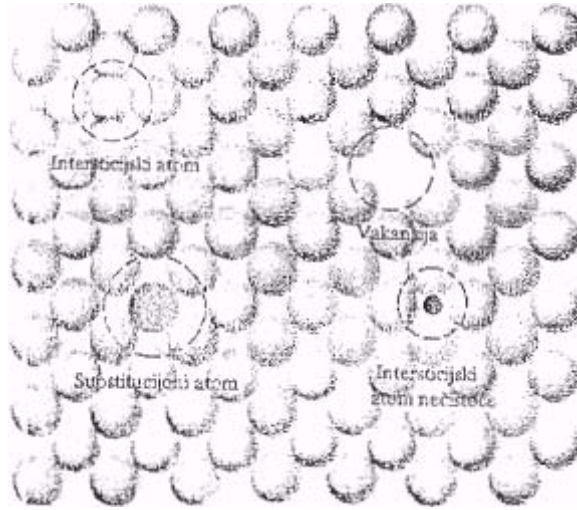


## GREŠKE KRISTALNE REŠETKE

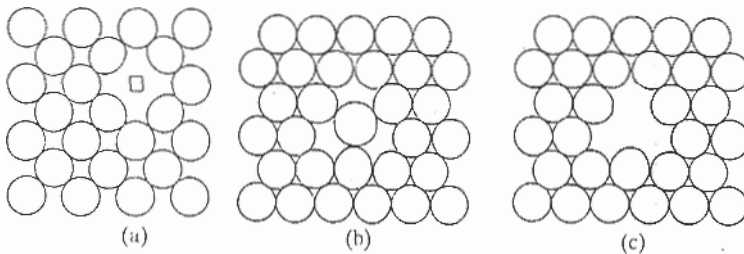
tačkaste; linijske (dislokacije); površinske

**Tačkaste nesavršenosti** vakansije (praznine), supstitucijski atom (zamenjen atom), intersticijski atom (umetnuti atom), intersticijski atom nečistoće

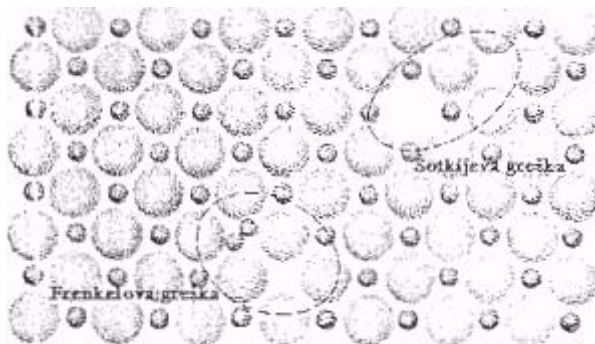


Slika – Dvodomenzionalni prikaz sa mogućim tačkastim greškama kristalne rešetke.

*di-vakansija, tri-vakansija*



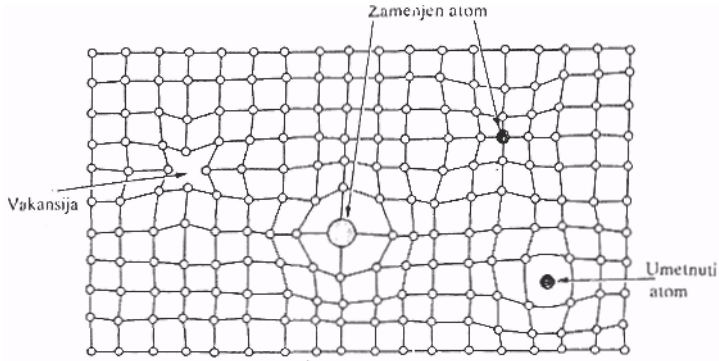
Slika – Tačkaste greške: (a) vakansije; (b) di-vakansije; (c) tri-vakansije



Slika – Dvodomenzionalni prikaz jonski uređenog čvrstog tela sa Frenkelovom i Šotkijevom greškom. Katjoni su prikazani malim sferama, a anjoni velikim.

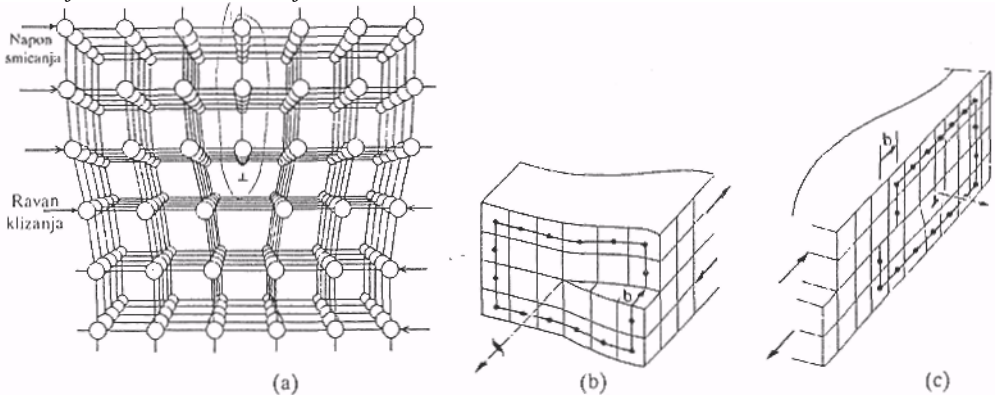
*Frenkelova greška, Šotkijeva greška*

**Linijske nesavršenosti**  
*dislokacije*



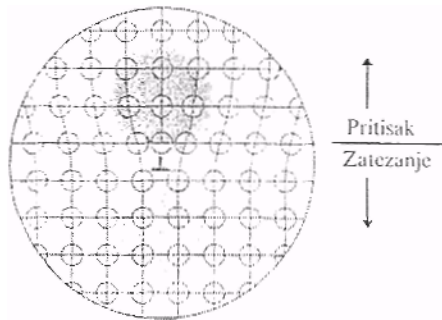
Slika – Iskrivljenost kristalne rešetke na mestima tačkastih grešaka.

