Mašinski materijali 3

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

1 Uvod

- Šta je nauka o materijalima?
- Zašto nam je bitna?

- **Materijali su obeležili doba**
  - Kameno doba
  - Bronzano doba
  - Gvozdeno doba (hmm☺ za nas je Fe železo)
  - Savremeno doba?
    - Silicijum?
    - Polimeri?
    - Pametni materijali?

Vrste materijala

- **Keramike: najčešće jonska veza (vatrostalni) ali je prisutna i kovalentna – često jedinjenja metala & nemetala (oksidi, karbidi, nitridi, sulfidi)**
  - **Visoka čvrstoća, modul elastičnosti, krte**
  - **Izolatori**
  - **Staklaste površine**
- **Polimeri/plastike: Kovalentna veza**
  - **Niska čvrstoća, duktilni, mala gustina**
  - **Toplotni i električni izolatori**
  - **Prozirni, providni i neprovidni**
- **Metali: metalna veza → kristalne rešetke**
  - **Visoka čvrstoća, duktilni**
  - **Visoka toplotna & električna provodnost**
  - **Neprovidni, reflektuju svetlost.**

Izbor materijala u mašinstvu

1. Primena → Primena određuje zahtevane osobine materijala

npr.: mehaničke – zahteva se visoka čvrstoća ili žilavost, električne – zahteva se dobra provodnost, ili npr. da bude isolator ili se traže druge osobine: termičke, magnetne, optičke, kako degradira, mikrostruktura, hemijski sastav,..

2. Osobine → Na osnovu osobina, vršimo izbor kandidata materijala

3. Izrada → Kada je izabran materijal bira se stanje isporuke, tj. način izrade

Načinom izrade delova menjamo mikrostrukturu i *oblik dela* npr: livenje, valjanje, kovanje, sinterovanje, naparavanje, rezanje, spajanje/zavarivanje, termička obrada, itd.

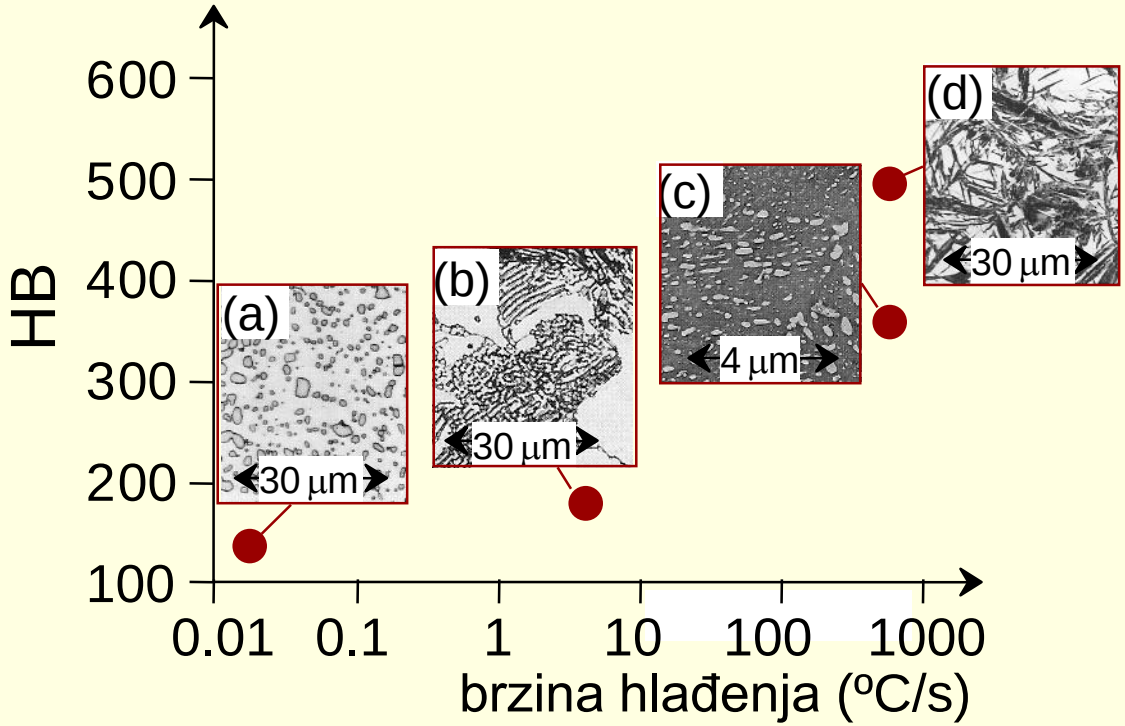
- **Kod materijala postoji neraskidiva veza osobina:**
  mikrostruktura i način izrade određuju osobine

Korelacija - izrada, mikrostruktura & osobine

Primer: tvrdoća čelika

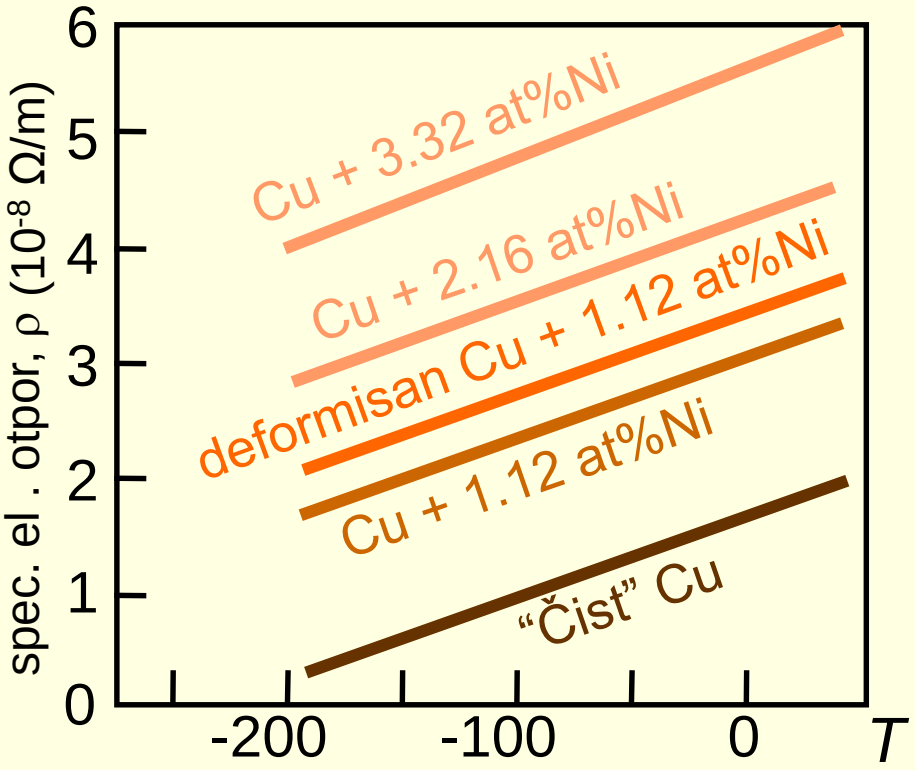
- osobine zavise od mikrostrukture
- različitim postupcima izrade menja se mikrostruktura

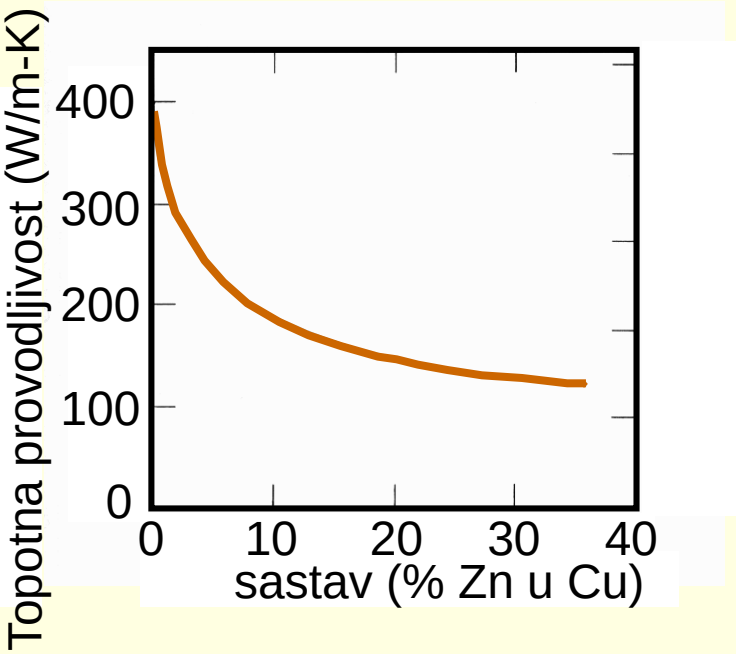
  - kod čelika mikrostruktura je definisana brzinom hlađenja (izrada) i u korelaciji je sa HB (osobina)



Korelacija - izrada, mikrostruktura & osobine

- Električna otpornost i toplotna provodljivost bakra (Cu):



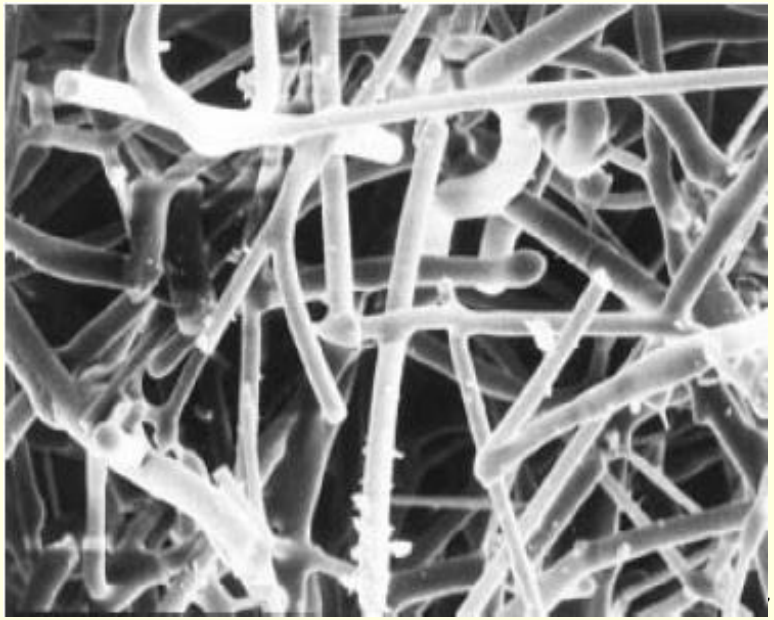


- Dodatkom atoma "nečistoća" u Cu raste el. otpornost (važi i za legiranje!)
- Toplotna provodljivost Cu sa dodatkom Zn opada, ...ali raste čvrstoća
- Porastom stepena deformacije Cu, raste el. otpornost.

Korelacija - izrada, mikrostruktura& osobine

Primer: toplotna provodljivost

Pločice za Space Shuttle:
Vlakna SiO_2 imaju vrlo malu toplotnu provodljivost



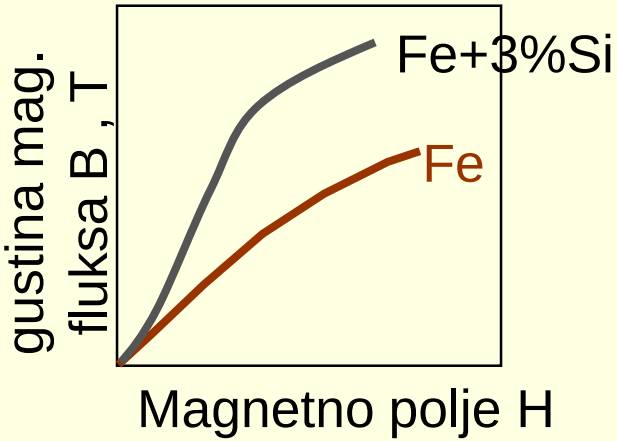
100 μm

Korelacija - izrada, mikrostruktura& osobine

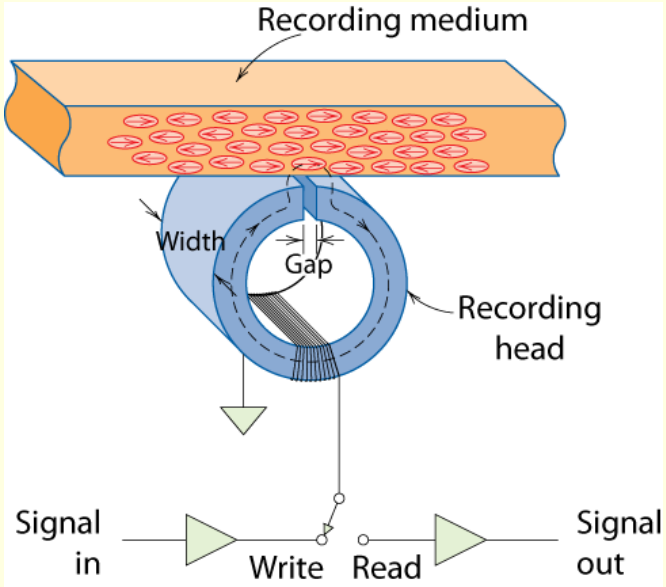
Primer: magnetne osobine

- Magnetna permeabilnost (μ) je elektromagnetna osobina koja pokazuje intenzitet magnetizacije kada su tela izložena spoljašnjem magnetnom polju.
- Što je permeabilnost veća, veća je magnetizacija (lakše se uspostavlja magnetnog polja u materijalu).

- Magnetna permeabilnost je u f-ji sastava: - dodatkom 3at.% Si u Fe raste intenzitet magnetizacije – bolji magnetni zapis!



- Magnetni zapisi na traci: traka se magnetiše magnetnom glavom.



Korelacija - izrada, mikrostruktura& osobine

Primer: optičke osobine

- Providnost (propuštanje svetlosti):
  - Al_2O_3 može biti providan, proziran ili neprovidan u zavisnosti od strukture

.

monokristal

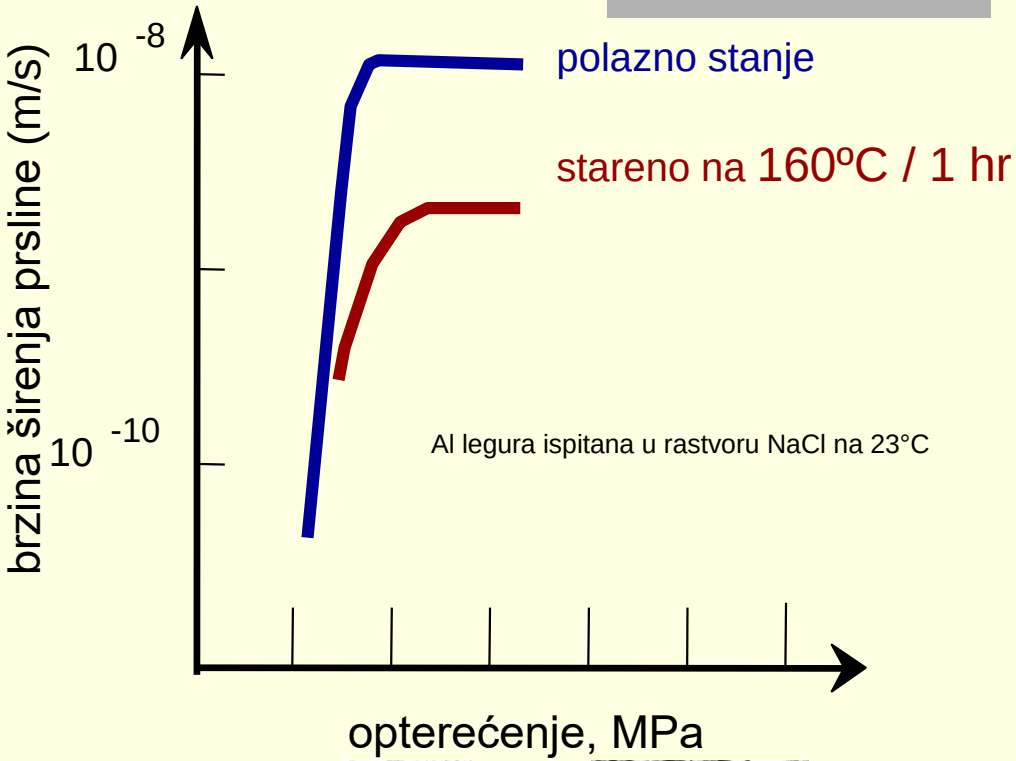
polikristal: mala poroznost

policristal: velika poroznost

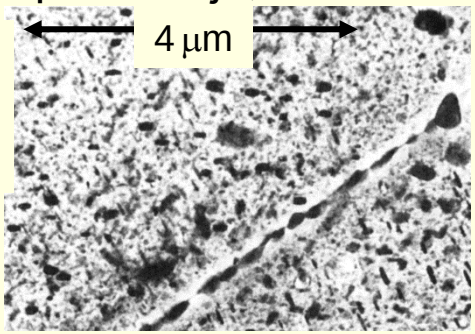
Korelacija - izrada, mikrostruktura& osobine

Primer: način degradacije materijala

- Kod nekih legura Al napon & morska voda izazivaju prsline naponske korozije!
- **Termička obrada** usporava brzinu širenja prslina naponske korozije u slanoj vodi!

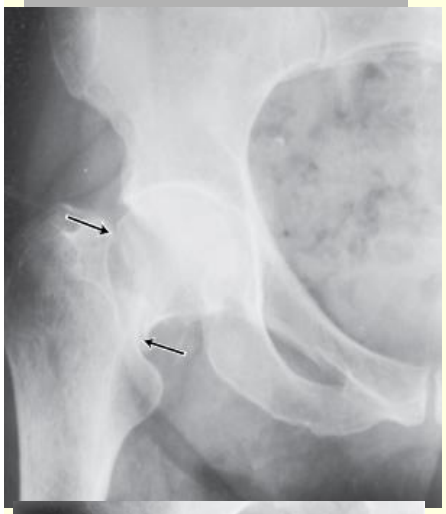


-materijal:
Al legura
(Zn,Cu,Mg,Zr)



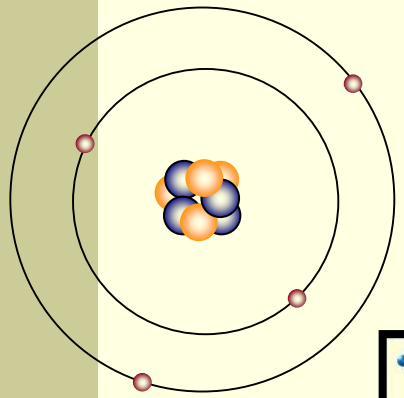
Primer izbora materijala
Inženjerski problem – zamena kuka

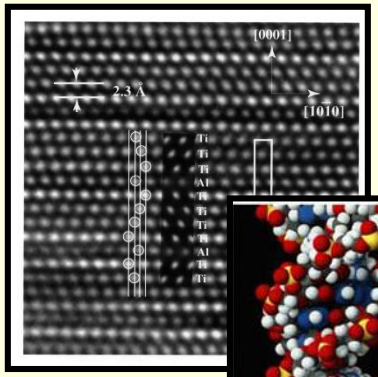
- Starenjem zglobovi se “troše” tj habaju.
- Zahtevi za materijal za izradu veštačkog kuka:
  - biokompatibilnost
  - dinamička čvrstoća
  - dobro podmazivanje ne smeju da se izdvajaju čestica usled habanja *kapice*
- Najveći problemi pri izradi:
  - Kako učvrstiti *kapicu*
  - “lepak” kojim se vezuje femoralni deo za kost

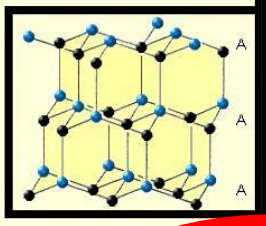


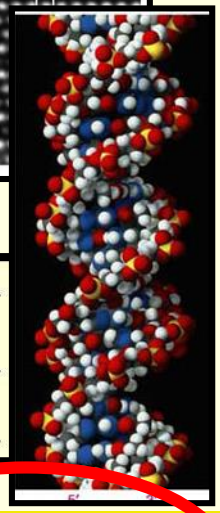
(b)

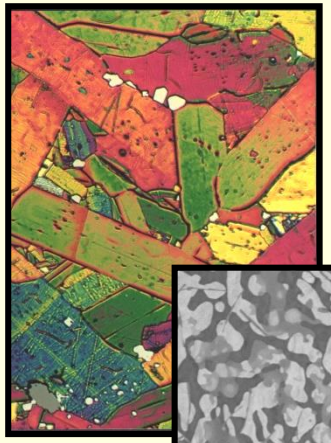
STRUKTURA MATERIJALA

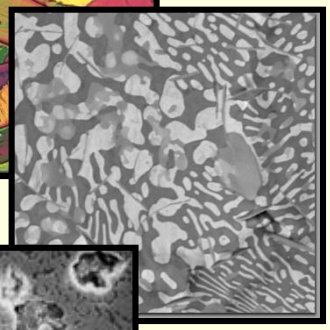


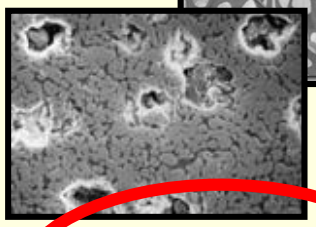


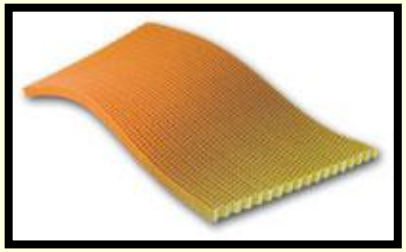












Subatomski nivo | Atomski nivo | Mikrostruktura | Makrostruktura

Osnovne grupe materijala - poređenje

Keramike

krute, visoka čvrstoća, vrlo tvrde, krte, loši provodinici, otporne na T i koroziju, neke magnetične itd

Jedinjenja metala i nemetala ili metaloida (Si, B) i nemetala, često oksidi, nitridi, karbidi
Npr. Al_2O_3, SiO_2, Si_3N_4, SiC,...
Ili tradicionalne keramike:
minerali gline (porcelan), staklo, stene, itd

Metali

Metali i njihove legure

veća gustina, veća čvrstoća, duktilni, umereno tvrdi, otporni na lom, dobri provodnici, neki magnetični

Polimeri

nisu čvrste i tvrde ali imaju malu gustinu –

Gume i plastike, npr. polietilen (PE), polivinilhlorid (PVC), silikonska guma, itd

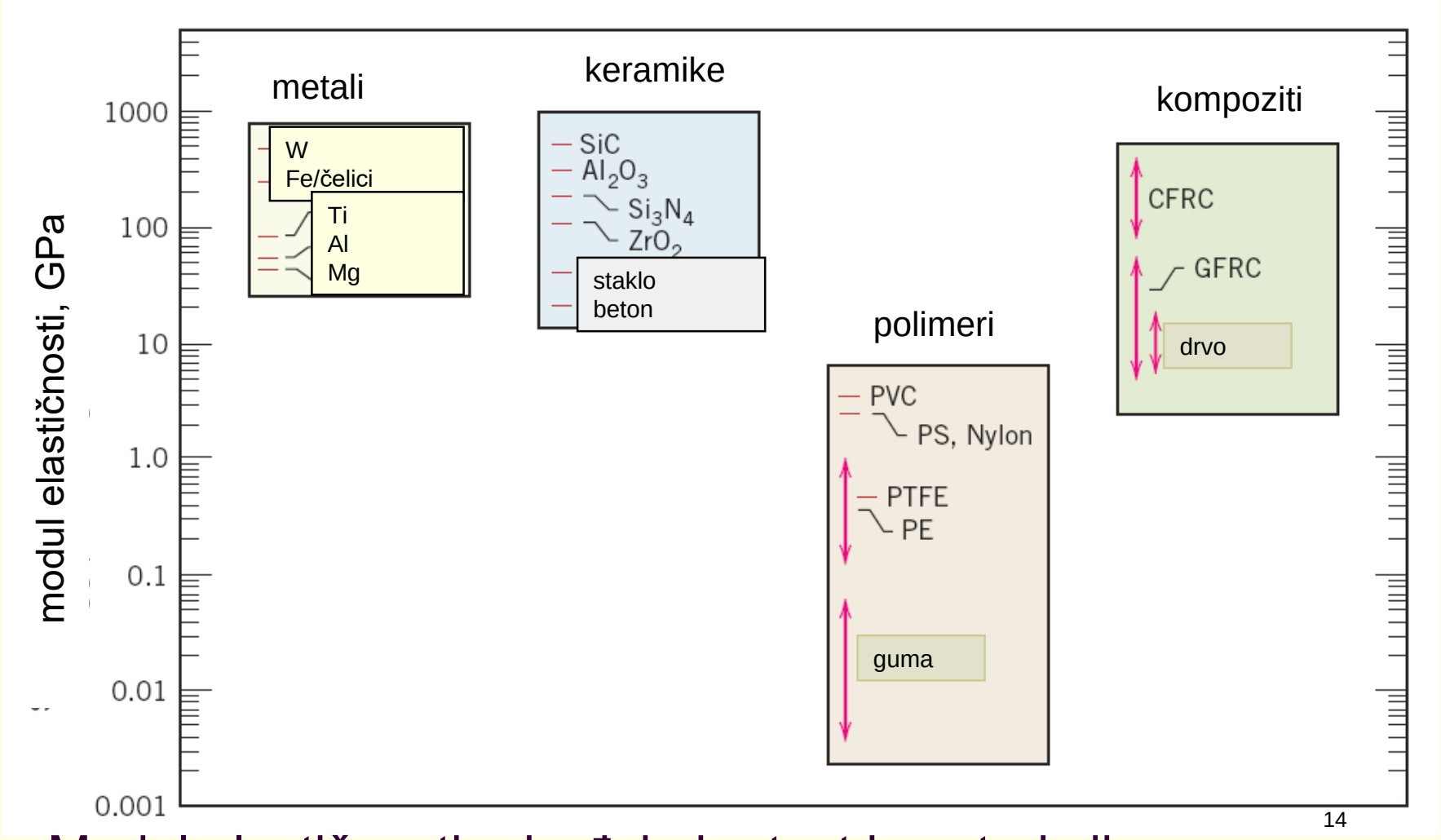
krutost i čvrstoća svedeni na masu su u rangu metala i keramika

