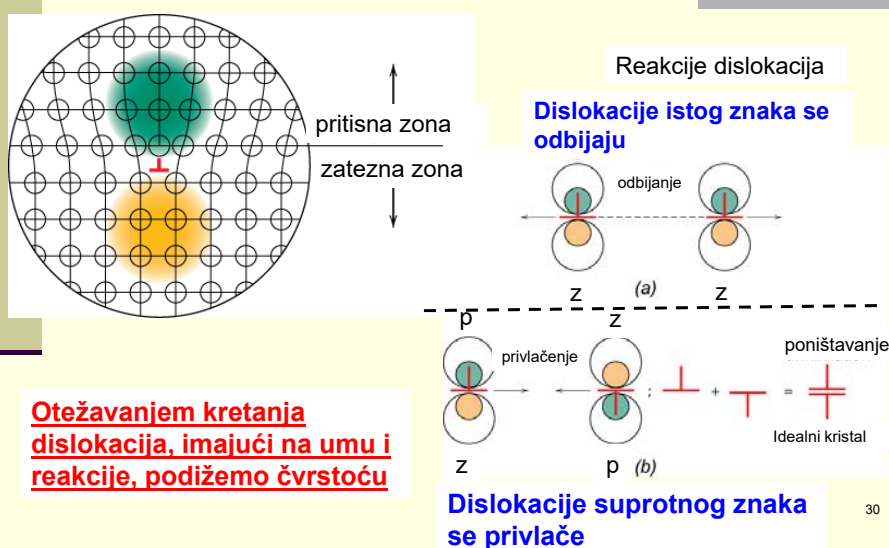
$\tau_R$  max za  $\lambda = \varphi = 45^\circ$

Orientacija kristala olakšava ili otežava kretanje dislokacija

29

29

## Koncentracija napona na dislokacijama



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

Dislokacije suprotnog znaka se privlače

30

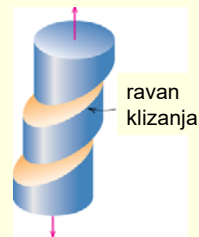
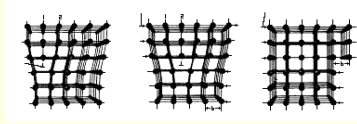
30



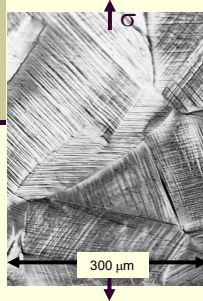
## Dislokacije i mehanizmi ojačavanja

### 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.
- $\tau_R$  se menja od kristala do kristala tako da se prvo deformišu zrna koja imaju najviši smicajni napon, dok se ostala deformišu kasnije

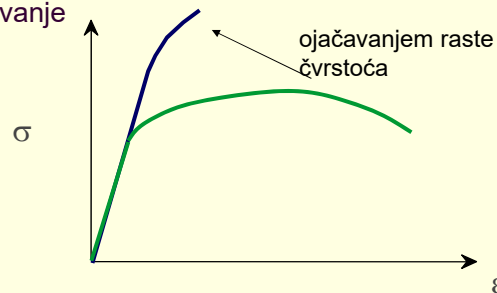
31

31

## 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!**

32

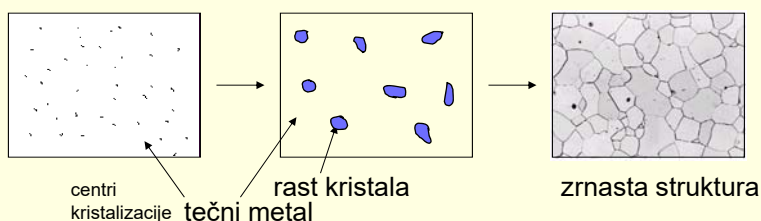
32



## 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**

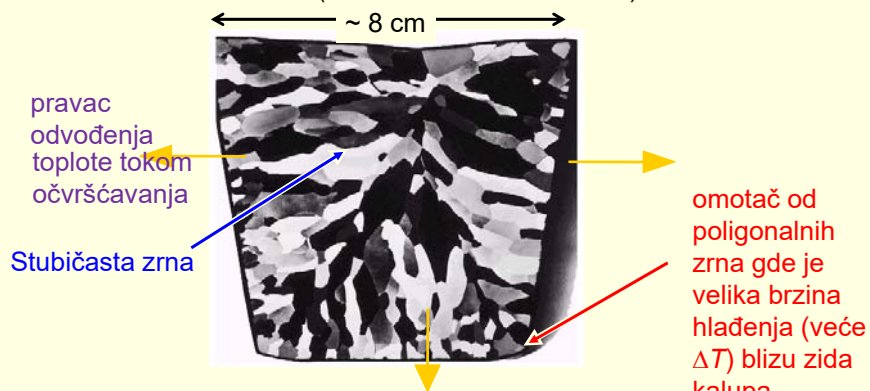
33

33

## Dislokacije i mehanizmi ojačavanja

### Očvršćavanje 1. Smanjenje veličine zrna

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



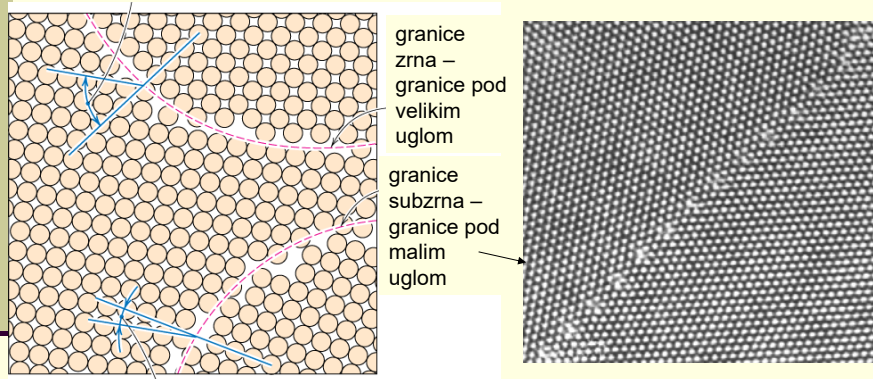
**Rafinacija zrna – dodajemo hemijske elemente koji pomažu da se formiraju sitnija i uniformnija zrna.**

