

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

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

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 izolator
ili se traže druge osobine: termičke, magnetne, optičke, kako degradira,...
 - 2. Osobine** → Na osnovu osobina, vršimo izbor kandidata **materijala**
npr.: pored mehaničkih, električnih, termičkih, itd osobina može da se
zahteva još i mikrostruktura, hemijski sastav,
 - 3. Materijal** → Kada je izabran materijal bira se stanje
isporuke, tj. način **izrade**
Načinom izrade delova menjamo mikrostrukturu i *oblik dela*
npr: livenje, valjanje, kovanje, sinterovanje, napanje,
rezanje, spajanje/zavarivanje, termička obrada, itd.
- **Kod materijala postoji neraskidiva veza:**
struktura i način izrade određuju osobine

Primer izbora materijala

Inženjerski problem – zamena kuka

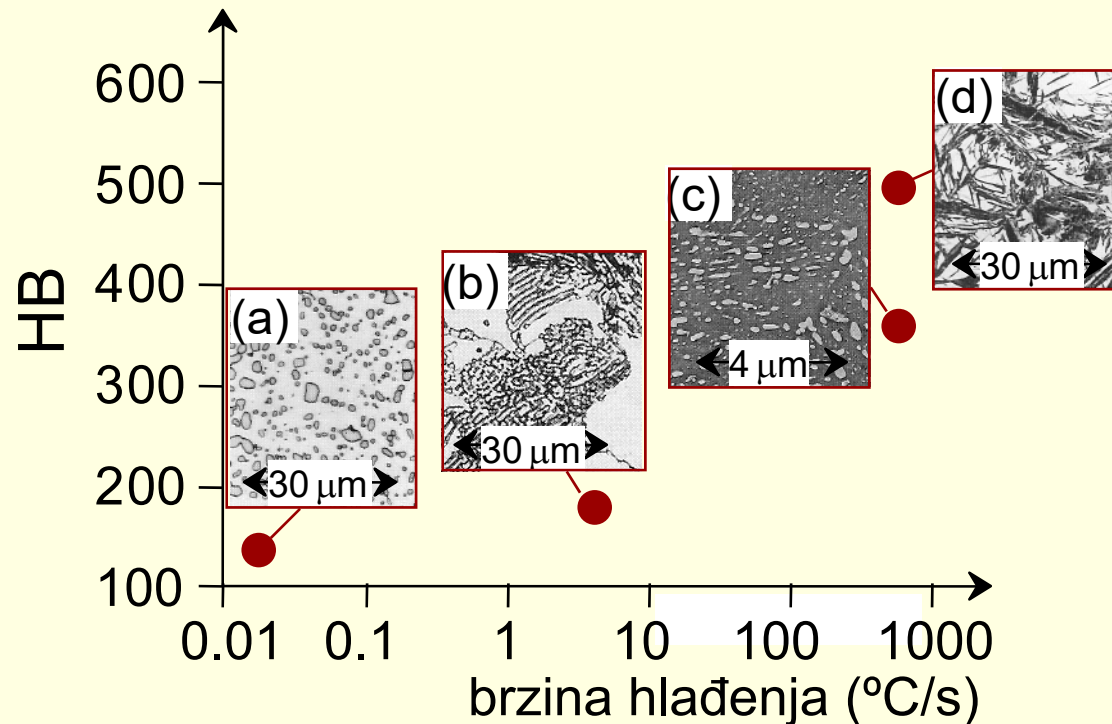
- Starenjem zglobovi se “troše” tj habaju.
- Zahtevi za materijal za izradu veštačkog kuka:
 - dinamička čvrstoća
 - dobro podmazivanje - svojstva podmazivanja *kapice* - ne smeju da se izdvajaju čestice usled habanja
 - biokompatibilnost
- **Najveći problemi pri izradi:**
 - Kako učvrstiti *kapicu*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



Korelacija - izrada, mikrostruktura & osobine

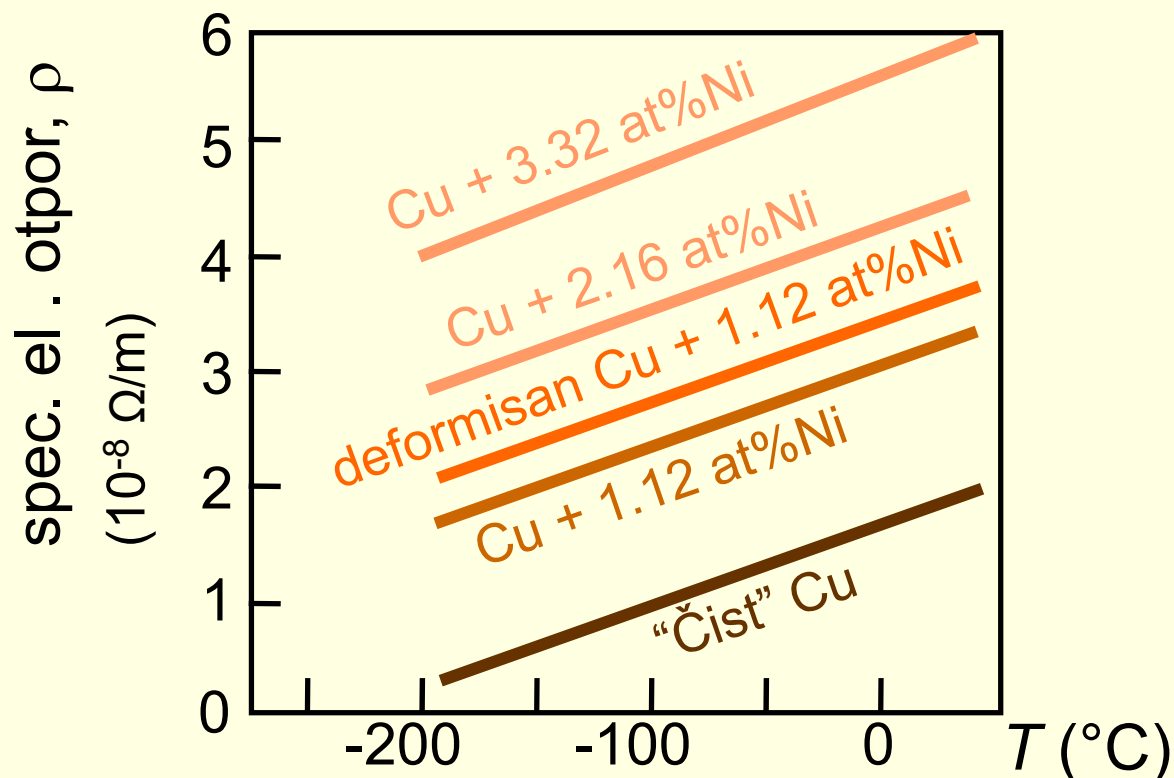
Primer: tvrdoća čelika

- 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 bakra (Cu):



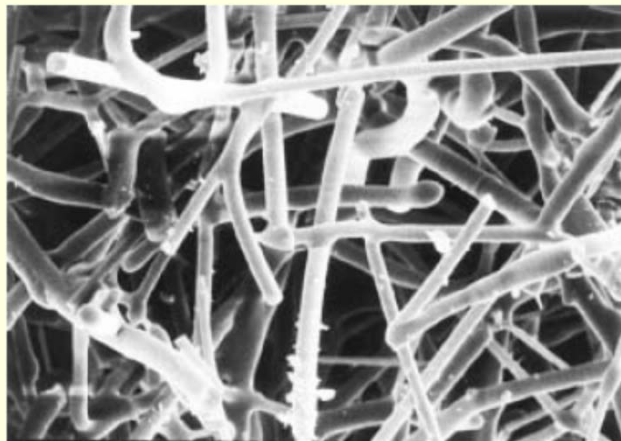
- Dodatkom atoma "nečistoća" (važi i za legiranje!) u Cu raste el. otpornost.
- Porastom stepena deformacije Cu raste el. otpornost.

Korelacija - izrada, mikrostruktura & osobine

Primer: toplotna provodljivost

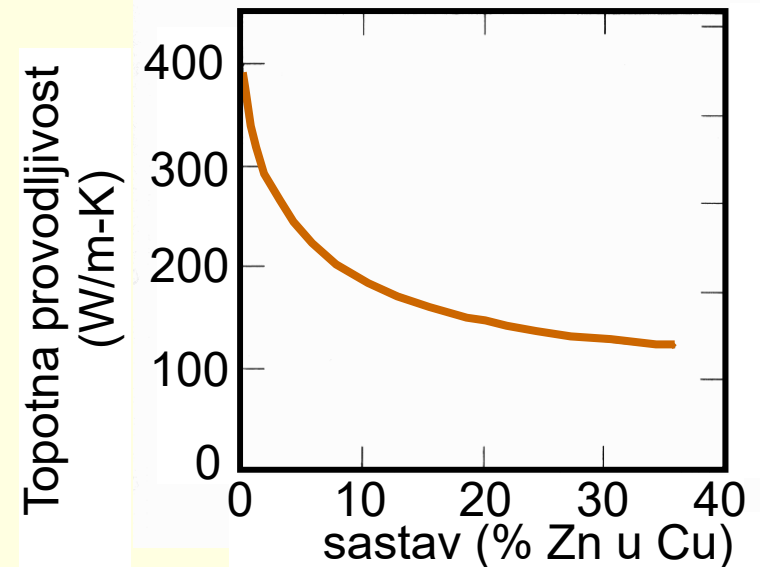


- Pločice za Space Shuttle: Vlakna SiO_2 imaju vrlo malu toplotnu provodnost



← 100 μm →

- **Toplotna provodljivost Cu:**
 - Sa dodatkom Zn opada!
 -ali raste čvrstoća

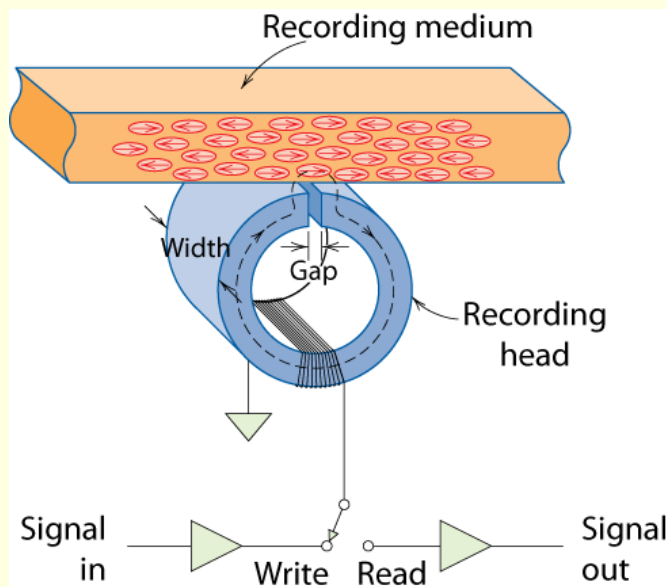


Korelacija - izrada, mikrostruktura & osobine

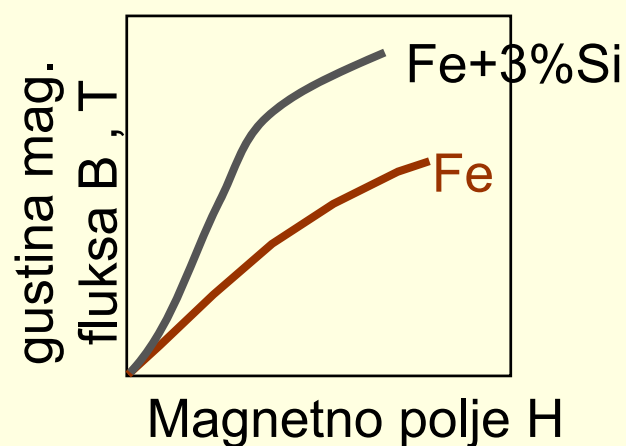
Primer: magnetne osobine

- 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).