Kompoziti

osobine zadržavaju od gradivnih komponenti i daju nove

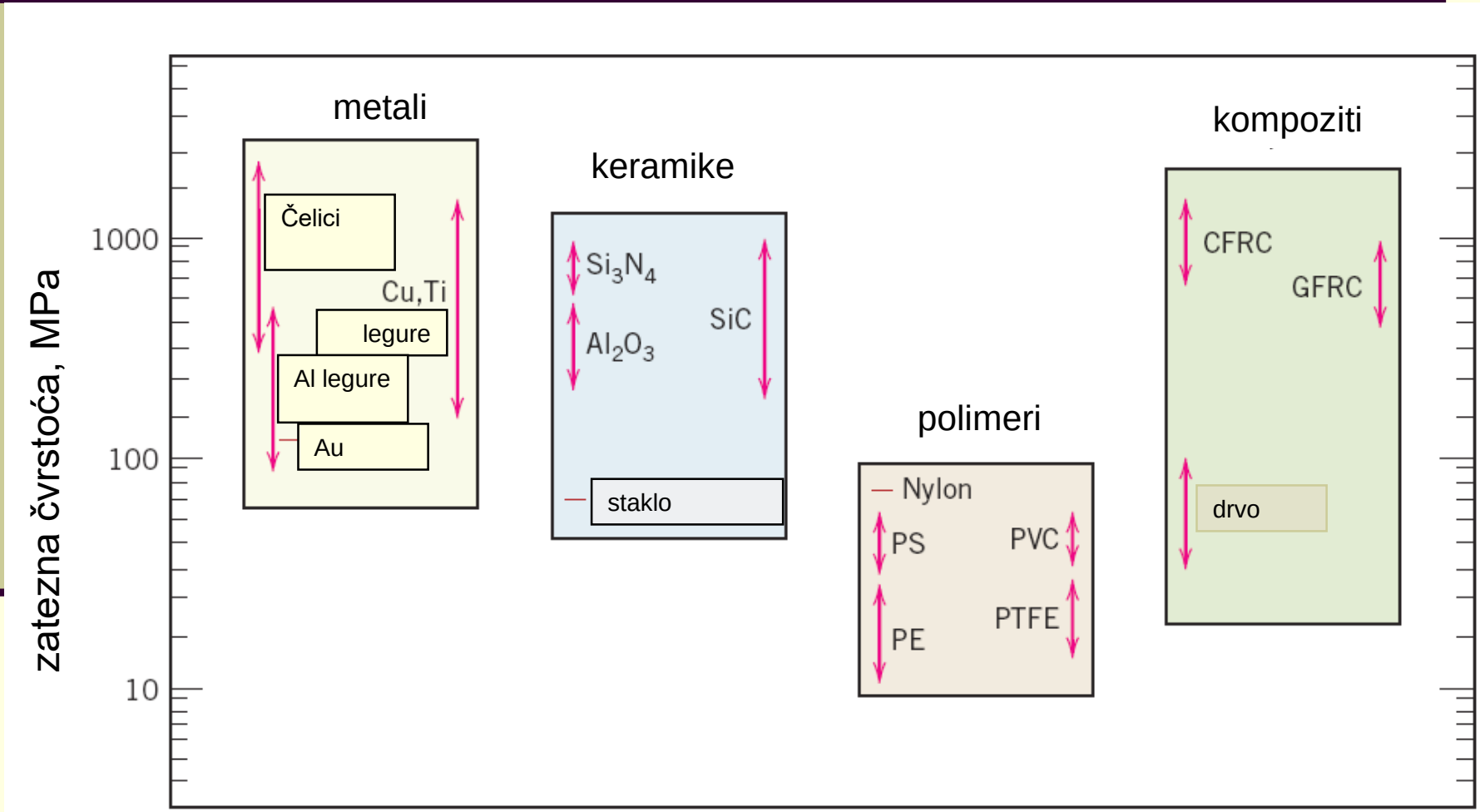
Grade ih dve ili sve tri osnovne grupe materijala
prirodni kompoziti – drvo i kost

Poređenje osnovnih grupa materijala prema modulu elastičnosti



Modul elastičnosti određuje krutost konstrukcije

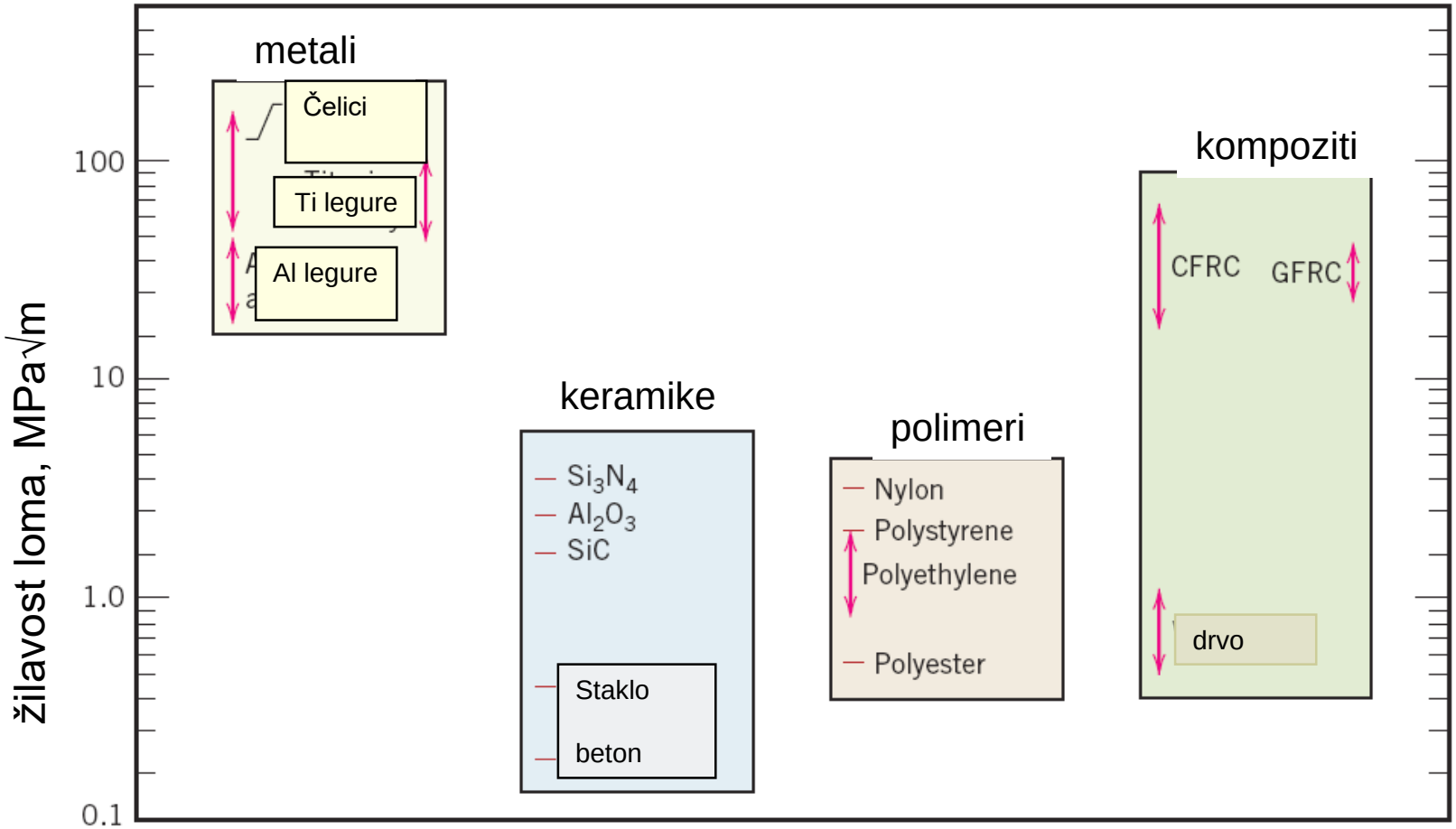
Poređenje osnovnih grupa materijala po čvrstoći



Zatezna čvrstoća određuje nosivost konstrukcije do loma.

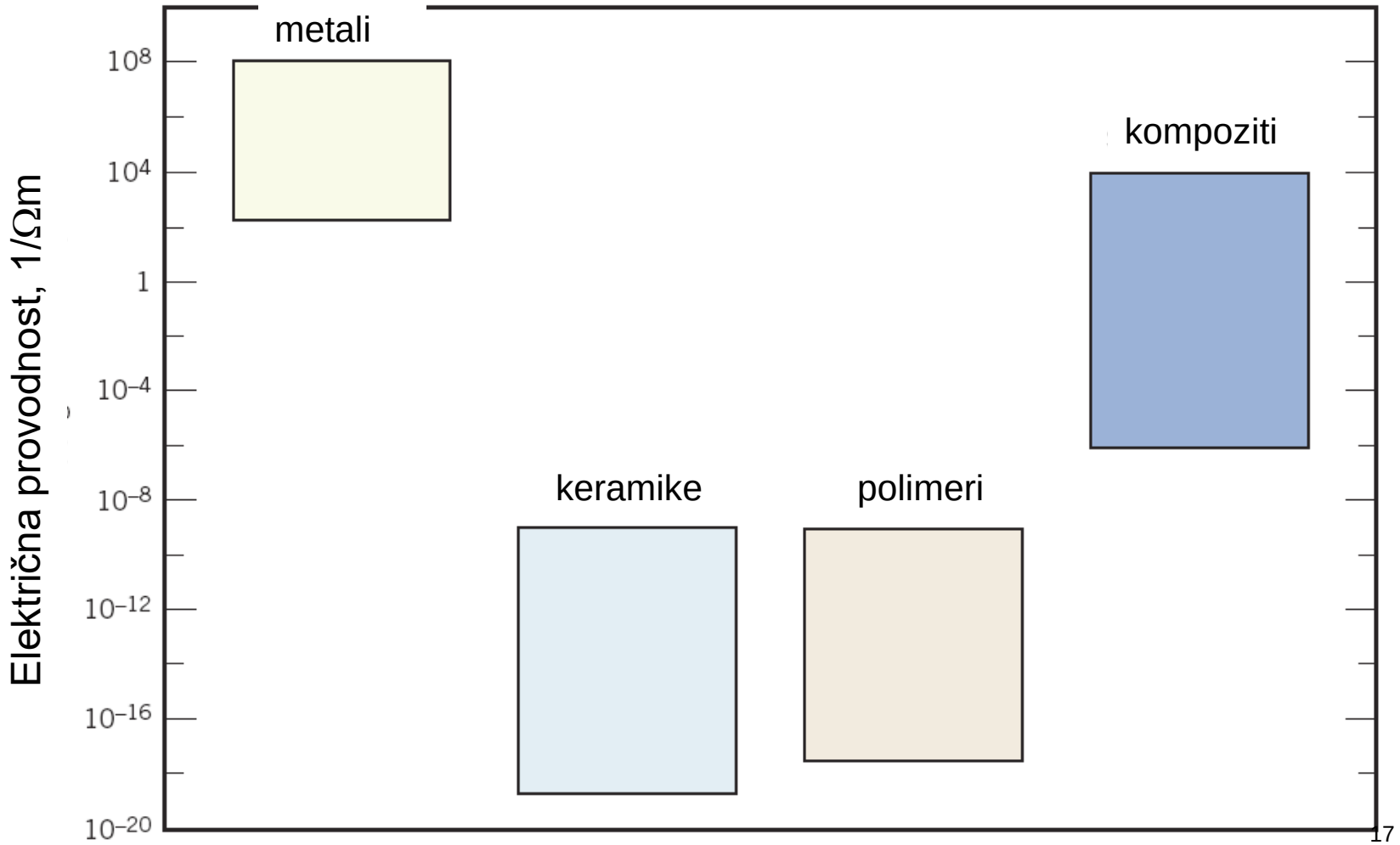
Veličine $R_{0,2}$ ili R_d ili $R_{100.000}^{540°C}$ određuju...? (pitanje za vas☺)

Poređenje osnovnih grupa materijala: K_{IC}



Žilavost loma K_{IC} određuje kritičnu dužinu prsline
(tj. koliko će dugo prslina da raste, kratko, tj. brzo ili dugo, tj. sporo)

Poređenje el. provodnosti osnovnih grupa materijala



R el. otpornost, 1/R el.provodnost

Poređenje osnovnih grupa materijala - primarne atomske veze

Keramike

jonska i kovalentna veza:

Velika energija veze

visoka $T_{topljenja}$
visok E
mali koef. line. širenja α

Metali

metalna veza:

Promenljiva energija veze

umerena T_m
visok do umeren E
umeren α

Polimeri

(kovalentna & sekundarne):

Energija veze zavisi od pravca

Dominantne sekundarne veze

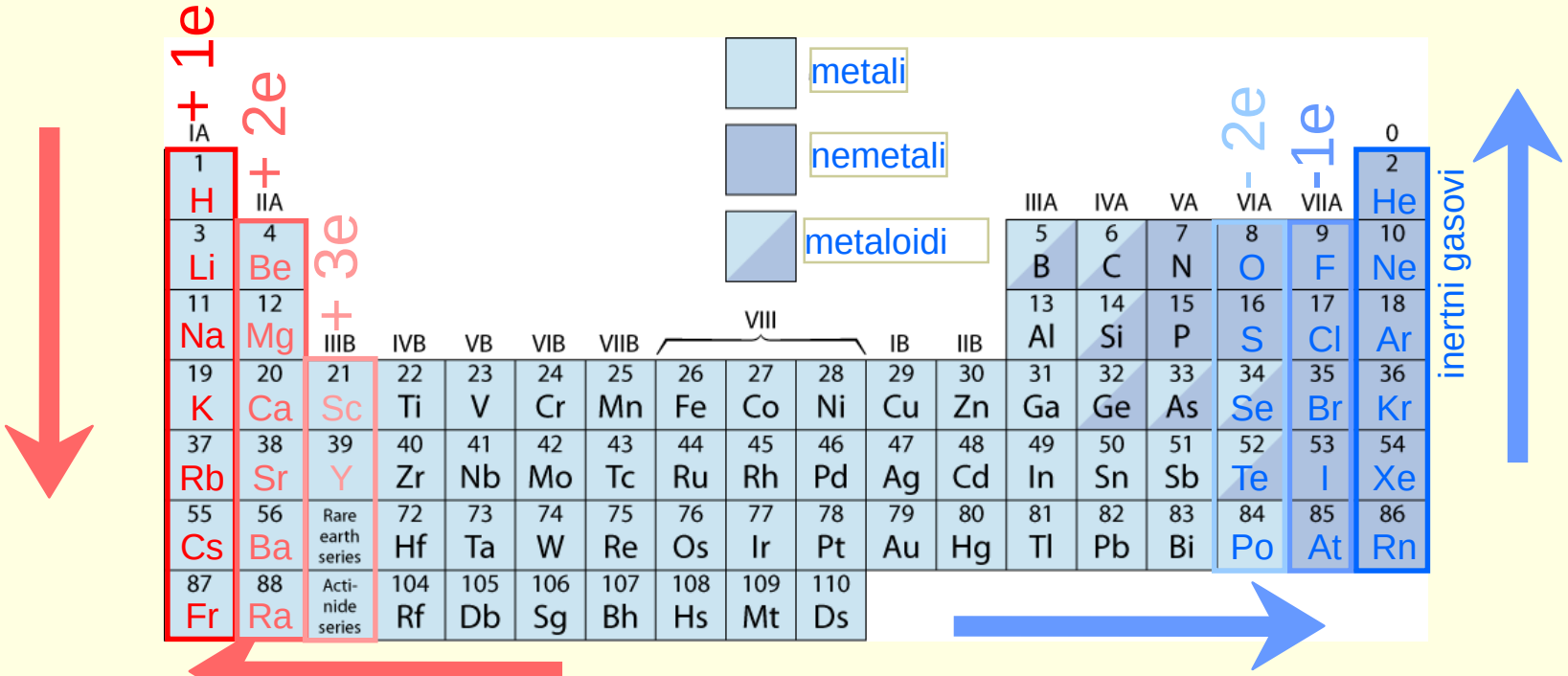
niska T_m
nizak E
visok α

Periodni sistem elemenata

- Kolone: Slična valentnost

Elektonegativnost – mera privlačenja elektrona

Elektronegativnost 0.7 - 4.0. Visoke vrednosti: primaju elektron

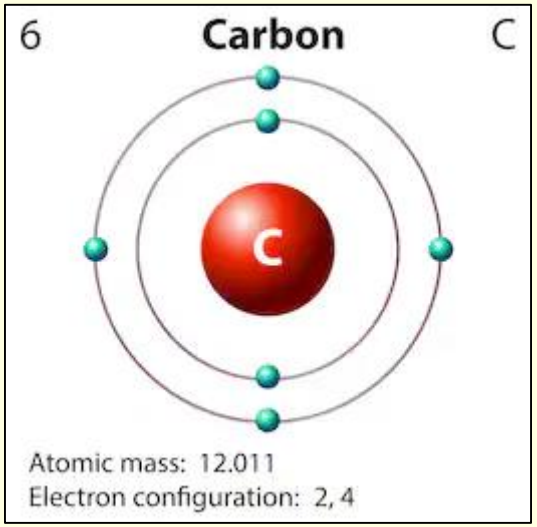


Elektropozitivni elementi:
otpuštaju elektrone
i postaju + joni.

Elektronegativni elementi:
primaju elektrone i postaju - joni.

Valentni elektroni određuju sve osobine materijala

- Valentni elektroni – u nepopunjenom poslednjem nivou
- Popunjen poslednji nivo – stabilna konfiguracija
- **Valentni elektroni određuju:**
  - Hemijske osobine
  - Električne osobine
  - Termičke osobine
  - Optičke osobine
- primer: C (atomski broj = 6)



$1s^2$ $2s^2\ 2p^2$

valentni elektroni

Jonska veza – metal + nemetal

daje elektrone

prima elektrone

Odlika jonske veze je velika razlika u elektronegativnosti

npr: MgO

Mg $1s^2\ 2s^2\ 2p^6\ 3s^2$

O $1s^2\ 2s^2\ 2p^4$

teže konfiguraciji neona [Ne]

Mg^{2+} $1s^2\ 2s^2\ 2p^6$ [Ne]

O^{2-} $1s^2\ 2s^2\ 2p^6$ [Ne]

Primeri jonske veze

- Dominantna veza kod keramika

NaCl

MgO

CaF_2

CsCl

IA	IIA	IIIB	IVB	VB	VIB	VIIB	VIII			IB	IIB	IIIA	IVA	VA	VIA	VIIA	0
H 2.1																	He –
Li 1.0	Be 1.5											B 2.0	C 2.5	N 3.0	O 3.5	F 4.0	Ne –
Na 0.9	Mg 1.2											Al 1.5	Si 1.8	P 2.1	S 2.5	Cl 3.0	Ar –
K 0.8	Ca 1.0	Sc 1.3	Ti 1.5	V 1.6	Cr 1.6	Mn 1.5	Fe 1.8	Co 1.8	Ni 1.8	Cu 1.9	Zn 1.6	Ga 1.6	Ge 1.8	As 2.0	Se 2.4	Br 2.8	Kr –
Rb 0.8	Sr 1.0	Y 1.2	Zr 1.4	Nb 1.6	Mo 1.8	Tc 1.9	Ru 2.2	Rh 2.2	Pd 2.2	Ag 1.9	Cd 1.7	In 1.7	Sn 1.8	Sb 1.9	Te 2.1	I 2.5	Xe –
Cs 0.7	Ba 0.9	La–Lu 1.1–1.2	Hf 1.3	Ta 1.5	W 1.7	Re 1.9	Os 2.2	Ir 2.2	Pt 2.2	Au 2.4	Hg 1.9	Tl 1.8	Pb 1.8	Bi 1.9	Po 2.0	At 2.2	Rn –
Fr 0.7	Ra 0.9	Ac–No 1.1–1.7															

elektronegativnost

daje elektrone

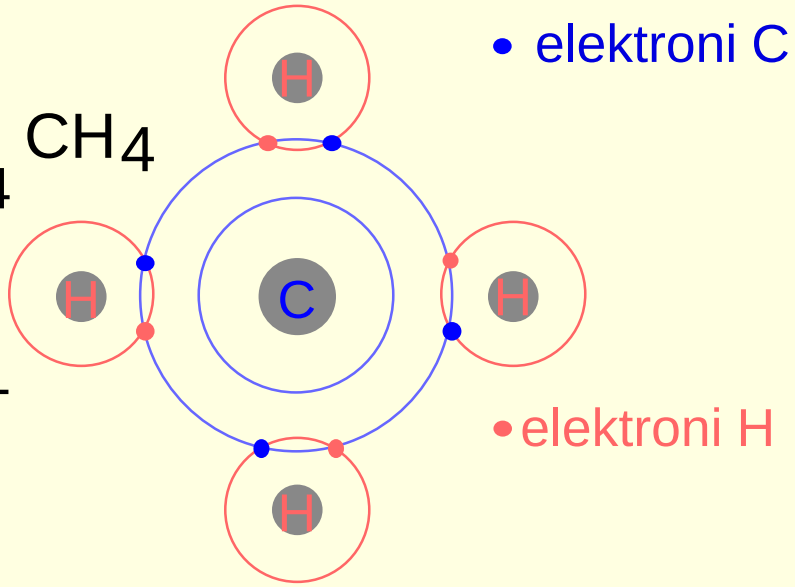
prima elektrone

Kovalentna veza

- Odlika kovalentne veze je slična* elektronegativnost atoma
- Atomi dele elektrone - <u>formiraju elektronske parove</u>
- Veza je određena valentnošću
- Primer: CH_4

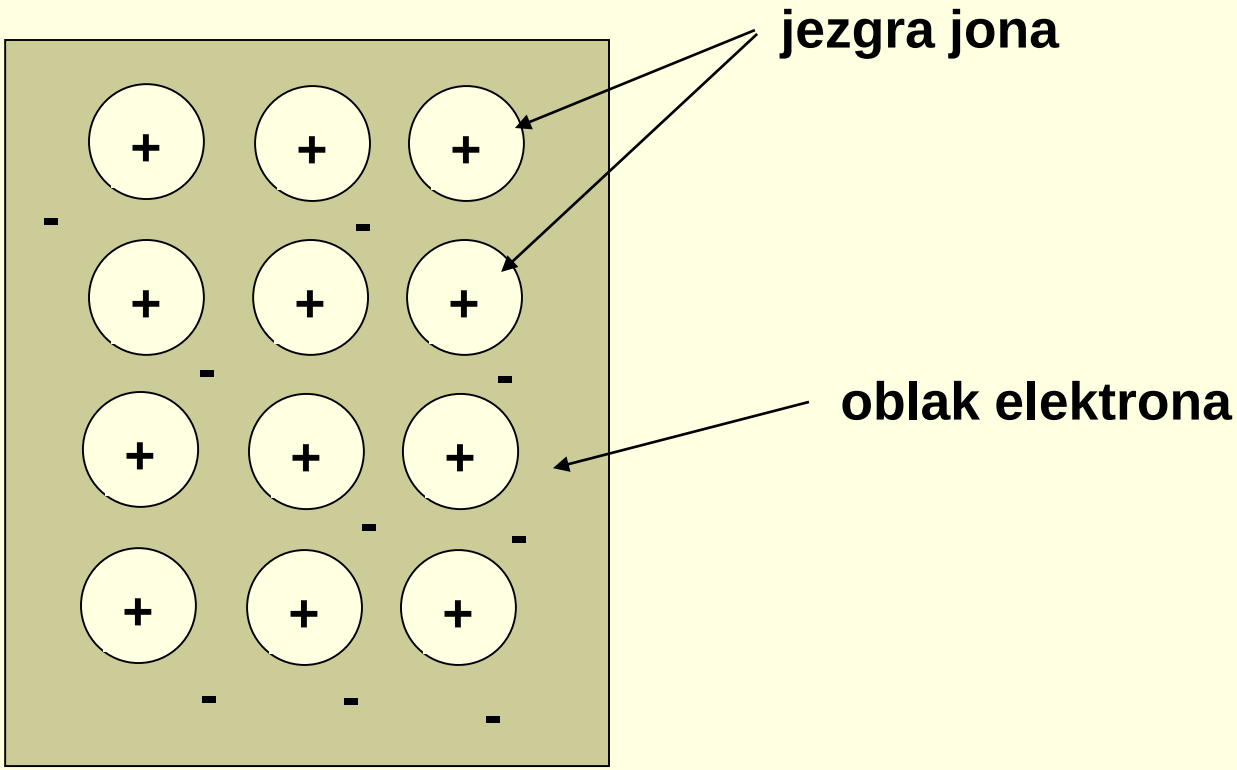
C: ima 4 valentna e^-,
potrebna su mu još 4

H: ima 1 valentni e^-,
potreban mu je još 1



*mala razlika u elektronegativnosti

Metalna veza – čisto da je spomenemo!