34

34

# Dislokacije i mehanizmi ojačavanja

## Granice zrna 1. Smanjenje veličine zrna



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

35

35

# 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.

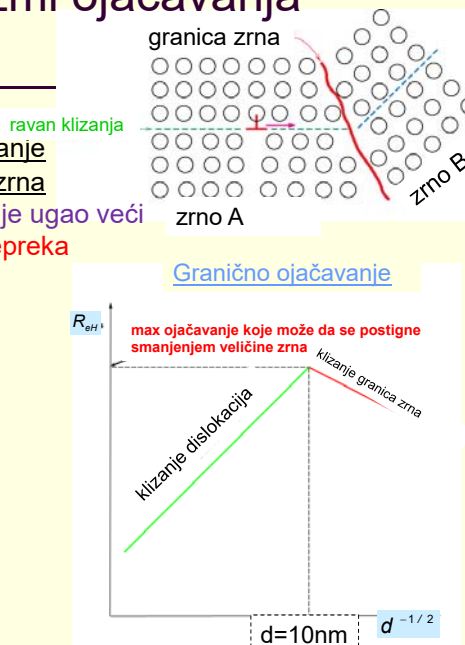
- Hall-Petch jednačina:

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

$k_y$  konstanta za materijal

$d$  - veličina zrna

$\sigma_o$  – napon za pokretanje dislokacija

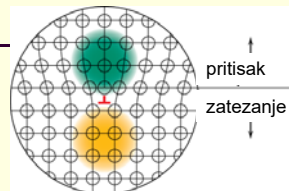


36

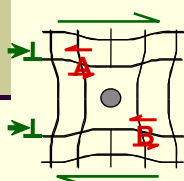
## Dislokacije i mehanizmi ojačavanja

### 2. Ojačavanje čvrstim rastvorom

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

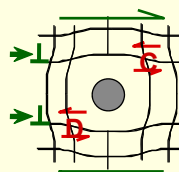


supstitucijski atom manjeg prečnika



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

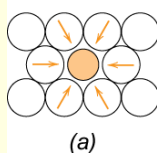
37

37

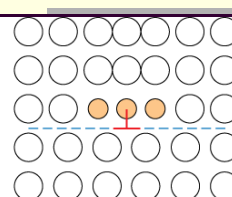
## Dislokacije i mehanizmi ojačavanja

### 2. Ojačavanje čvrstim rastvorom

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

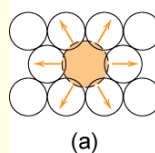


(a)

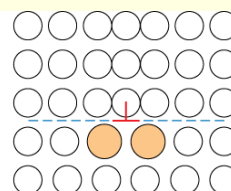


(b)

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



(a)



(b)

**strani atomi koče dislokacije ∴ raste čvrstoća**

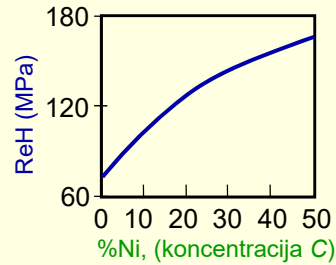
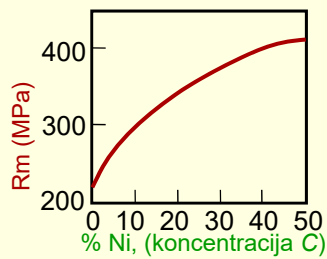
38

38

## Dislokacije i mehanizmi ojačavanja

npr: ojačavanje čvrstim rastvorom bakra Cu

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



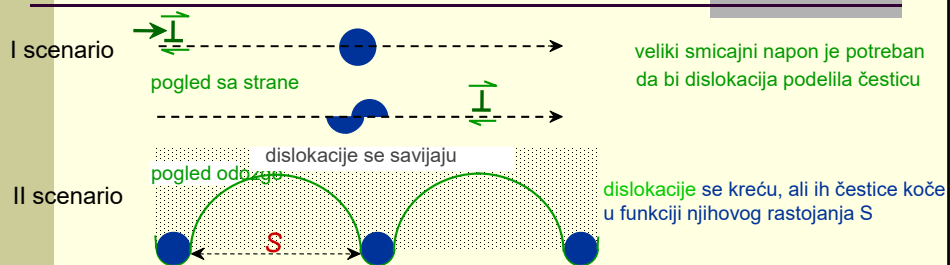
- Empirijska zavisnost čvrstoće od koncentracije:  $\sigma_y \sim C^{1/2}$
- Legiranjem raste  $R_{eH}$  and  $R_m$ .

39

39

## Dislokacije i mehanizmi ojačavanja

### 3. Čestično ojačavanje

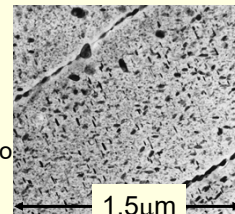


- Tvrdе čestice se teško dele kada naiđe na njih dislokacija – bitniji II scenario.