*ivične i zavojne, složene dislokacije, ekstra-ravan*



Slika – (a) Ivična dislokaciju; (b) Burgersov vektor zavojne dislokacija; (c) Burgersov vektor ivične dislokacije

*vektor klizanja (b), ili Burgersov vektor*

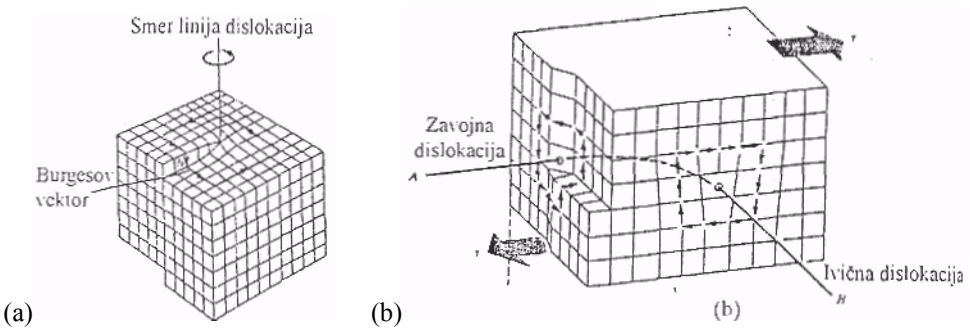


Slika – Polje napona u okolini ivične dislokacije

*gustina dislokacija  $\rho$ :*

*ukupna dužina dislokacija  $l$  (cm) koja dolazi na jedinicu zapremine kristala  $v$  (cm<sup>3</sup>), tj.*

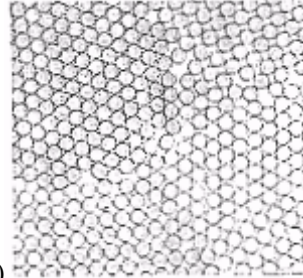
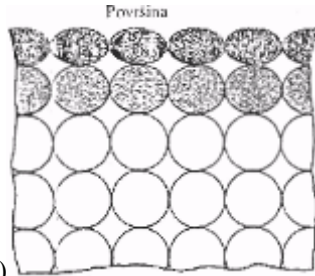
$$\rho = \sum l / v \text{ (cm}^{-2}\text{)}$$



Slika – (a) Zavojna dislokacija, (b) složena dislokacija

## Površinske greške

spoljne granične površine, granica metalnog zrna

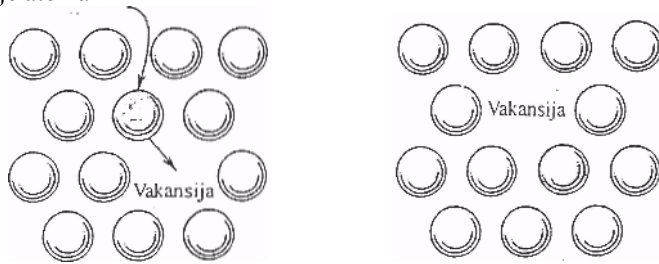


Slika – (a) Šematski prikaz atoma na graničnoj površini; (b) granice metalnog zrna

## DIFUZIJA

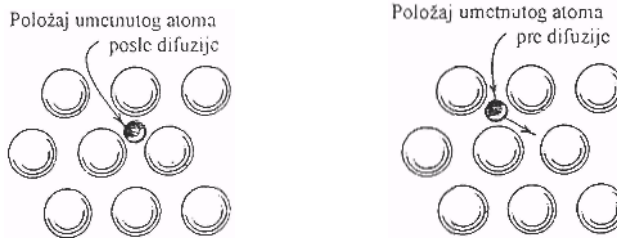
difuzija i samodifuzija, vakansijski (supstitucijski) mehanizam, intersticijski mehanizam energije aktivacije

Kretanje atoma



Slika – Vakansijski mehanizam difuzije

Difuzija kod metala i legura: kroz zapreminu; po granicama metalnog zrna

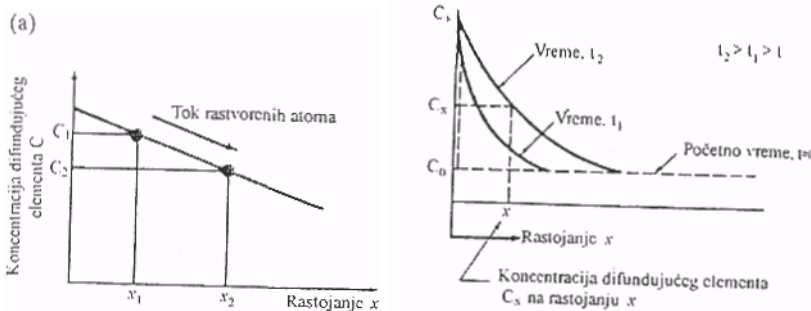


Slika – Intersticijski mehanizam difuzije

stacionarni sistem difuzije, brzina difuzije, maseni tok

prvi Fikov (Fick) zakon difuzije, koeficijent difuzije

(b)



Slika – (a) Stacionarni sistem difuzije, (b) nestacionarni sistem difuzije

Prvi Fikov zakon difuzije: za stacionarno stanje difuzije, brzina difuzije atoma rastvorenog elementa među atomima posmatrane materije meri se masenim tokom  $J$ , definisan kao broj atoma koji prolaze kroz jedinicu površine, normalne na pravac toka, u jedinici vremena. Maseni tok atoma  $J$  (atom/m<sup>2</sup>s), proporcionalan je gradijentu koncentracije ( $C_2 - C_1/x_2 - x_1$ ) (atom/m<sup>3</sup>m),

$$J = -D \frac{dC}{dx}$$

Koeficijent proporcionalnosti  $D$  (m<sup>2</sup>/s) je koeficijent difuzije.