Metali imaju malu elektronegativnost – atomi slabo vezuju elektrone
Formira se elektronski oblak

Primarne veze – malo drugačija podela

Generalna podela veza može i ovako da izgleda:

- Metalna veza – elektronski oblak
- Jonsko-kovalentna, odnosno mešovita veza

$$\% \text{ jonske veze} = \left(1 - e^{-\frac{(X_A - X_B)^2}{4}}\right) \text{x}\,(100\%)$$

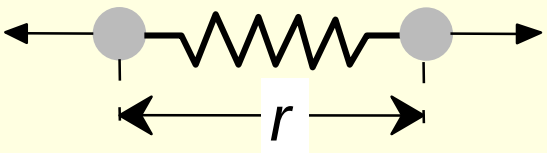
gde su X_A & X_B – vrednosti elektronegativnosti elemenata A i B

Primer: MgO $X_{Mg} = 1.3$
$X_O = 3.5$

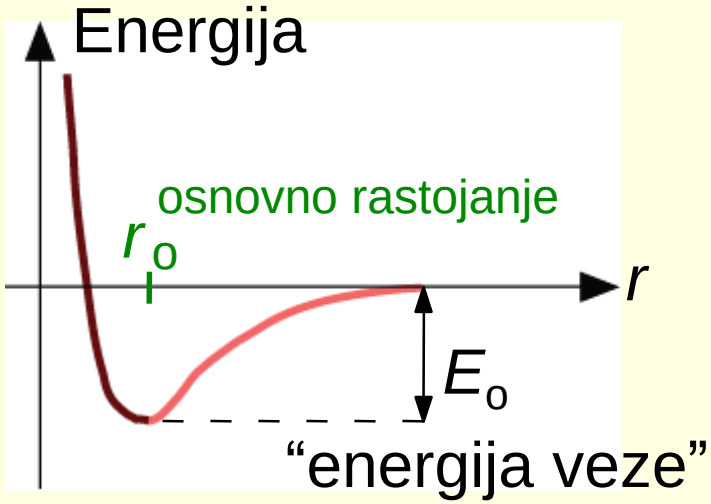
$$\% \text{ jonski deo} = \left(1 - e^{-\frac{(3.5-1.3)^2}{4}}\right) \text{x}\,(100\%) = 70.2\% \text{ jonska}$$

Šta zavisi od energije veze? Npr. temperatura topljenja: T_t

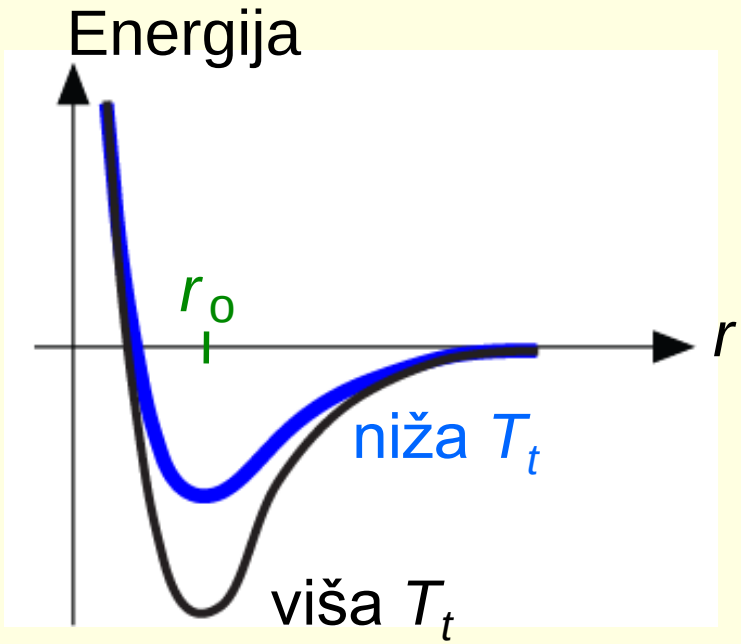
- rastojanje, r



- energija veze, $\boldsymbol{E_o}$



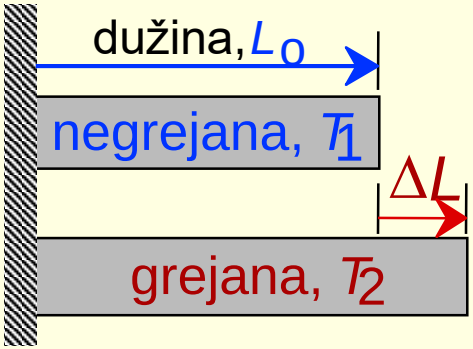
- temperatura topljenja, T_t



T_t raste ako energija veze E_o raste

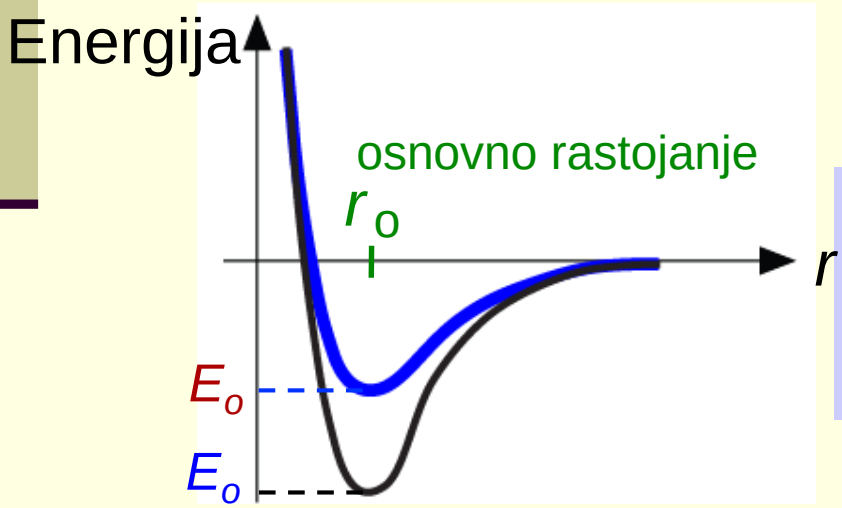
Šta još zavisi od energije veze? α

- Koeficijent lin. širenja, α



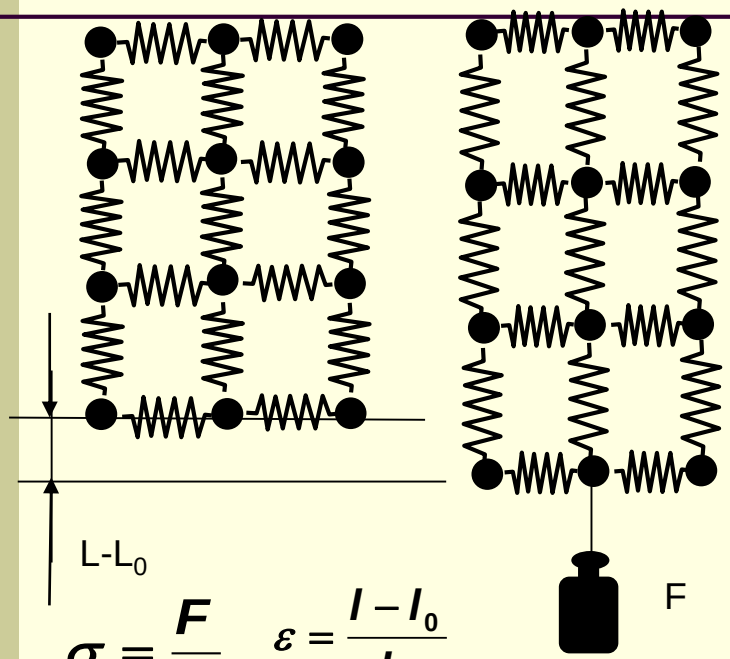
Koeficijent lin. širenja

$$\frac{\Delta L}{L_o} = \alpha\,(T_2 - T_1)$$



Sa zagrevanjem slabe veze.
α raste sa opadanjem energije veze

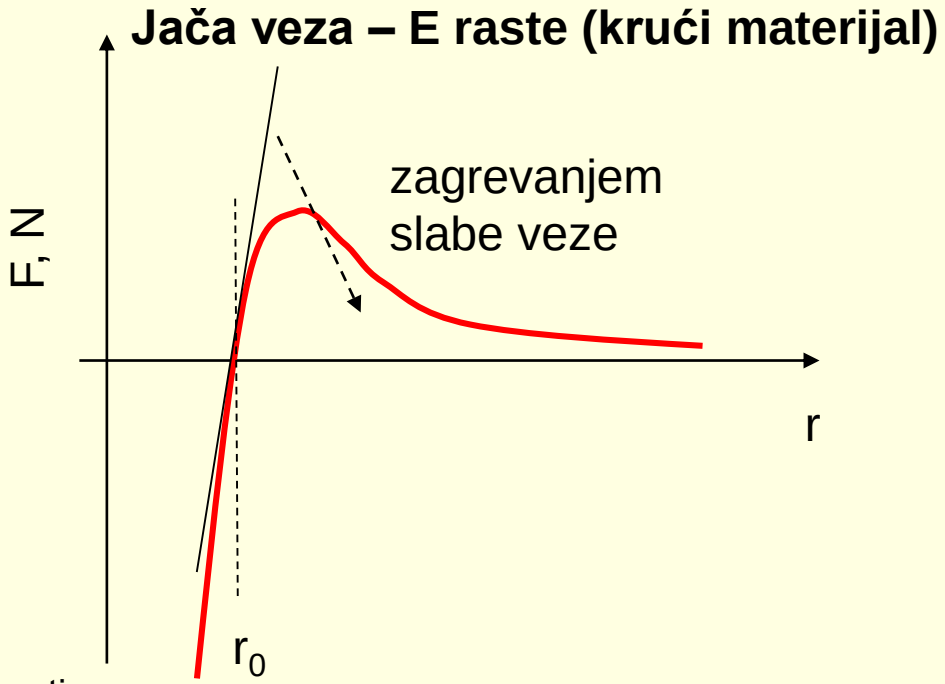
Šta još zavisi od energije veze? E



$$\sigma = \frac{F}{A} \qquad \varepsilon = \frac{l - l_0}{l_0}$$

$$\sigma = E \cdot \varepsilon$$

Hukov zakon
E – Jungov modul elastičnosti



E raste kada raste energija veze

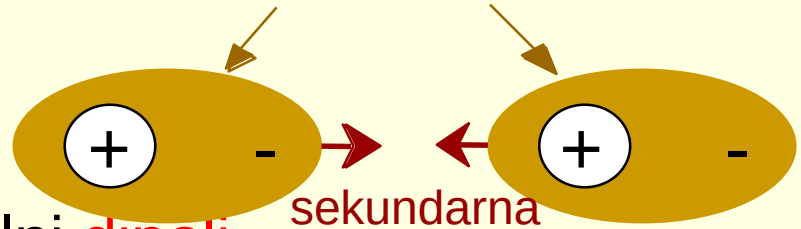
Sa porastom temperature slabe veze i E opada

Sekundarne veze - VAN DER WAALS

Veze koje se uspostavljaju između dipola – praktično kod svih molekula

- promenljivi dipoli

asimetričo naelektrisanje



sekundarna veza

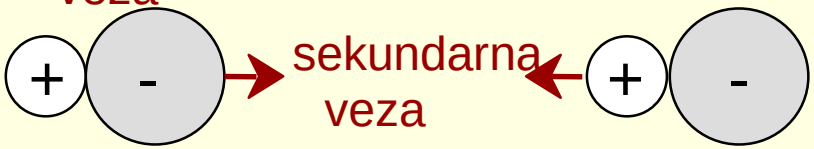
npr: tečni H_2

$H_2 \rightarrow \leftarrow H_2$

sekundarna veza

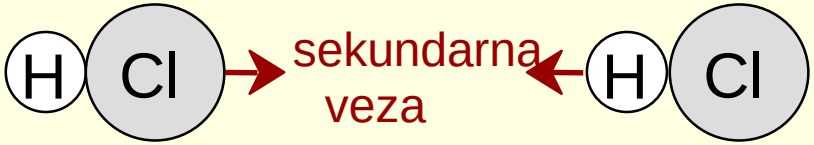
- stalni dipoli

-opšti slučaj:



sekundarna veza

-npr: tečni HCl



sekundarna veza

-npr: polimeri

sekundarna veza

Van der Waals

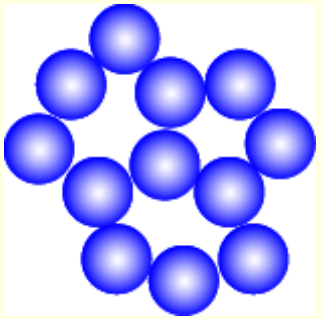
Najjače sekundarne veze su između H i F, O i N – **vodonična veza**

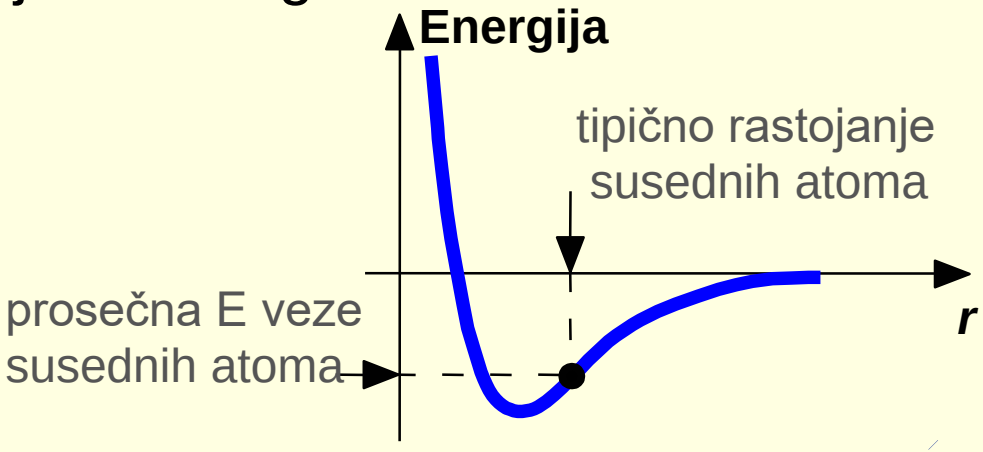
Rekapitulacija
Atomske veze - poređenje

Tip	Energija veze	Napomena
Jonska	Velika!	Neusmerena (keramike)
Kovalentna	promenljiva velika - dijamant mala - bizmut	usmerena (poluprovodnici, keramike lanci polimera)
Metalna	promenljiva velika - W mala- Hg	neusmerena (metali)
Sekundarna	mala	usmerena između lanaca (polimeri) između molekula

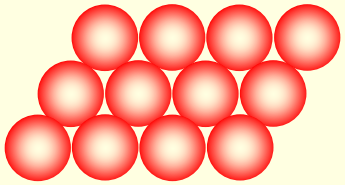
Raspored atoma

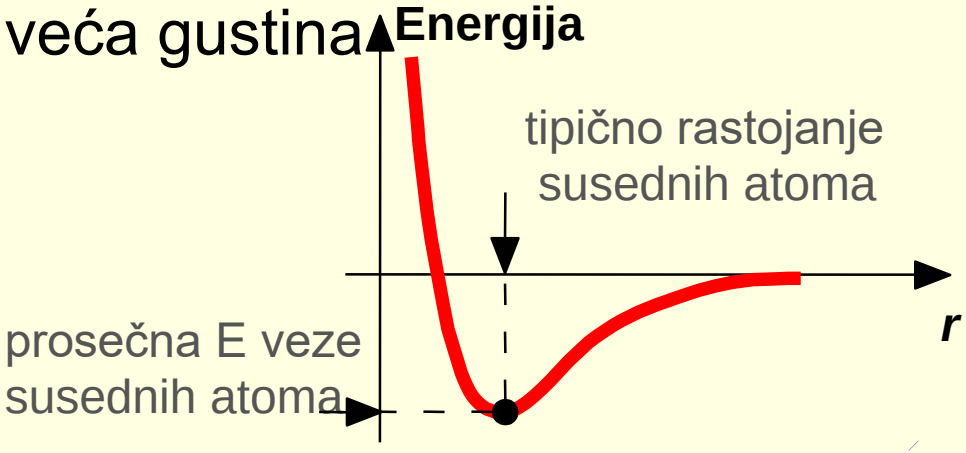
- nasumično pakovanje - mala gustina atoma





- uređeno pakovanje- veća gustina



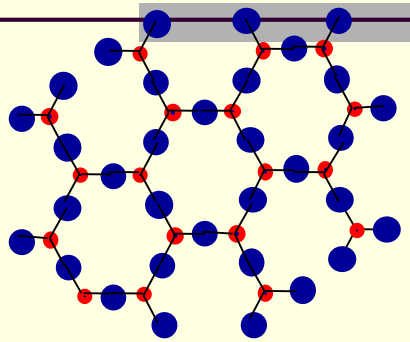


Uređene, gusto pakovane strukture imaju **jaču** vezu

Raspored atoma

Kristalni materijali...

- periodično, prostorno pakovanje
- tipično za -metale
  -mnoge keramike
  -neke polimere

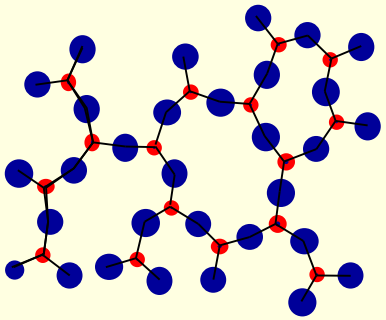


kristalni SiO_2

• Si • O

Nekristalni ili amorfni materijali...

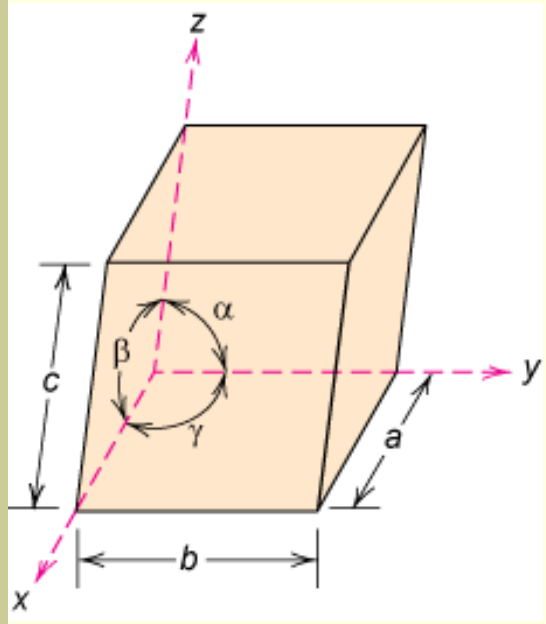
- atomi nisu uređeno složeni
- tipična za: -kompleksne strukture
  -naglo hlađenje

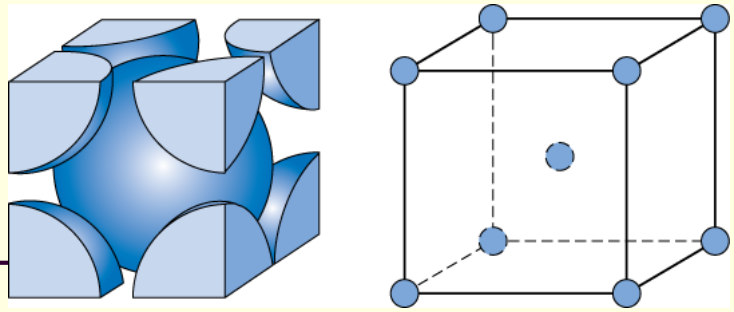


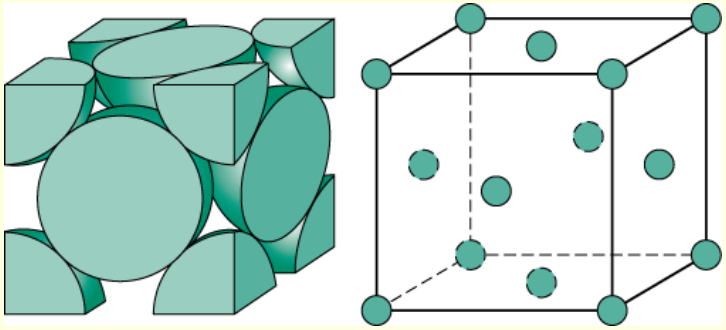
nekristalni SiO_2

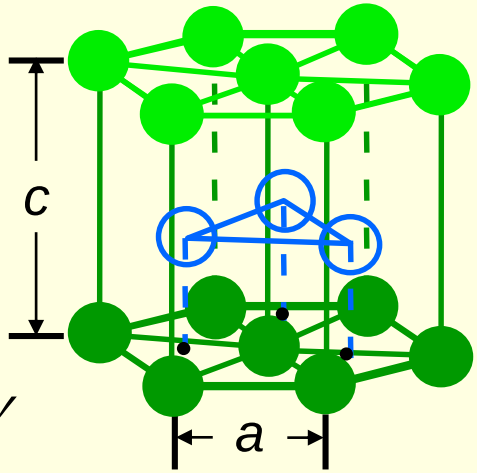
Kristalne rešetke

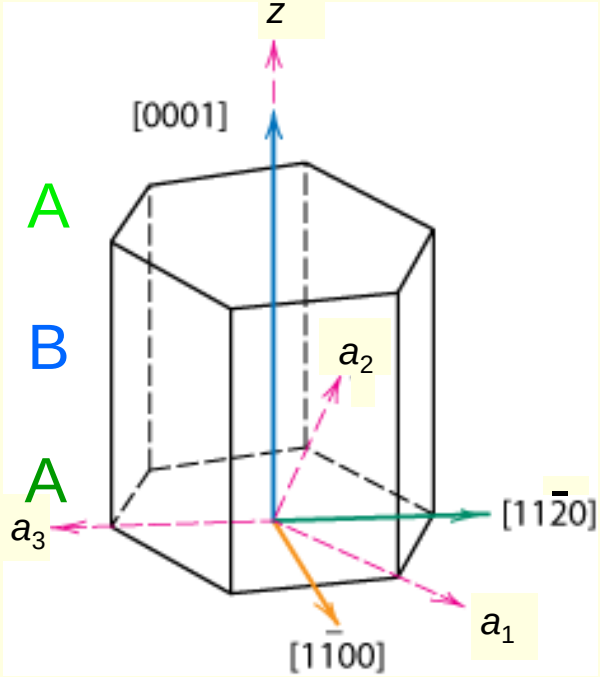
jedinična ćelija







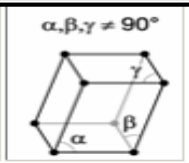
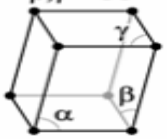
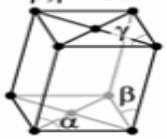
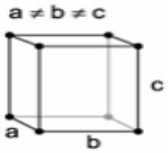
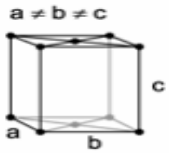
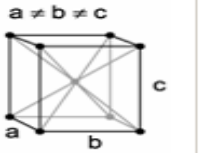
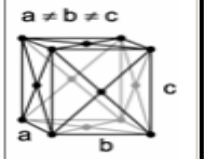
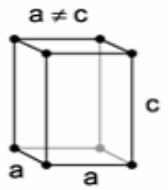
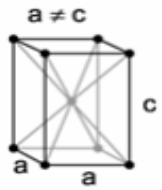
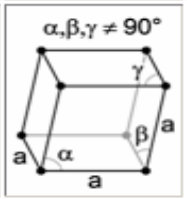
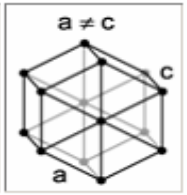
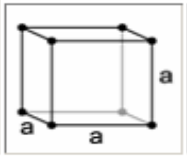
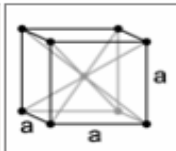
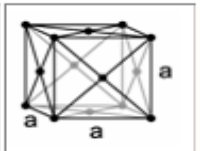




