

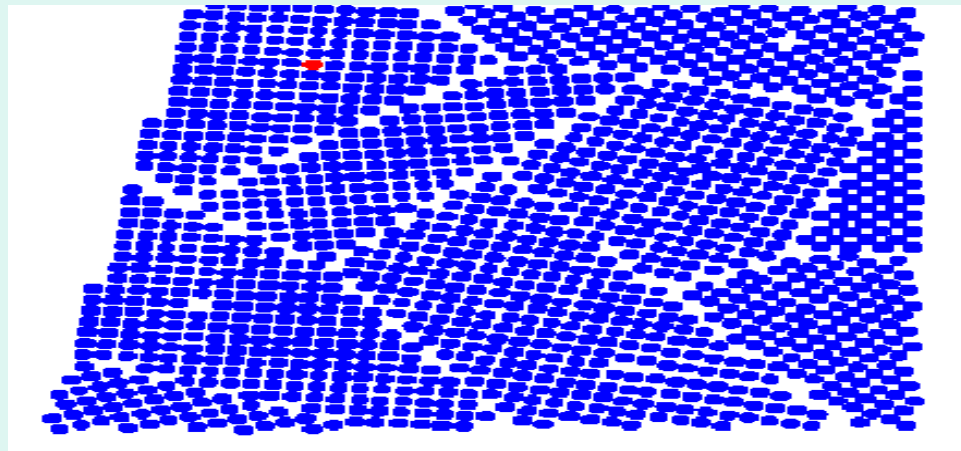
MATERIJALI I

Red. prof. dr.sc. Loreta Pomenić

NESAVRŠENOSTI (NEPRAVILNOSTI)

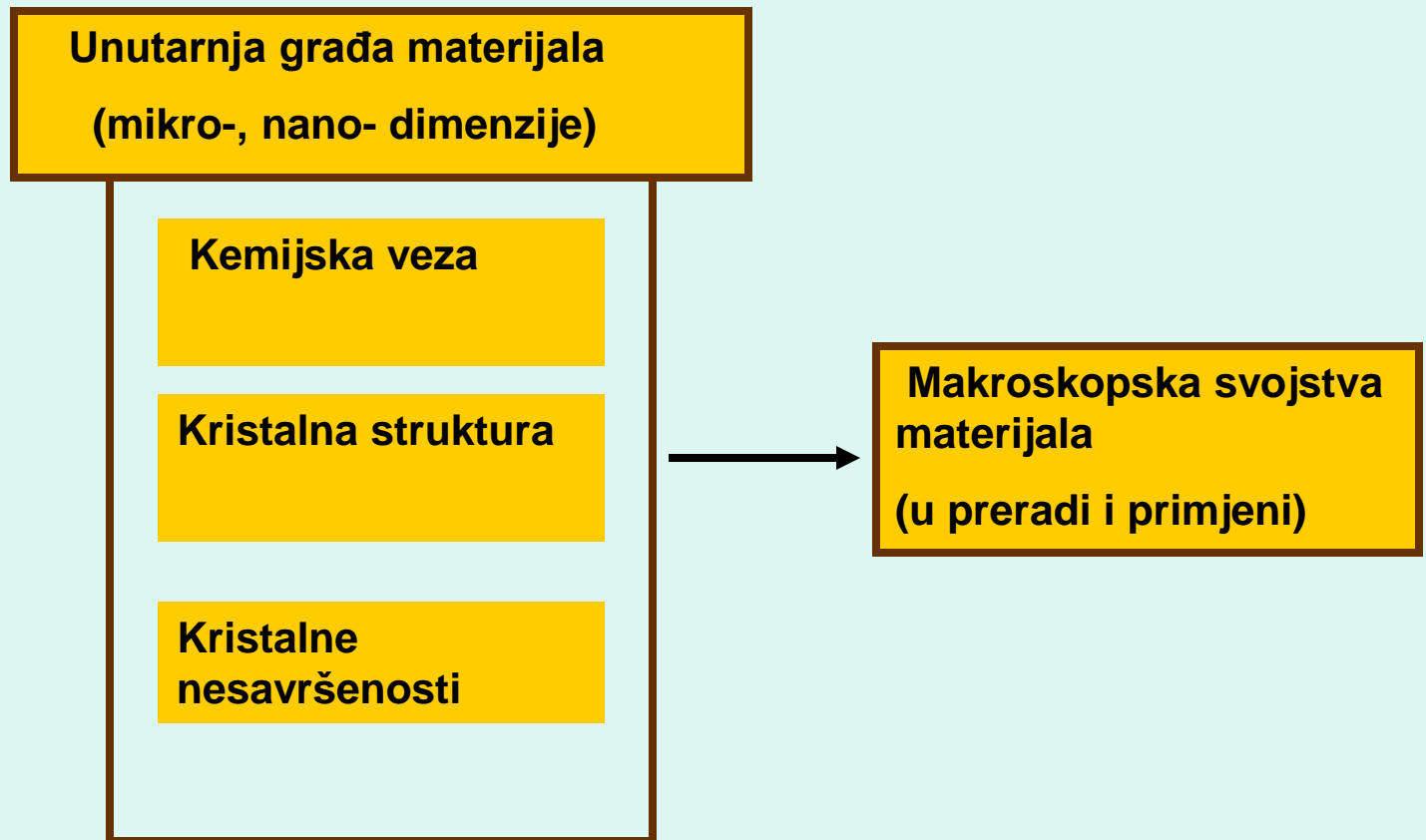
U KRISTALIMA

- **Realni kristali nisu nikad idealni – zbog prisutnih nepravilnosti u njihovoj strukturi**
- Tijekom skrućivanja (kristalizacije) – svi atomi ne uspiju zauzeti svoje položaje u prostornoj kristalnoj rešetki
- Broj tih atoma je vrlo malen (od približno 1 do 1000)
- Ipak, nesavršenosti kristala imaju vrlo važan utjecaj na svojstva materijala