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



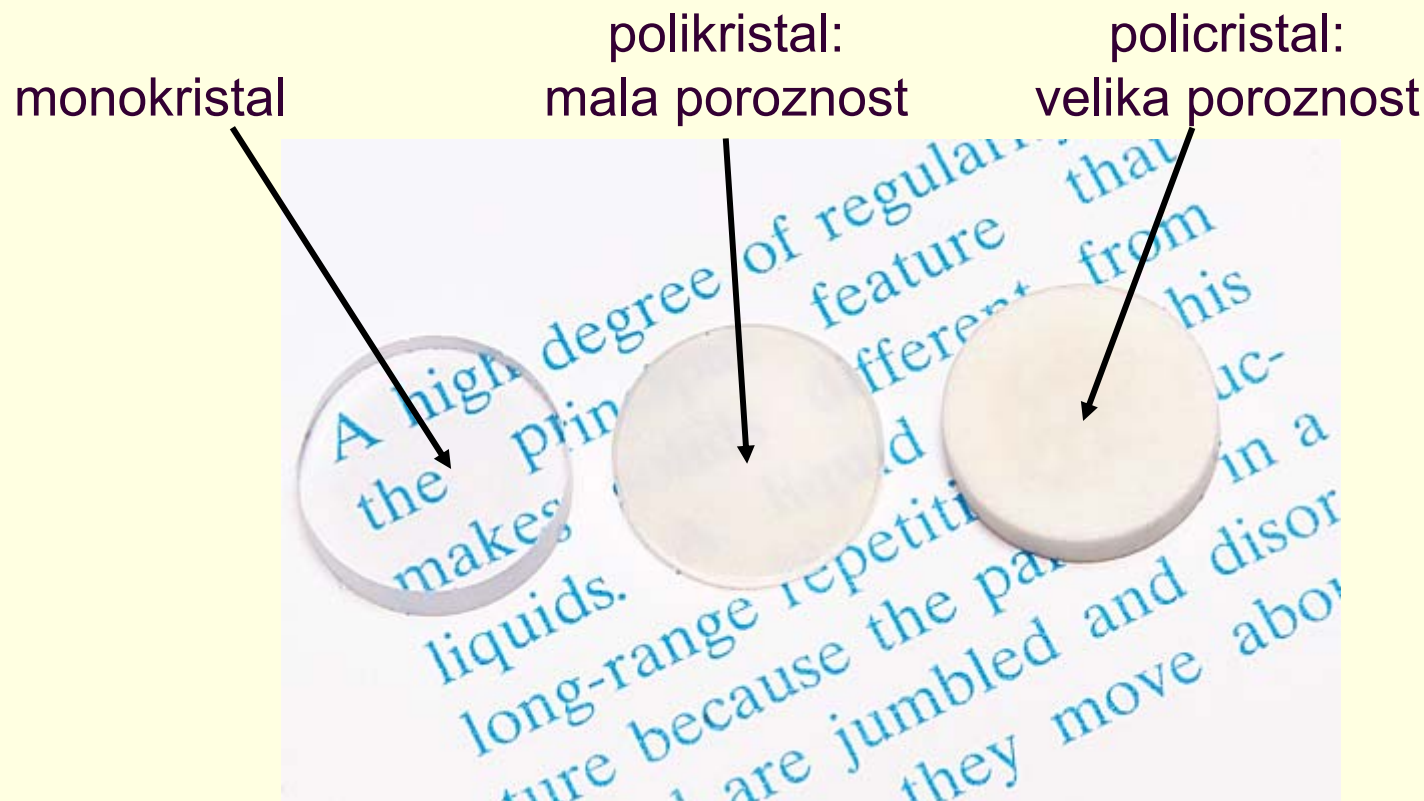
- **Magnetna permeabilnost** je u f-ji sastava: - dodatkom 3at.% Si u Fe raste intenzitet magnetizacije – bolji magnetni zapis!



Korelacija - izrada, mikrostruktura & osobine

Primer: optičke osobine

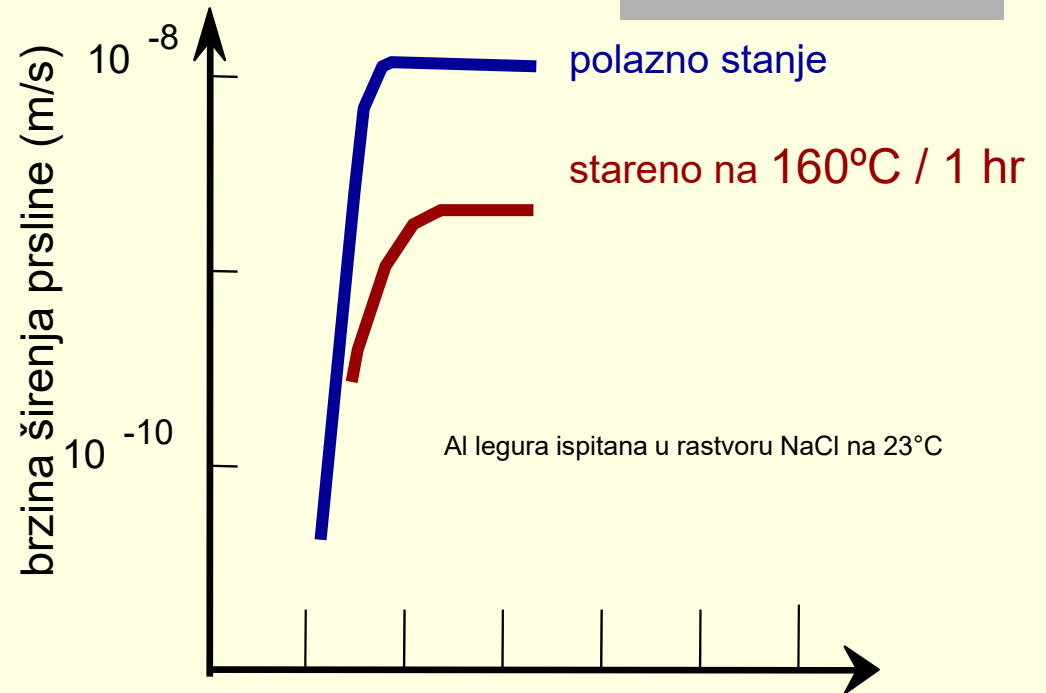
- **Providnost (propuštanje svetlosti):**
 - Al_2O_3 može biti providan, proziran ili neprovidan u zavisnosti od strukture



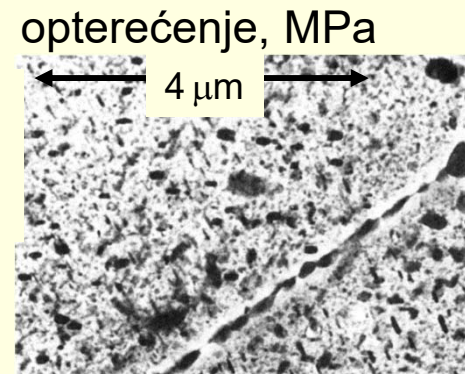
Korelacija - izrada, mikrostruktura & osobine

Primer: način degradacije materijala

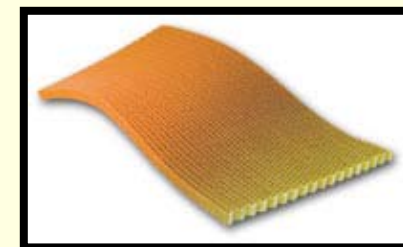
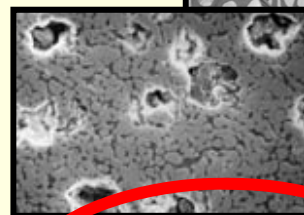
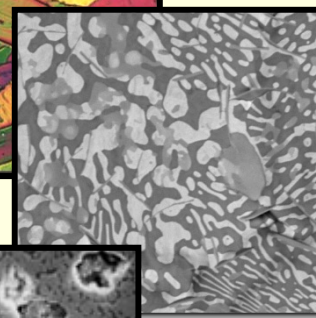
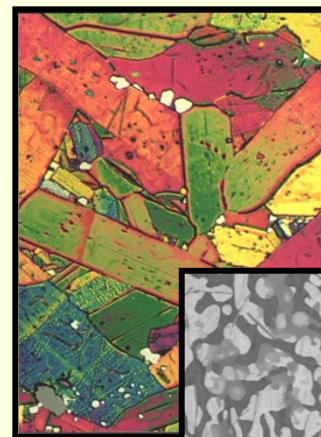
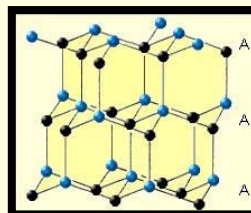
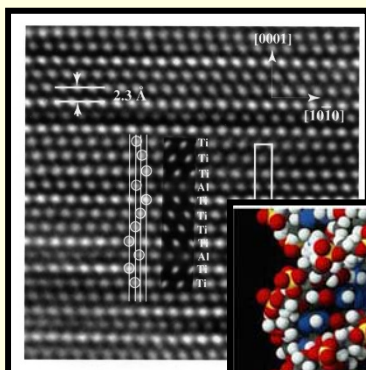
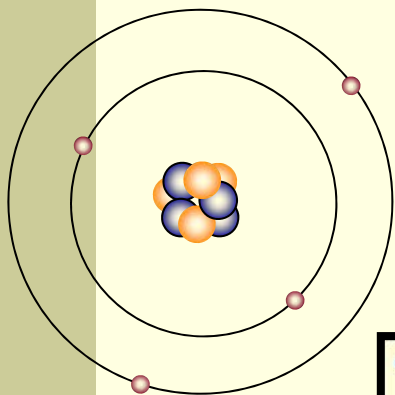
- Kod nekih legura Al napon & morska voda izazivaju prsline naponske korozije!
- **Termička obrada** usporava brzinu širenja prsline naponske korozije u slanoj vodi!



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



STRUKTURA MATERIJALA



Subatomski nivo

Atomski nivo

Mikrostruktura

Makrostruktura

Osnovne grupe materijala - poređenje

Keramike

krute, visoka čvrstoća,
vrlo tvrde, krte, loši
provodnici, 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