Parametri rešetke:

stranice a, b, c i uglovi α, β i γ

14 Braveovih rešetki

triclinic				
monoclinic	simple	centered		
				
orthorhombic	simple	base-centered	body-centered	face-centered
				
tetragonal	simple	body-centered		
				
rhombohedral				
hexagonal				
cubic	simple	body-centered	face-centered	
				

Teorijska gustina materijala, ρ

$$\text{gustina} = \rho = \frac{\text{masa atoma u jediničnoj ćeliji}}{\text{zapremina jedinične ćelije}}$$

$$\rho = \frac{n\,A}{V_C N_A}$$

gde su n = broj atoma u jediničnoj ćeliji

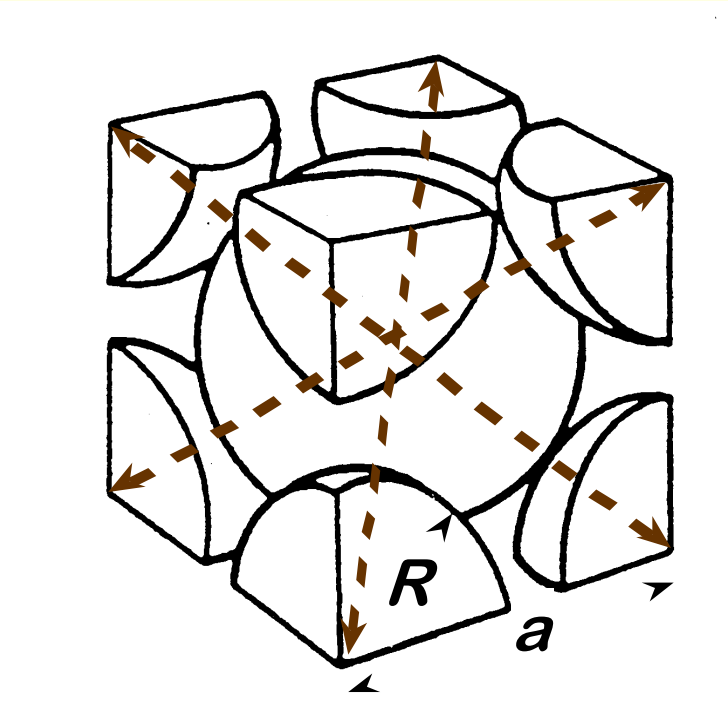
A = atomska masa (g/mol)

V_C = zapremina jed. ćelije = a^3 za kubnu rešetku

N_A = Avogadrov broj = 6.023×10^{23} atom/mol

Gustina određuje masu i težinu konstrukcije

Primer: Cr



Cr (ZCK)

A = 52.00 g/mol

R = 0.125 nm

n = 2

$a = 4R/\sqrt{3}$ = 0.2887 nm (x10-7 cm)

$$\rho = \frac{\frac{\text{atoma}}{\text{jed.ćeliji}} \cdot 2 \cdot 52.00 \frac{\text{g}}{\text{mol}}}{0.2887^3 \cdot 6.023 \times 10^{23} \frac{\text{atoma}}{\text{mol}}}$$

zapremina / jed. ćelija

$\rho_{teorijska}$	= 7.18 g/cm^3
$\rho_{izmerena}$	= 7.19 g/cm^3

Poređenje osnovnih grupa materijala po gustini

Generalno $\rho_{metal} > \rho_{keramika} > \rho_{polimera}$

Zašto?

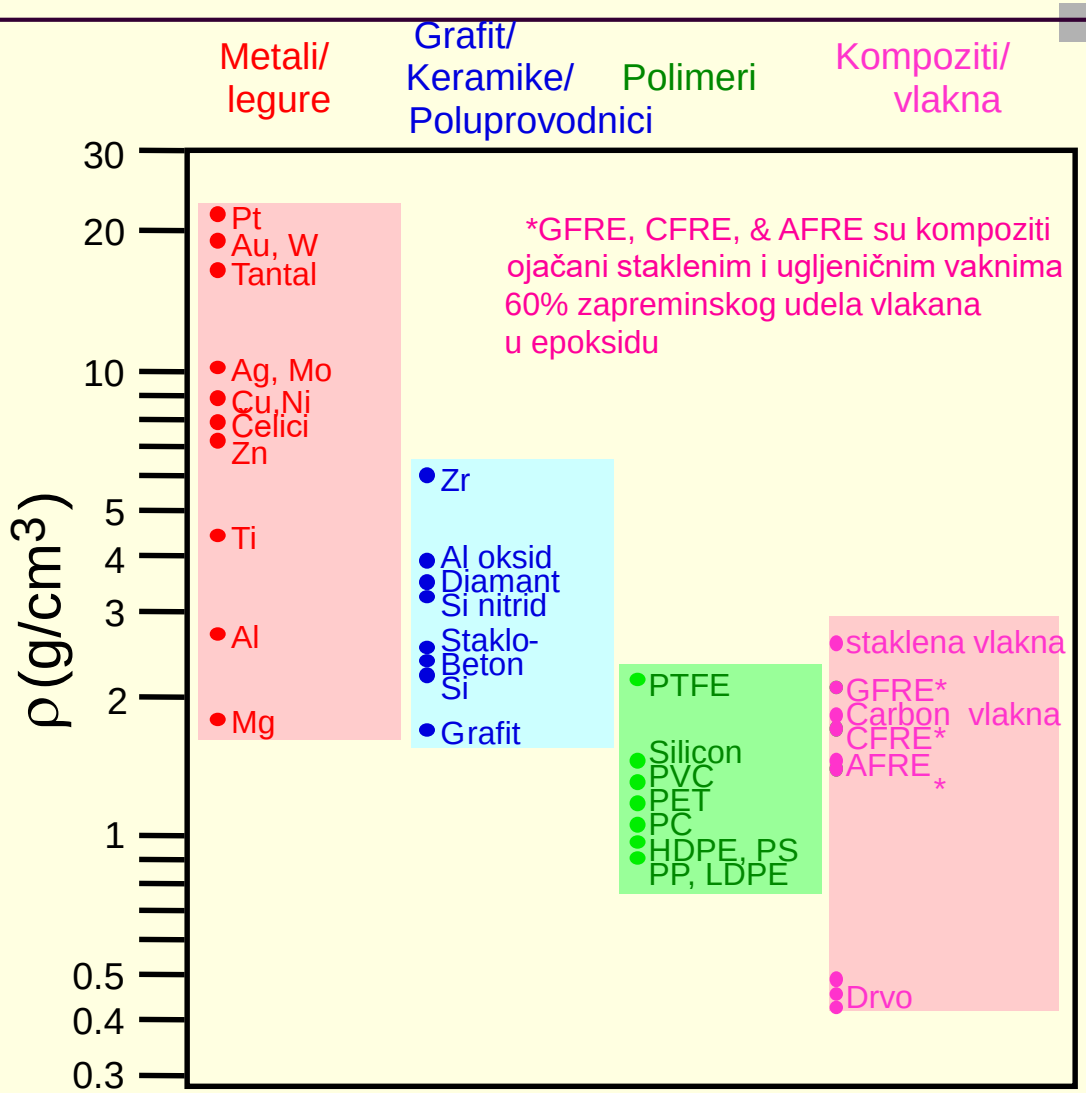
Metali imaju...
- gusto pakovanje (metalna veza)
- često veliku atomsku masu

Keramike...
- manju gustinu pakovanja
- grade ih lakši elementi

Polimeri...
- grade ih laki elementi (C,H,O)
- mala gustina pakovanja (često amorfne građe)

Kompoziti nisu navedeni u poređenju jer...
- zavise od čega su sastavljeni – negde su između

Poređenje osnovnih grupa materijala po gustini



Kristalna struktura i monokristali

- Za neke inženjerske primene neophodni su monokristali:

-dijamantski monokristali
za skidanje površine abrazijom

-lopatice gasnih turbina

- Osobine kristalnih materijala zavise od njegove kristalne strukture.

- Npr: Kvarc, ali i drugi materijali, lakše se lome po određenim kristalografskim ravnima

Polikristali

- *Većina inženjerskih materijal ima strukturu* polikristala.

Anizotropna

Izotropna

- Nb-Hf-W lim sa zavarenim spojem dobijenim el. snopom.
- Svako “zrno" je približno jedan monokristal.
- Ako su zrna nasumično orijentisana – kvaziizotropna struk.
- Tipična veličina zrna može da bude 1nm - 2 cm!

  (tj., od nekoliko do milion atomskih slojeva).

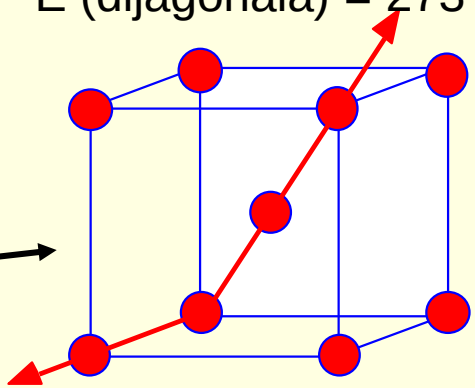
Poređenje monokristala i polikristala

- Monokristal

  -Osobine zavise od pravca anizotropan.

  -Npr: modul elastičnosti kod KZC rešetke Fe

E (dijagonala) = 273 GPa

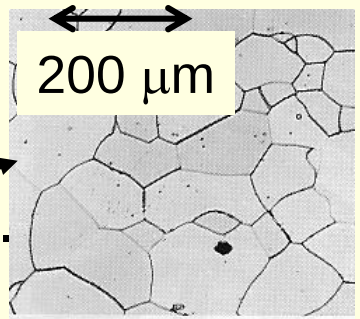


E (ivica) = 125 GPa

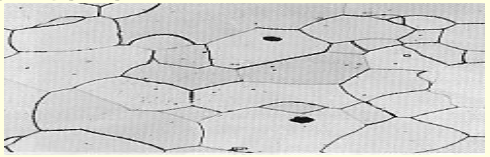
- Polikristali

  -Mogu da budu kvaziizotropni ili anizotropni

  Npr.: pologonalna struktura je: kvaziizotropna.



($E_{poli\ Fe}$ = 210 GPa): hladno deformisana struktura (tekstura) je anizotropna.

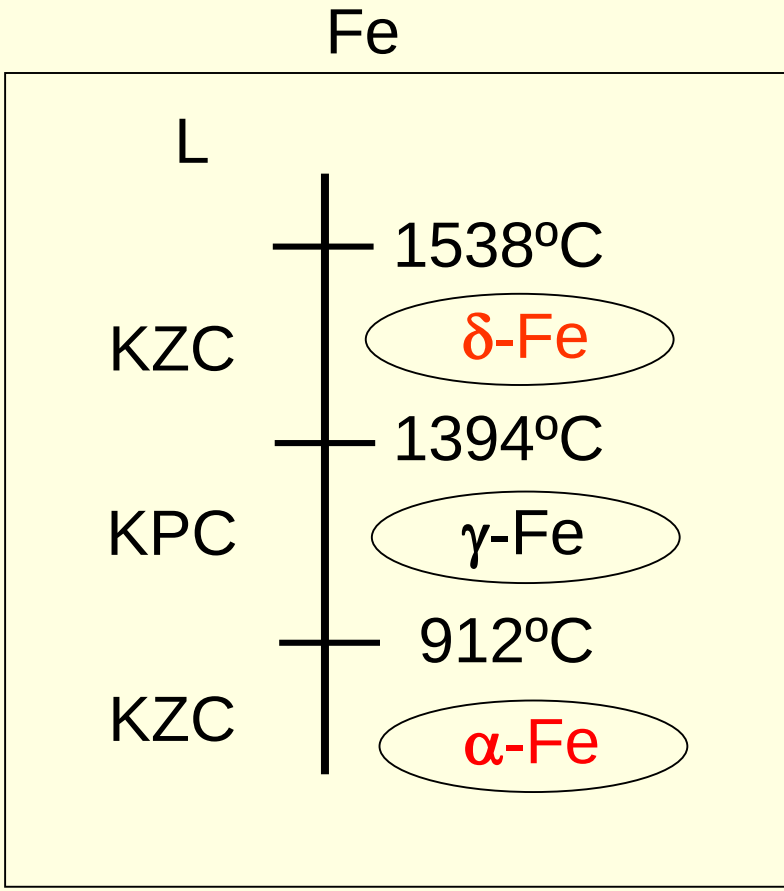


Polimorfija

- Promena kristalne rešetke - sa temperaturom i pritiskom
- Ti - α (HGP), β-Ti (KZC)
- CrO_2 - α, β oblik
- SiC – heksagonalna, romboedarska i KPC
- Sn – kalaj

α ili sivi kalaj sa kubnom rešetkom i

β ili beli kalaj sa tertragonalnom reš.



KERAMIKE

Struktura i osobine keramika

- Veze kod keramika su jonsko-kovalentne
- Kod jonske veze kristalnu rešetku grade joni **metala** koji su pozitivno naelektrisani **katjoni** i joni **nemetala** koji su negativno naelektrisani **anjoni.**
- Pošto metali otpuštaju elektrone, prečnik jona metala je uvek manji od prečnika jona nemetala **(prečnik katjona < prečnika anjona)**

Kristalnu strukturu keramika određuju dve osobine:

- **neutralnost naelektrisanja** kristala (UVEK!)
- **odnos radijusa katjona i anjona** - r_k/r_a, ($r_k/r_a < 1$)

Struktura i osobine keramika

Neke osobine keramika:

- **Struktura keramika** zavisi od radijusa jona koji je grade - može da se ***predvidi.***

- **Ponašanje** keramika na sobnoj *T* je elastično.

- **Lom** kod keramika je krt sa zanemarljivom deformacijom.

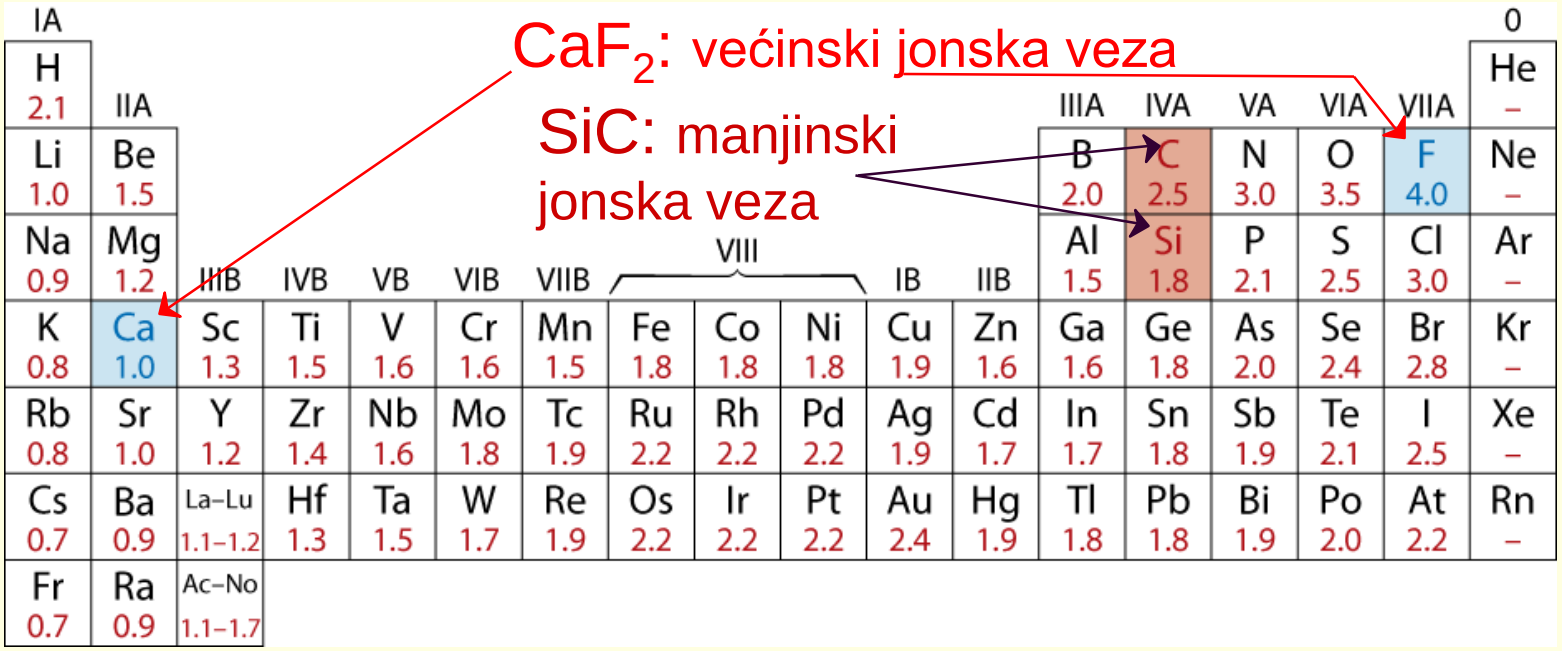
- **Otpornost na povišenim *T*** im je znatno viša od metala i polimera (npr. puzanje, vatrostalnost).

- **Osnovne greške kristalne rešetke** su tačkaste.

Veze kod keramika

-Veze su većinom jonsko-kovalentne (mešane).
- % jonske veze zavisi od razlike elektronegativnosti.

- Većinski i manjinski jonska veza:



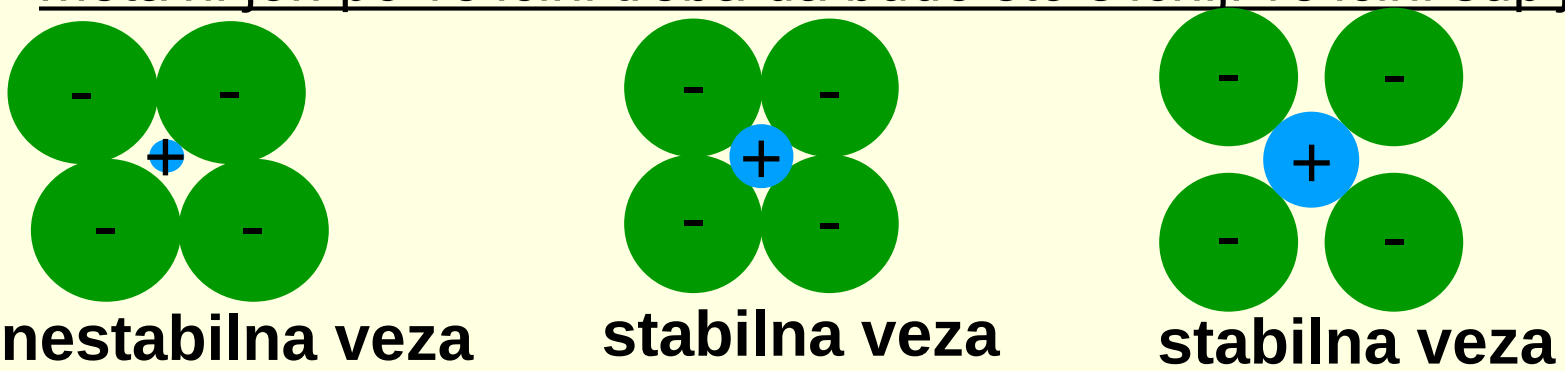
Kristalna struktura keramika

Struktura oksida kao primer (M+O)

- veza je **jonsko-kovalentna**
- katjoni (+joni) metala su **mnogo manji** od anjona (- joni) kiseonika
- kristalne rešetke koje sadrže kiseonik uobičajeno imaju **gusto pakovanje**
- **katjoni** metala se smeštaju **u "šupljinama" kristalne rešetke anjona** kiseonika

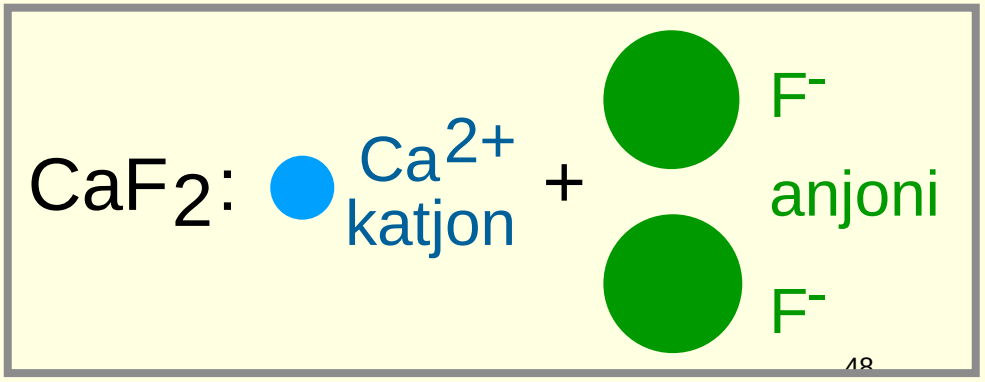
Jonska veza kod keramika

- **<u>Stabilnost</u> strukture određuje veličina jona:**
  - <u>metalni jon po veličini treba da bude što sličniji veličini šupljine</u>



- Ukupno **naelektrisanje je neutralno**:
  - ukupno naelektrisanje treba da bude **0**.
  - Uopštena formula:

$$A_m X_p$$



<u>m, p – su određeni neutralnošću naelektrisanja</u>

Kovalentna veza kod keramika

Veze su jonsko kovalentne – hibridne

- **Primer: SiC (ima preko 250 oblika građe)**
  - elektronegativnost **Si, X_{Si} = 1.8**
  - elektronegativnost **C, X_C = 2.5**

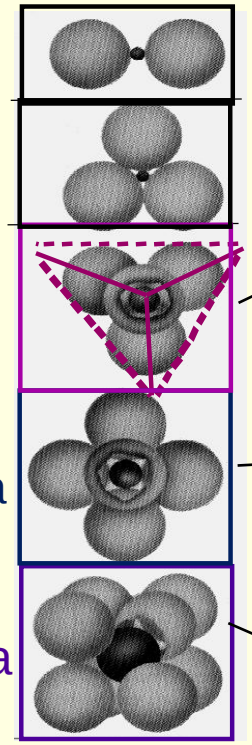
$$\%\ jonske\ veze = 100\{1 - \exp[-0.25(X_{Si} - X_C)^2]\} = 11.5\%$$

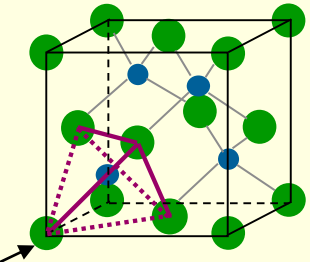
  - ostatak od ~ 89% je kovalentna veza
  - ovakva veza je posledica strukture orbitala Si i C

Koordinacioni broj - definiše građu

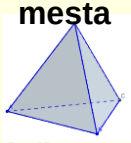
Koordinacioni broj zavisi od odnosa r_k/r_a i definiše **broj anjona oko katjona** i prazna mesta **gde se smeštaju katjoni**