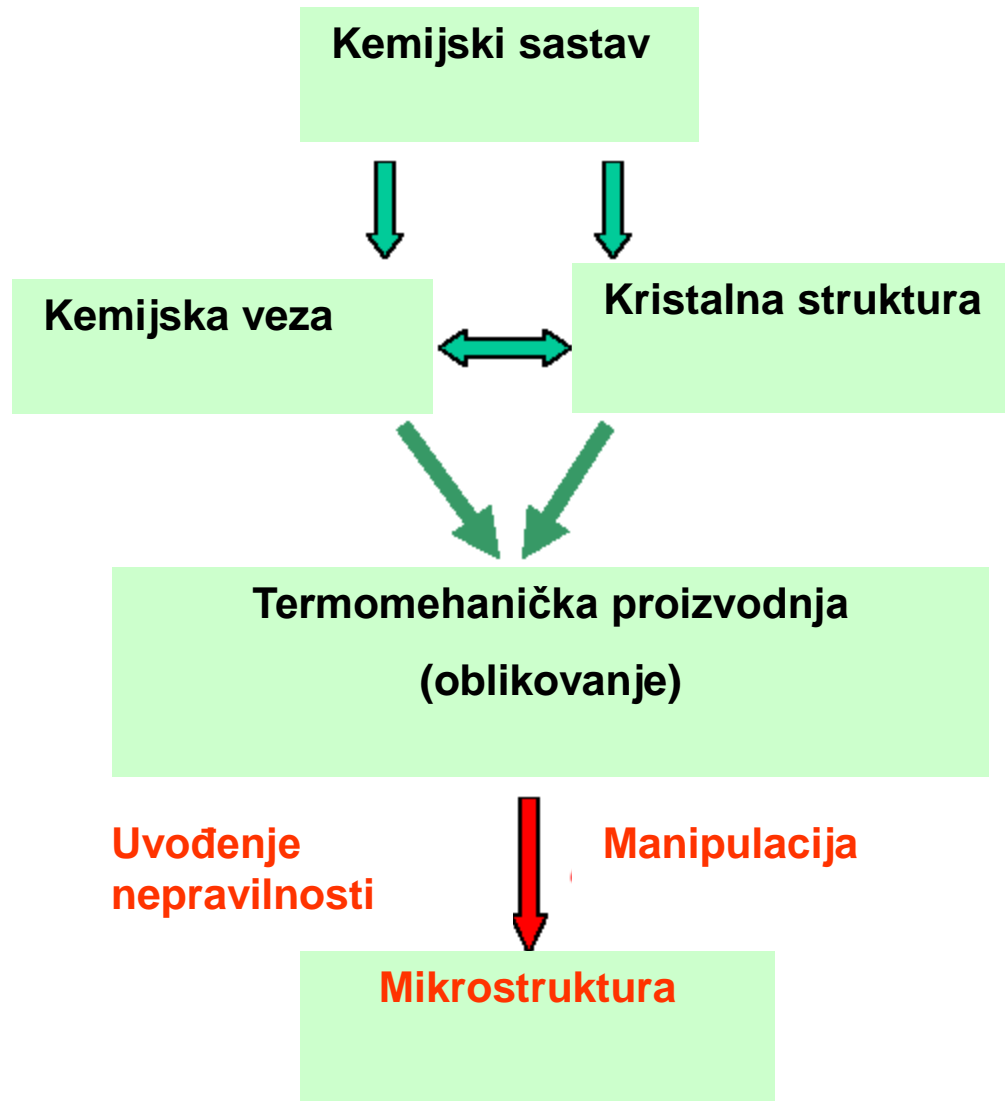
Slika 1. Shema realnog kristala s nesavršenostima

Utjecaj nesavršnosti kristala na makroskopska svojstva materijala



Slika 2. Utjecaj nesavršnosti kristala na makroskopska svojstva materijala

Nastajanje nesavršenosti u kristalima



Slika 3. Nastajanje nesavršenosti u kristalima

Podjela nesavršenosti građe kristala

Nesavršenosti kristala klasificiraju se prema njihovoj geometriji i obliku i ima i 4:

1) 0D – Nuldimenzijske (točkaste)

- Atom nedostaje ili je na nepravilnom mjestu (vakancije, intersticije, nečistoće)

2) 1D – Jednodimenzijske (linijske)

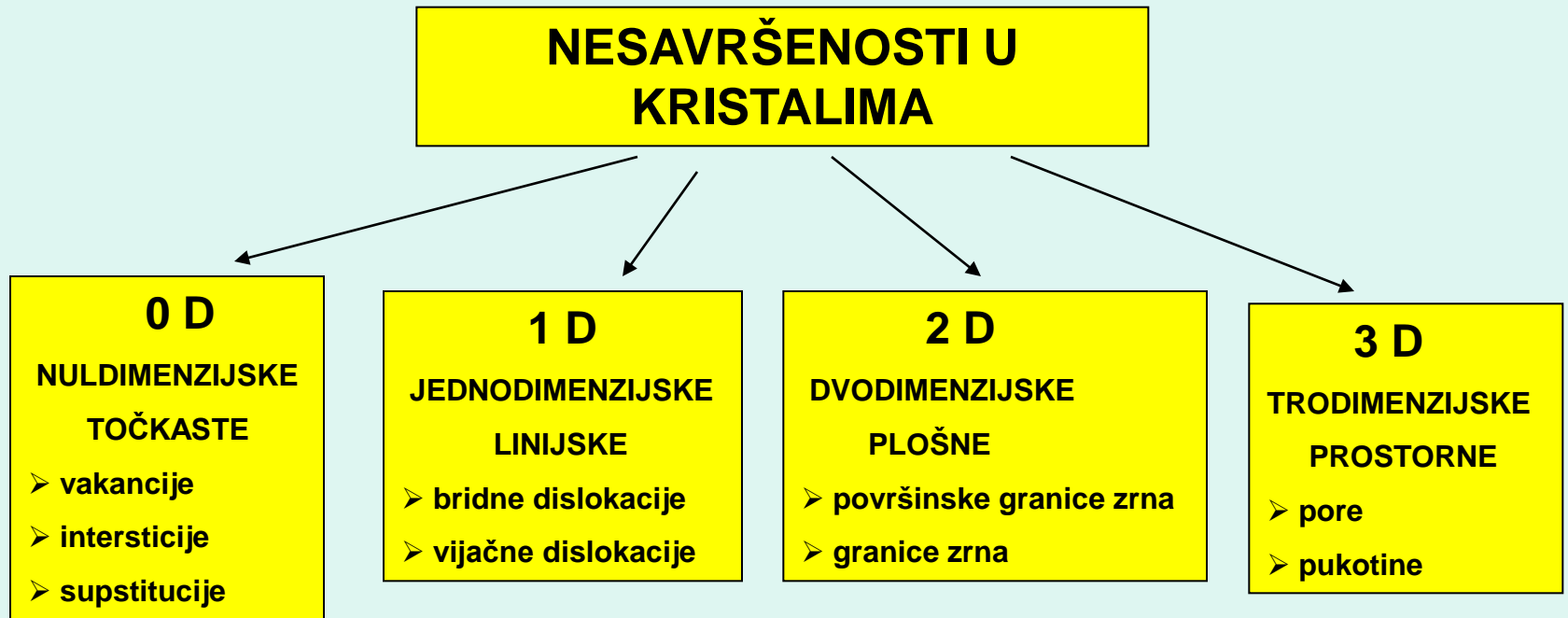
- Grupe atoma u nepravilnoj poziciji – dislokacije: bridne (pravocrtne) i vijčane (spiralne poput vijka)

3) 2D – Dvodimenzijske (plošne)

- Granice kristalnih zrna, vanjske površine

4) 3D – Trodimenzijske (prostorne)