Tabela – Vrednosti koeficijenta difuzije

Rastvoren element	Osnovni element	Koeficijent difuzije, $D$ (m <sup>2</sup> /s)	
		500°C	1000°C
Ugljenik	Železo (KPC)	$5 \times 10^{-15}$	$3 \times 10^{-11}$
Ugljenik	Železo (KZC)	$10^{-12}$	$2 \times 10^{-9}$
Železo	Železo (KPC)	$2 \times 10^{-23}$	$2 \times 10^{-16}$
Železo	Železo (KZC)	$10^{-20}$	$3 \times 10^{-14}$
Nikal	Železo (KPC)	$10^{-23}$	$2 \times 10^{-16}$
Magnezijum	Železo (KPC)	$3 \times 10^{-24}$	$10^{-16}$
Bakar	Bakar	$10^{-18}$	$2 \times 10^{-13}$
Bakar	Aluminijum	$4 \times 10^{-14}$	$10^{-10}$
Srebro	Srebro (kristal)	$10^{-17}$	$10^{-12}$
Srebro	Srebro (granica zrna)	$10^{-11}$	
Ugljenik	Titan (HGP)	$3 \times 10^{-16}$	$2 \times 10^{-11}$

Zavisnost koeficijenta difuzije od temperature  
*energija aktivacije, koeficijent proporcionalnosti*

Koeficijent difuzije na različitim temperaturama mnogih materijala može se odrediti jednačinom:

$$D = D_0 e^{-Q/RT}$$

gde je:  $D$ –koeficijent difuzije (m<sup>2</sup>/s);  $D_0$ –koeficijent proporcionalnosti (m<sup>2</sup>/s), (ne zavisi od temperature);  $Q$ –energija aktivacije (J/mol);  $R$ –gasna konstanta, 8,314 (J/mol K);  $T$ –temperatura (K).

Tabela – Vrednosti koeficijenta proporcionalnosti i energije aktivacije za neke difuzione sisteme

Rastvoren element	Element rastvarač	$D_0$ (m <sup>2</sup> /s)	$Q$ (kJ/mol)
Ugljenik	Železo (KPC)	$2,0 \times 10^{-5}$	142
Ugljenik	Železo (KZC)	$22,0 \times 10^{-5}$	122
Železo	Železo (KPC)	$2,2 \times 10^{-5}$	268
Železo	Železo (KZC)	$20,0 \times 10^{-5}$	240
Nikal	Železo (KPC)	$7,7 \times 10^{-5}$	280
Magnezijum	Železo (KPC)	$3,5 \times 10^{-5}$	282
Bakar	Aluminijum	$1,5 \times 10^{-5}$	126
Bakar	Bakar	$2,0 \times 10^{-5}$	197
Srebro	Srebro	$1,0 \times 10^{-5}$	184
Ugljenik	Titan (HGP)	$51,0 \times 10^{-5}$	182

Nestacionarni sistem difuzije, *drugi Fikov zakon*

Nestacionarni sistem difuzije: gradijent koncentracije se menja sa promenom vremena, slika na str. 3, i određen je drugim Fikovim zakonom:

$$\frac{dC_x}{dt} = \frac{d}{dx} \left( D \frac{dC}{dt} \right) = D \frac{d^2 C}{dt^2}$$

Rešavanje gornje diferencijalne jednačine, za određene granične uslove difuzije:

$$\frac{C_s - C_x}{C_s - C_0} = fgg \left( \frac{x}{2\sqrt{D \cdot t}} \right)$$

gde su:  $C_s$ –koncentracija elementa na površini;  $C_0$ –početna koncentracija elementa u čvrstom telu;  $C_x$ –koncentracija elementa na rastojanju  $x$  u vremenu  $t$ ;  $x$ –rastojanje od površine;  $D$ –koeficijent difuzije;  $t$ –vreme;  $fgg$ –Gausova funkcija greške.

## **DEFINICIJE:**

**Jezgra kristalizacije:** male čvrste čestice nastale očvršćavanjem tečne faze, a rastu sve dok se ne završi očvršćavanje.

**Embrion:** mala čestica čvrste faze nastala očvršćavanjem tečne faze, koja nije dostigla kritični prečnik i koja se ponovo rastvara u tečnoj fazi.

**Kritični poluprečnik  $R_k$ :** minimalni poluprečnik jezgra stvorene čvrste faze koja dalje raste u stabilno jezgro.

**Homogena jezgra kristalizacije:** formiranje jezgra kristalizacije u čistom metalu od sopstvenih atoma.

**Heterogena jezgra kristalizacije:** formiranje jezgra kristalizacije na površinama i česticama primesa u tečnoj fazi.

**Metalna zrna:** poseban kristal u polikristalnoj strukturi metala.

**Granica metalnog zrna:** zona sa nepravilnim rasporedom atoma između dva susedna zrna.

**Veličina metalnog zrna:** prosečan broj metalnih zrna po jedinici površine pri određenom uveličanju.

**Monokristal:** kristal čiji se pravilan raspored atoma ponavlja po celoj zapremini bez prekida.

**Vakansija:** nedostatak atoma u rešetki na mestu gde se očekuje da normalno postoji.

**Supstitucijski atom primese:** tačkasta greška u kojoj atom druge materije zauzima mesto osnovnog atoma.

**Intersticijski atom primese:** tačkasta greška u kojoj se atom druge materije smešta u prostor između atoma osnove.

**Intersticijski atom:** tačkasta greška u kojoj se atom iste vrste kao osnova smešta u prostor između drugih atoma osnove.