$\frac{r_k}{r_a}$	koordinacioni broj	vrsta praznih mesta gde se smeštaju katjoni
< 0.155	2	linearna
0.155 - 0.225	3	trigonalna
0.225 - 0.414	4	tetraedarska
0.414 - 0.732	6	oktaedarska
0.732 - 1.0	8	kubna

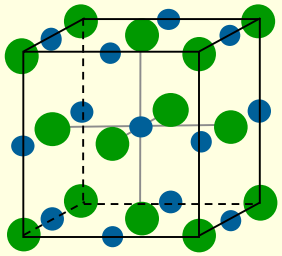




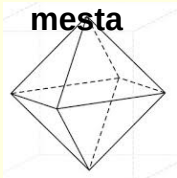
izgled praznog mesta



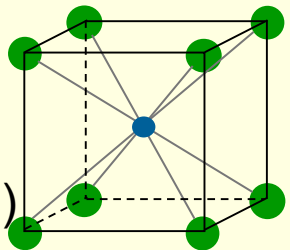
ZnS
(cink sulfid)
Sfalerit
ruda Zn



izgled praznog mesta



NaCl



CsCl
(cezijum hlorid)

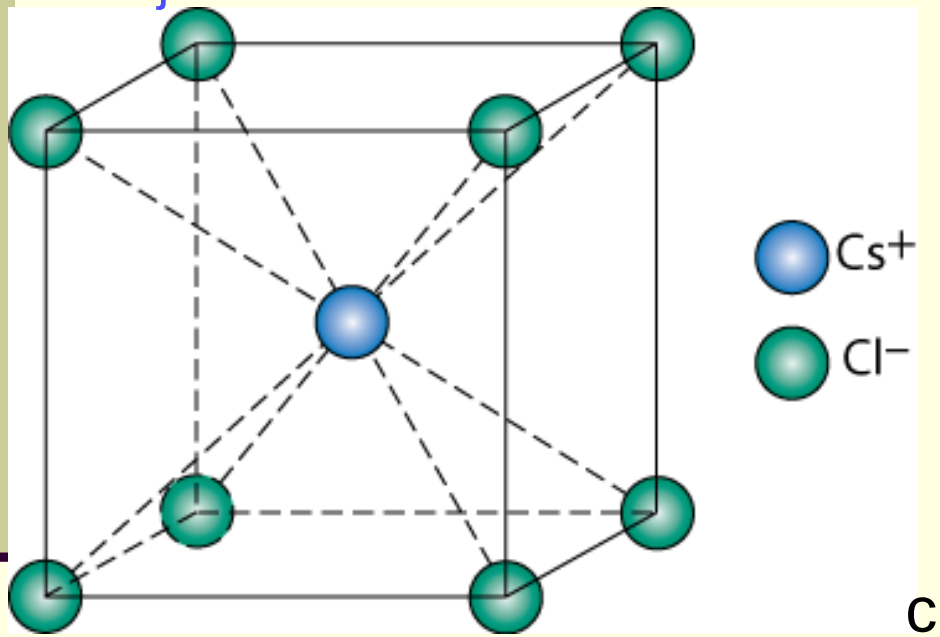
prazno mesto cela prosta kubna rešetka

(npr. KPC rešetka ima 4 oktaedar. mesta i 8 tetraed. mesta)

AX kristalna struktura keramika

AX–jedan anjon, jedan katjon - NaCl, CsCl, and ZnS

Cezijum hlorid:

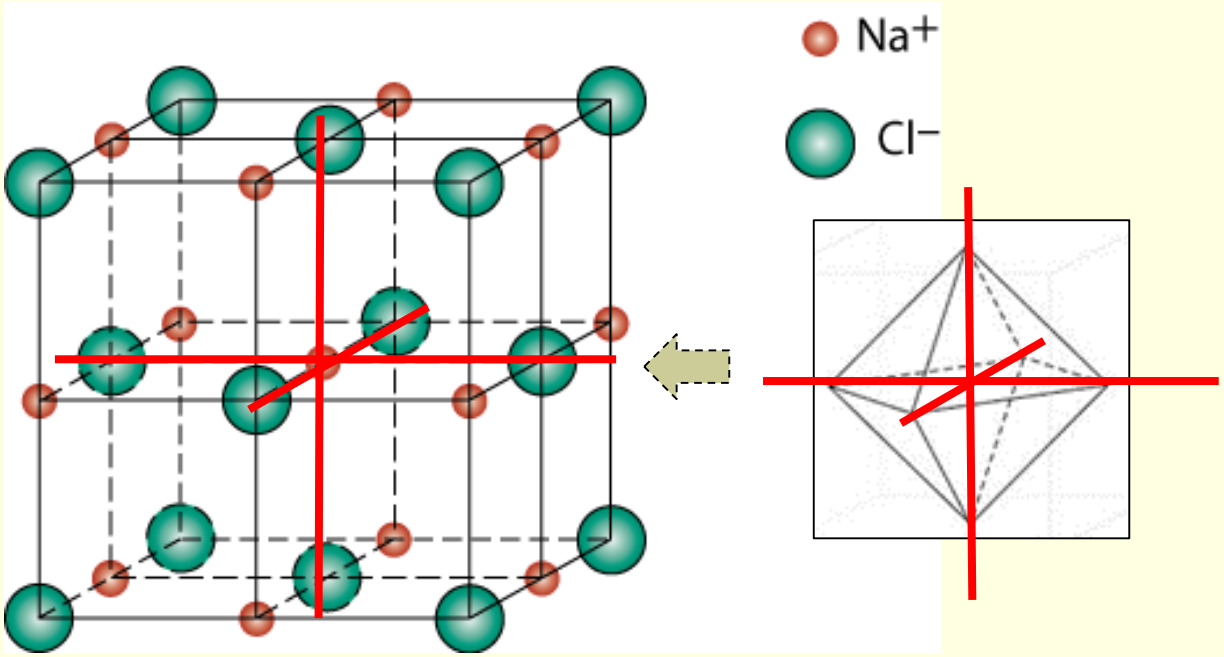


$$\frac{r_{Cs^+}}{r_{Cl^-}} = \frac{0.170}{0.181} = 0.939$$

$\therefore$ katjon Cs^+ smešta se u centru **<u>proste kubne rešetke</u>** (nije KZC!)

svaki jon Cs^+ ima 8 susednih jona Cl^-

Primer: NaCl - struktura



r_{Na} = 0.102 nm

r_{Cl} = 0.181 nm

r_{Na}/r_{Cl} = 0.564

katjoni Na^+ se smeštaju u **oktaedarska mesta** rešetke

svaki jon Cl^{-1} ima 6 susednih jona Na^{+1}

Primer: FeO struktura

katjon	radijus jona (nm)
Al^{3+}	0.053
Fe^{2+}	0.077
Fe^{3+}	0.069
Ca^{2+}	0.100

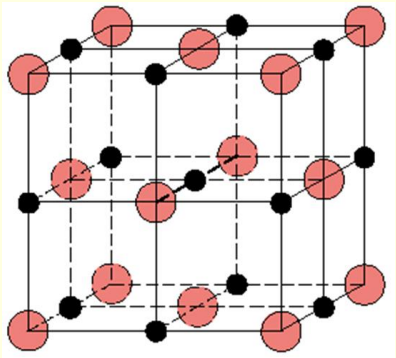
Anjon	
O^{2-}	0.140
Cl^{-}	0.181
F^{-}	0.133

$$\frac{r_k}{r_a} = \frac{0.077}{0.140} = 0.55$$

koordinacioni broj = 6

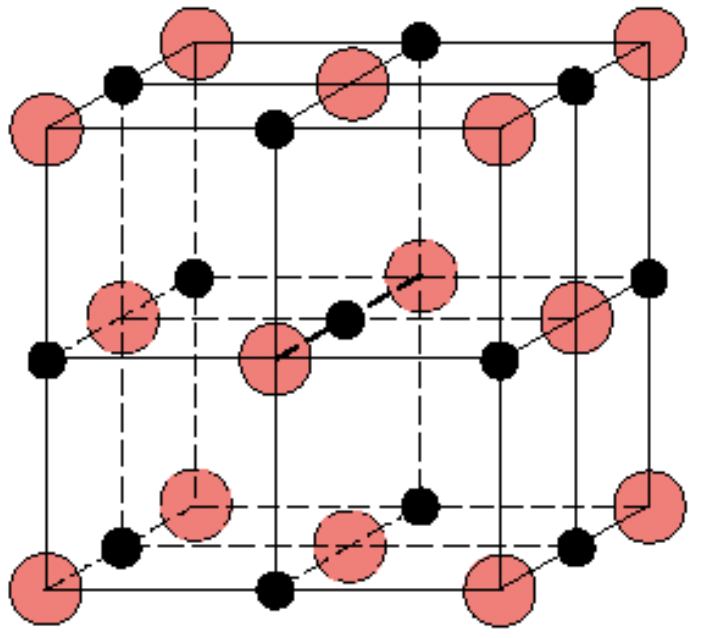
odgovara strukturi = NaCl

FeO



Pitanje: u koju vrstu praznih mesta se smeštaju katjoni Fe+?

Primer: MgO struktura



O^{2-} $r_O = 0.140$ nm

Mg^{2+} $r_{Mg} = 0.072$ nm

$r_{Mg}/r_O = 0.514$

katjoni se smeštaju u oktaedarska mesta

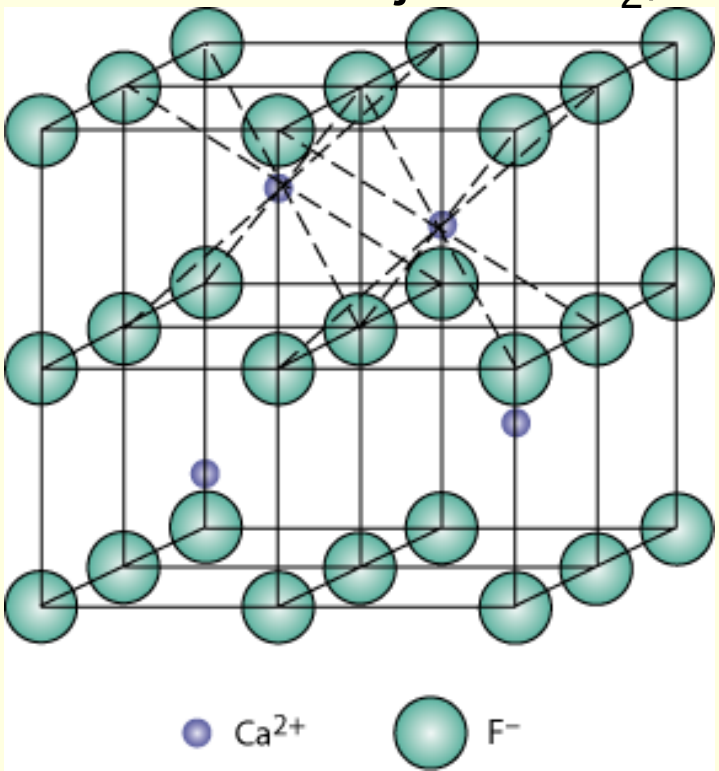
svaki jon O^{2-} ima 6 susednih jona Mg^{2+}

MgO takođe ima NaCl strukturu (kao i FeO)

AX_2 kristalna struktura keramika

Primer:

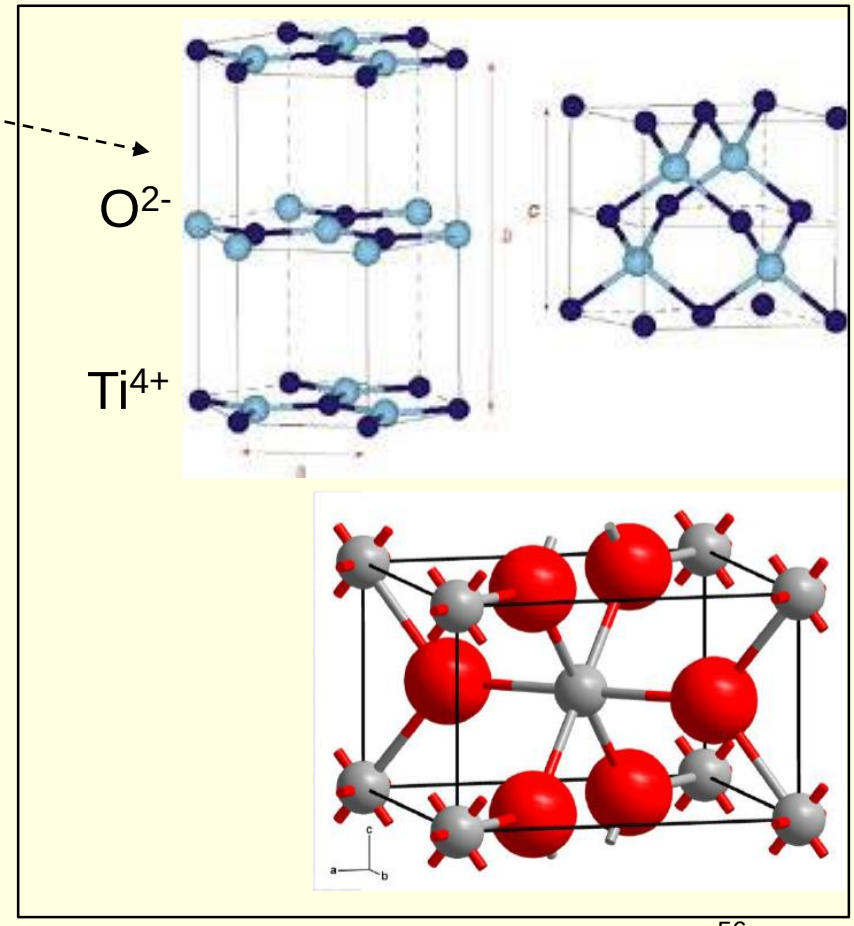
- kalcijum fluorit (CaF_2)
- katjoni su smešteni u kubnim mestima
- sličnu strukturu imaju i ThO_2, ZrO_2



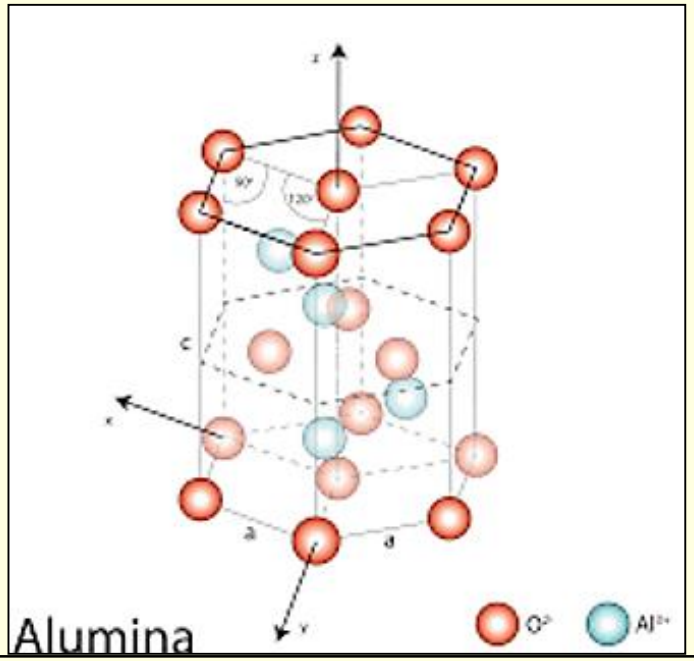
CaF_2

Primer: rutil TiO_2

Rutil je samo jedan od velikog broja polimorfnih oblika TiO_2 i ima HGP rešetku



i oksid Al_2O_3 ima HGP rešetku



katjoni se smeštaju u oktaedarska mesta

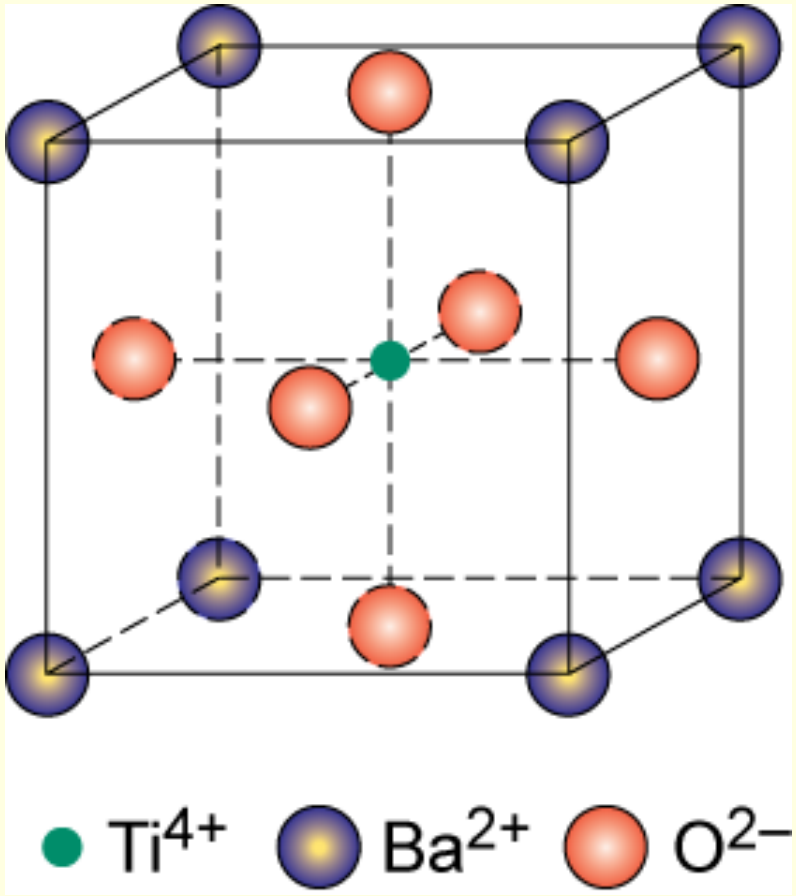
ABX_3 kristalna struktura keramika

Primer:
compleksni oksid $BaTiO_3$
(perovskit)

- koristi se za fuel cells
- piezoelektrična keramika

(polarizuje se kada se deluje silom na nju)

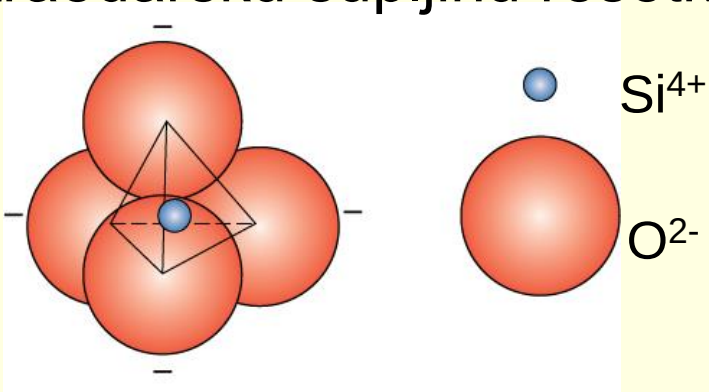
- kubna rešetka

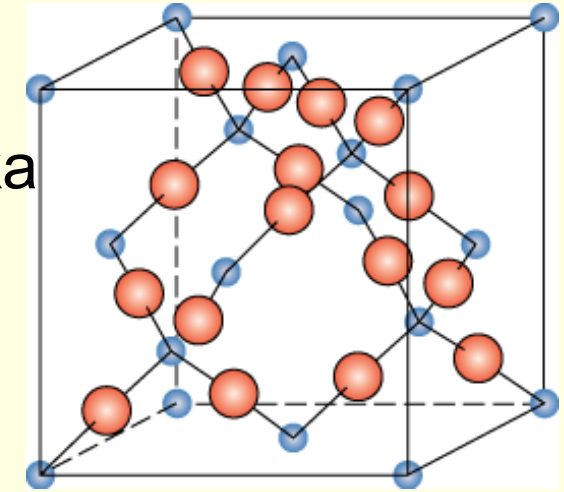


Silikatne keramike

Najčešći elementi na našoj planeti su Si & O

Atom silicijuma se smešta u tetraedarsku šupljinu rešetke kiseonika



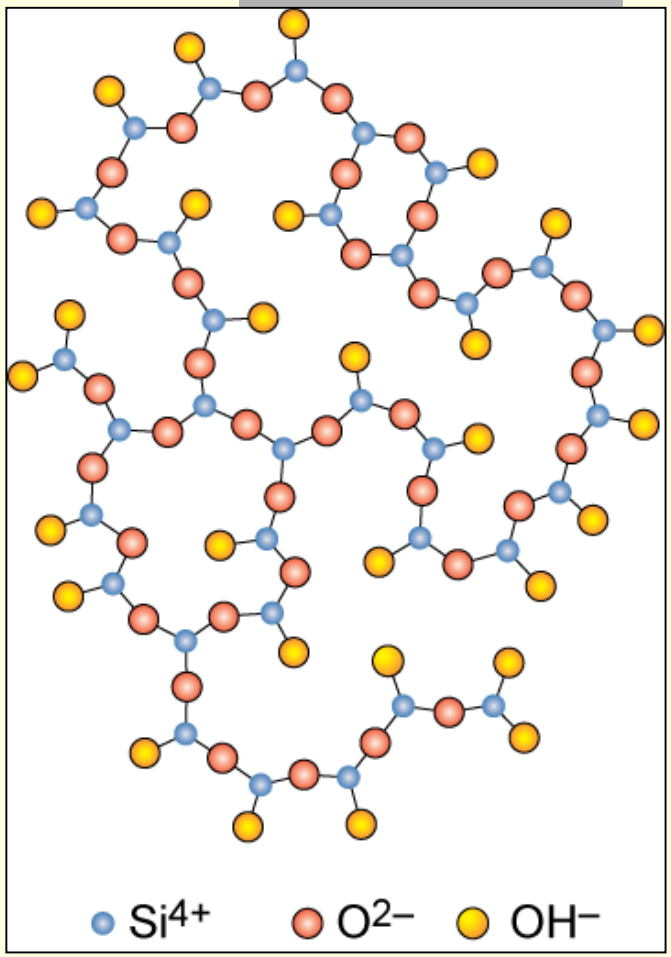


kristobalit

- SiO_2 struktura je npr. kvarc, kristobalit
- veza Si-O je jaka tako da je $T_{topljenja}$ visoka (1710ºC)

Amorfna struktura **SiO_2**

- **Primer: Amorfni SiO_2 - silika gelovi**
  - Si^{4+} i O^{2-} formiraju neuređene rešetke
  - naelektrisanje je uravnoteženo sa H^+ (koji formira OH^-) na krajevima lanaca
  - ovaj oblik SiO_2 je vrlo stabilan i nereaktivan

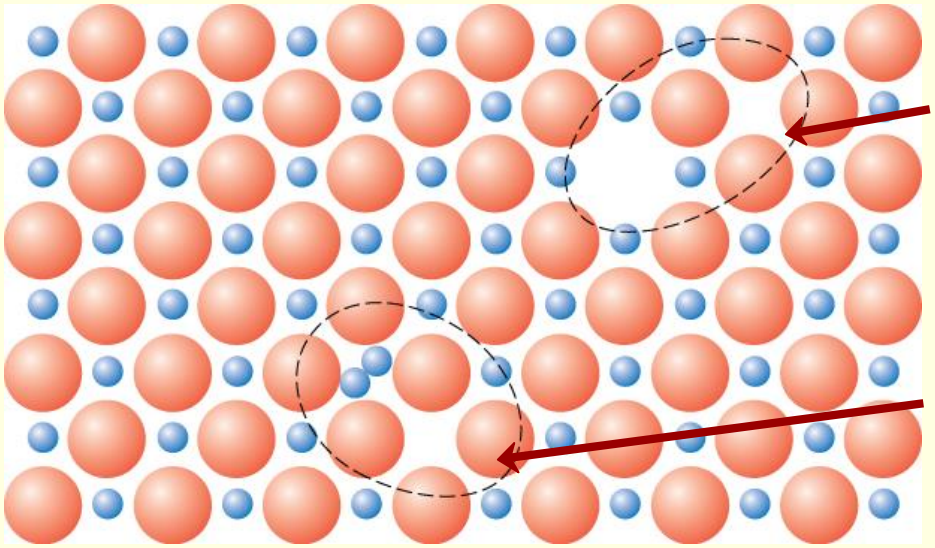


- **Primer: staklo je takođe oblik amorfnog SiO_2, samo ima veliku gustinu**
  - naelektrisanje je uravnoteženo dodatkom katjona tipa **Na^+**
  - kada se dodaje bor (**B**) dobija se **borosilikatno staklo** ili vatrootporno staklo (**pyrex**) koje ima višu T primene i manje je krto u odnosu na na obično staklo