- Pore, pukotine, uključci stranih čestica



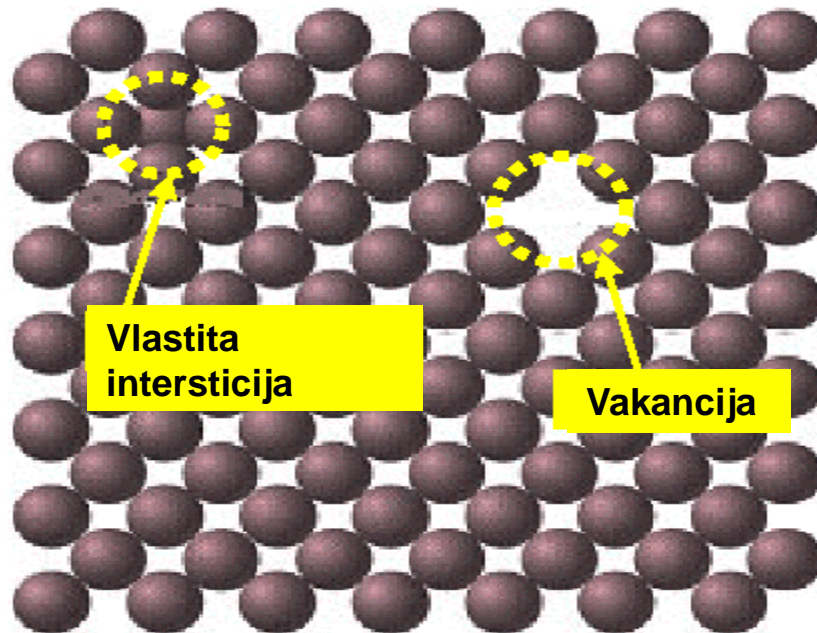
Slika 4. Podjela nesavršenosti u kristalima

1) 0 D – NULDIMENZIJSKE (TOČKASTE) NESAVRŠENOSTI

- Dije se na: strukturne i kemijske točkaste nesavršenosti

A) Strukturne točkaste nesavršenosti

- Nastaju greškama u slaganju vlastitih atoma unutar kristalne rešetke



- **Broj vakancija se mijenja**, npr. na sobnoj temperaturi Cu ima jednu vakanciju na 10^{15} atoma kristalne rešetke, međutim na temperaturi blizu tališta ima jednu vakanciju na svakih 10000 atoma

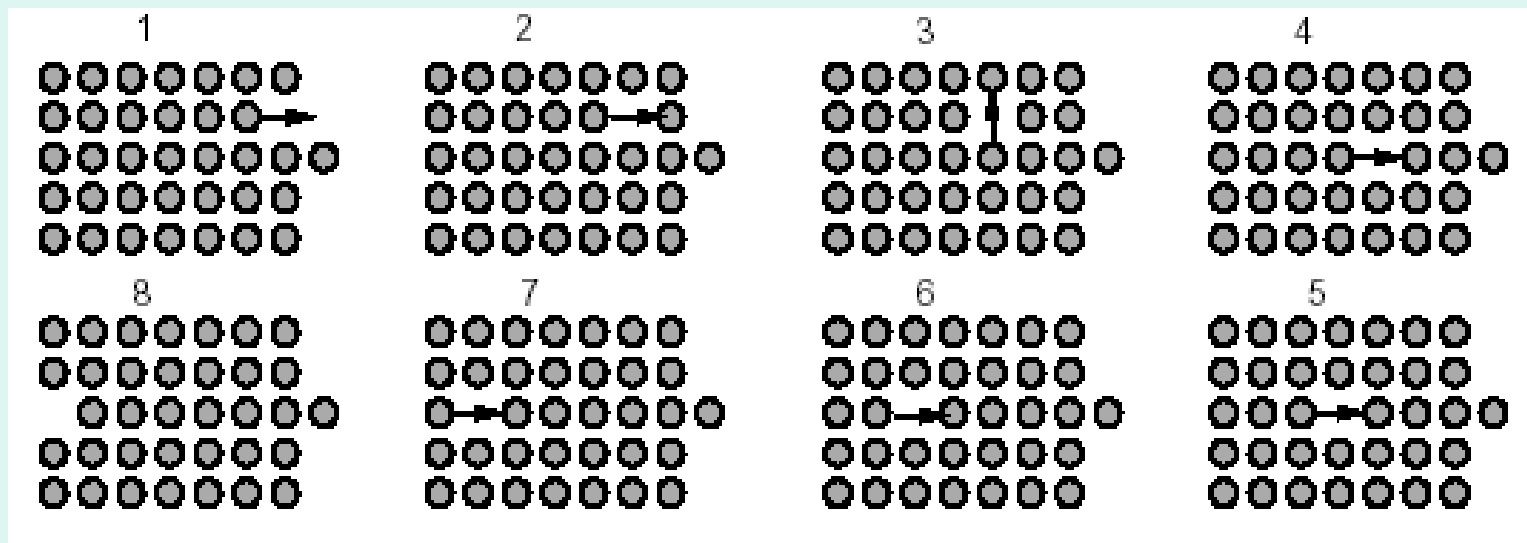
- **Veliki broj dodatnih vakancija** (neravnotežnih) može nastati tijekom procesa rasta kristala ili kao rezultat buduće obrade materijala kao što su: plastična deformacija, toplinska obrada (žarenje i zatim ohlađivanje do sobne temperature), itd.

- **Postojanje određenog broja vakancija omogućava i olakšava procese difuzije u legurama**

Slika 5. Shematski prikaz strukturnih točkastih nesavršenosti: a) **vakancije** – pložaj u kristalnoj rešetki gdje nedostaje atom i b) **intersticije** (uključinska pozicija) - vlastita intersticija - isti tip atoma samo na nepravilnom mjestu u kristalnoj rešetki

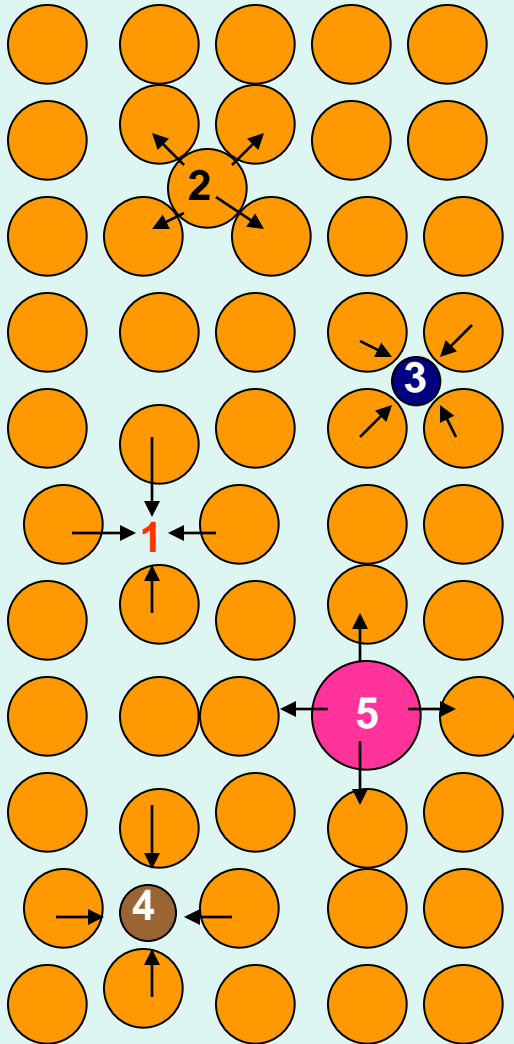
Važnost postojanja vakancija

- kontroliraju brzinu zamjene atoma kod legura (difuzijom atoma)
- atomi se mogu kretati kroz kristalne tvare primarno zbog prisutnosti vakancija
- vakancija ima smjer suprotan smjeru kretanja atoma kroz kristalnu rešetku