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

Metali i njihove legure

Polimeri

nisu čvrste i tvrde ali
imaju malu gustinu –

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

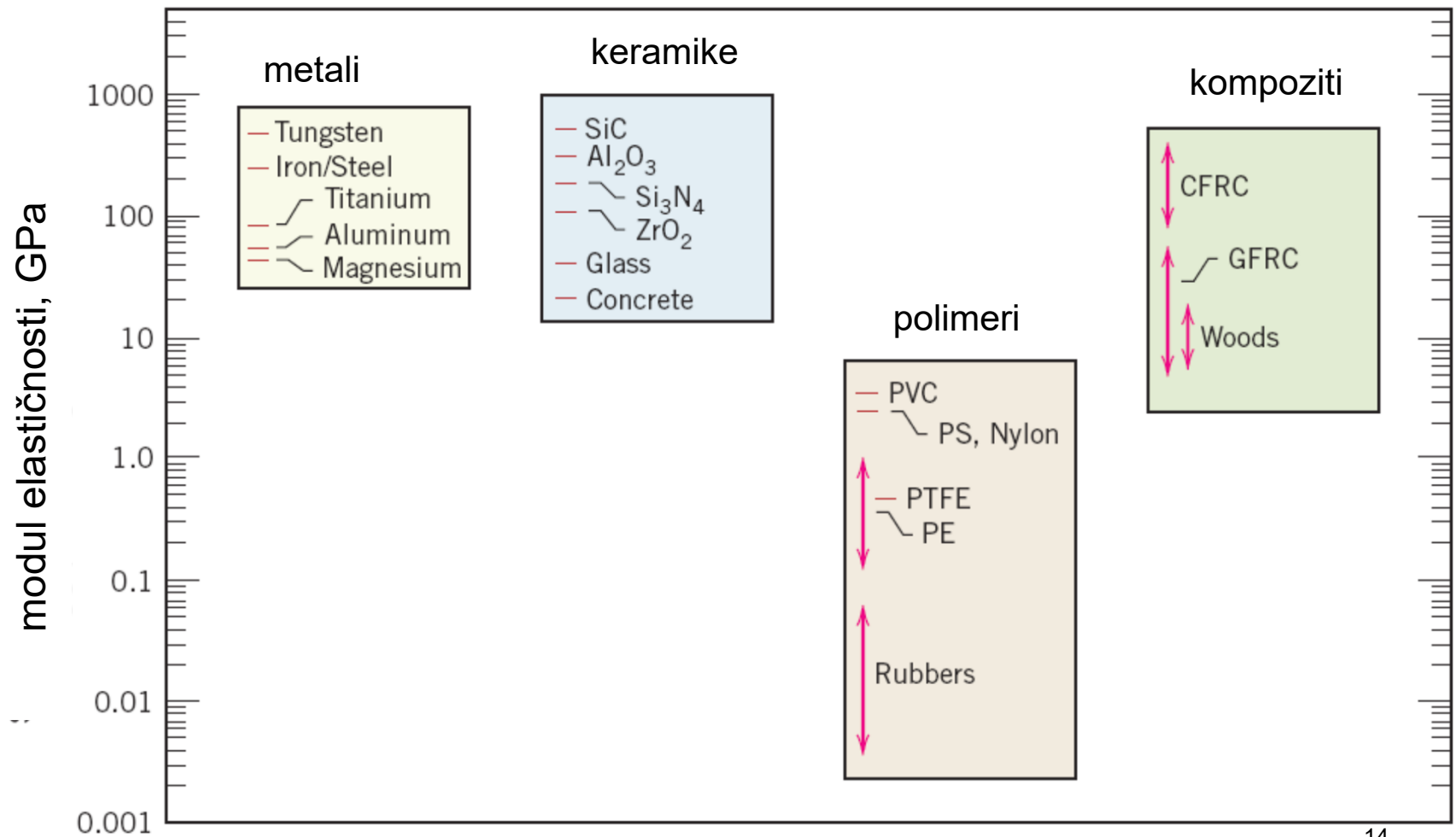
krutost i čvrstoća svedeni na masu su u rangu metala i keramika

Kompoziti

osobine zadržavaju od
gradivnih komponenti i
daju nove

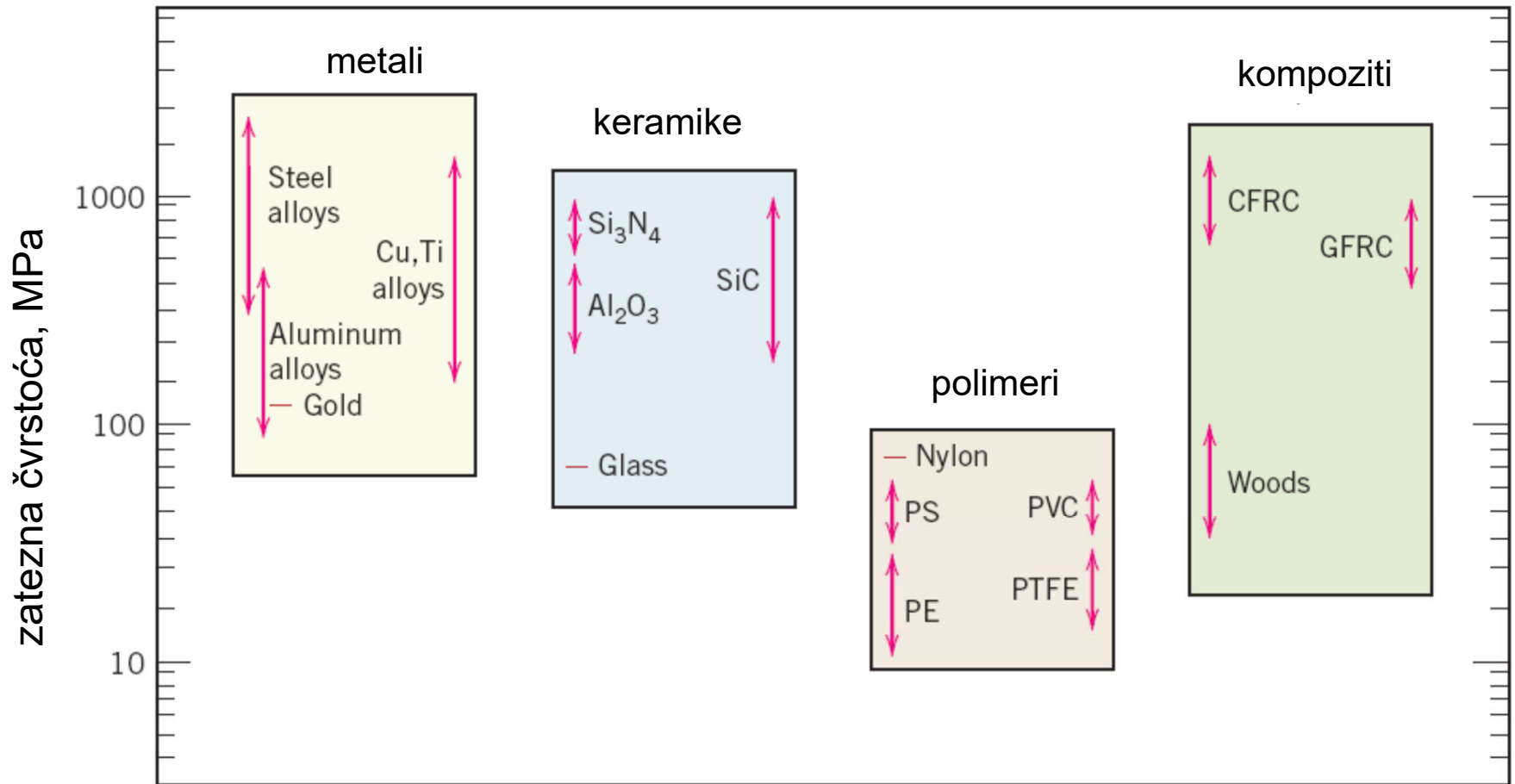
Grade ih dve ili sve tri osnovne grupe materijala
prirodni kompoziti – drvo i kost

Poređenje osnovnih grupa materijala: prema modulu elastičnosti



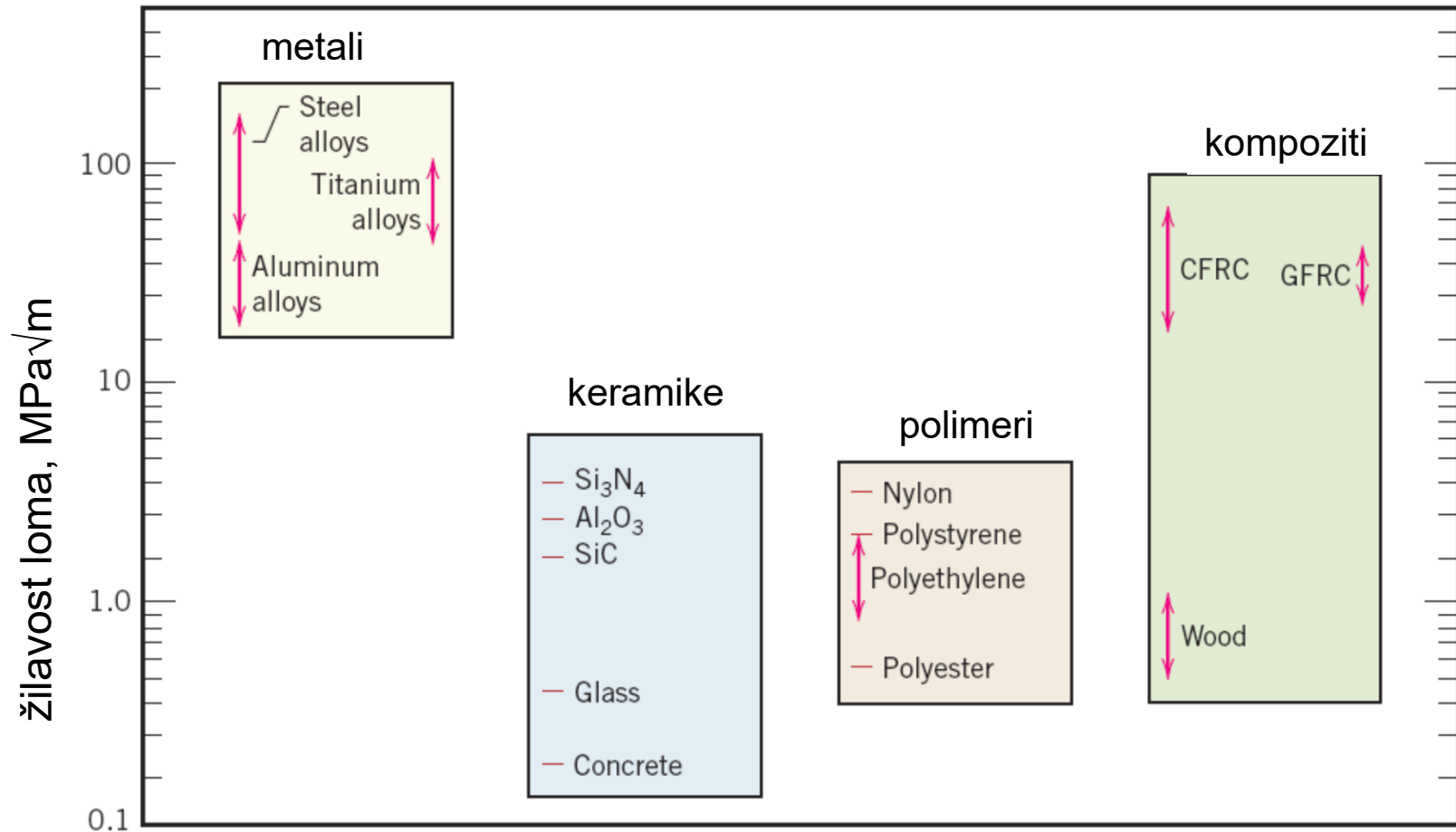
Modul elastičnosti određuje krutost konstrukcije