**Frenkelova greška:** tačkasta greška u kojoj je katjonska vakansija povezana sa intersticijskom katjonskom, u jonskom kristalu.

**Šotkijeva greška:** tačkasta greška u kojoj je katjonska vakansija povezana sa anjonskom u jonskom kristalu.

**Dislokacija:** greška kristalne rešetke kod koje je iskrivljenost rešetke usredsređena po liniji. Dislokacije mogu biti ivične, zavojne i kombinovane ivično-zavojne.

**Samodifuzija:** premeštanje atoma u čistom metalu.

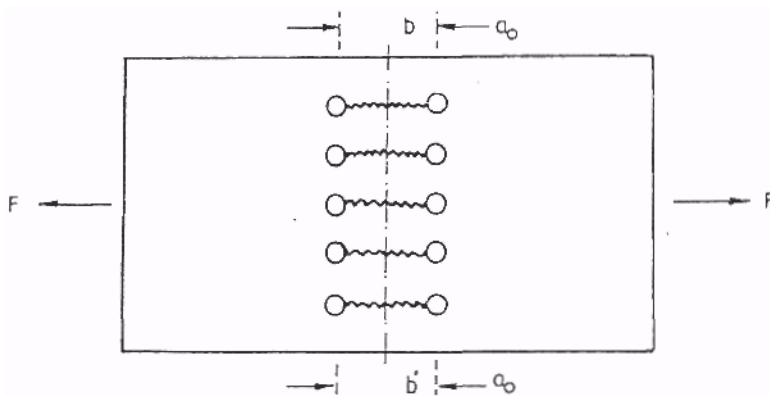
**Vakansijska difuzija (supstitucijska):** difuzioni mehanizam po kome se atomi premeštaju iz svog položaja u rešetki u položaj susedne vakansije.

**Intersticijska difuzija:** difuzioni mehanizam po kome se atomi iz jednog intersticijskog položaja premeštaju u drugi intersticijski položaj.

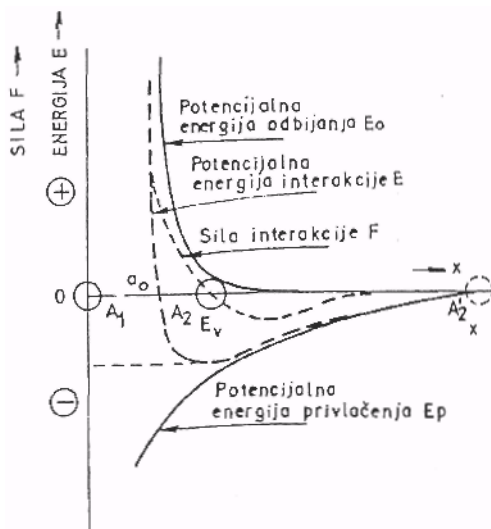
**Difuzija kroz zapreminu:** kretanje atoma kroz metalno zrno polikristalnog materijala.

# LOMOVI

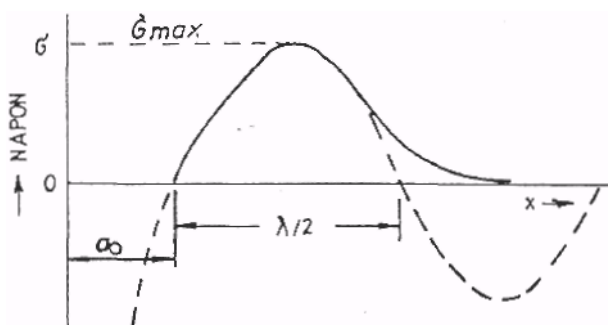
## TEORIJSKA KOHEZIONA ČVRSTOĆA



Slika – Model idealnog kristala

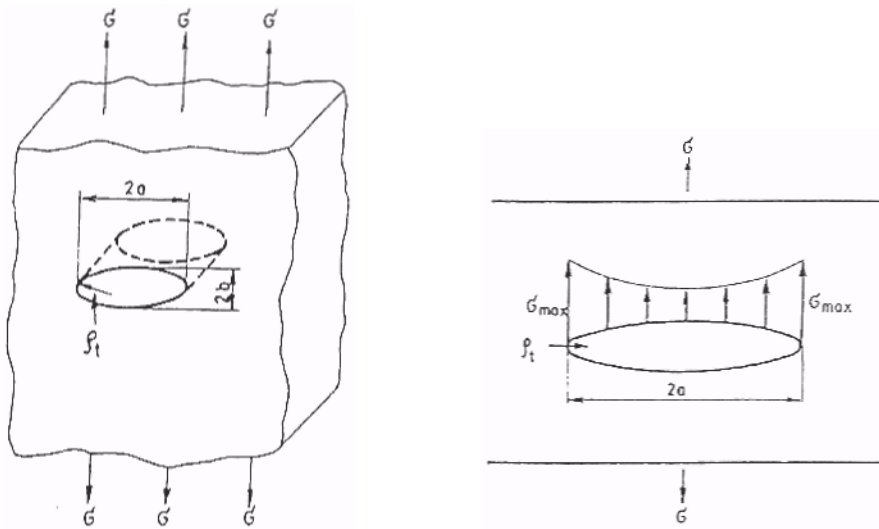


Slika – Promena sile i energije u kristalnoj rešetki sa promenom rastojanja između atoma



Slika – Promena napona sa promenom međuatomskog rastojanja

Hukov zakon, površinski napon, teorijska kohezioni čvrstoća ili teorijska čvrstoća loma