Slika 6. Shematski prikaz dinamike kretanja vakancija kroz gusto slegan kristal metala

A) Strukturne točkaste nesavršenosti



- 1- **Vakancija** – pločaj u kristalnoj rešetki gdje nedostaje atom
- 2 - **Intersticija - vlastita intersticija** – vlastiti se atom smjestio između pravilno poredanih atoma, dakle na nepravilnom mjestu (uključinska pozicija)

B) Kemijske točkaste nesavršenosti

- 3 - **Intersticijska nečistoća**, tj. tuđi atom koji se smjestio između atoma osnovnog metala (kao neželjna nečistoća ili kao željena, npr. C u kristalnoj rešetki Fe (čelik))
- 4,5 - **Supstitucijska nečistoća (zamjenbena)**, tj. tuđi atom koji je zamijenio atom osnovnog metala (npr. u leguri Cu-Ni kad se atom Ni zamijeni atomom Cu u kristalnoj rešetki Cu)
- Strelice pokazuju smjer lokalne napetosti u kristalnoj rešetki uzrokovane točkastim nesavršenostima koje dovode do iskrivljenja rešetke.

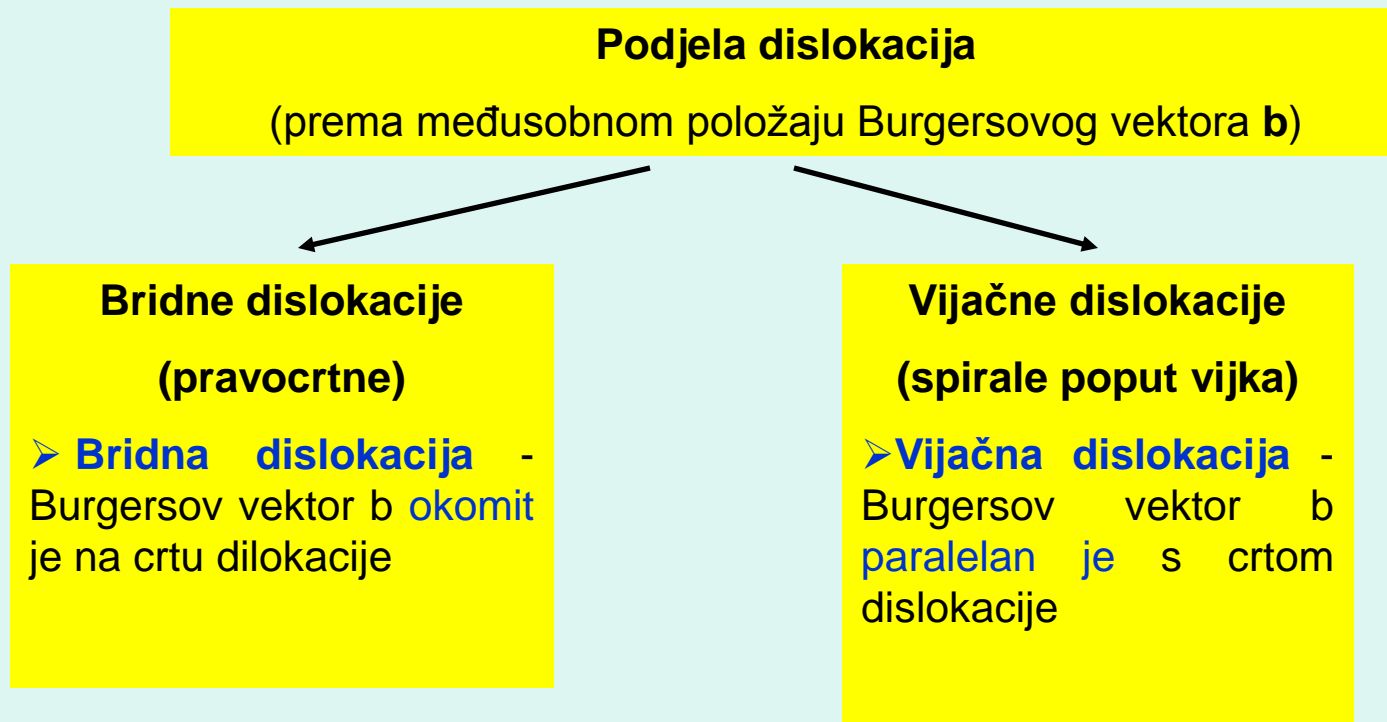
Slika 7. Shematski prikaz točkastih nesavršenosti

Kemijske točkaste nesavršenosti

- **Nečistoća** – strani atom koji je drukčiji (drugi kemijski element; razlikuju se po promjeru atoma) od atoma “domaćina” u kristalnoj rešetki
 - strani atom može biti smješten u intersticijskom položaju (ako ima dovoljno mali promjer atoma) ili supstitucijskom ako mu je promjer atoma približno velik kao atomu osnovnog metala čija je kristalna rešetka
 - Sve realne čvrste tvari su nečiste. Vrlo čisti metali 99.99999 – imaju jednu nečistoću na broj od 10^6 atoma
 - Nečistoće mogu biti **nenamjerne** ili **namjerne**
- Namjerne nečistoće:** npr. ugljik dodan željezu daje leguru čelik koji je mnogo čvršći nego čisto željezo
- **Točkaste nesavršenosti olakšavaju nastajanje legura**

1 D - JEDNODIMENZIJSKE NESAVRŠENOSTI U KRISTALU – DISLOKACIJE

➤ **Definicija:** Jednodimenzijske, linijske nesavršenosti ili dislokacije u kristalnim krutinama su nepravilnosti koje uzrokuju distorziju, grešku na liniji, crti u kristalu. Nastaju nagomilavanjem niza točkastih nesavršenosti.