Zavisnost čvrstoće i rastojanja između čestica :

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

Al legura ojačana čestično



40

## Čestično ojačavanje

**I scenario**

pogled sa strane

veliki smicajni napon je potreban da bi dislokacija podelila česticu

**II scenario**

dislokacije se savijaju

pogled odozgo

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

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

41

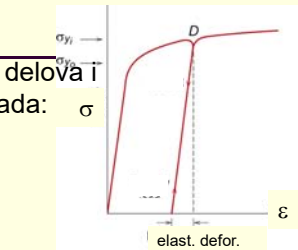
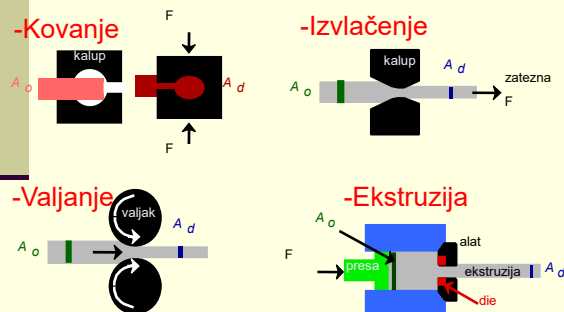
## Dislokacije i mehanizmi ojačavanja

### 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

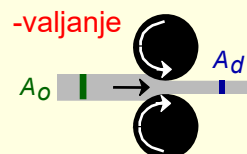
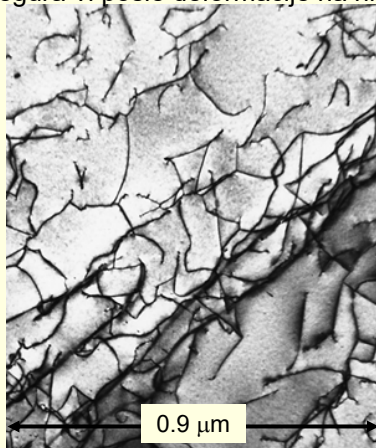
42

42

## Dislokacije i mehanizmi ojačavanja

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

- legura Ti posle deformacije na hladno:

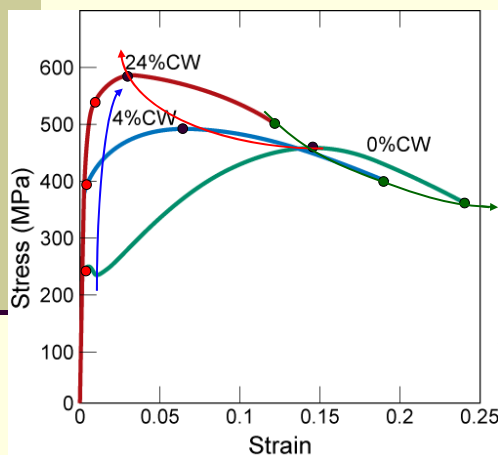


- Dislokacije se koče međusobno tokom **hladne deformacije**.
- Zbog toga je njihovo dalje kretanje otežano.

43

43

## 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.

44

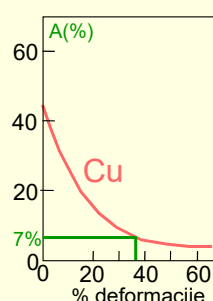
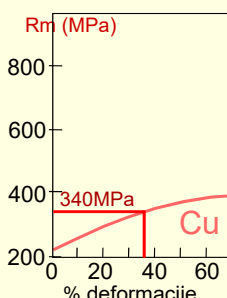
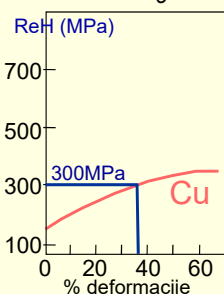
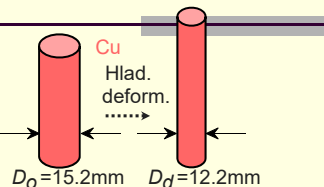
44

## Dislokacije i mehanizmi ojačavanja

### primer: ojačavanje Cu hladnom deformacijom

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

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



45

45

## Dislokacije i mehanizmi ojačavanja

### Rezultat hladne deformacije

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

Monokristal

$$\rightarrow \sim 10^3 \text{ mm}^{-2}$$

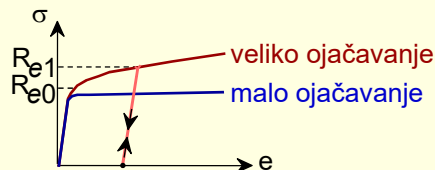
Hladna deformacija uvećava gustinu dislokacija

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

Termička obrada smanjuje gustinu dislokacija

$$\rightarrow 10^5 - 10^6 \text{ mm}^{-2}$$

Čvrstoća raste sa %deformacije:



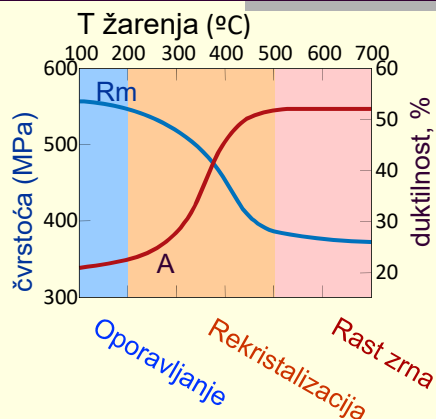
46

46

## 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  $R_{eH}$  i povećanja  $A\%$ .  
Efekat hladne deformacije se poništava!