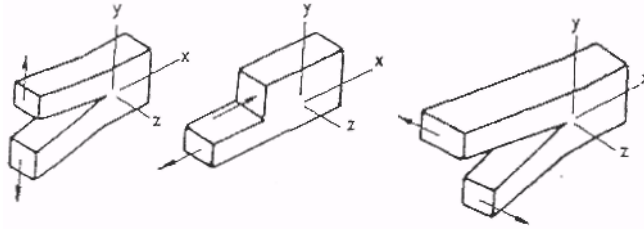


Slika – Ploča sa eliptičnom prslinom

stvarna čvrstoća loma

**Osnovni elementi mehanike loma**

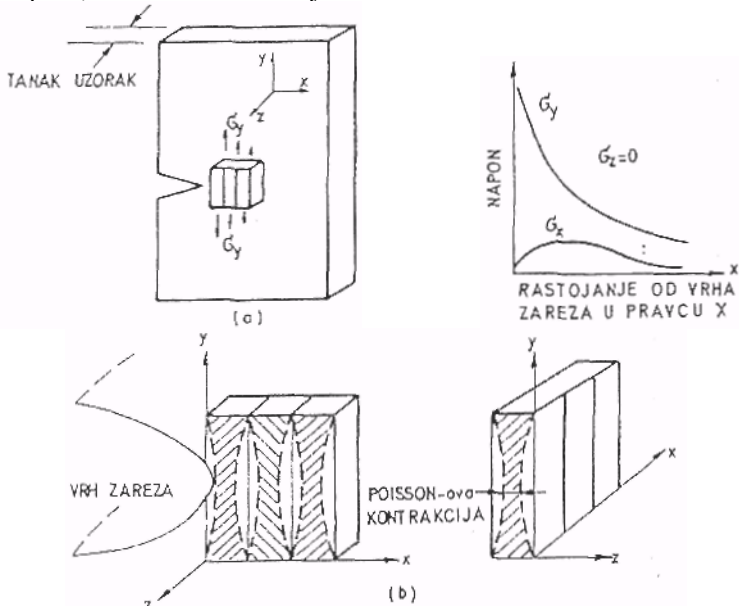
čvrstoća loma, dužina prsline, *Grifitova* jednačina, *Irvinova* jednačina



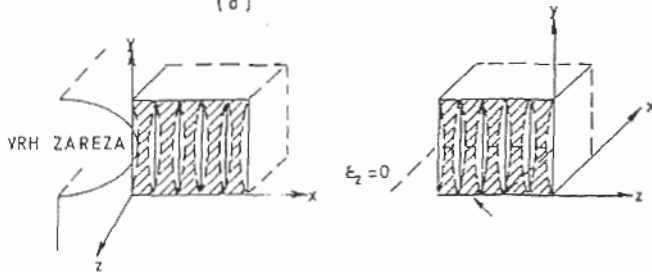
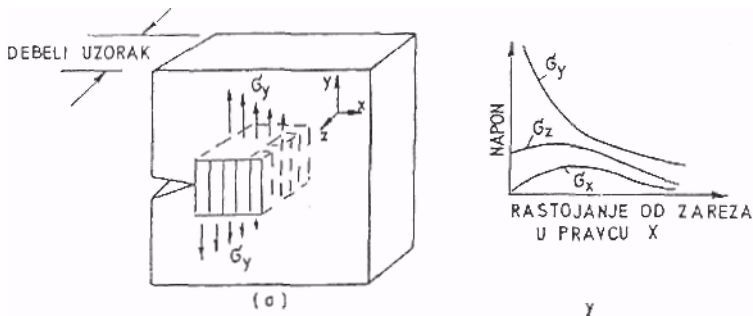
Slika – Modeli otvaranja prsline

**USLOVI ZA KRTI LOM**

faktor intenziteta napona, žilavost loma materijala

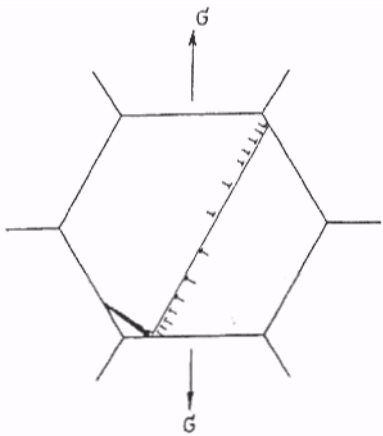


Slika – Ravansko stanje napona u tankom uzorku

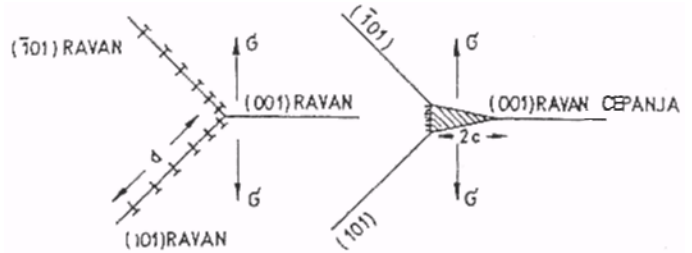


Slika – Ravanska deformacija u uzorku veće debljine

### Dislokacioni mehanizmi krtog loma



Slika – *Stroh* model krtog loma

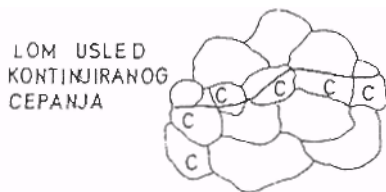


Slika – *Kotrel*ov dislokacioni model krtog loma

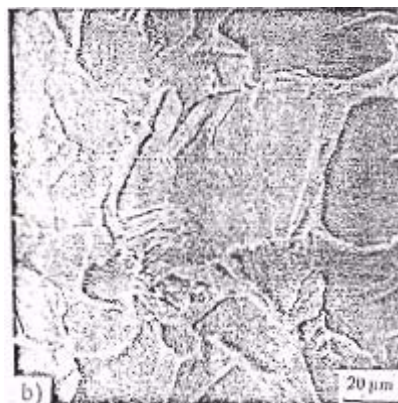
mehanizam cepanja, ravan cepanja

### MIKROSKOPSKE I MAKROSKOPSKE KARAKTERISTIKE KRTOG LOMA

transkristalni krti lom, interkristalni krti lom



a)