Slika 8. Podjela jednodimenzijskih nesavršenosti u kristalu - dislokacija

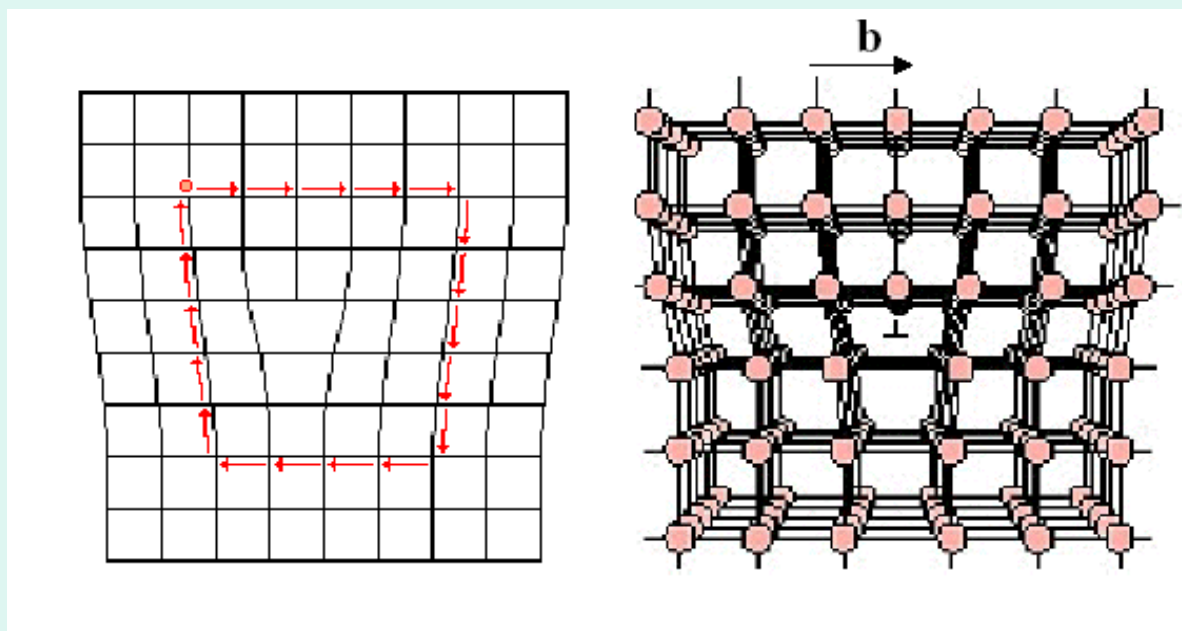
Opis dislokacija – Burgersov vektor

➤ Za opis dimenzija i smjera najvećih pomaka u kristalnoj rešetki, a koje uzrokuju dislokacije, služimo se tzv. **Burgersovim vektorom b** . Da bismo odredili Burgersov vektor moramo kružiti od početne točke (●) oko crte dislokacije s jednakim brojem koraka (od atoma do atoma na jednakoj udaljenosti u svim smjerovima) u smjeru kazaljke na satu, slika 9. Nedostajući korak (ili više njih) potreban za zatvaranje kruženja oko dislokacije naziva se **Burgersov vektor b** koji je definiran vrijednošću konstante rešetke i kristalografskim pravcem.

Prema međusobnom položaju Burgersovog vektora i dislokacijske crte, dislokacije se dijele na:

- **Bridnu dislokaciju** ako je **Burgersov vektor b okomit** na crtu dislokacije
- **Vijačnu dislokaciju** ako je **Burgersov vektor b paralelan** s crtom dislokacije

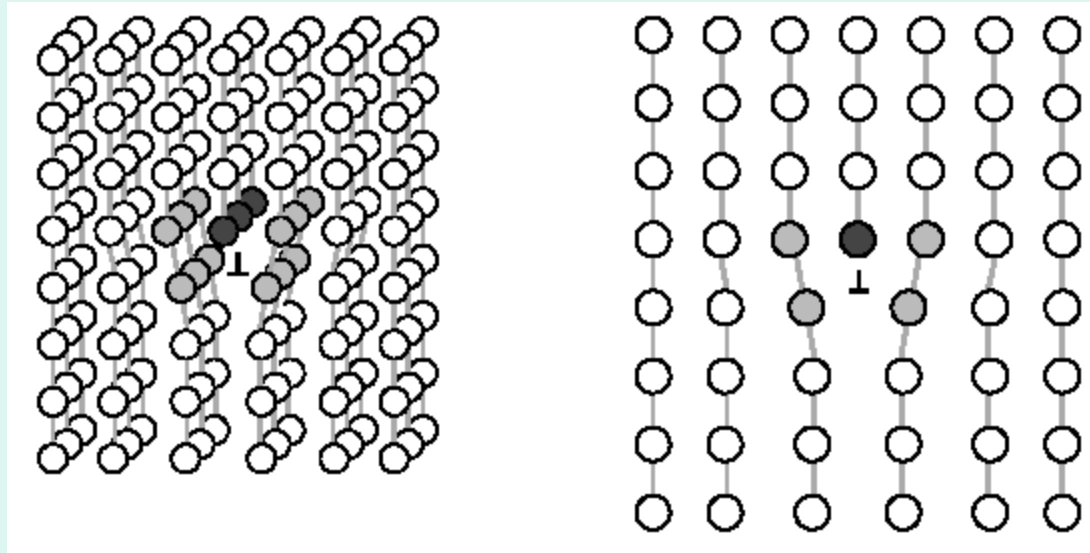
Bridna dislokacija - Burgersov vektor b okomit je na crtu dilokacije



Slika 9. Određivanje Burgersovog vektora b kod bridne dislokacije

1 D – JEDNODIMENZIJSKE NESAVRŠENOSTI U KRISTALIMA, LINIJSKE JEDNODIMENZIJSKE NESAVRŠENOSTI – BRIDNE DISLOKACIJE

- **Bridna dislokacija - Burgersov vektor b je okomit na crtu dilokacije**
- **Označavanje dislokacija:**
 - **simbol \perp se koristi za označavanje pozitivne dislokacije (kada je uključena nova ploha)**
 - **simbol \top se koristi za označavanje negativne dislokacije (kada nedostaje ploha)**
 - **dislokacije nastaju nagomilavanjem niza točkastih nesavršenosti u kristalu**



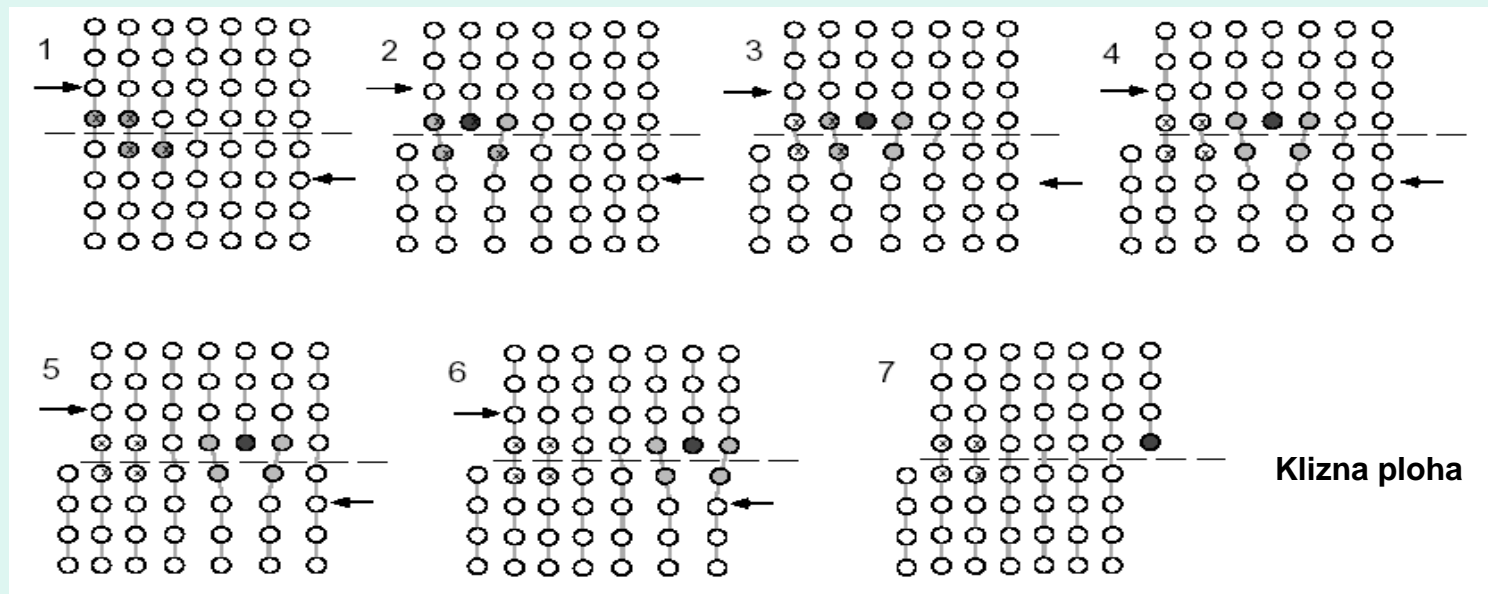
Slika 10. Shematski prikaz bridne dislokacije: zadnji red atoma (crno) na ekstra uključenoj plohi