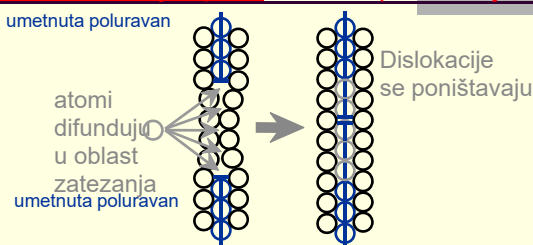
47

47

### Oporavljanje:

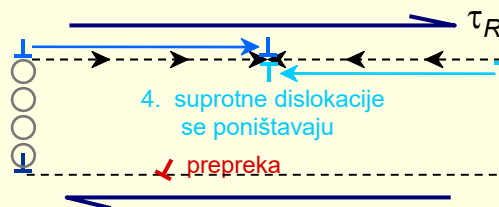
Zbog zagrevanja gustina dislokacija opada – one se poništavaju

- 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



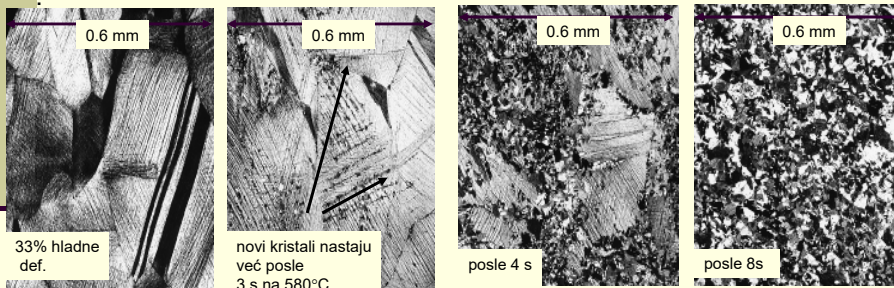
48

48



### Rekristalizacija:

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



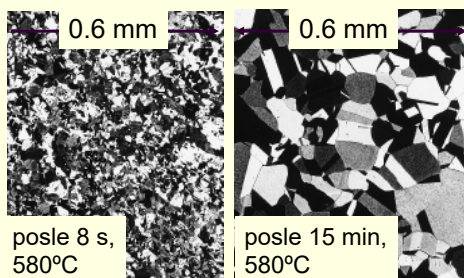
Materijal: mesing

49

49

### 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:

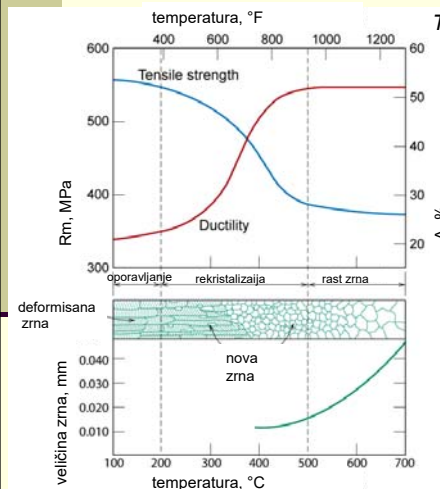
$$d^n - d_o^n = Kt$$

$d^n$  ← prečnik zrna u trenutku t  
 $d_o^n$  ← prečnik zrna u početku  
 $K$  ← koef. koji zavisi od T i materijala.  
 $t$  ← proteklo vreme

50

50

## 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  $\Rightarrow$  viša  $T_R$
- veći % deformacije  $\Rightarrow$  niža  $T_R$