Poređenje osnovnih grupa materijala: Rm



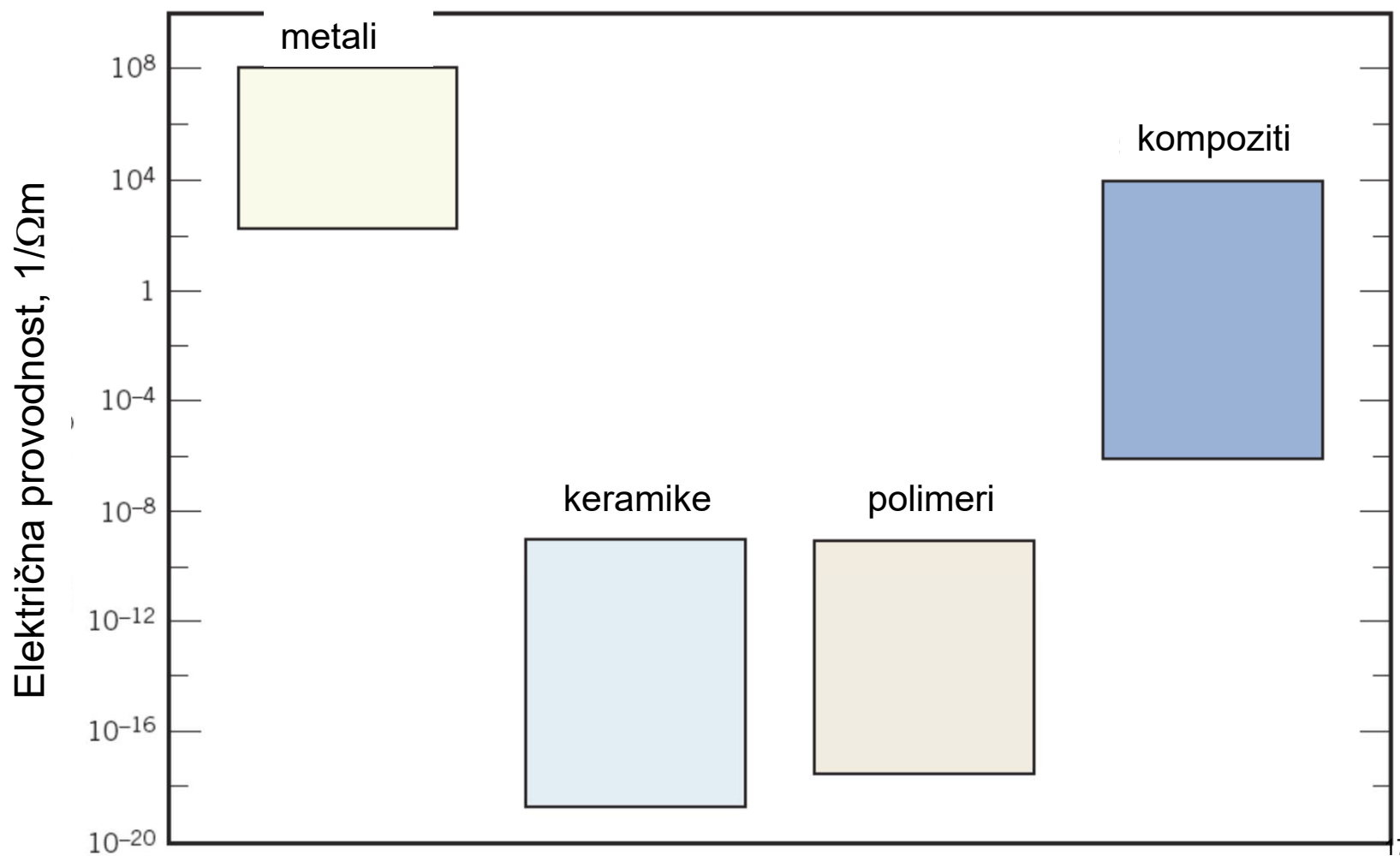
Zatezna čvrstoća određuje nosivost konstrukcije do loma.
 Veličine $R_{0,2}$ ili R_d ili $R_{100.000}^{540^\circ\text{C}}$ određuju...? (pitanje za vas 😊)

Poređenje osnovnih grupa materijala: K_{IC}



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

Poređenje osnovnih grupa materijala – 1/R



R el. otpornost, tj 1/R el. provodnost određuju primenu

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

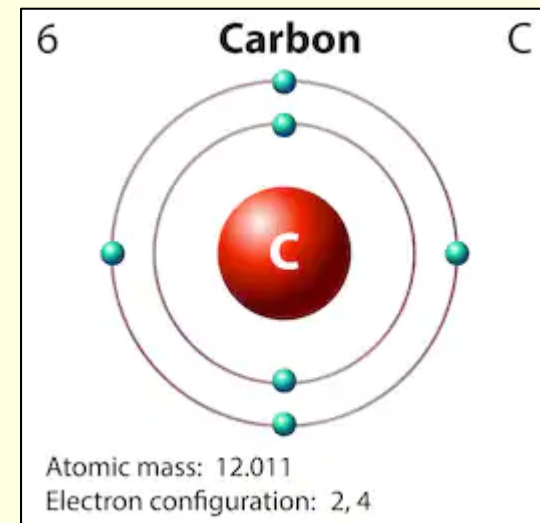
niska T_m

nizak E

visok α

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)



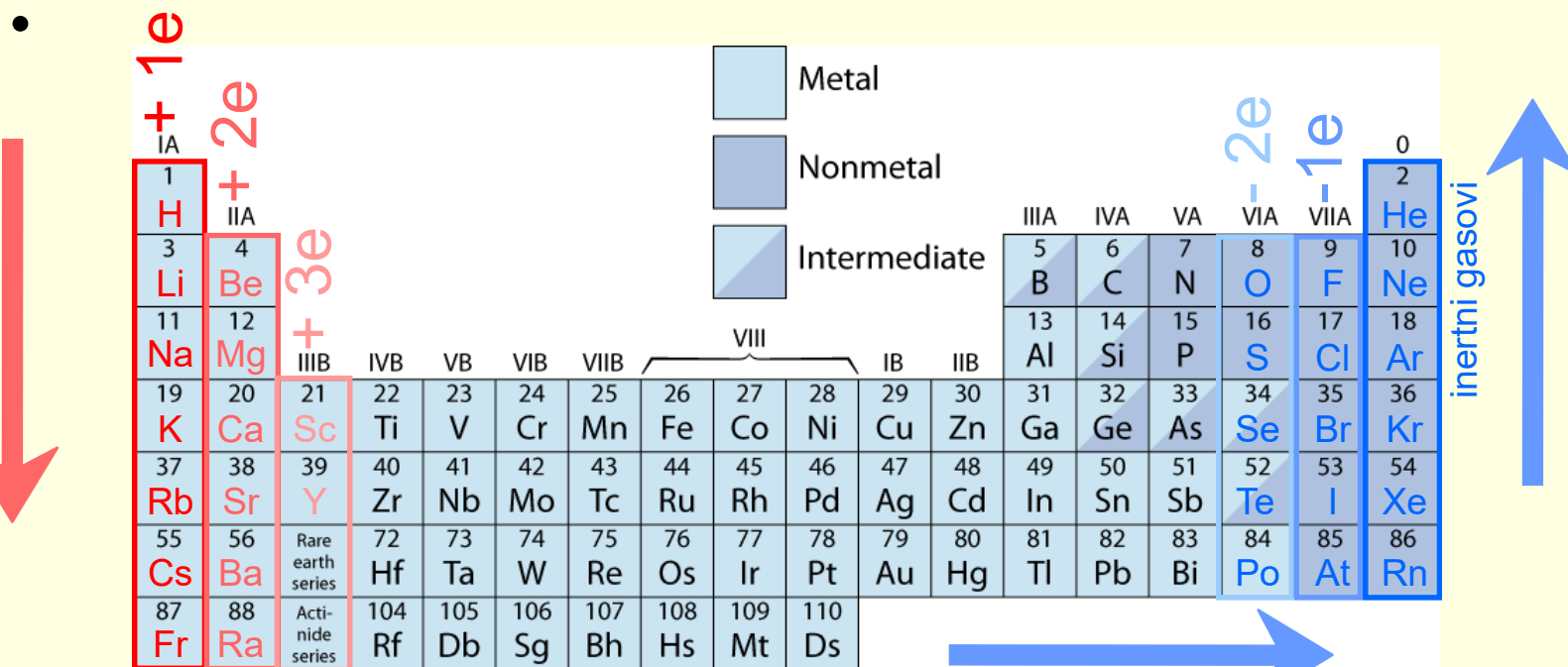
$1s^2$

$2s^2 2p^2$

valentni elektroni

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.²⁰

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
CaF₂
CsCl

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

elektronegativnost

← daje elektrone

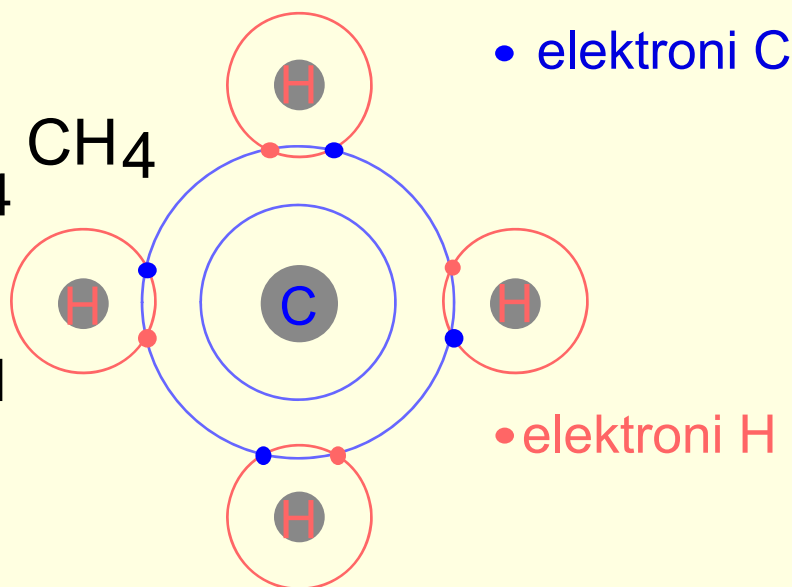
→ prima elektrone

Kovalentna veza

- Odlika kovalentne veze je **slična*** elektronegativnost atoma
- Atomi dele elektrone - formiraju elektronske parove
- Veza je određena valentnošću
- Primer: CH₄

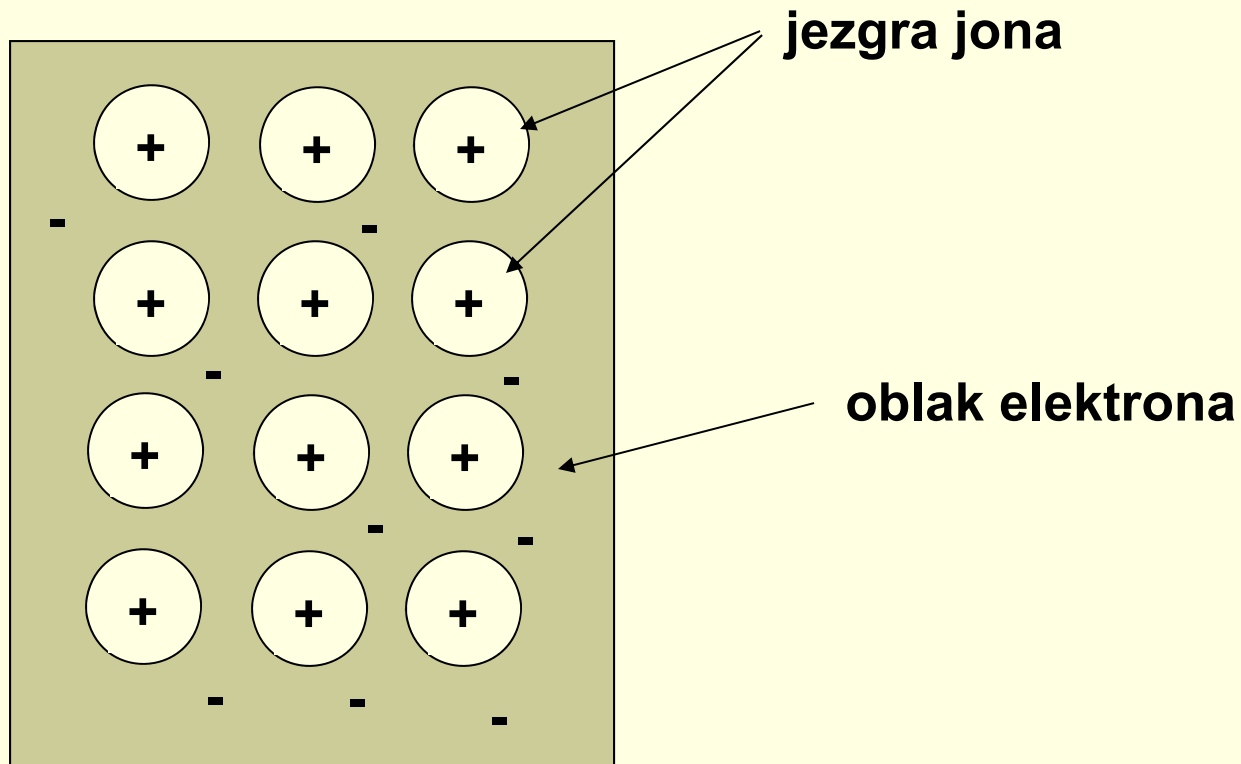
C: ima 4 valentna e⁻,
potrebna su mu još 4

H: ima 1 valentni e⁻,
potreban mu je još 1



*mala razlika u elektronegativnosti

Metalna veza – čisto da je spomenemo!