➤ **Kretanje bridnih dislokacija:** ako na kristal djeluje smično naprezanje dislokacije se kreću tako da se miče red atoma za redom te je jedan dio kristala pomaknut u odnosu na drugi. Kada je dislokacija prošla kroz kristal, dio kristala u blizini *klizne plohe* se pomakao jedan atomski razmak u odnosu na dio ispod *klizne plohe*. Drugim rječima, kretanje dislokacija uzrokovalo je promjenu oblika kristala koji ostaje trajno deformiran – plastična deformacija (slika 11).

➤ Kretanje dislokacija se najlakše događa na najgušće zaposjednutim ploham kristala:

Za FCC – strukture su klizne plohe $\{111\}$ u smjeru $\langle 110 \rangle$

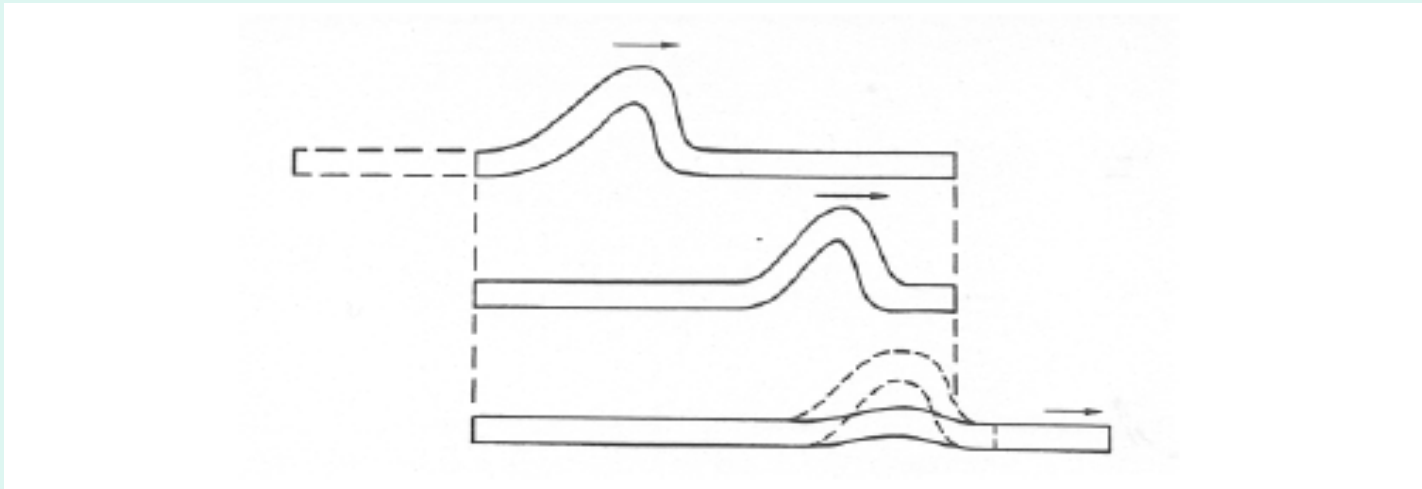
Za BCC – strukture su klizne plohe $\{110\}$ u smjeru $\langle 111 \rangle$



Slika 11. Plastična deformacija udružena s klizanjem, koje uzrokuje kretanje dislokacija, što je posljedica djelovanja vanjskog smičnog naprezanja na kristal

Za plastičnu deformaciju je potrebna velika sila (teorijski) da razbije sve veze između atoma na kliznoj plohi, međutim plastična se deformacija događa kod upotrebe znatno manje sile zbog kretanja velikog broja dislokacija.