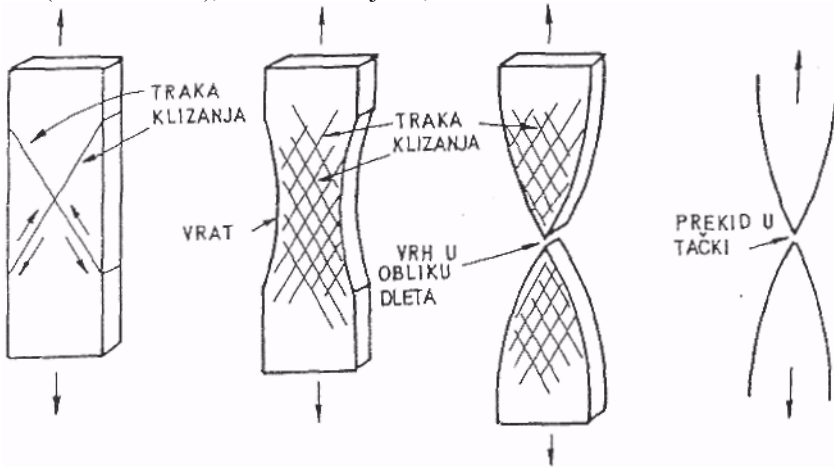
b)

Slika – Promena pravca kretanja krte prsline: a) šematski, b) u čeliku

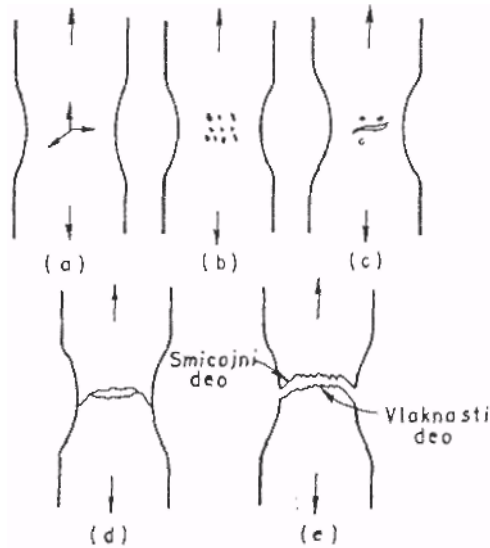


# MAKROSKOPSKE I MIKROSKOPSKE KARAKTERISTIKE DUKTILNOG LOMA

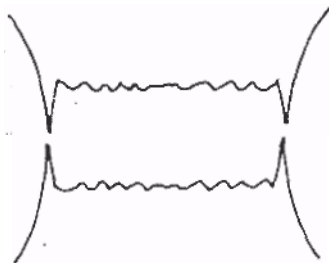
sekundarne faze (fine i masivne), nemetalni uključci, vrat



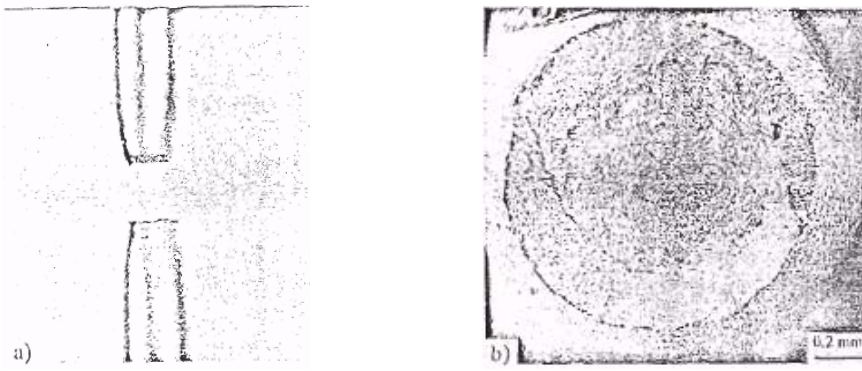
Slika – Prekid izazvan višestrukim klizanjem



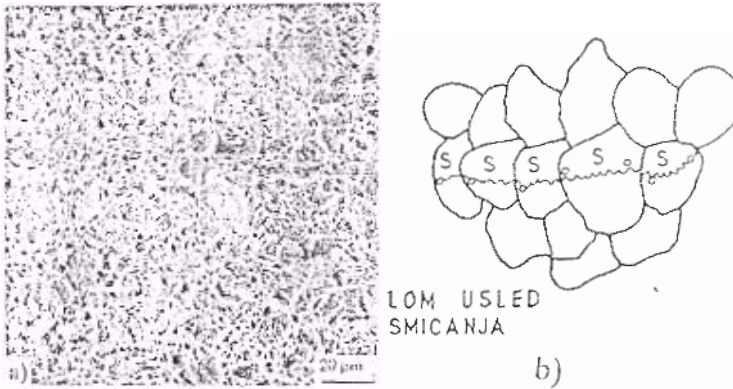
Slika – Šema duktilnog loma u obliku čaše i kuje