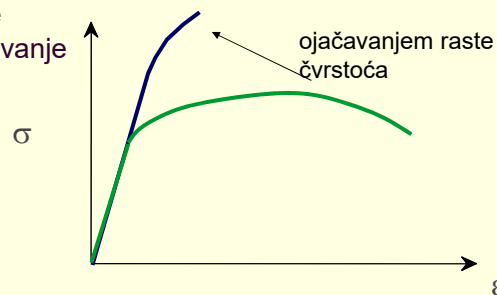
51

51

## 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



52

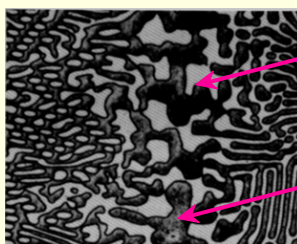
52

## 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

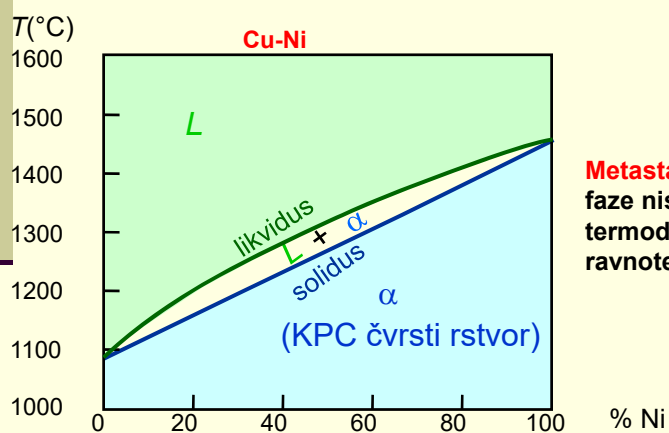
Hemijska jedinjenja

53

53

## Dijagrami stanja

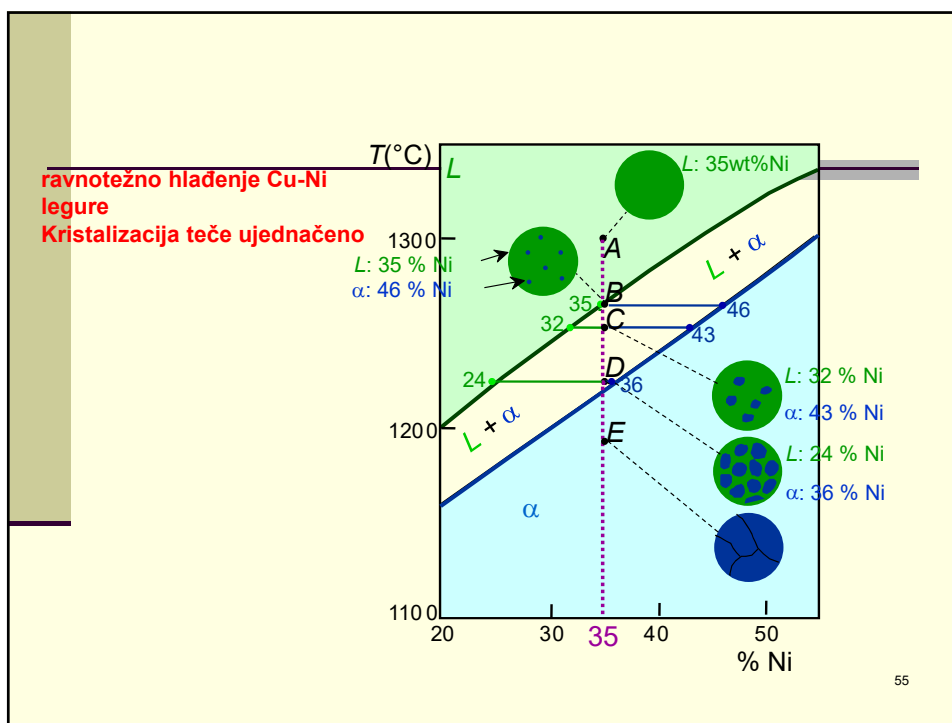
**Stabilni/ili ravnotežni dijagrami stanja**  
sve faze su u termodinamičkoj ravnoteži



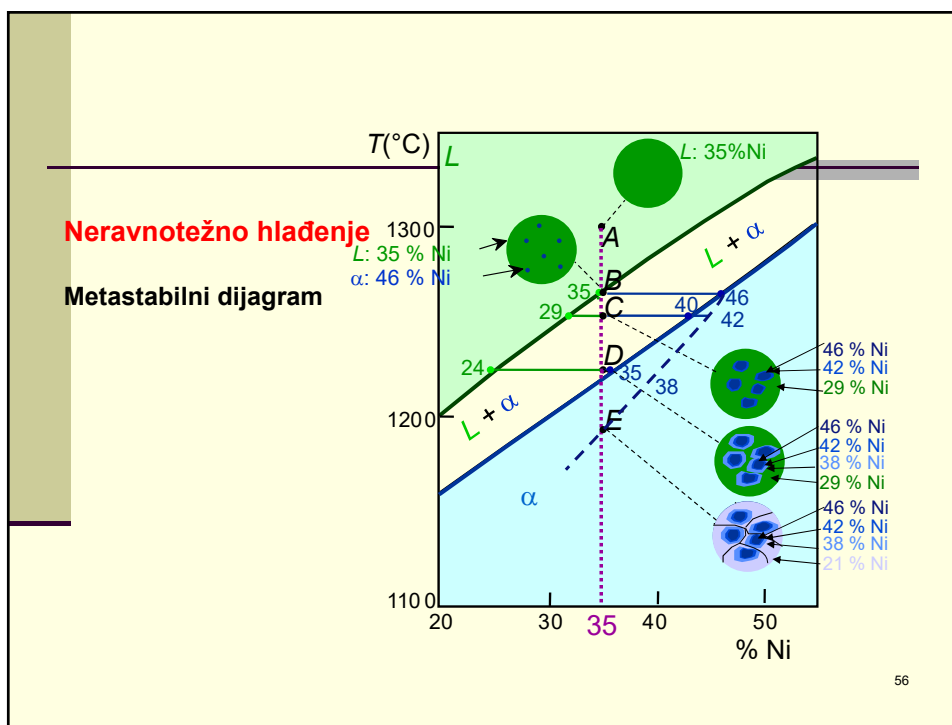
**Metastabilni dijagrami**  
faze nisu u  
termodinamičkoj  
ravnoteži