Greške kristalne rešetke kod keramika

Greške kristalne rešetke kod keramika su **tačkaste:**

- Frenkelove greške – pomeren katjon
- Šotkijeve greške – nedostaje par katjon-anjon

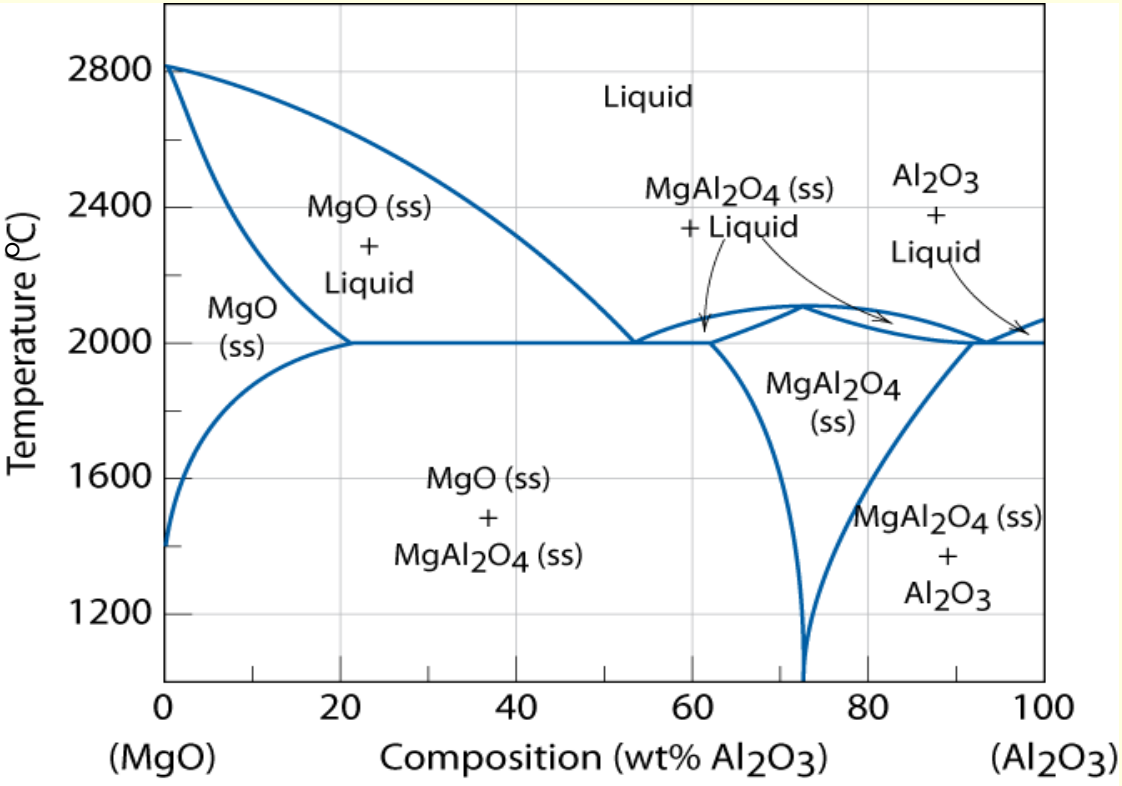


- postiže se ravnotežna koncentracija grešaka (f+-ja T) $\sim e^{-Q_D / kT}$
- **nečistoće se smeštaju tako da se zadrži neutralno naelektrisanje**
- **nema dislokacija**

Fazni dijagrami keramika

Dve ili više keramika mogu da imaju **reakciju u čvrstom stanju** i da grade različite faze u zavisnosti od sastava, a **faze mogu da se prikažu na dijagramima stanja kao kod legura metala**.

Primer: dijagram stanja $MgO-Al_2O_3$:

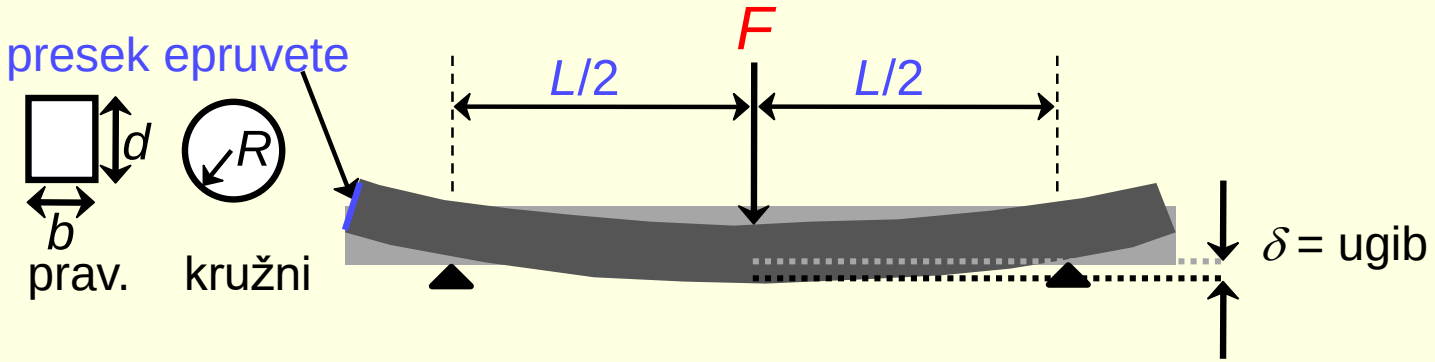


Mehaničke osobine keramika

- Kod keramika je otežan klasičan mehanizam deformacije klizanjem po ravnima klizanja jer **nemaju dislokacije - krte su**:
  - kod jonske veze klizanje je vrlo teško ostvarljivo jer je potrebna velika energija da se npr. jedan anjon pomeri sa svog mesta i pri tome da prođe pored mesta drugog anjona – pošto su istog naelektrisanja anjoni se snažno odbijaju
- Zbog svojih osobina, keramike se **drugačije ispituju u odnosu na metale**.
- Ponašanje keramika na sobnoj *T* je obično **elastično sa krtim lomom.**
- Ispitivanje zatezanjem je vrlo teško izvodljivo kod krtih materijala.

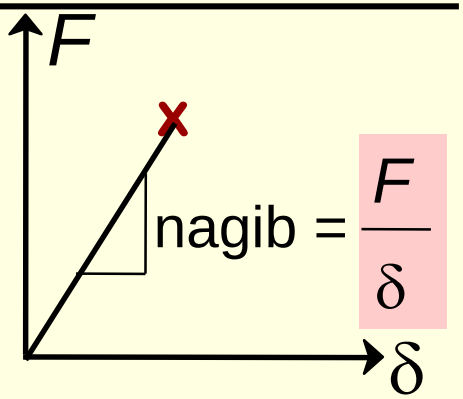
Merenje modula elastičnosti

- **najčešće se koristi ispitivanje savijanjem u 3 tačke**



Ispitivanjem se dobija **kriva zavisnosti sile i ugiba** (umesto F-ΔL).
Zavisnost je **linearna** – ponašanje keramika je **linearno-elastično do loma**

- **Modul elastičnosti** se određuje:



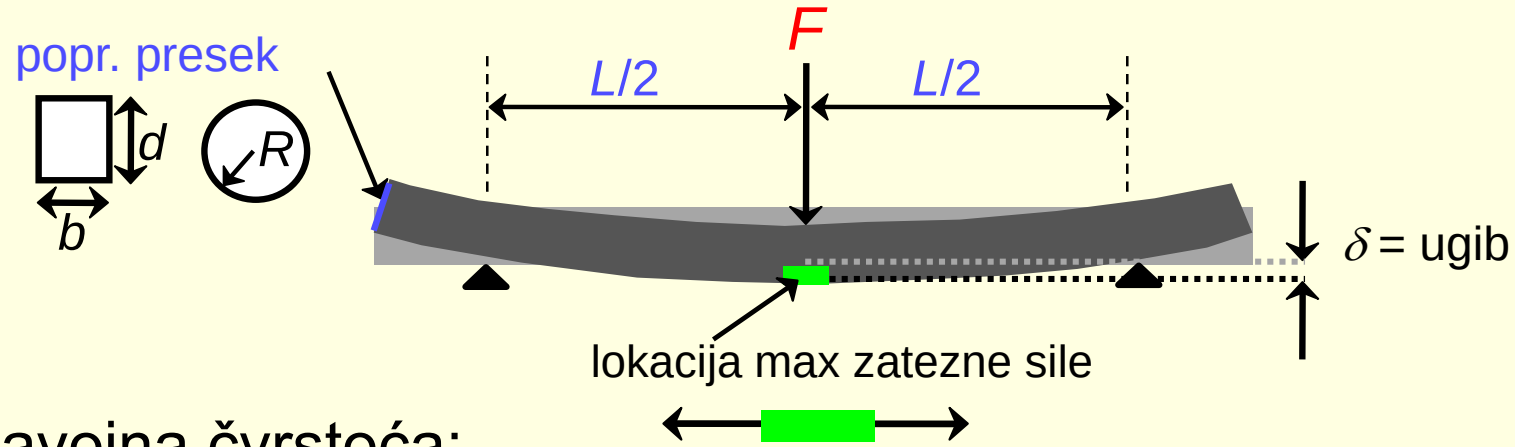
$$E = \frac{F}{\delta}\frac{L^3}{4bd^3} = \frac{F}{\delta}\frac{L^3}{12\pi R^4}$$

pravoug. presek epruvete

kružni presek epruvete

Određivanje savojne čvrstoće

- **ispitivanje savijanjem u 3 tačke za određivanje čvrstoće na sobnoj T**

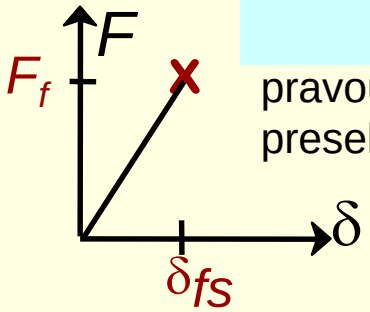


- savojna čvrstoća:

$$\sigma_{fs} = \frac{1.5 F_f L}{b d^2} = \frac{F_f L}{\pi R^3}$$

pravoug. presek

kružni presek

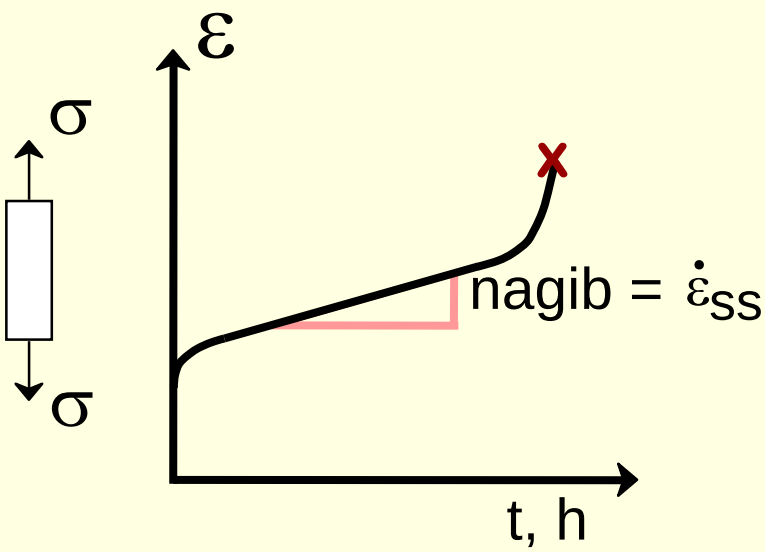


Vrednosti savojne čvrstoće i modula elastičnosti za neke keramike:

Materijal	σ_{fs} (MPa)	E(GPa)
Si nitrid	250-1000	304
Si karbid	100-820	345
Al oksid	275-700	393
staklo	69	69

Ispitivanje na puzanje

- Keramike se uobičajeno ispituju na puzanje zbog njihove stabilnosti na vrlo viskim temperaturama
- Puzanje se i kod keramika javlja na $T > 0.4\ T_t$.



nagib = $\dot{\varepsilon}_{SS}$ = brzina puzanja u II stadijumu

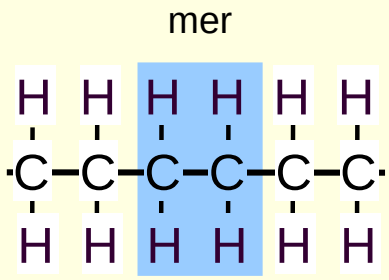
Polimeri

Polimeri

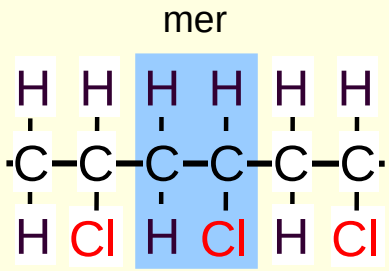
Šta su polimeri?

Poli **mer**

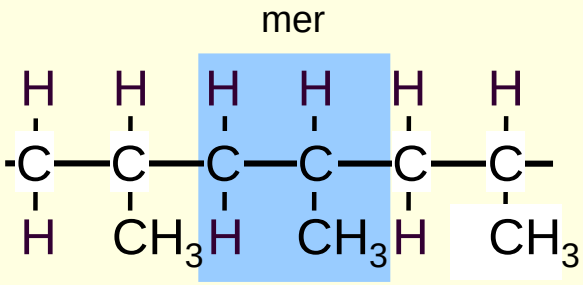
mnogo **ćelija koja se ponavlja**



Polietilen (PE)



Polivinil hlorid (PVC)



Polipropilen (PP)

Istorija polimera

- **Prirodni polimeri**
  - **drvo – guma**
  - **pamuk – vuna**
  - **koža – svila**

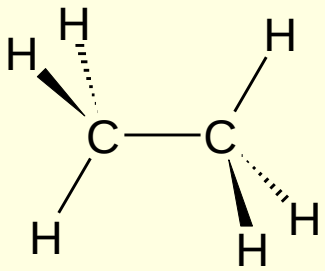
- **Najstariji podaci o primeni su npr.**
  - **gumene lopte Inka**
  - **katran**

Sastav polimera

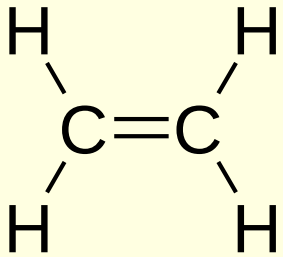
<u>Najveći broj polimera grade H i C</u>

- **<u>Zasićeni</u>** ugljovodonici <u>nemaju slobodne veze za polimerizaciju</u>

$\mathbf{C_nH_{2n+2}}$

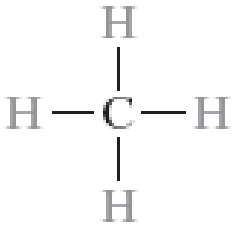
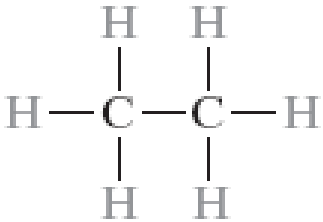
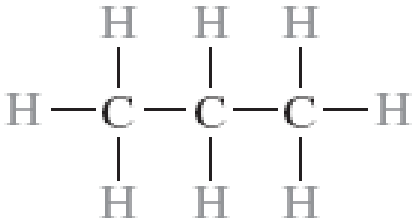


- **<u>Nezasićeni ugljovodonici</u>** – C atomi vezani sa dvogubom ili trogubom vezom koje mogu da se raskinu tako da su reaktivni i <u>mogu da grade nove veze</u>
  - **Dvoguba veza – npr. etilen - $\mathbf{C_nH_{2n}}$**



  - **Troguba veza – acetilen - $\mathbf{C_nH_{2n-2}}$**

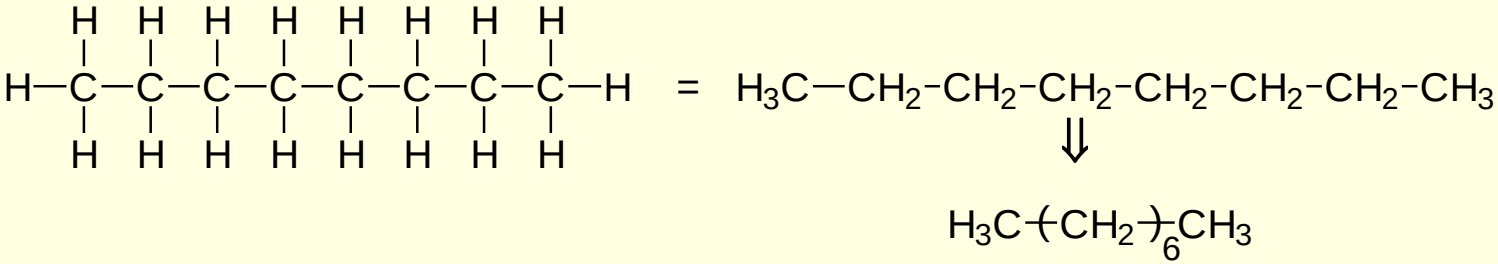
Sastav, molekularna struktura i tačka ključanja pojedinih ugljovodonika

Naziv	sastav	molekularna struktura	tačka ključanja, °C
metan	CH_4		−164
etan	C_2H_6		−88.6
propan	C_3H_8		−42.1
butan	C_4H_{10}		−0.5
pentan	C_5H_{12}		36.1
heksan	C_6H_{14}		69.0

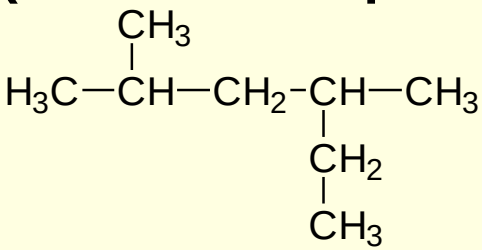
Izomeri

- **Izomeri**
  - **Izomeri su jedinjenja sa istim hemijskim sastavom (hemijska formula ista) koja imaju različitu strukturu**

    Primer: C_8H_{18}
    - **n-oktan**

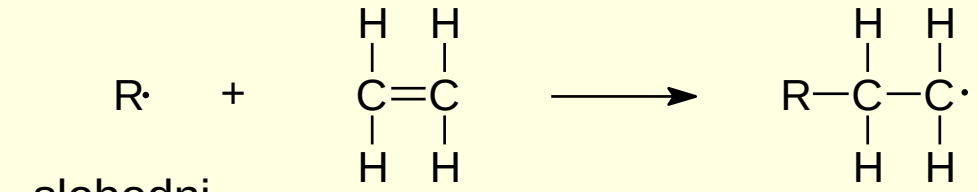


    - **Izooktan (2-metil-4-etil pentan)**



Polimerizacija

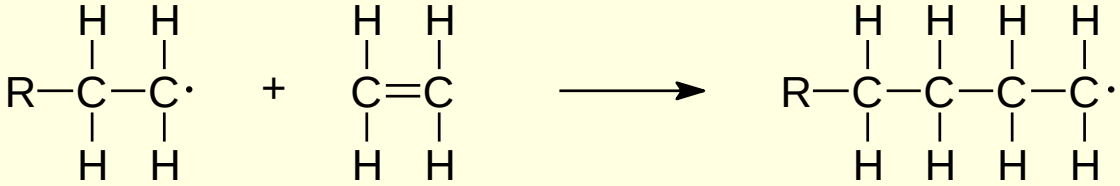
- **Proces polimerizacije treba da se aktivira**
- **Aktivacija se obavlja slobodnim radikalima**



slobodni radikal

monomer etilen

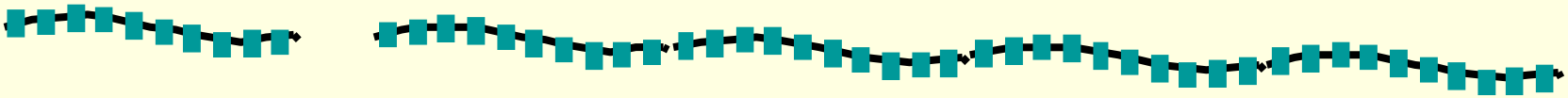
inicijacija



rast

Veličine koje opisuju polimere

1.) Molarna masa Mi: masa mola lanca

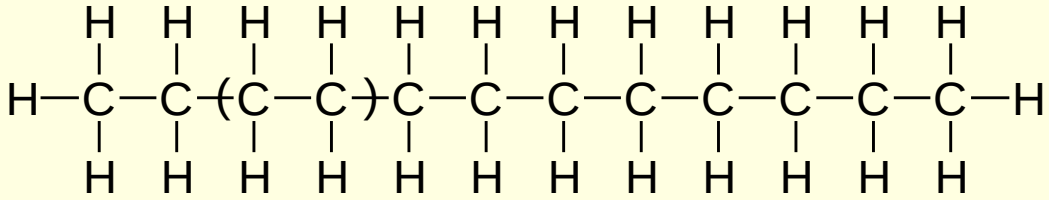


manja Mi *veća Mi*

$$\overline{M}_n = \frac{\text{ukupna masa polimera}}{\text{ukupan broj molekula}}$$