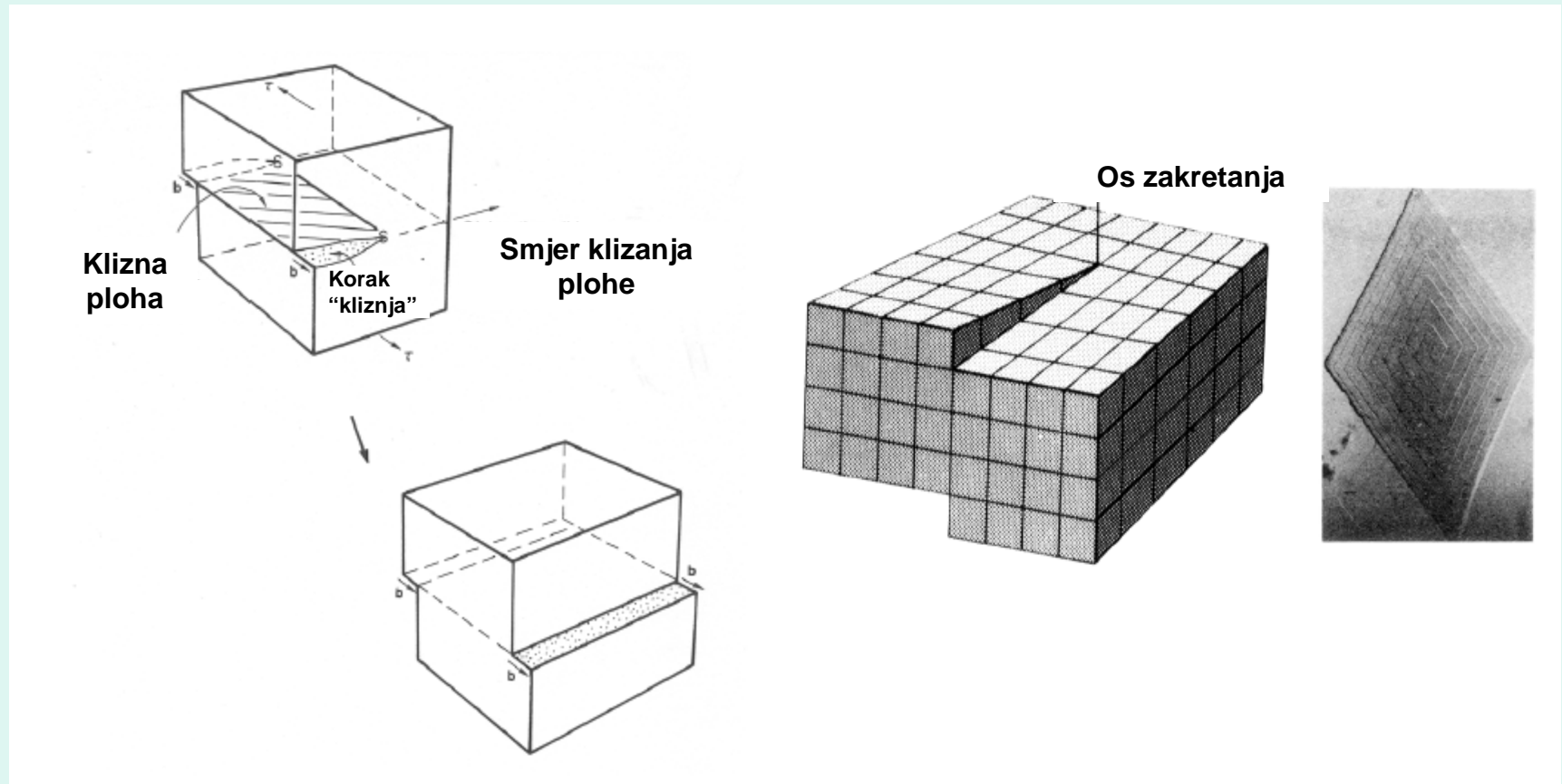
Način na koji se bridne dislokacije kreću sličan je pomicanju tepiha na podu (slika 12). Lakše je pomaknuti tepih na ovaj način nego ga cijeloga podignuti i pomaknuti.



Slika 12. Usporedba kretanja bridne dislokacije s pomicanjem tepiha

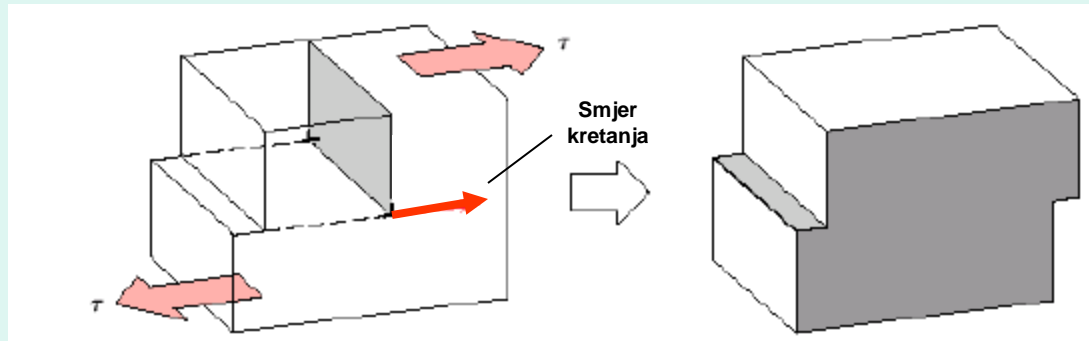
JEDNODIMENZIJSKE NESAVRŠENOSTI VIJAČNE DISLOKACIJE

- **Vijačna dislokacija - Burgersov vektor b je paralelan s crtom dislokacije**

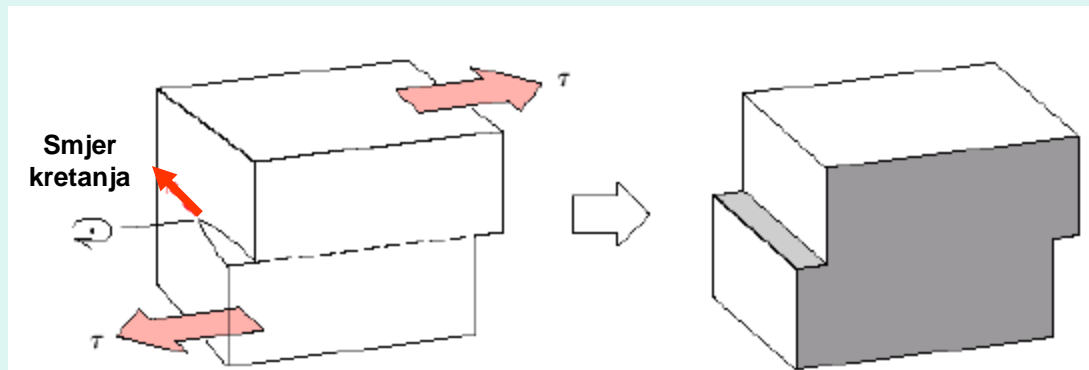


Slika 13. Shematski prkazi vijačne deformacije, kreće se kao spirala

Smjer kretanja dislokacija



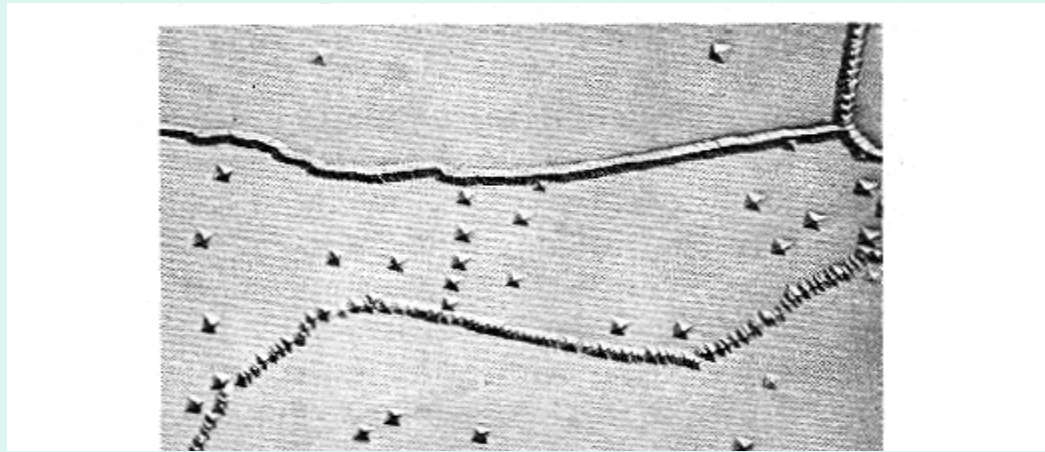
Slika 14. Bridne dislokacijske linije kreću se paralelno s obzirom na smjer djelovanja vanjske sile



Slika 15. Vijačne dislokacijske linije kreću se okomito s obzirom na smjer djelovanja vanjske sile

Promatranje dislokacija

Dislokacije se mogu promatrati pomoću metalografskog mikroskopa. Površina uzorka se prethodno pripremi kemijskim nagrizanjem koje će otopiti okolinu dislokacija. Nastati će “vrhovi” koje je lako uočiti.