54

54



55

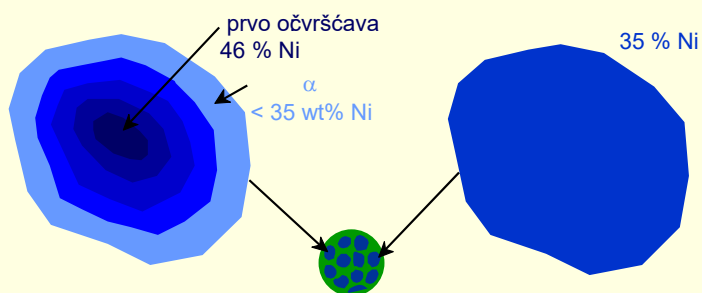


56

## Metastabilno i ravnotežno hlađenje - razlike

- Brzo hlađenje:  
segregacija

- sporo hlađenje:  
homogena struktura



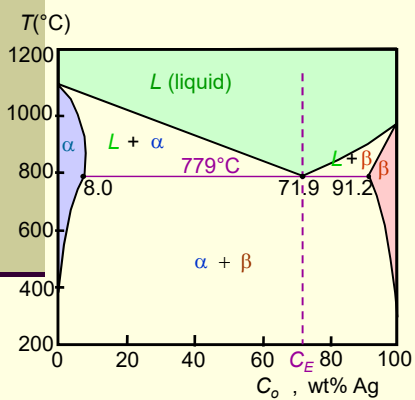
57

57

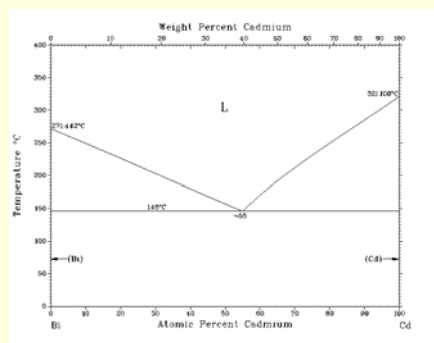
## Dijagrami stanja

potpune nerastvorljivosti i delimične rastvorljivosti u čvrstom stanju

Cu-Ag



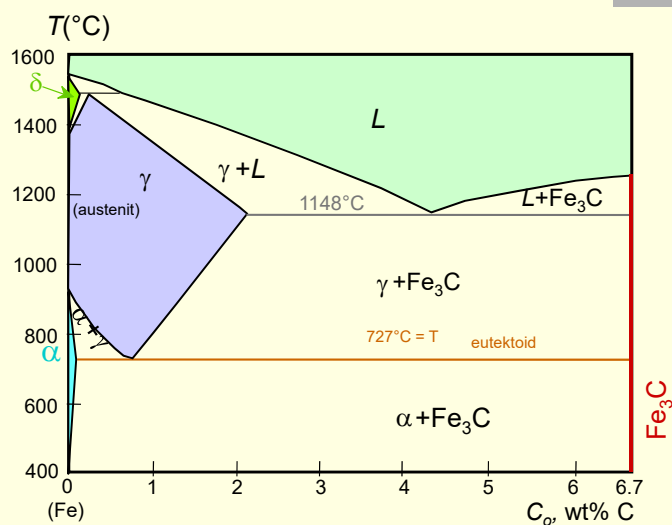
Cd-Bi



58

58

## Dijagram stanja Fe-C



59

59

## 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):

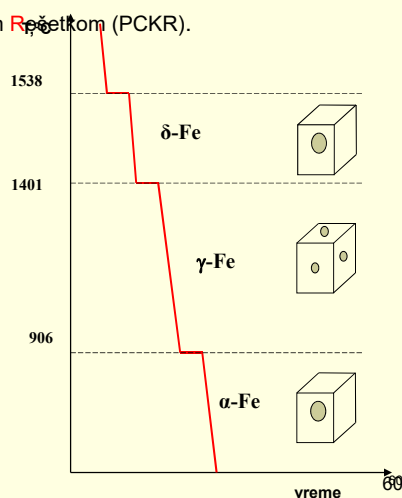
- KZC;
- $T=20-906^\circ C$ ;
- fizičke osobine (magnetičnost):
  - $T=20-769^\circ C \rightarrow$  feromagnetično  $\alpha$ -Fe,
  - $T=769-906^\circ C \rightarrow$  paramagnetično  $\beta$ -Fe.
  - ( $\alpha$ -Fe,  $\beta$ -Fe = ZCKR)

### ➤ $\gamma$ železo ( $\gamma$ -Fe):

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

### ➤ $\delta$ železo ( $\delta$ -Fe):

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



60

## Dijagram stanja Fe-C

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

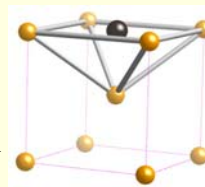
1. **Intersticijski čvrsti rastvori C u Fe:** **FERIT**( $\alpha$ ), **AUSTENIT** ( $\gamma$ ) i  **$\delta$ -Ferit**( $\delta$ ).
2. **Hemijsko jedinjenje:** **CEMENTIT** (Fe<sub>3</sub>C)
3. **Mehaničke smeše**, kao kombinacija prethodne 2 faze: **Perlit** (**P**) i **Ledeburit** (**L**).

### 1. INTERSTICIJSKI ČVRSTI RASTVORI C u Fe:

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

- KZC;
- HB 80;
- Rm=280N/mm<sup>2</sup>;

- Rastvorljivost C u  $\alpha$ : max = 0,025 %C (na 727°C),  
min = 0,0025 %C (na 20°C).

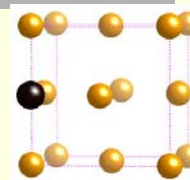


61

61

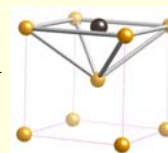
- **AUSTENIT** ( $\gamma$ ) je intersticijski čvrsti rastvor C u  $\gamma$ -Fe.

- KPC;
- HB 180;
- Rm=200-800 N/mm<sup>2</sup>;
- 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  $t_{\min} = 1394^\circ\text{C}$ .



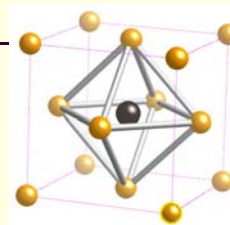
62

62

## 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;
- Rm=30-50 N/mm<sup>2</sup>;
- 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:  $\text{R} \xrightarrow{1147^\circ\text{C}; 4,3\% \text{C}} \text{L}(\gamma_{2,14\% \text{C}} + \text{Fe}_3\text{C}_{6,67\% \text{C}})$

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

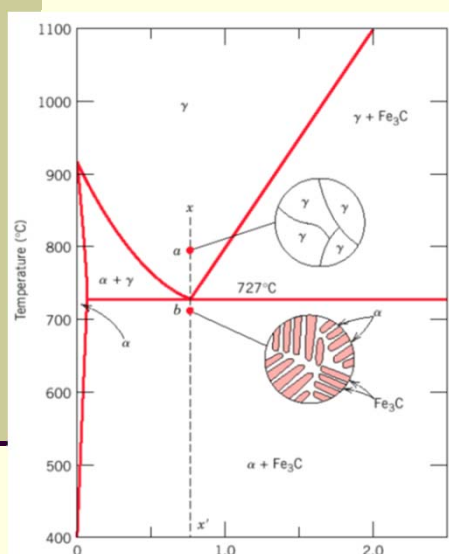
- **PERLIT (P)** je mehanička smeša ferita ( $\alpha$ ) i cementita ( $\text{Fe}_3\text{C}$ )!