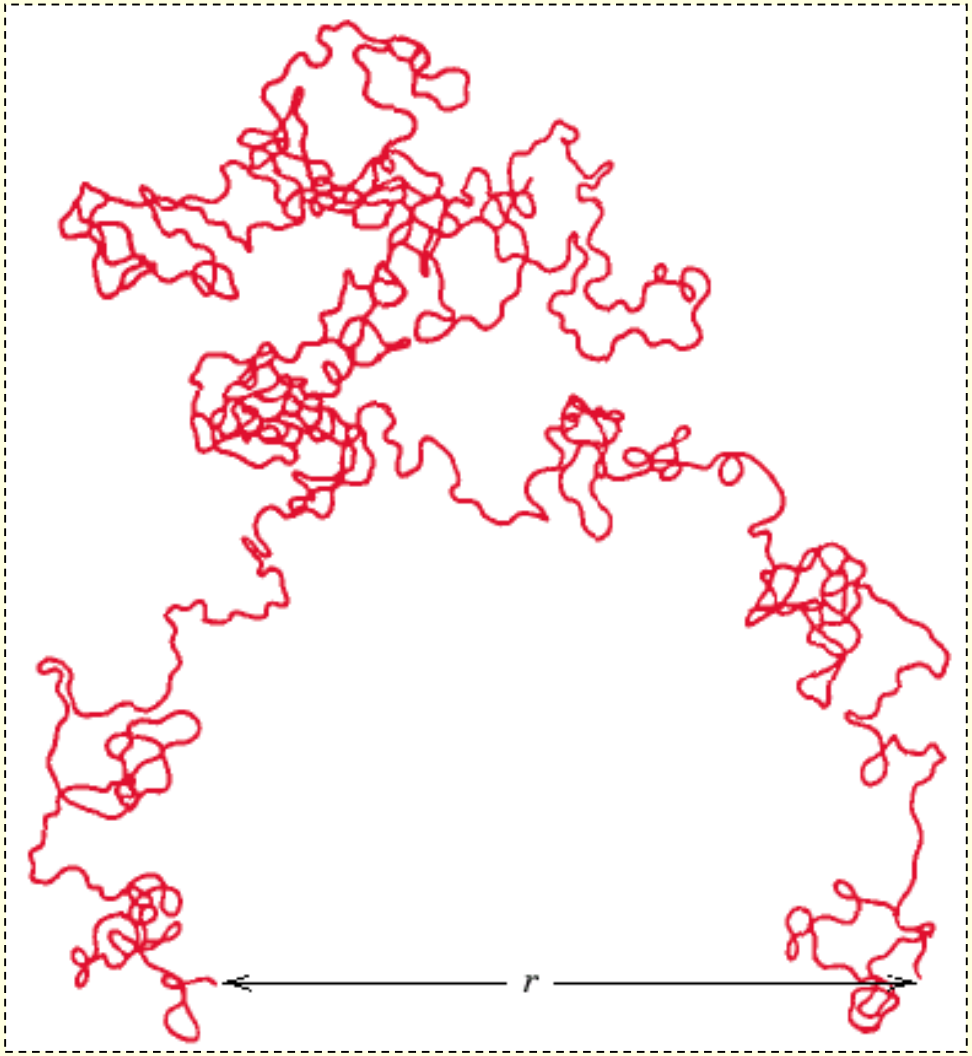
prosečna *Mi*

2.) Stepen polimerizacije, n = br. ponovljenih mera u lancu



$n_i = 6$

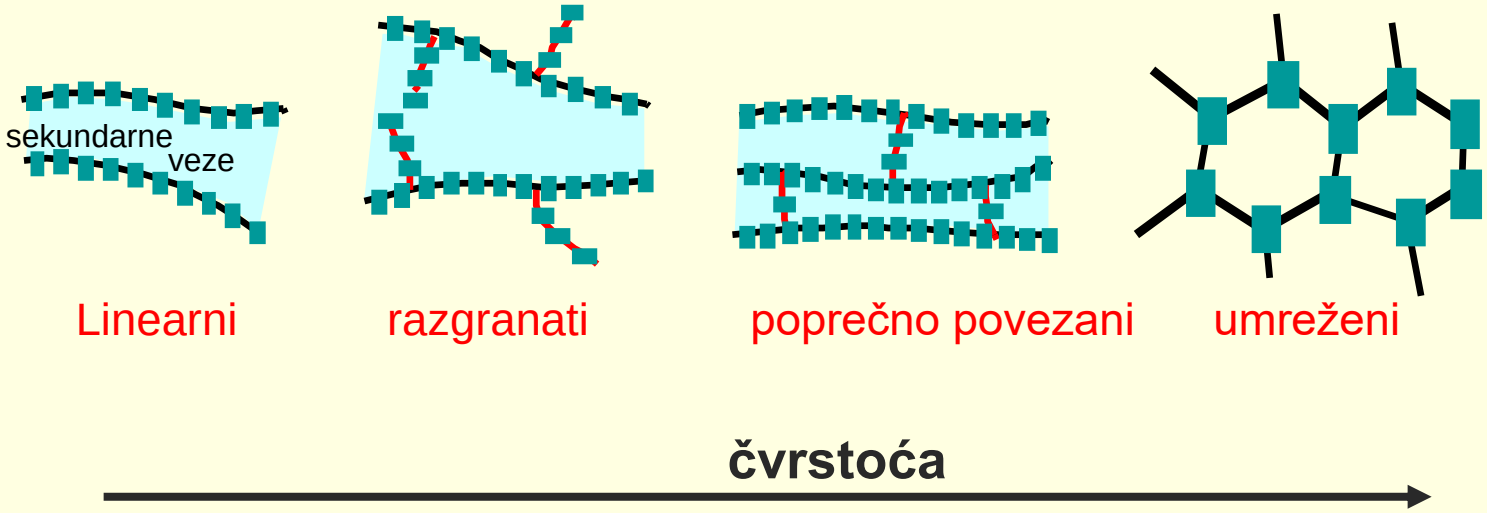
Rastojanje između krajeva lanca, r



određuje elastomerna svojstva

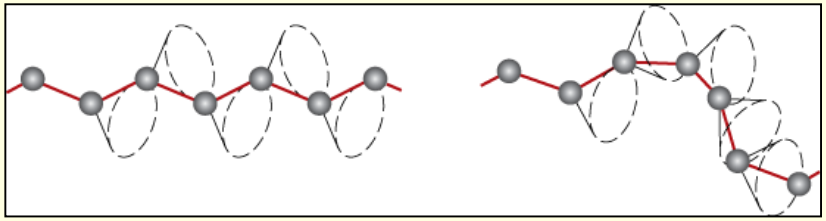
Struktura molekula

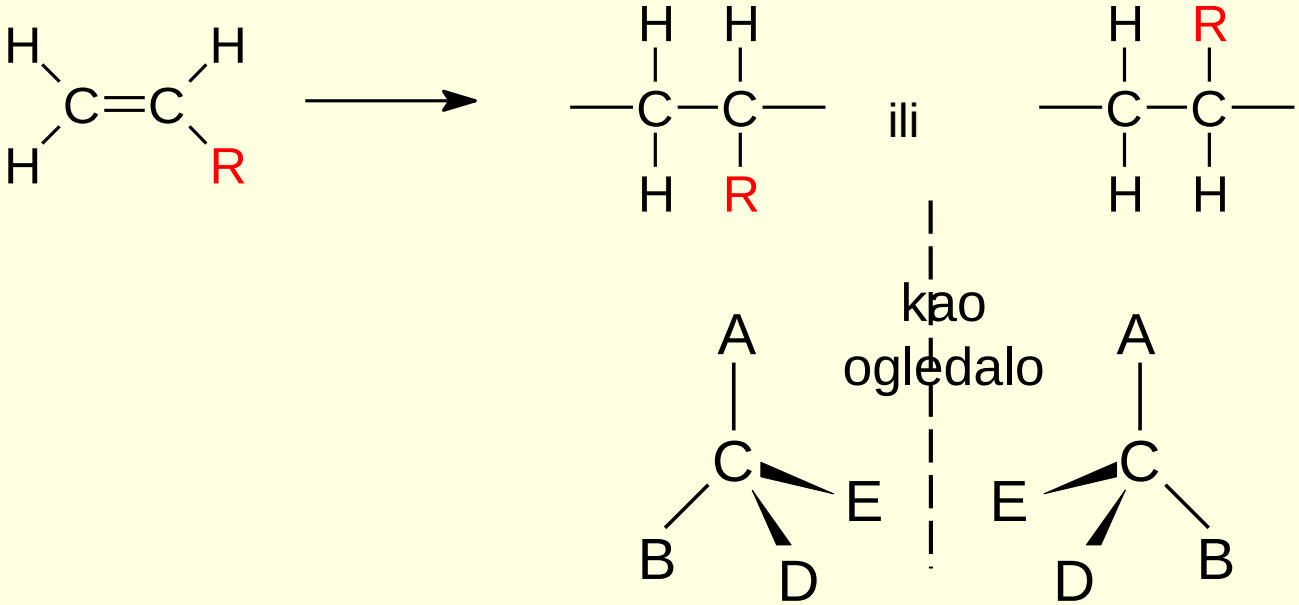
- Lanci svojim oblikom utiču na čvrstoću:



Oblik molekula

- **orijentacija molekula može da se promeni rotacijom bez raskidanja veza**
- **rotacija obezbeđje elastično ponašanje polimera**

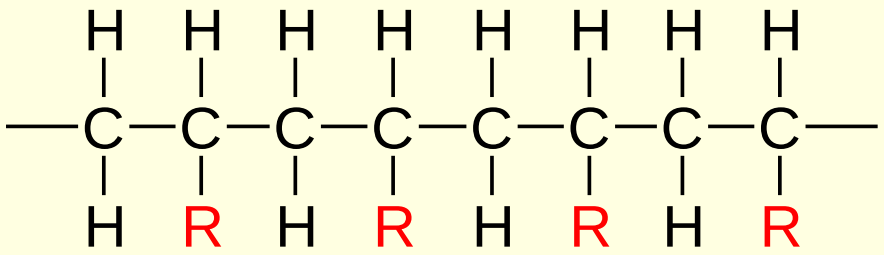




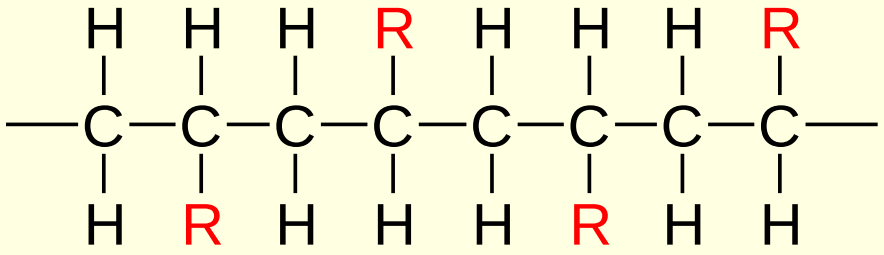
- <u>za druge promene – veze se raskidaju</u>

Ponovljivost

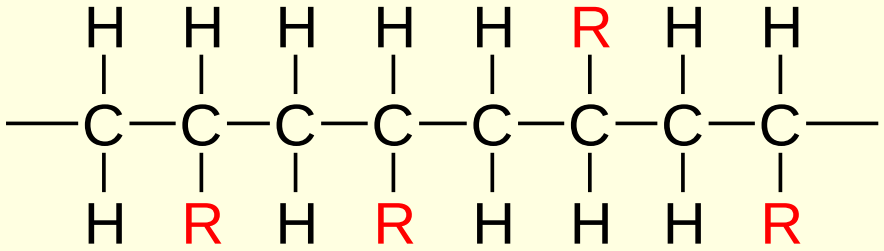
jednostrano – sve R grupe su na istoj strani



dvostrano – R grupa menja stranu



ataktični – R slučajni raspored

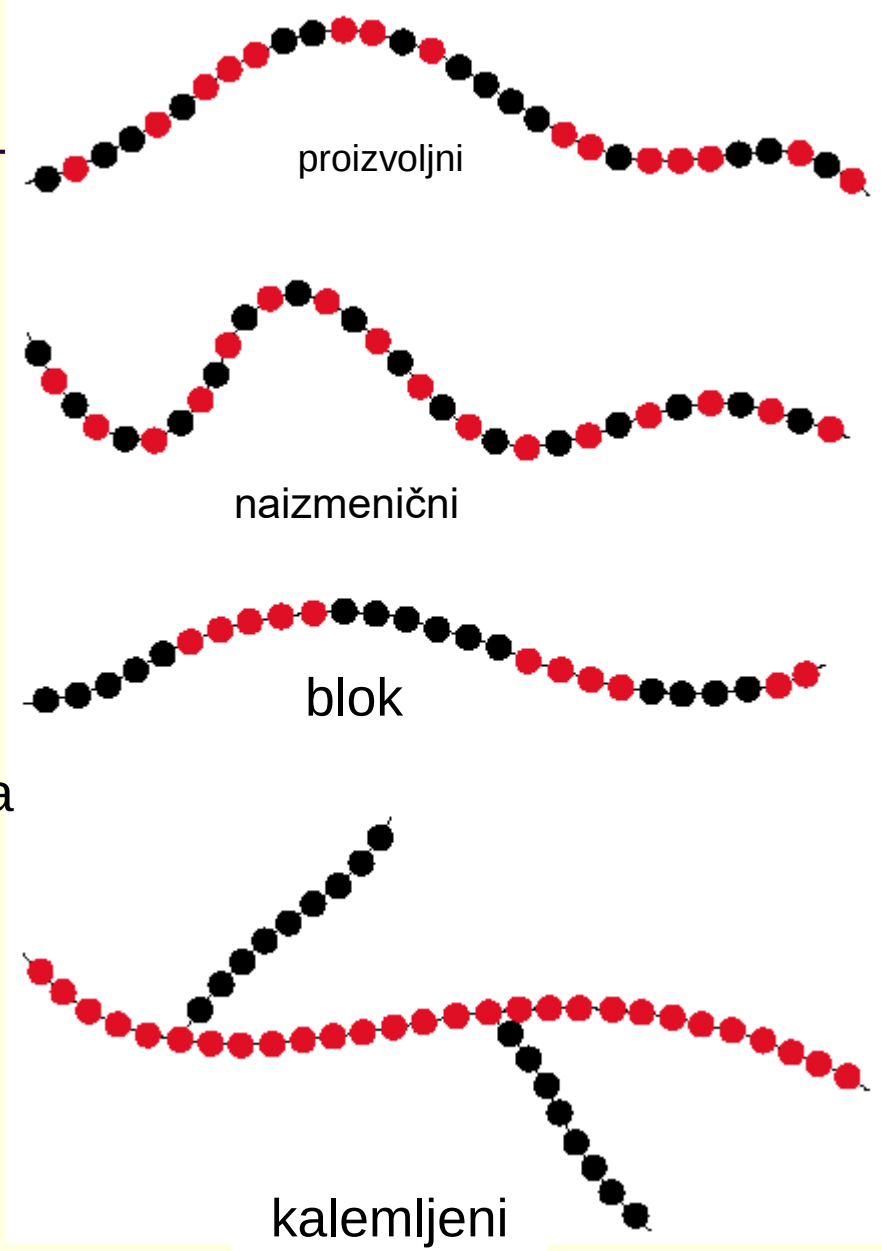


Kopolimeri

dva ili više **monomera**

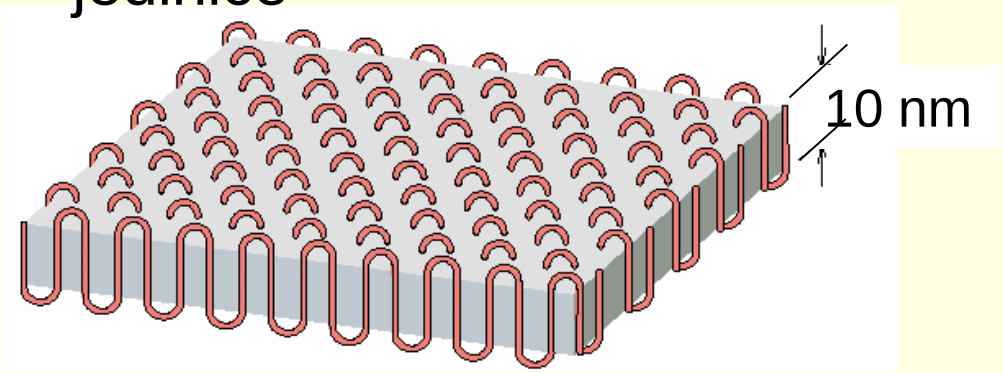
- proizvoljni – A i B imaju slučajan raspored
- naizmenični – A i B se naizmenično ponavljaju
- blok – veliki blokovi A i B se naizmenično ponavljaju
- kalemljeni – lanci B se vezuju na osnovni lanac A

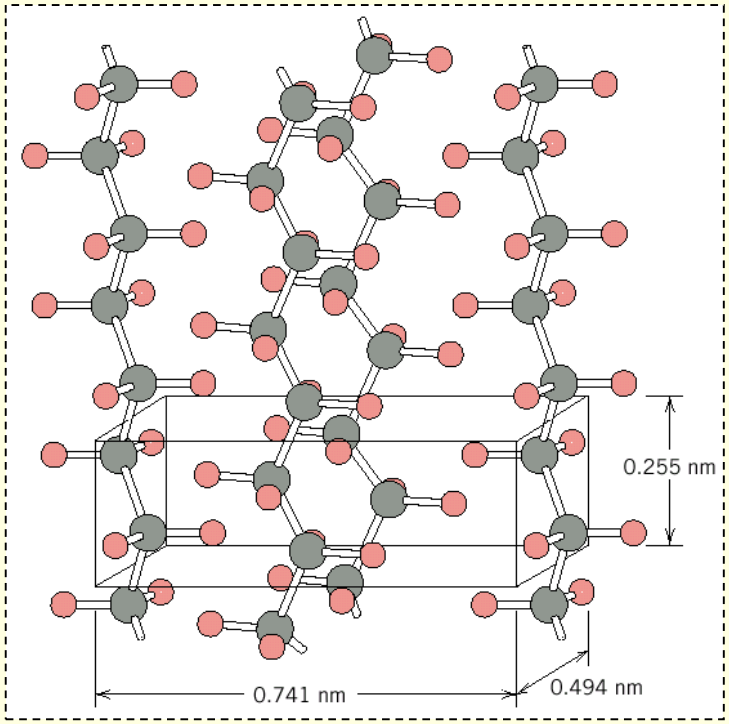
A – ● B – ●



Kristalna struktura polimera

- Lance polimera je moguće urediti u neku vrstu kristalne strukture
- Spakovani lanci imaju uređeni raspored i formiraju pravilne jedinice

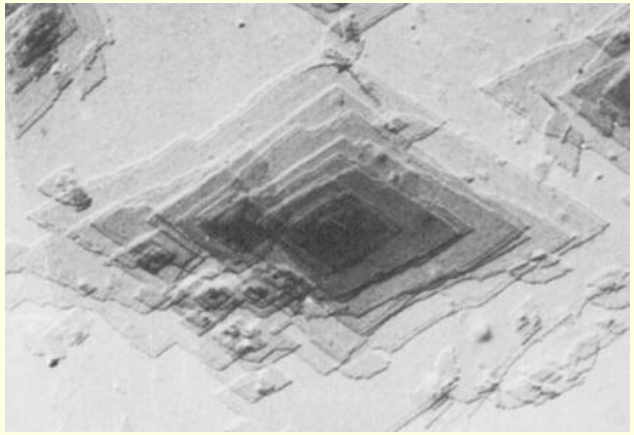




Kristalna struktura polimera

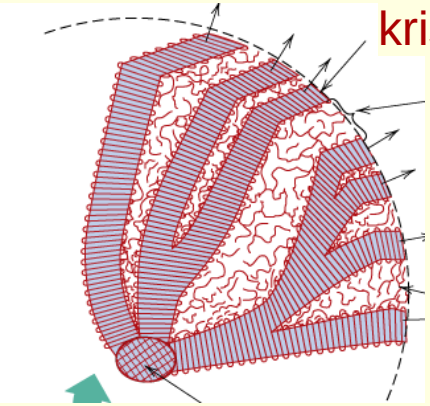
- Brzinom očvršćavanja se reguliše udeo kristalne strukture kod polimera

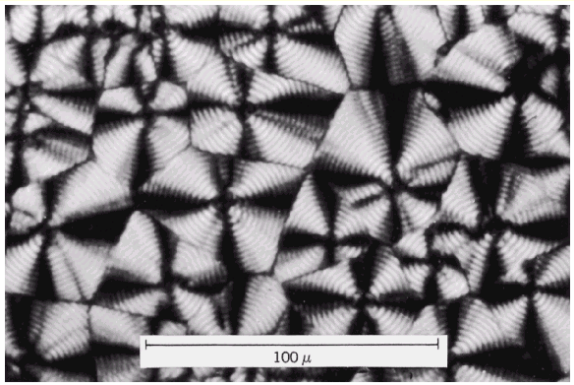
- **spori rast**
- monokristal



- **brzi rast (sferuliti) –**

lamelarna (slojevita) struktura

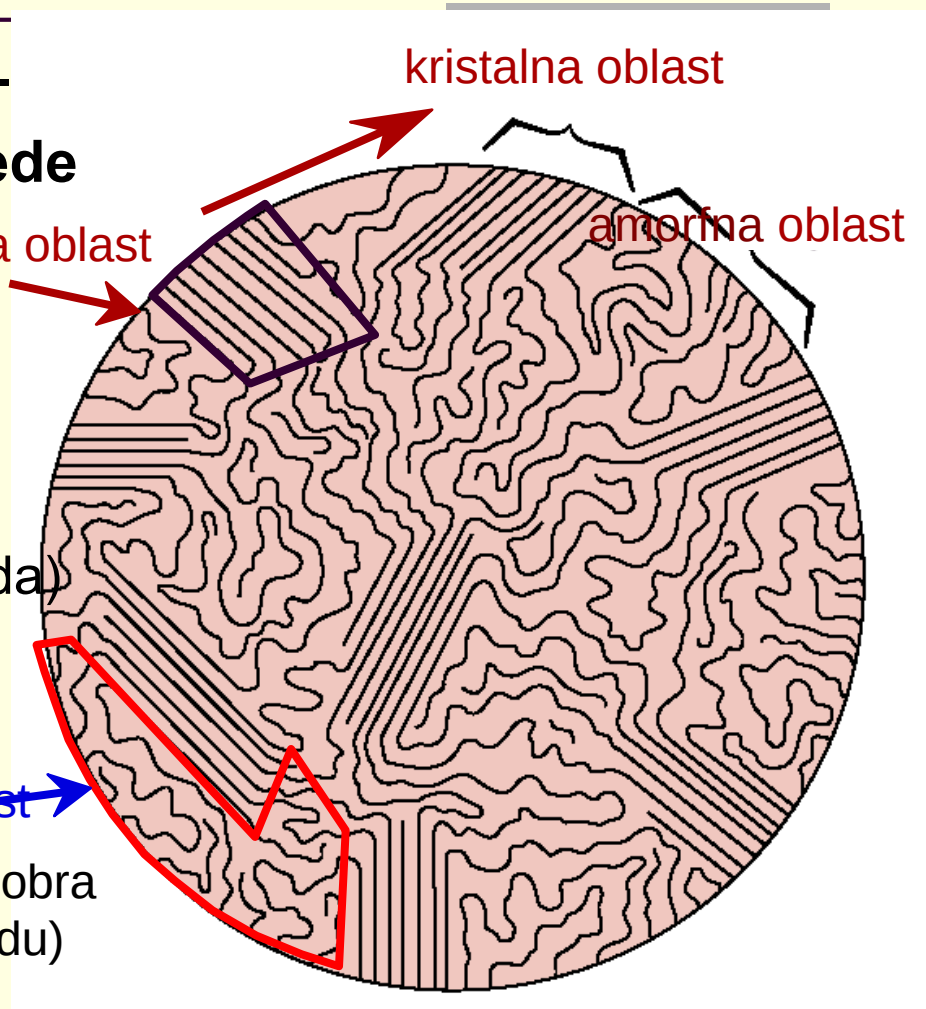




Kristalna struktura polimera

Polimeri retko 100% kristališu – vrlo je teško da se svi lanci urede

- zbog toga se određuje % kristalne strukture
  - *Rm* i *E* rastu sa % kristalne strukture.
  - Zagrevanje (kao termička obrada) izaziva rast kristalnih oblasti i porast % kristalnosti



Amorfni polimeri – po pravilu prozirni, dobra postojanost dimenzija (za preciznu izradu)
Kristalasti polimeri – neprozirni, žilavi, hemijski postojani

Termoplastični polimeri

- ***Termoplastični polimeri*** *su polimeri* koji zagrevanjem omekšavaju, a zatim se tope. **Nakon hlađenja ponovo očvršćavaju zadržavajući osnovna svojstva**.
- Prednosti:
  - postupak omekšavanja i očvršćavanja može da se ponovi više puta bez promene osobina polimera,
  - mala specifična masa (1000-1200 kg/m^3),
  - mala toplotna provodljivost i
  - visoka hemijska otpornost.
- Nedostaci:
  - nepostojanost na povišenim temperaturama,
  - nizak modul elastičnosti,
  - krtost na nižim temperaturama,
  - sklonost ka starenju itd.
- U termoplastične polimere spadaju: *polietilen, polivinilhlorid, polistirol, poliamidi, polimetilmetakrilat, polivinilacetat, poliizobutilen i dr.*

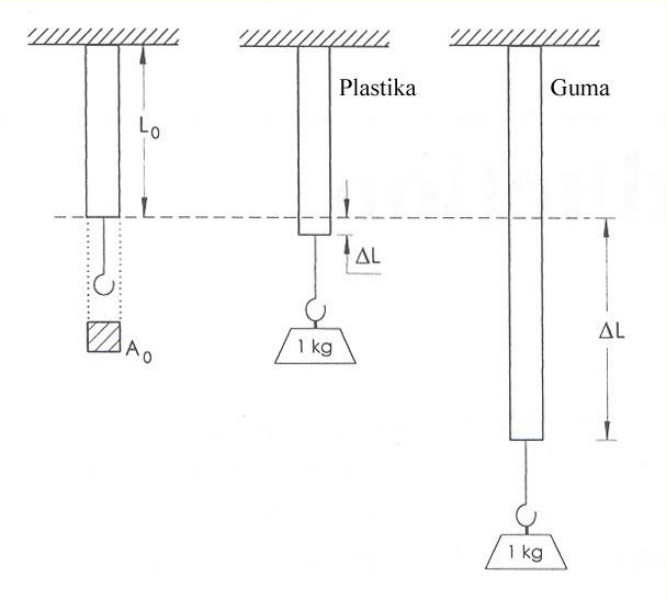
Termostabilni polimeri

- *Termostabilni polimeri* zagrevanjem **mogu samo jednom** da omekšaju i pređu u plastično stanje.
  - Pokazuju stabilnost na povišenim temperaturama.
  - Na povišenim temperaturama mogu da se deformišu.
  - Na visokim temperaturama sagorevaju.
  - Najčešće radne temperature su u opsegu od **200 - 400°C.**
  - Sa povećanjem temperature, opadan zatezna čvrstoća Rm i modul elastičnosti E, a raste žilavosti.
  - U termostabilne polimere spadaju: *fenolaldehidi, epoksidi, poliestri, poliuretani, silicijum-organski polimeri (silikoni) i dr.*