Slika – Duktilni lom u obliku dvostruke čaše



Slika – a) zatezna epruveta, b) duktilni lom u obliku čaše i kupe

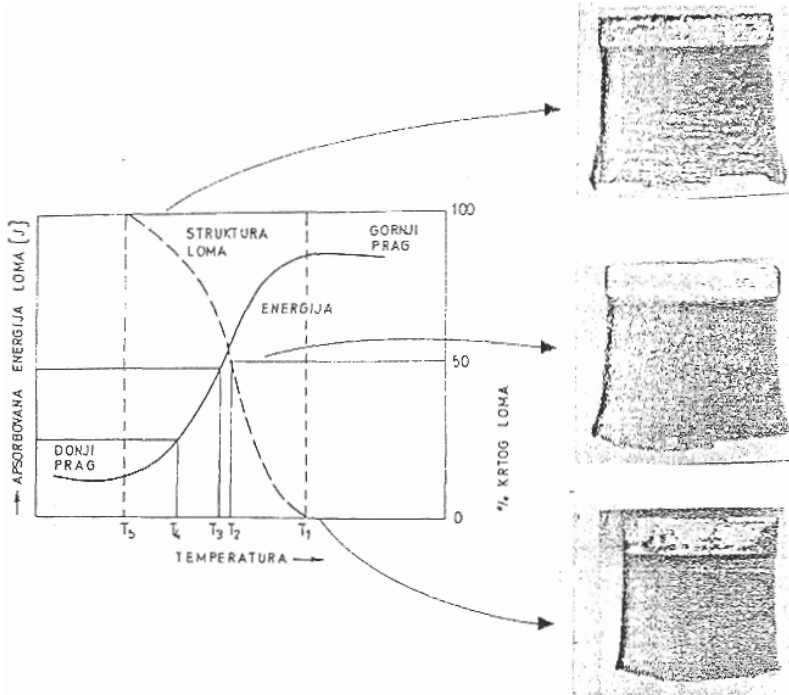


Slika – Transkristalni duktilni lom: a) u čeliku, b) šema

mehanizam dekohezije, koalescencija mikrošupljina, smicajna dekohezija, mešoviti lom, mehanizam kvazi-cepanja

## PRELAZNA TEMPERATURA

Šarpi epruvete

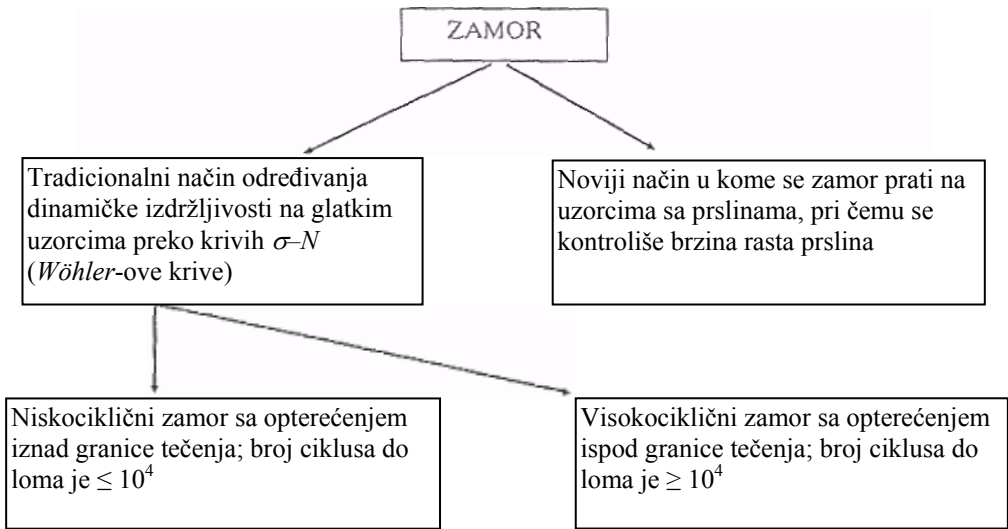


Slika – Uticaj temperature na apsorbovanu energiju i udeo krtog loma na površini preloma