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

63

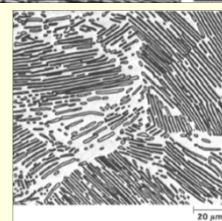
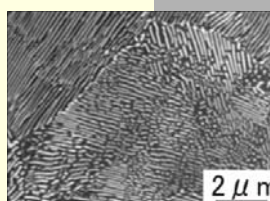
63

## EUTEKTOIDNI ČELICI



## PERLIT

$\gamma_{727^\circ\text{C}; 0,8\% \text{C}} \rightarrow \text{P}(\alpha_{0,025\% \text{C}} + \text{Fe}_3\text{C}_{6,67\% \text{C}})$

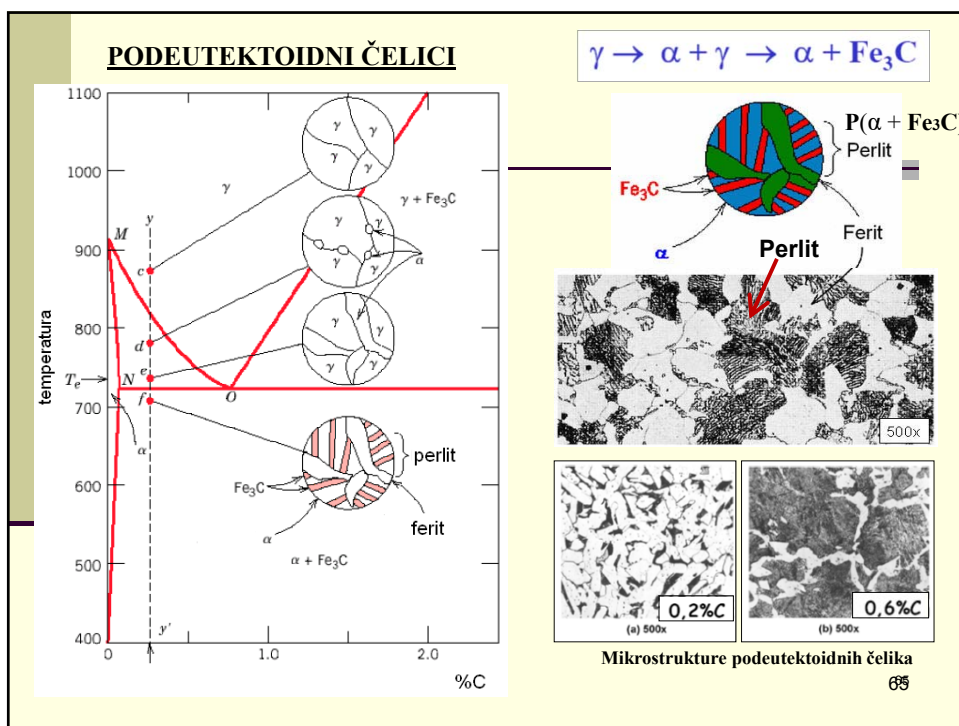