Metali imajo 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

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

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

Primer: MgO

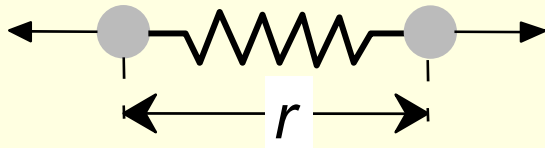
$$\begin{aligned} X_{\text{Mg}} &= 1.3 \\ X_{\text{O}} &= 3.5 \end{aligned}$$

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

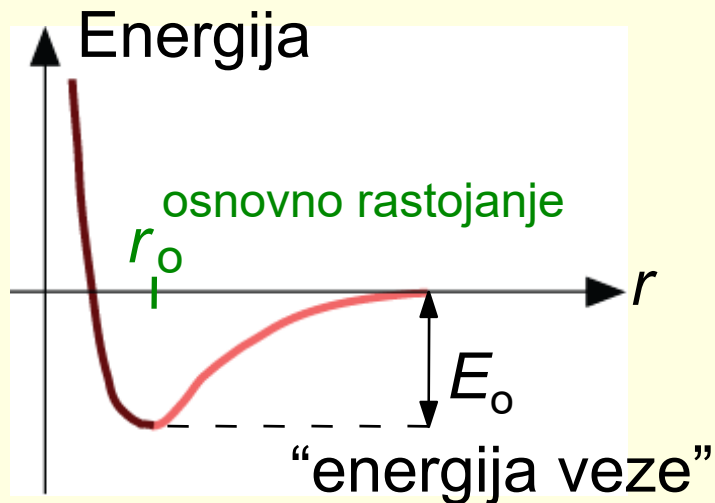
Šta zavisi od energije veze?

Npr. temperatura topljenja: T_t

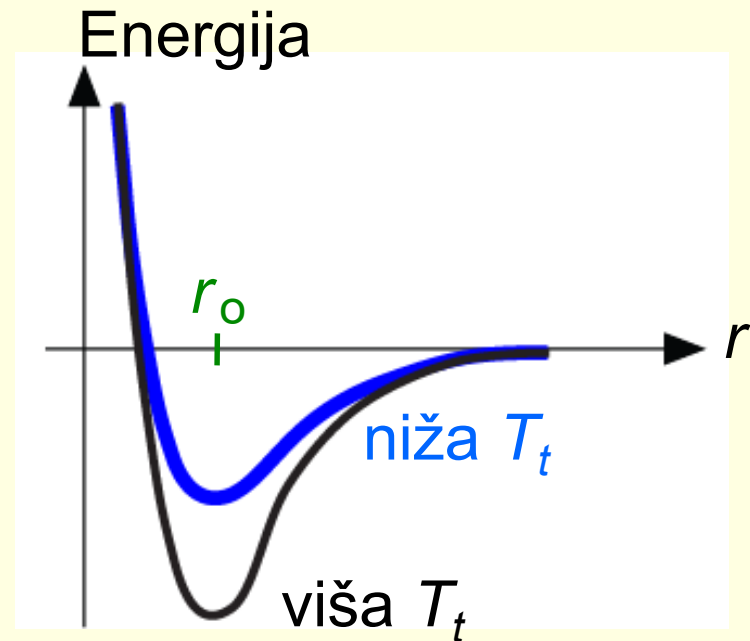
- rastojanje, r



- energija veze, E_o



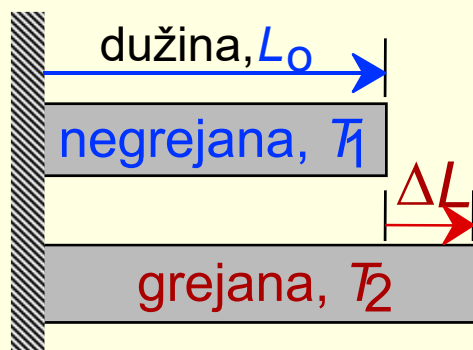
- temperatura topljenja, T_t



T_t je viša ako je energija veze viša tj. E_o ima višu vrednost.

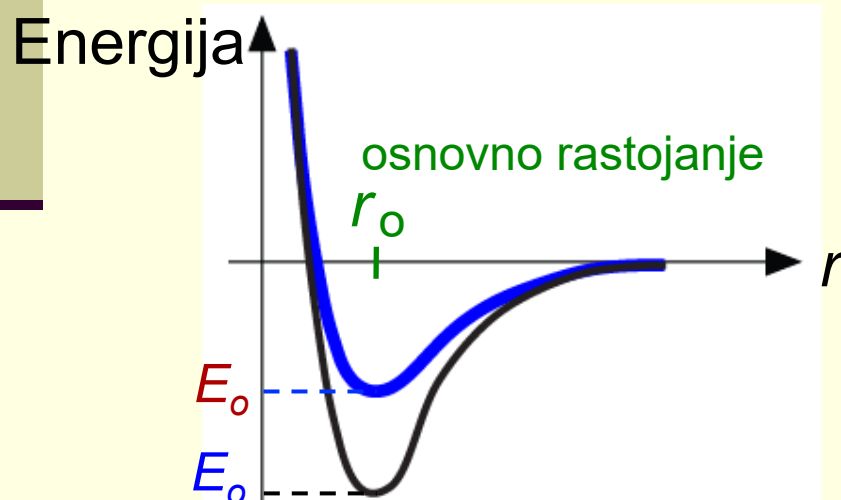
Šta još zavisi od energije veze? α

- **Koeficijent lin. širenja**, α



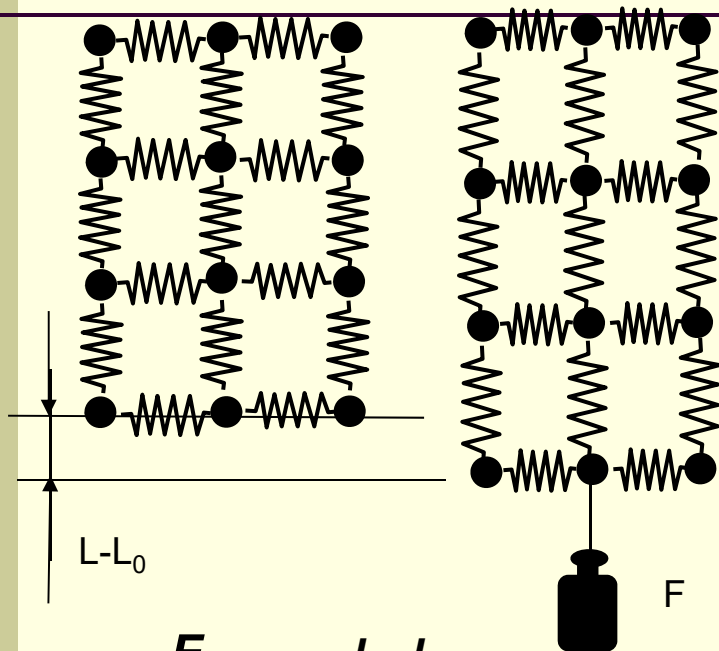
Koeficijent lin. širenja

$$\frac{\Delta L}{L_0} = \alpha (T_2 - T_1)$$



Sa zagrevanjem slabe veze.
 α je veće ako je energija
veze manja.

Šta još zavisi od energije veze? E

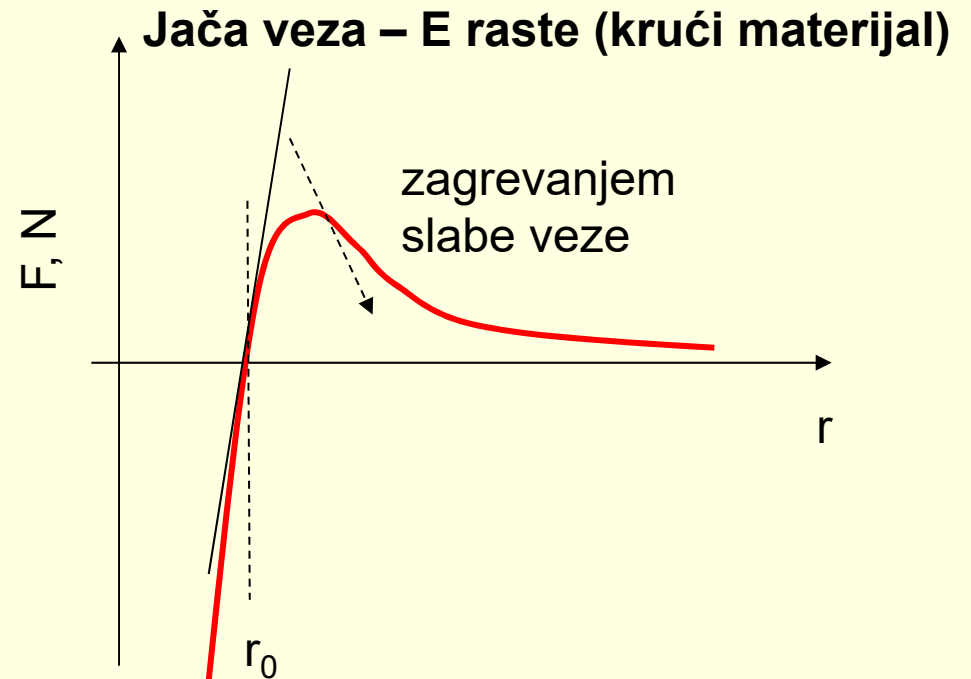


$$\sigma = \frac{F}{A} \quad \varepsilon = \frac{l - l_0}{l_0}$$

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

Hukov zakon

E – Jungov modul elastičnosti



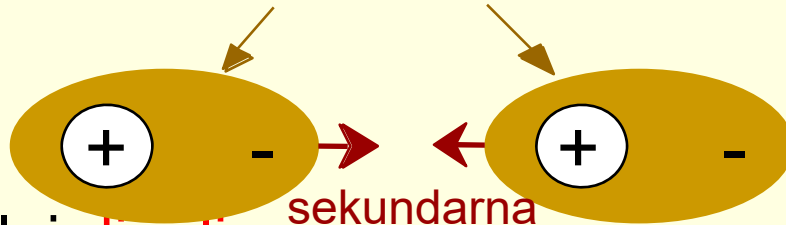
Sa porastom temperature
slabe veze i E opada

Sekundarne veze - VAN DER WAALS

Veze koje se uspostavljaju između **dipola – praktično kod svih molekula**

- promenljivi **dipoli**

asimetrično naelektrisanje

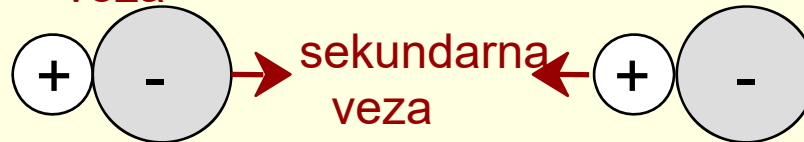


npr: tečni H₂
H₂ → ← H₂

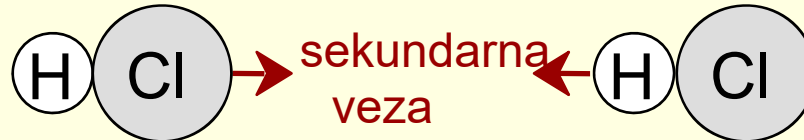


- stalni **dipoli**

-opšti slučaj:



-npr: tečni HCl



-npr: polimeri



sekundarna veza
Van der Waals

Najjače sekundarne veze su između H i F, O i N – **vodonična veza** ²⁹

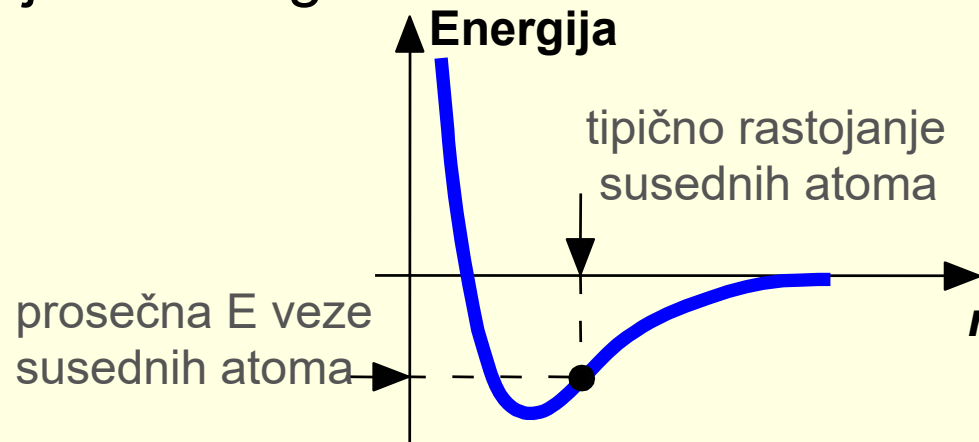
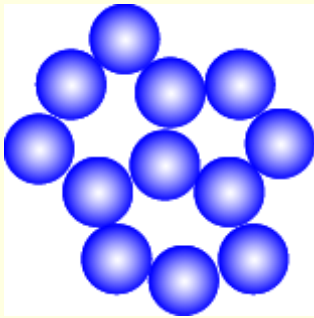
Rekapitulacija

Atomske veze - poređenje

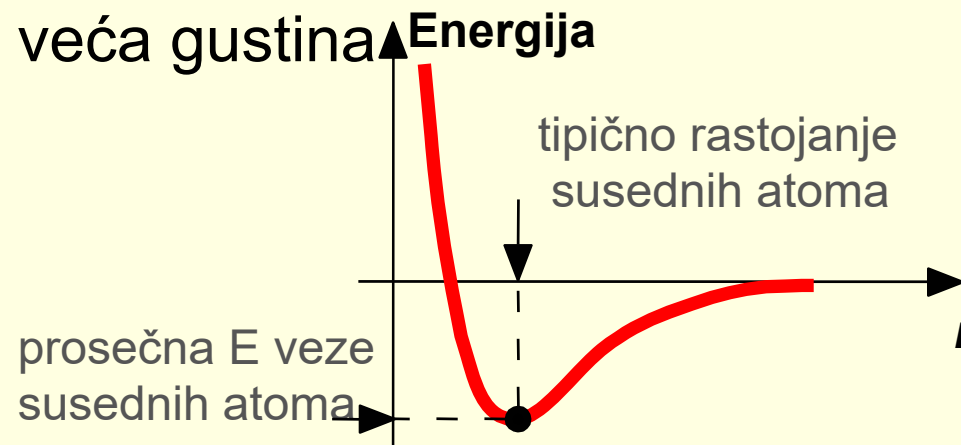
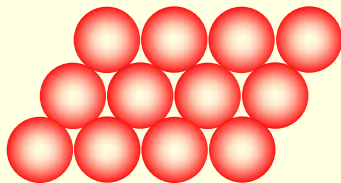
<u>Tip</u>	<u>Energija veze</u>	<u>Napomena</u>
Jonska	Velika!	Neusmerena (keramike)
Kovalentna	različita velika - dijamant mala - bizmut	usmerena (poluprovodnici , keramike lanci polimera)
Metalna	promenjiva velika - W mala- Hg	neusmerena (metali)
Sekundarna	mala	usmerena između lanaca (polimeri) između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

Raspored atoma

- **nasumično** pakovanje - mala gustina atoma



- **uređeno** pakovanje - veća gustina

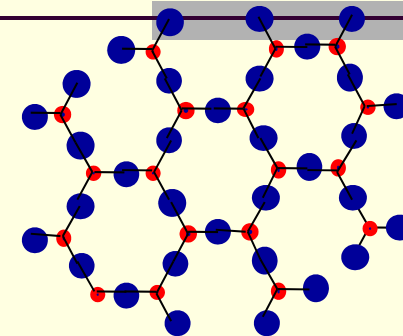


Uređene, gusto pakovane strukture imaju **jaču** vezu

Raspored atoma

Kristalni materijali...

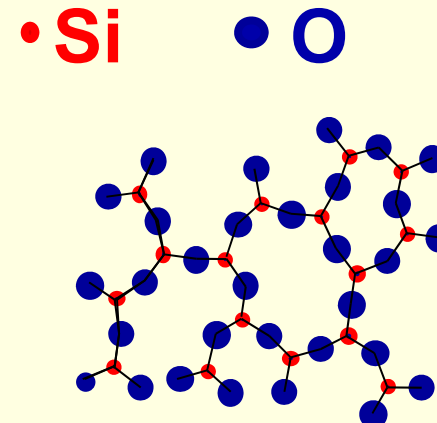
- periodično, prostorno pakovanje
- tipično za
 - metale
 - mnoge keramike
 - neke polimere



kristalni SiO₂

Nekristalni ili amorfni materijali...

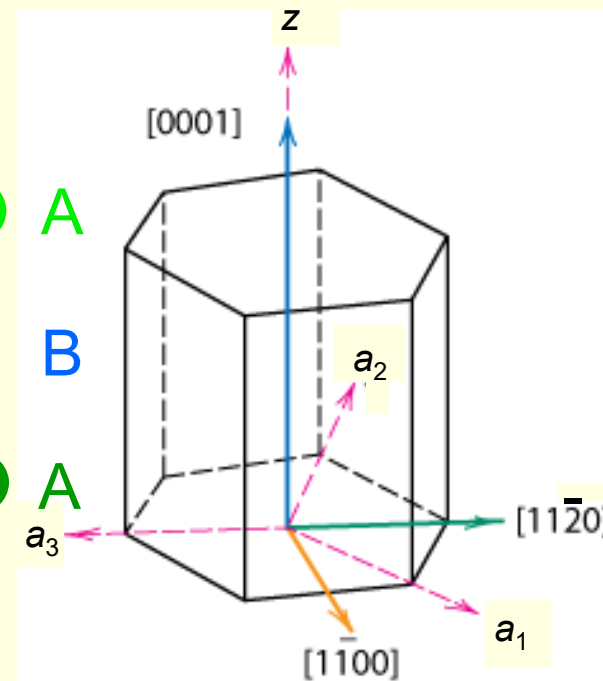
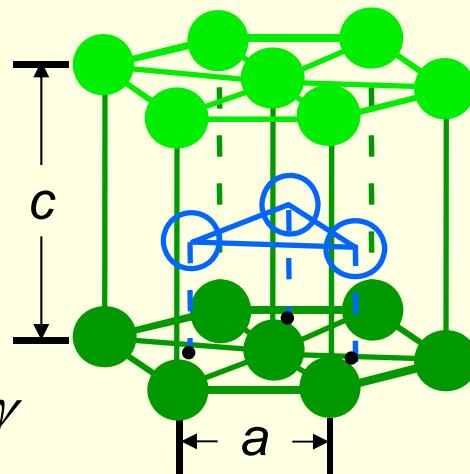
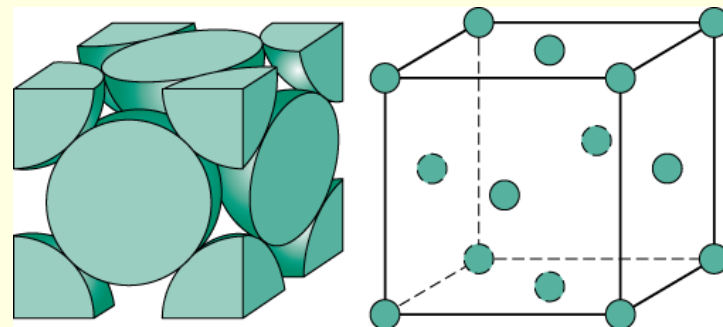
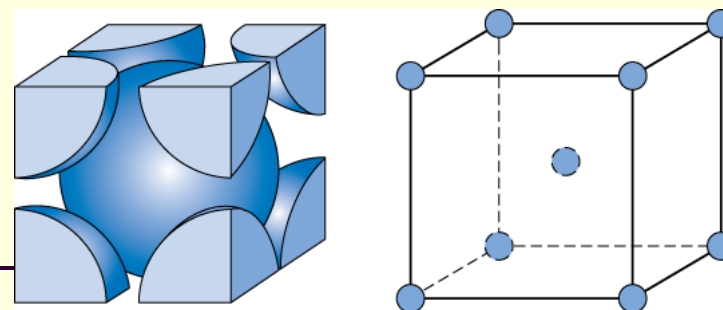
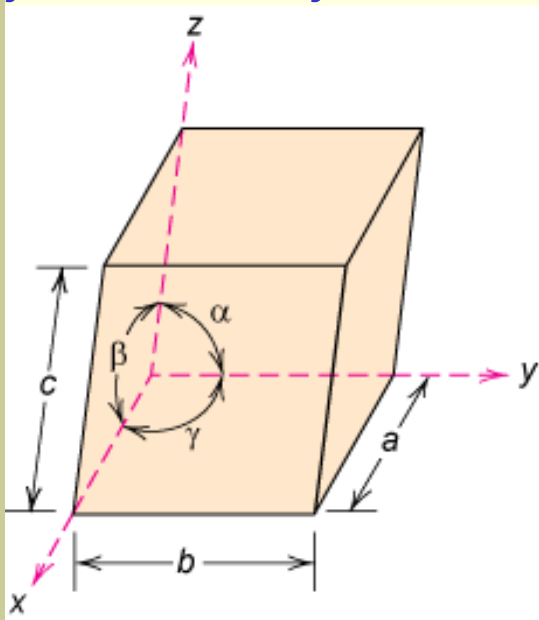
- atomi nisu uređeno složeni
- tipična za:
 - kompleksne strukture
 - naglo hlađenje



nekristalni SiO₂

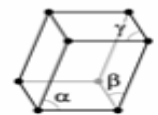
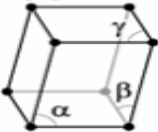
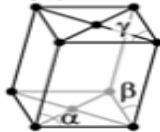
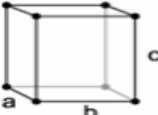
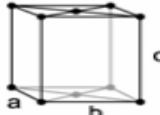
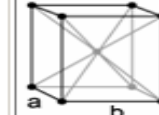
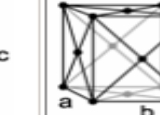




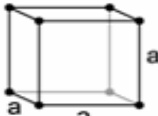
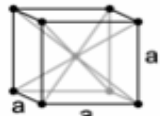
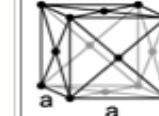
Kristalne rešetke

jedinična ćelija



Parametri rešetke:
stranice a , b , c i uglovi α , β i γ

14 Bravaisovih rešetki

<u>triclinic</u>	$\alpha, \beta, \gamma \neq 90^\circ$ 			
<u>monoclinic</u>	simple $\alpha \neq 90^\circ$ $\beta, \gamma = 90^\circ$ 	centered $\alpha \neq 90^\circ$ $\beta, \gamma = 90^\circ$ 		
<u>orthorhombic</u>	simple $a \neq b \neq c$ 	base-centered $a \neq b \neq c$ 	body-centered $a \neq b \neq c$ 	face-centered $a \neq b \neq c$ 
<u>tetragonal</u>	simple $a \neq c$ 	body-centered $a \neq c$ 		
<u>rhombohedral</u>	$\alpha, \beta, \gamma \neq 90^\circ$ 			
<u>hexagonal</u>	$a \neq c$ 			
<u>cubic</u>	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