prelazne temperature:  $T_1$ ;  $T_2$ ;  $T_3$ ;  $T_4$ ;  $T_5$

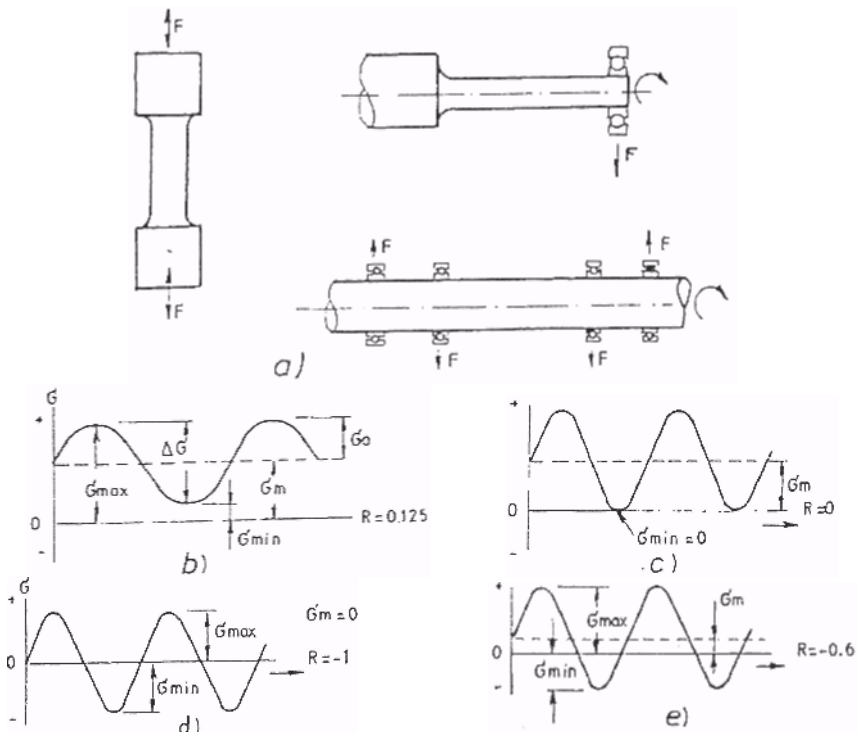
# ZAMOR

zamorni lom, dinamička izdržljivost  
Velerova kriva



Slika – Vrste zamora

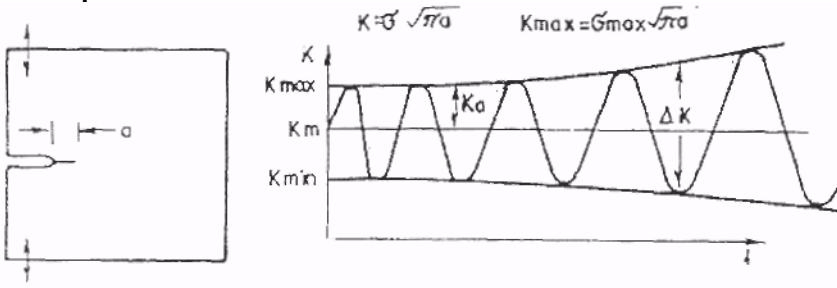
## Zamor na uzorcima bez prslina



Slika – Zamor na uzorcima bez prslina

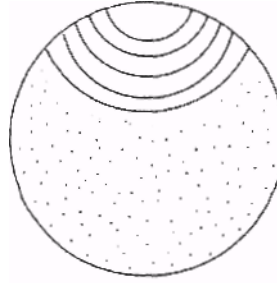
Visokociklični zamor (*Baskinov zakon*)  
Niskociklični zamor (*Kofin-Mansonov zakon*)

## Zamor na uzorcima sa prslinom

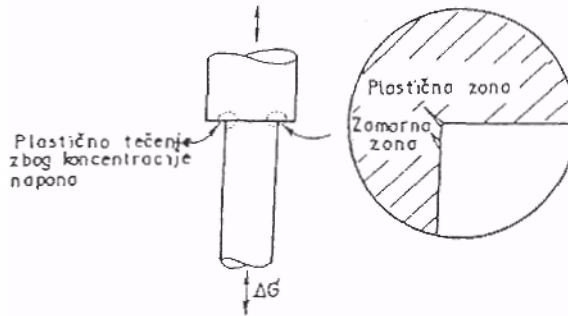


Slika – Rast zamorne prsline

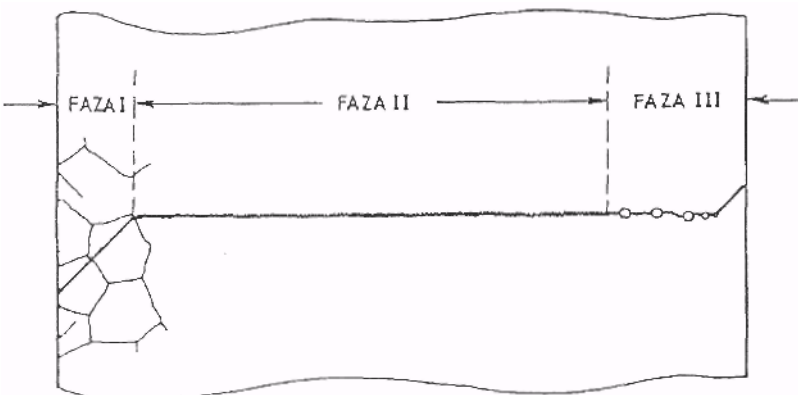
## Makroskopske i mikroskopske karakteristike zamornog loma



Slika – Zamorni lom (šema)



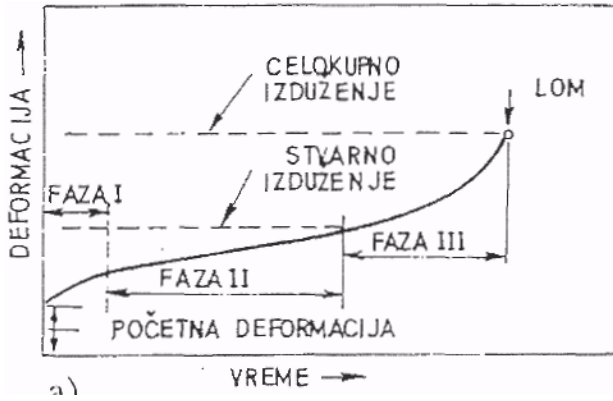
Slika – Stvaranje zamorne prsline na mestima koncentracije napona



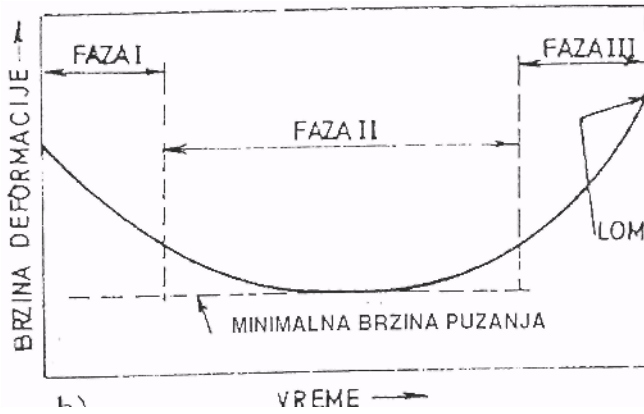
Slika – Faze zamornog loma (šema)

## LOM NA POVIŠENIM TEMPERATURAMA

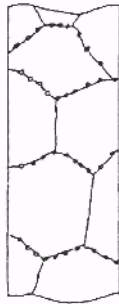
*puzanje*, mehanizam kretanja dislokacija uspinjanjem i spuštanjem, poprečno klizanje, mehanizmi plastične deformacije, *klizanje po granicama zrna* i *difuziono puzanje*, *oporavljanje*, *rekristalizacija*, *rast zrna*, *rastvaranje disperznih faza*, *prekomerna oksidacija*



Slika – kriva puzanja sa tri stadijuma puzanja



Slika – brzina puzanja



Slika – Mikrošupljine na granicama zrna: a) sferne; b) klinaste