Mikrostruktura perlita

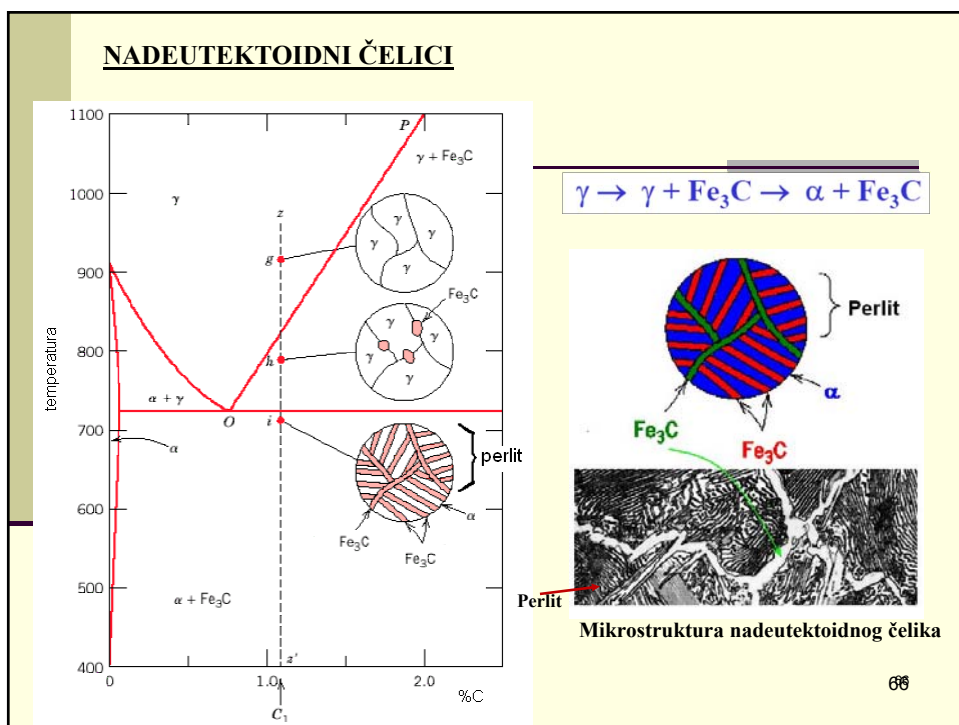
64

64

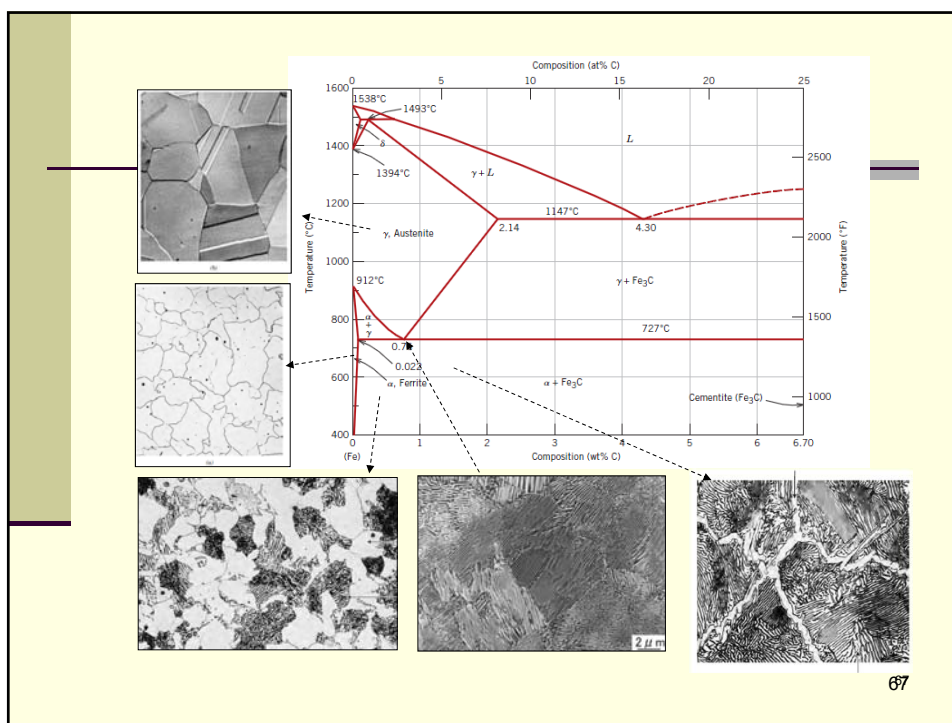




65



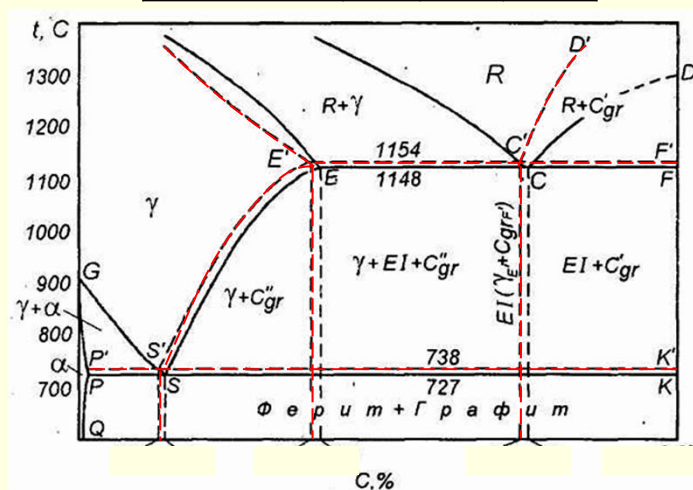
66



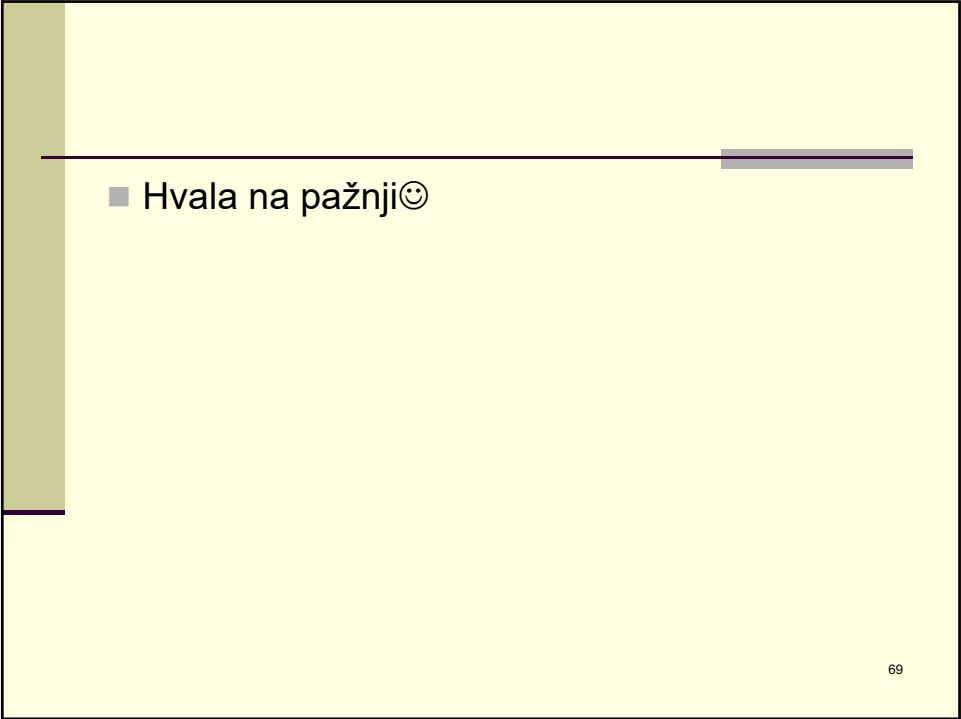
67

### Stabilni dijagram stanja (Fe-C)

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



68



■ Hvala na pažnji😊

69