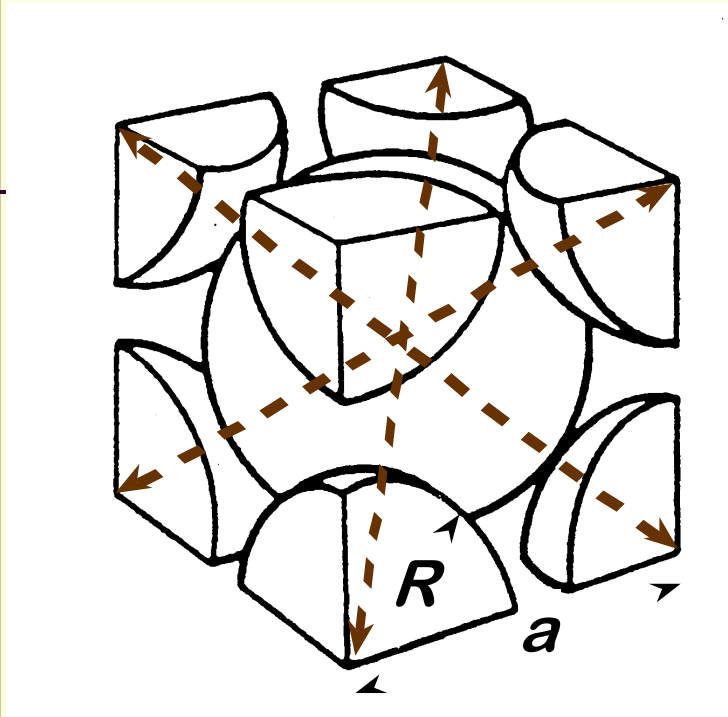
A = atomska masa (g/mol)

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)

$A = 52.00 \text{ g/mol}$

$R = 0.125 \text{ nm}$

$n = 2$

$a = 4R\sqrt{3} = 0.2887 \text{ nm}$
($\times 10^{-7} \text{ cm}$)

$\frac{\text{atoma}}{\text{jed. ćeliji}} \rightarrow 2 \quad 52.00$

$\frac{\text{g}}{\text{mol}}$

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

$\rho = \frac{2 \cdot 52.00}{0.2887^3 \cdot 6.023 \times 10^{23}}$

$\frac{\text{zapremina}}{\text{jed. ćelija}}$

$\frac{\text{atoma}}{\text{mol}}$

Poređenje osnovnih grupa materijala po gustini

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

Zašto?

Metali imaju...

- gusto pakovanje (metalna veza)
- često veliku atomsku masu

Keramike...

- manju gustinu pakovanja
- grade ih lakši elementi

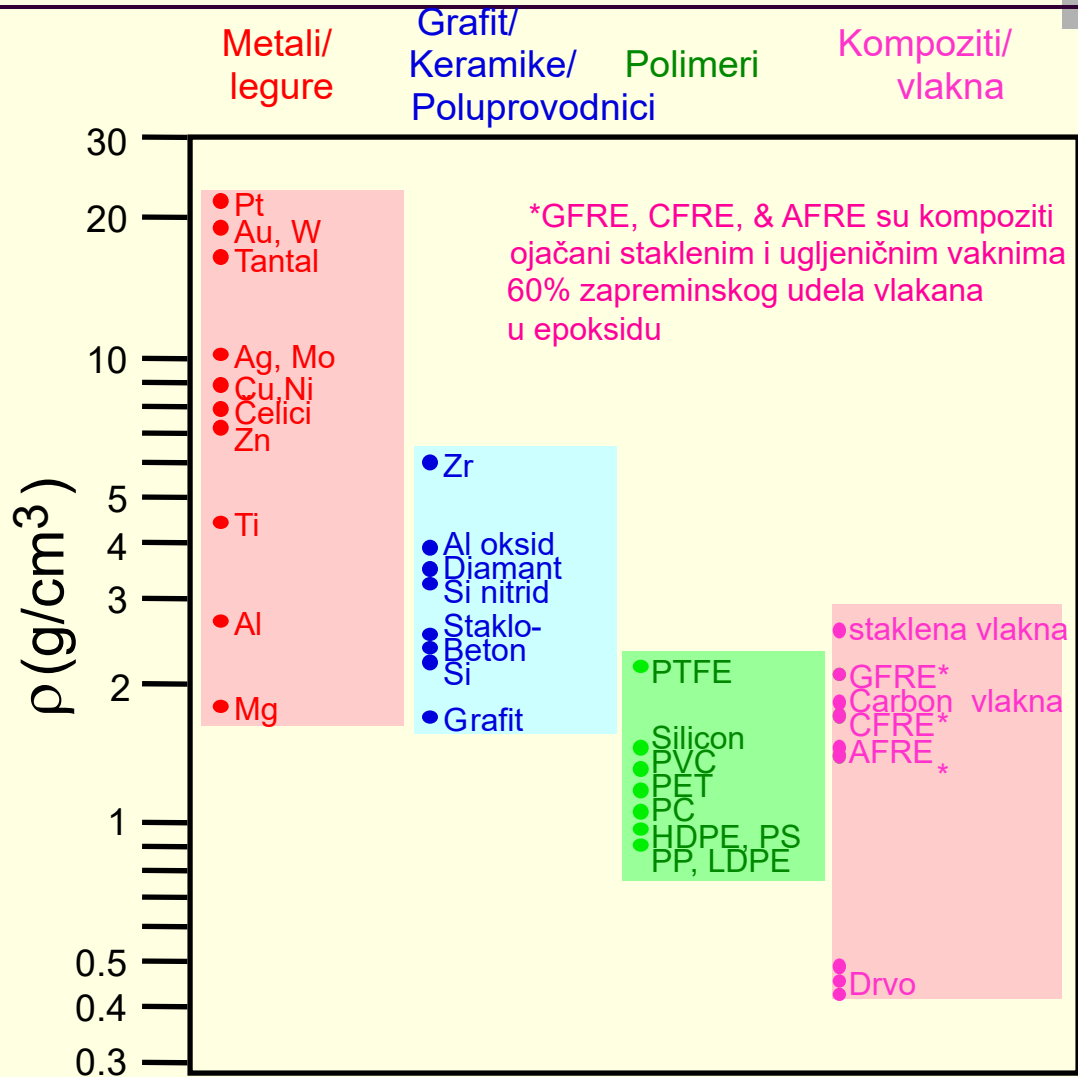
Polimeri...

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

Kompoziti nisu navedeni u poređenju jer...

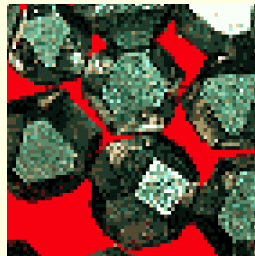
- zavise od čega su sastavljeni – negde su između₃₇

Poređenje osnovnih grupa materijala po gustini



Kristalna struktura i monokristali

- Za neke inženjerske primene neophodni su monokristali:
 - dijamantski monokristali
za skidanje površine abrazijom



- Osobine kristalnih materijala zavise od njegove kristalne strukture.

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

-lopatice
gasnih
turbina



Polikristali

- *Većina inženjerskih materijal ima strukturu polikristala.*



- 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).

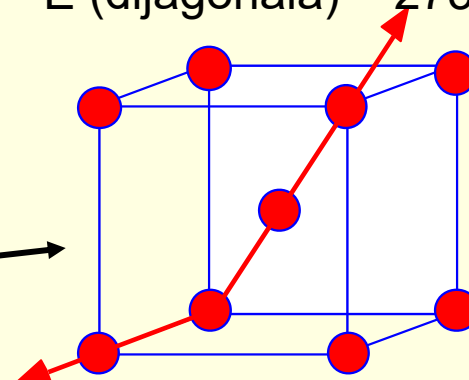
Poređenje monokristala i polikristala

- Monokristal

- Osobine zavise od pravca
anizotropan.

- Npr: modul elastičnosti kod KZC rešetke Fe

E (dijagonala) = 273 GPa

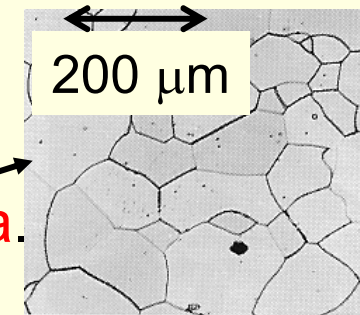


E (ivica) = 125 GPa

- Polikristali

- Mogu da budu **kvaziizotropni** ili **anizotropni**

- Npr.: pologonalna struktura je: **kvaziizotropna.**

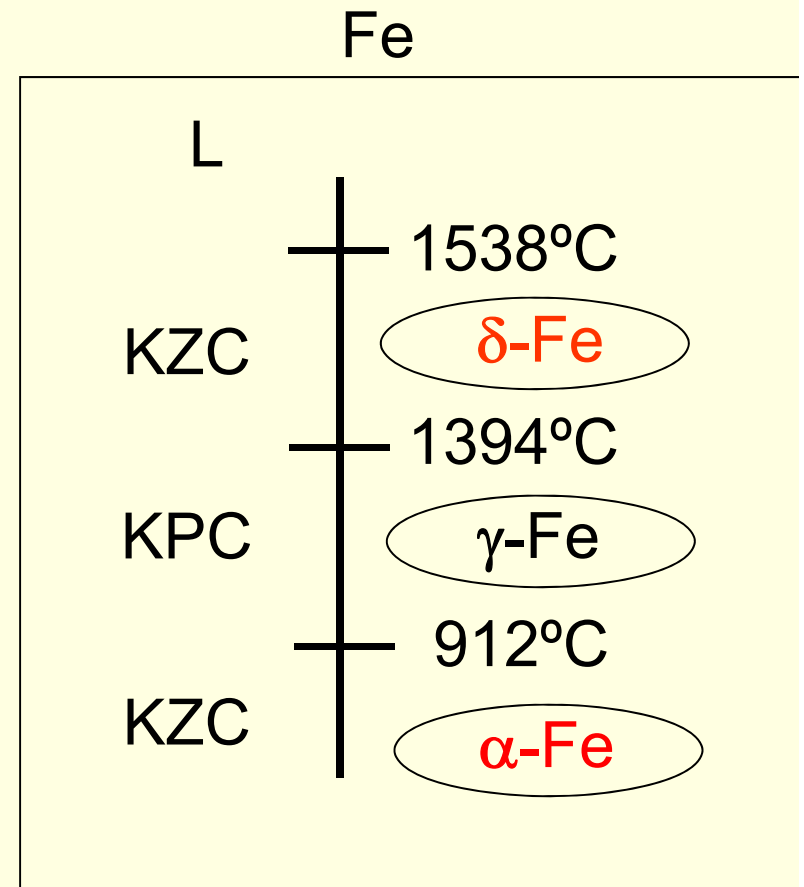


- ($E_{\text{poli Fe}} = 210$ GPa): hladno deformisana struktura (tekstura) je **anizotropna.**



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 **nemetali** 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 , ($r_k/r_a < 1$)⁴⁴

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.