Mehaničke osobine polimernih materijala

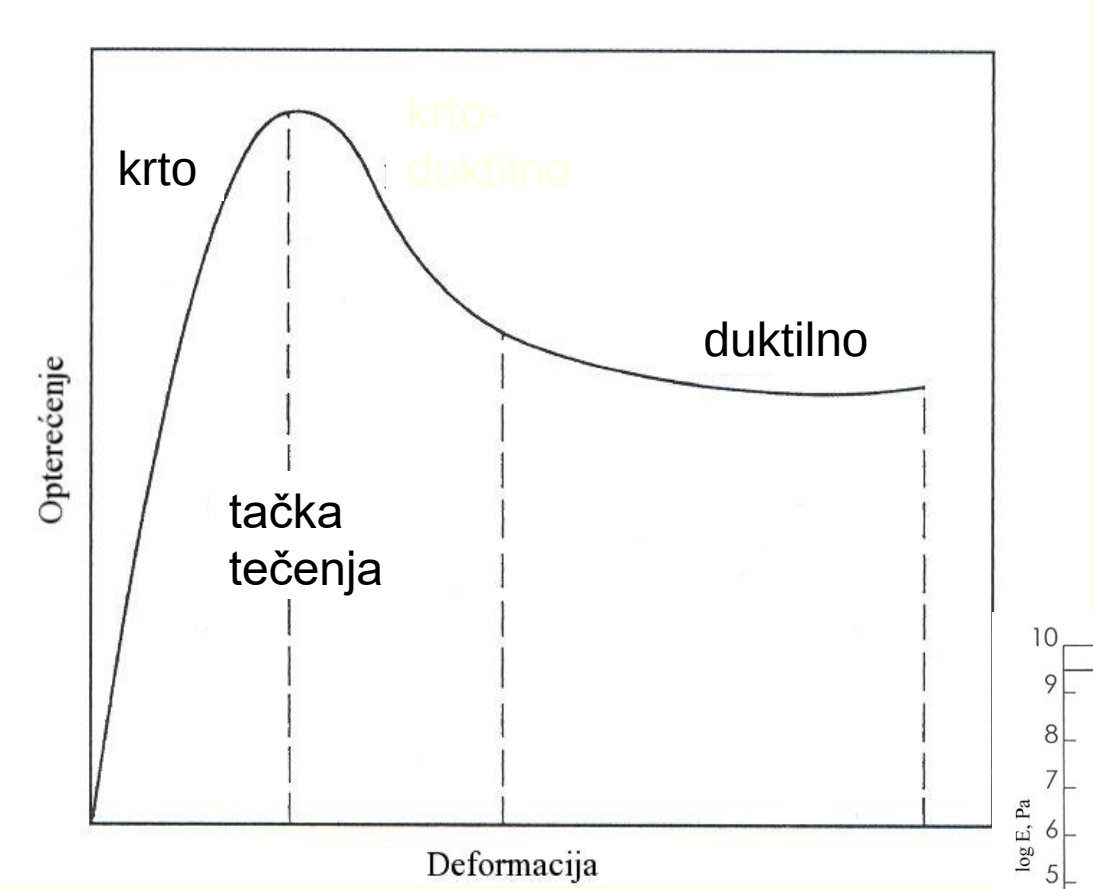
<u>Kod polimera se ispituju</u>:

- čvrstoća
- modul elastičnosti (krutost)
- tvrdoća
- žilavost
- deformabilnost



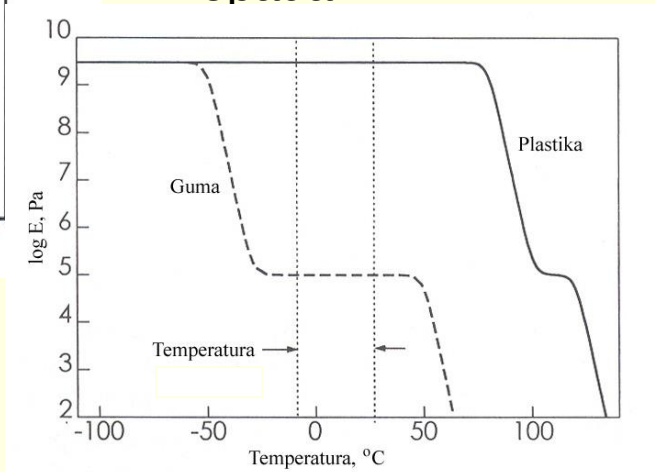
Polimeri imaju **viskoelastično** ponašanje (ponašaju se i kao elastični i kao viskozni matrerijali) Zbog viskoelastičnosti mehanička svojstva polimera se bitno razlikuju od svojstava metalnih i keramičkih materijala.

Tipična kriva zatezanja



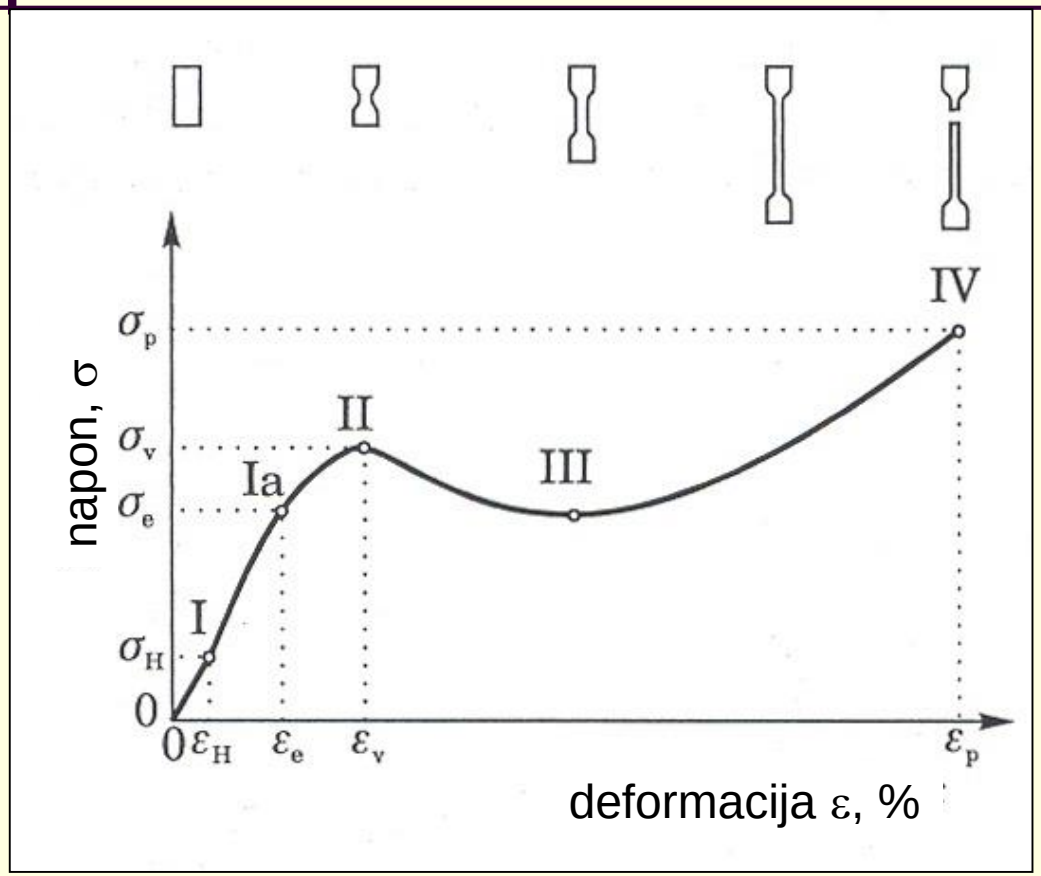
- Za neke polimerne materijale nema izraženog početnog linearnog dela $\sigma-\varepsilon$ dijagrama (ili je slabo izražen) pa se modul elastičnosti E određuje kao *tangenta*.

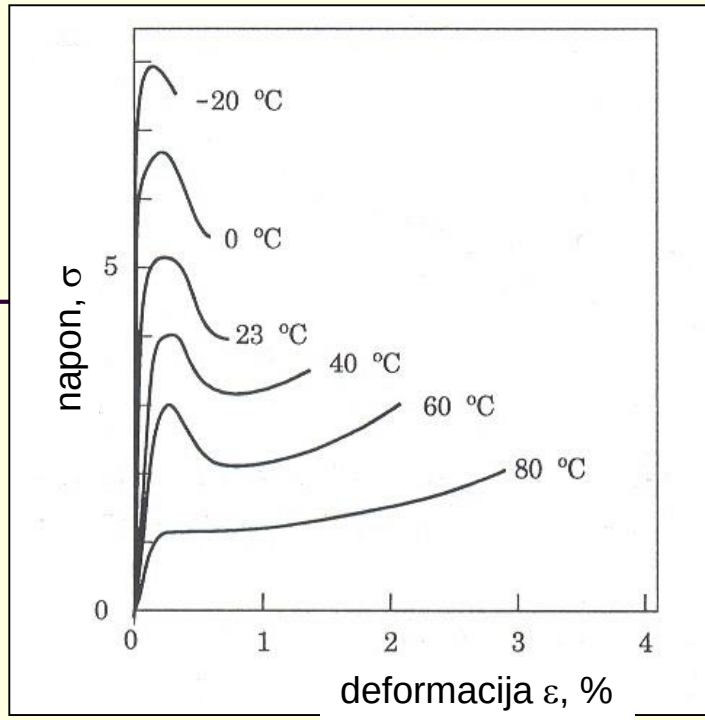
- Sa porastom temperature opada E



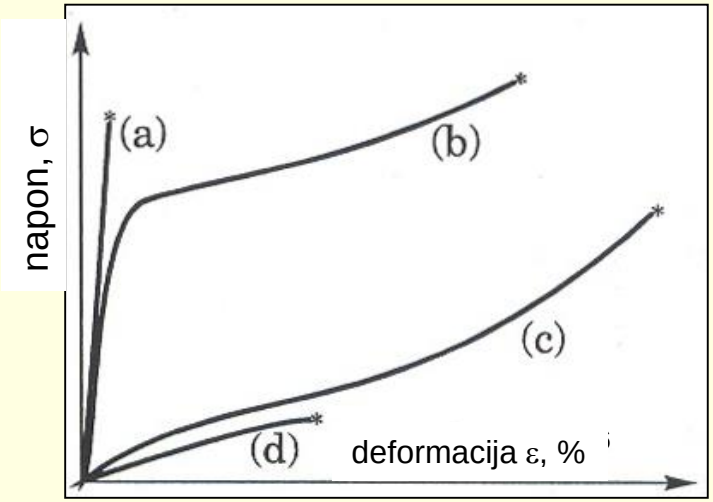
Zavisnost modula elastičnosti od temperature za plastiku i gumu

Dijagram zatezanja polimera





Promena zateznih osobina sa temperaturom ispitivanja

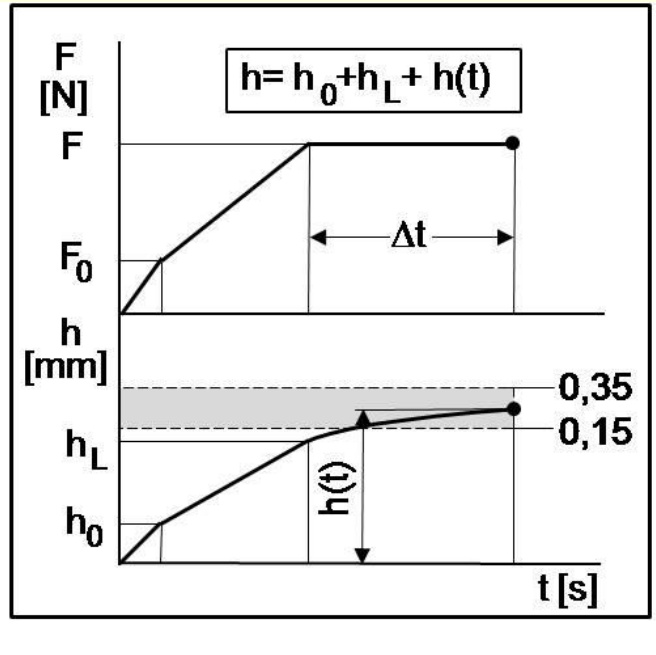


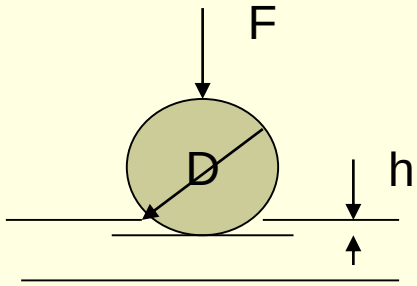
Oblici dijagrama zatezanja :
a)-kruti i krti polimeri; b)-tvrdi i žilavi polimeri;
c)-savitljivi i žilavi polimeri; d)-savitljvi i krti polimeri

Tvrdoća polimera

Metode za određivanje tvrdoće najčešće su:

- Shore
- Brinel HB.

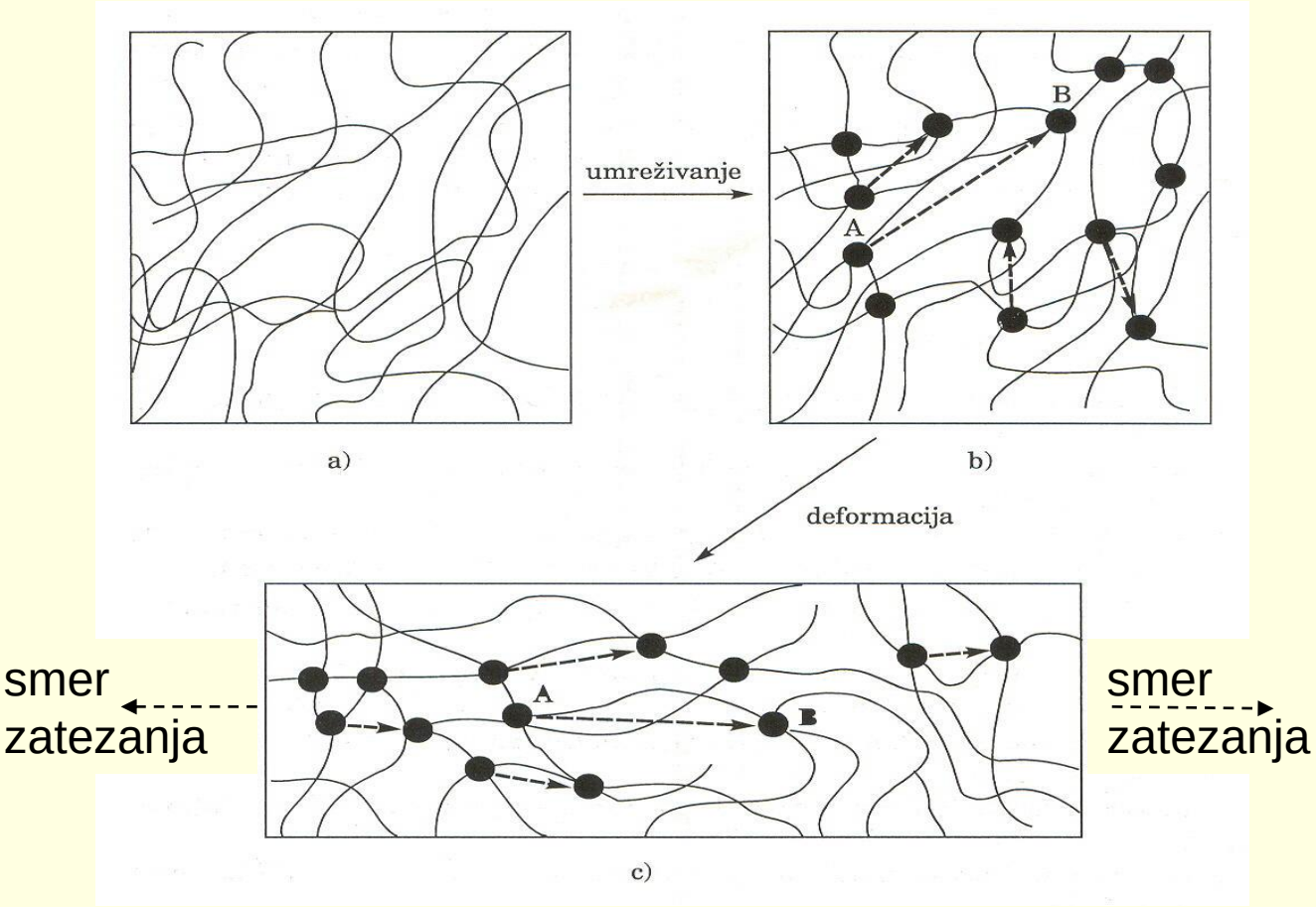




D=5 mm

$$H = \frac{1}{\pi D}\frac{F}{h} = 0{,}064\frac{F}{h}\,N/mm^2$$

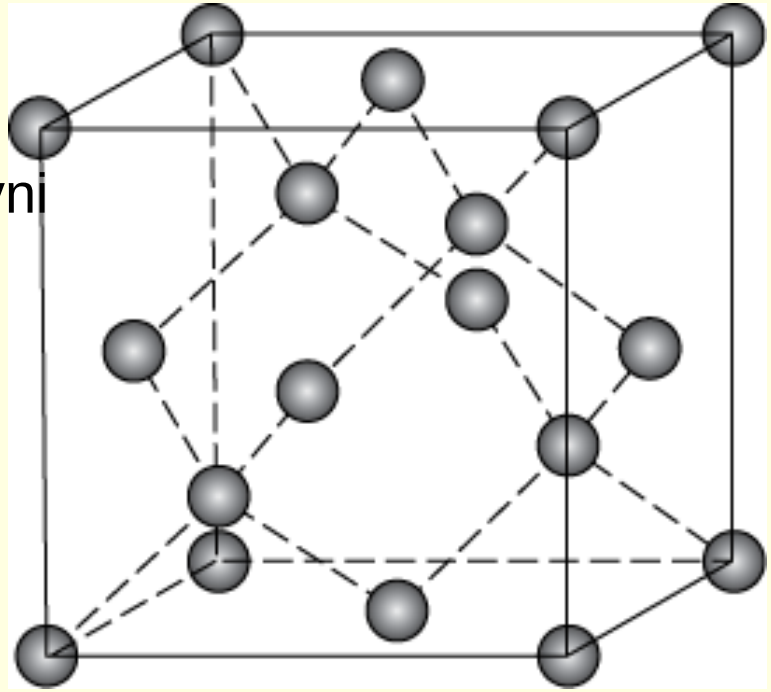
Efekat umrežavanja kod guma (elastomeri)



Šematski prikaz umrežavanja i deformacije elastomernih makromolekula:
a) linearna struktura, b) umrežena struktura, c) deformisana struktura

Ugljenik C – amorfan

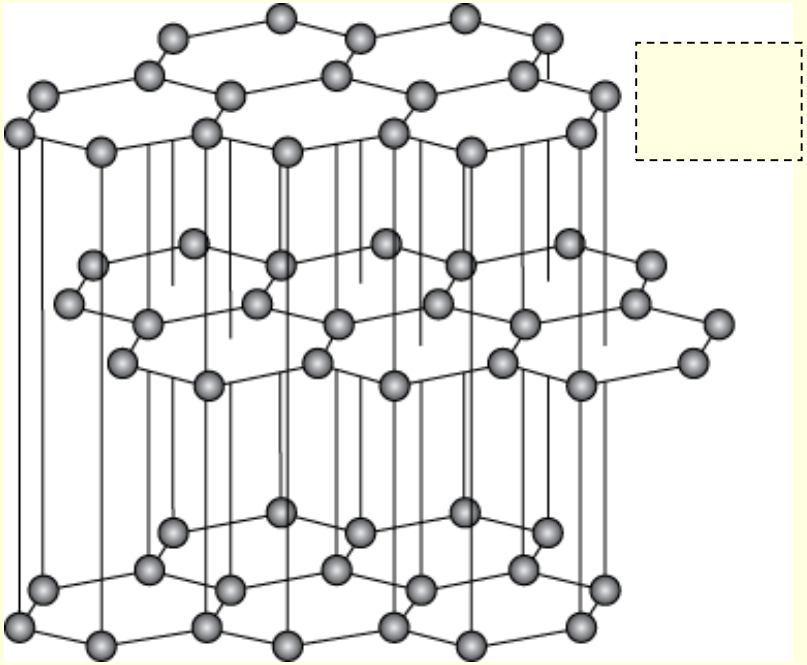
- Dijamant
  - tetraedarska rešetka C
    - tvrd – nema pogodne ravni klizanja
    - krt – može da se reže
  - veliki komadi – nakit
  - mali (veštački) komadi - za rezne alate za poliranje
  - filmovi
    - tvrda prevlaka za alate, medicinske uređaje, itd.



Adapted from Fig. 12.15, *Callister 7e.*

Grafit

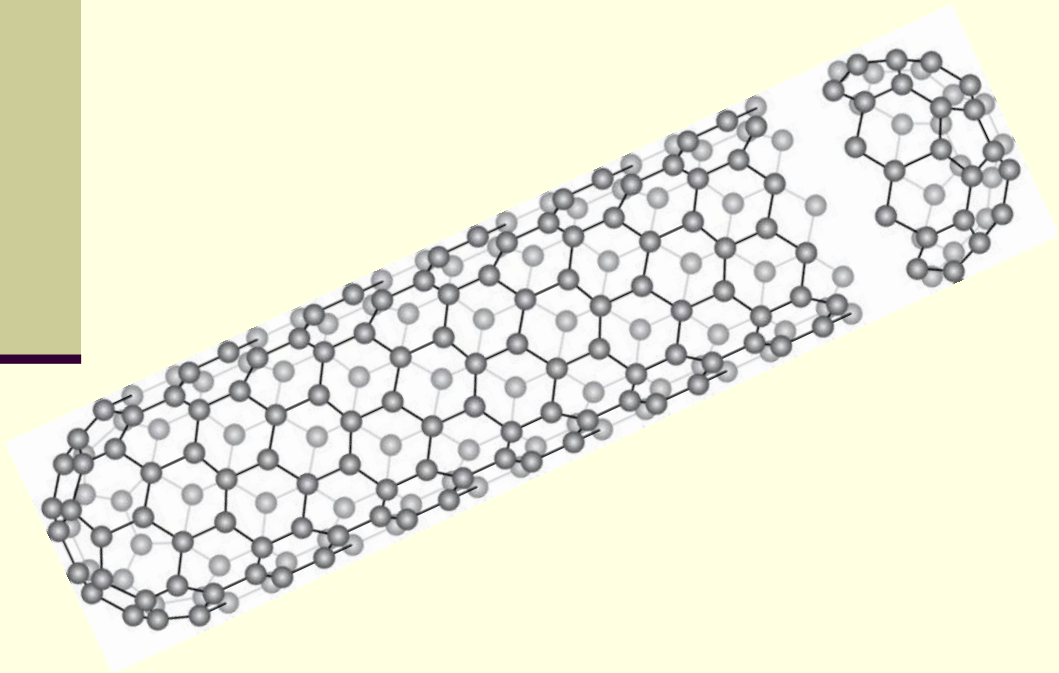
- **slojevita struktura**

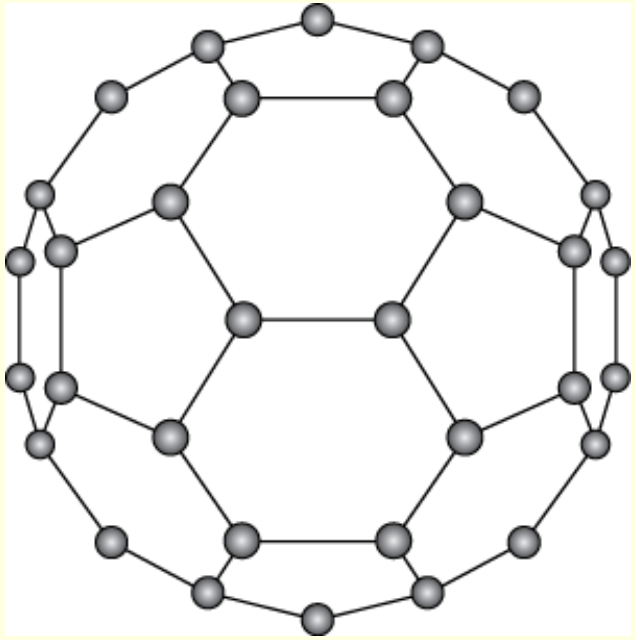


  - **slabe *van der Waal*-sove veze između slojeva**
  - **ravni lako klizaju – dobar je kao sredstvo za podmazivanje**
  - **spec površina. 1000 m^2/g**

Složene strukture

- savijanjem grafita u oblik lopte ili cevi
- fulereni – kao fudbalske lopte C_{60} - ili C_{70} + itd
- nano materijali





- Hvala na pažnji☺