Slika 16. Mikroskopski izgled dislokacija

Pošto su dislokacije vrlo važne za mehanička svojstva materijala, ova je tehnika pogodna za određivanje gustoće dislokacija:

$$\rho = \frac{\text{Broj dislokacija}}{\text{Jedinica površine}}, \text{ (jedinica: } 1/\text{m}^2\text{)}$$

- Gustoća dislokacija varira od $10^5/\text{cm}^2$ do $10^{12}/\text{cm}^2$ u jako deformiranim metalima
- Broj dislokacija znatno raste tijekom plastične deformacije

Važnost dislokacija

- Dislokacije su vrlo važne za mehanička svojstva materijala. Za njihovo proučavanje (1934. god.) zaslužni su Taylor, Orowan i Polyani koji su započeli s istraživanjem i razumijevanjem mehaničkih svojstava materijala. Ona se i do danas intenzivno istražuju.
- Postojanje dislokacija (jednodimenzijskih, linijskih nesavršenosti) u kristalima omogućava mehanizam pomoću kojeg dolazi do promjene oblika ili mehaničke deformacije.
- Kristalne krutine koje nemaju dislokacija su krhke i praktički neupotrebljive kao konstrukcijski materijal, pogotovo u strojarstvu.
- Postojanje dislokacija u kristalima osigurava duktilnost (sposobnost deformiranja), jer je teorijska čvrstoća kristalnih krutina drastično smanjena zbog njihove prisutnosti.
- Možemo vidjeti da su dislokacije vrlo važne u određivanju čvrstoće i duktilnosti materijala.
- Sva mehanička svojstva kristalnih krutih materijala ovise o ponašanju dislokacija.

2 D - DVODIMENZIJSKE NESAVRŠENOSTI – PLOŠNE NESAVRŠENOSTI

Dvodimenzijske, plošne nesavršenosti mogu se prema površini nastajanja podijeliti na one koje nastaju na površini kristala - vanjske površinske nesavršenosti i unutar kristala – granice zrna

➤ **Vanjske površininske nesavršenosti** nastaju na površini kristala (slobodne površine ako su u kontaktu sa zrakom) – površinski atomi imaju nezadovoljavajuće atomske veze za razliku od unutarnjih, ali zadržavaju isti prostorni raspored (kristalnu rešetku)

➤ Površinski atomi imaju veću energiju od unutarnjih – vrlo rado stupaju u kemijsku reakciju s okolinom

• Zbog toga se površinski dio nastoji smanjiti

• Krute površine se mogu presložiti kako bi zadovoljile atomske veze atoma na površini

➤ **Granice zrna.** Polikristalni materijali kakvi su metali sastoje se od mnogo malih kristala ili zrna, jer su nastali iz velikog broja centara kristalizacije. Orijentacija tih zrna je različita pa je narušena građa kristala na njihovim dodirnim površinama koje se nazivaju granice zrna. Kao plošne, dvodimenzijske nesavršenosti, granice zrna zahvaćaju veliki volumen metala.

➤ Granice kristalnih zrna imaju veći sadržaj energije od unutrašnjosti zrna

➤ Vanjske površine i granice zrna su raktivne pa se nečistoće lako vežu s njima

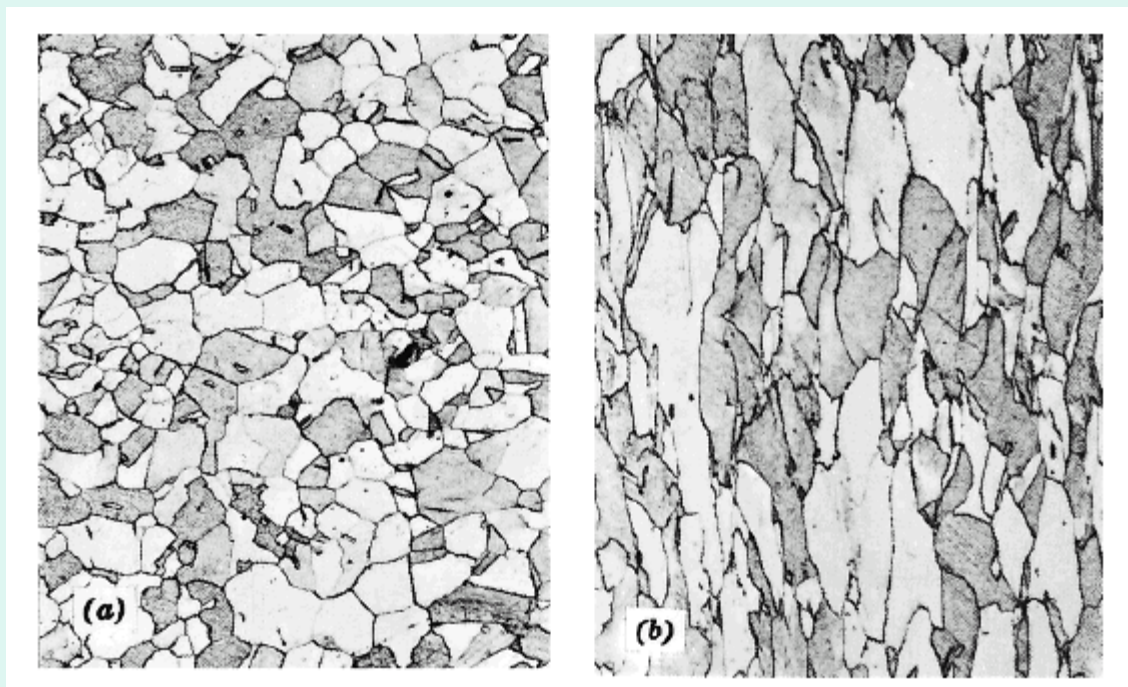
➤ Veličina kristalnih zrna je veoma važna za mehanička svojstva metala i legura.

➤ Što su sitnija zrna to su bolja mehanička svojstva (čvrstoća, tvrdoća, žilavost) nego ako je krupnozrnata struktura istog materijala.

➤ Što je broj malih kristalnih zrna veći, metal ima veću duljinu kristalnih granica

Primjer plastične deformacije polikristalnog materijala

- Jača plastična deformacija rezultira produljenjem zrna uzduž smjera djelovanja primjenjenog naprezanja.



Slika 17. Plastična deformacija kristalnih zrna: a) prije deformacije, b) nakon deformacije

3 D - TRODIMENZIJSKE, PROSTORNE NESAVRŠENOSTI

Makroskopske nesavršenosti

➤ Nastaju tijekom proizvodnje metala:

- Pore – mogu bitno utjecati na optička, toplinska i mehanička svojstva
- Pukotine – jako utječu na mehanička svojstva
- Uključci stranih čestica – mogu bitno utjecati na mehanička , optička i električna svojstva