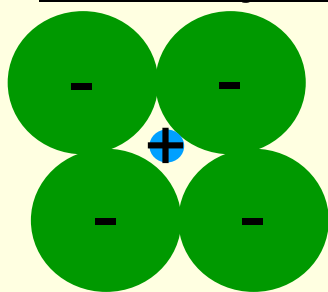
Kristalna struktura keramika

Struktura oksida kao primer (M+O)

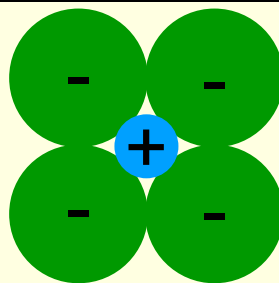
- veza je jonsko-kovalentna
- katjoni (+joni) metala su mного manji od anjona (-joni) kiseonika
- kristalne rešetke koje sadrže kiseonik uobičajeno imaju gusto pakovanje (KPC)
- katjoni metala se smeštaju u “šupljinama” kristalne rešetke anjona kiseonika

Jonska veza kod keramika

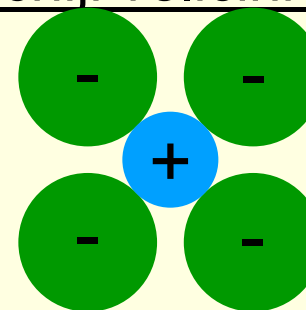
- **Stabilnost strukture određuje veličina jona:**
 - metalni jon po veličini treba da bude što sličniji veličini šupljine



nestabilna veza



stabilna veza

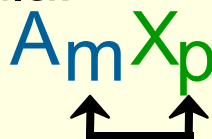


stabilna veza

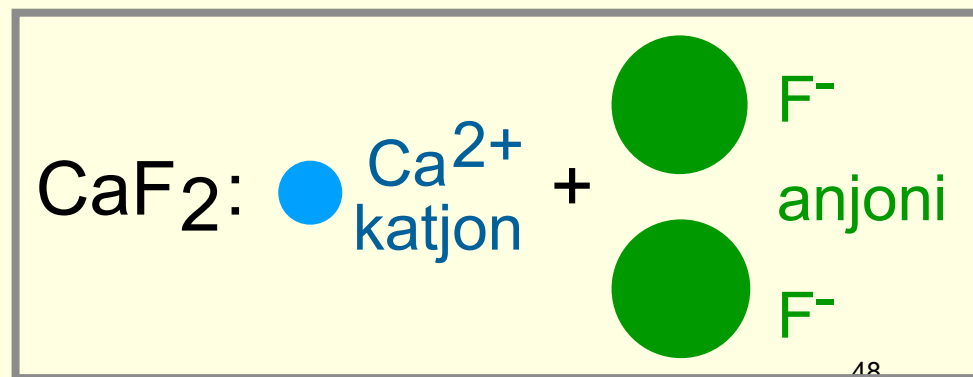
- Ukupno **naelektrisanje je neutralno:**

-ukupno naelektrisanje treba da bude **0**.

-Uopštena formula:



m, p – su određeni neutralnošću naelektrisanja



Kovalentna veza kod keramika

Veze su jonsko kovalentne – hibridne

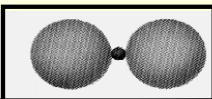
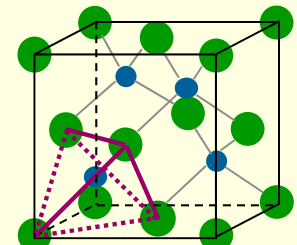
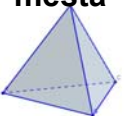
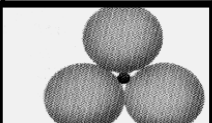

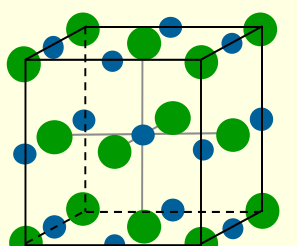
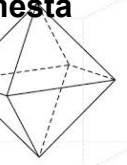
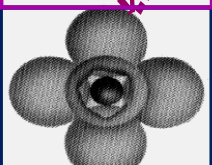
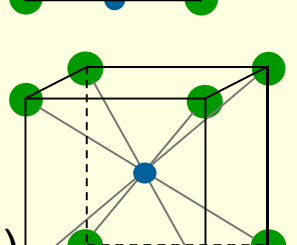
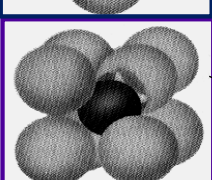
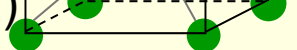
- **Primer: SiC (ima preko 250 oblika građe)**
 - elektronegativnost **Si**, $X_{\text{Si}} = 1.8$
 - elektronegativnost **C**, $X_{\text{C}} = 2.5$

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

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

Koordinacioni broj - definiše građu

Koordinacioni broj zavisi od odnosa $\frac{r_k}{r_a}$ i definiše: **broj anjona oko katjona** i prazna mesta **gde se smeštaju katjoni**

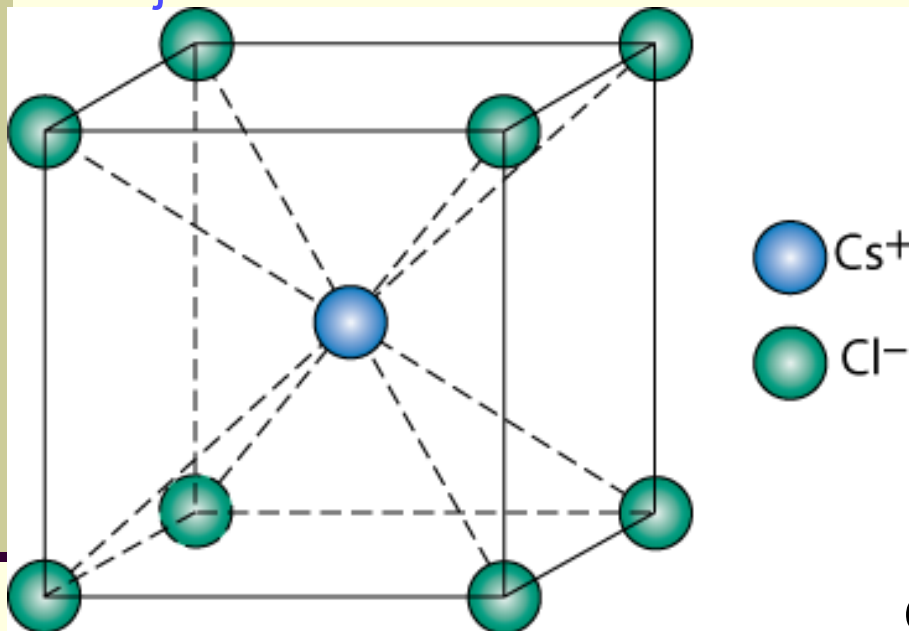
$\frac{r_k}{r_a}$	koordinacioni broj	vrsta praznih mesta gde se smeštaju katjoni			
< 0.155	2	linearna			izgled praznog mesta 
0.155 - 0.225	3	trigonalna			ZnS (cink sulfid) Sfalerit ruda Zn
0.225 - 0.414	4	tetraedarska			izgled praznog mesta 
0.414 - 0.732	6	oktaedarska			NaCl
0.732 - 1.0	8	kubna			CsCl (cezijum hlorid) prazno mesto ⁵⁰ 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:

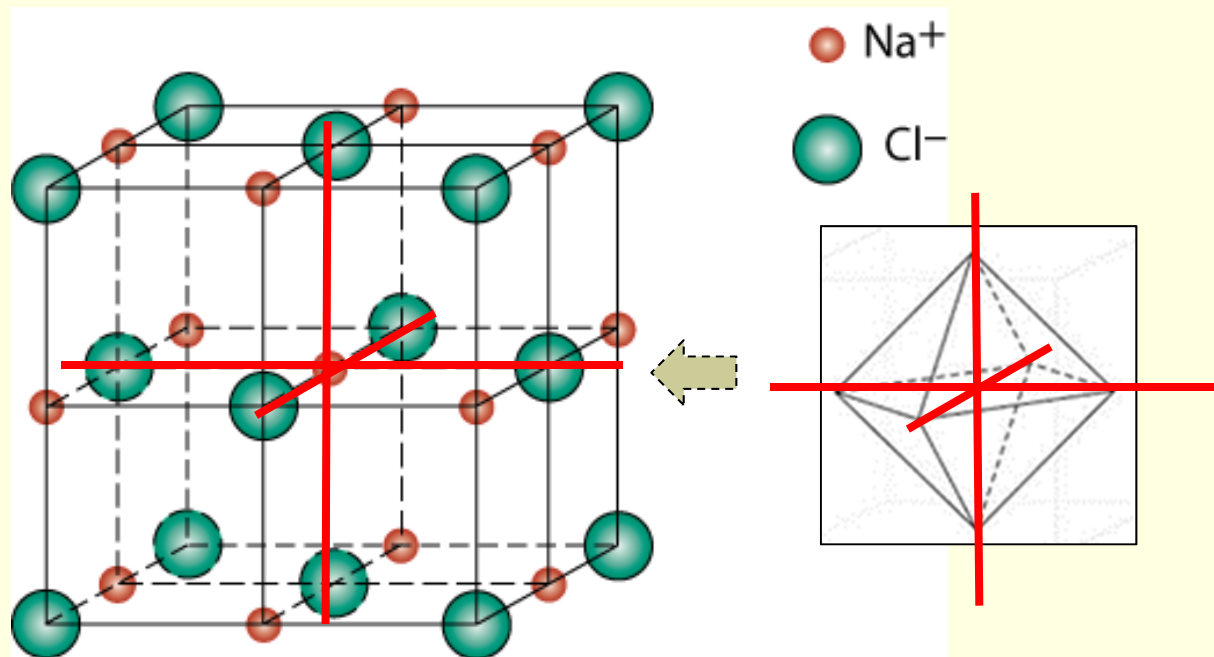


$$\frac{r_{\text{Cs}^+}}{r_{\text{Cl}^-}} = \frac{0.170}{0.181} = 0.939$$

∴ katjon Cs⁺ smešta se u centru **proste kubne rešetke**
(nije KZC!)

svaki jon Cs⁺ ima 8 susednih jona Cl⁻

Primer: NaCl - struktura



$$r_{\text{Na}} = 0.102 \text{ nm}$$

$$r_{\text{Cl}} = 0.181 \text{ nm}$$

$$r_{\text{Na}}/r_{\text{Cl}} = 0.564$$

katjoni Na⁺ se
smeštaju u
oktaedarska
mesta KPC
rešetke

svaki jon Cl⁻¹ ima 6 susednih jona Na⁺¹

Primer: FeO struktura

katjon radijus jona (nm)

Al³⁺ 0.053

Fe²⁺ 0.077

Fe³⁺ 0.069

Ca²⁺ 0.100

Anjon

O²⁻ 0.140

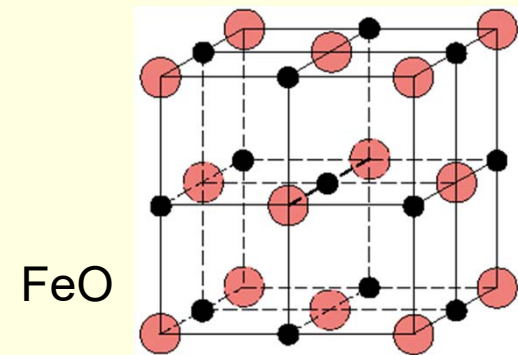
Cl⁻ 0.181

F⁻ 0.133

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

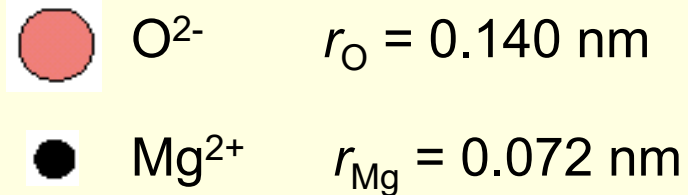
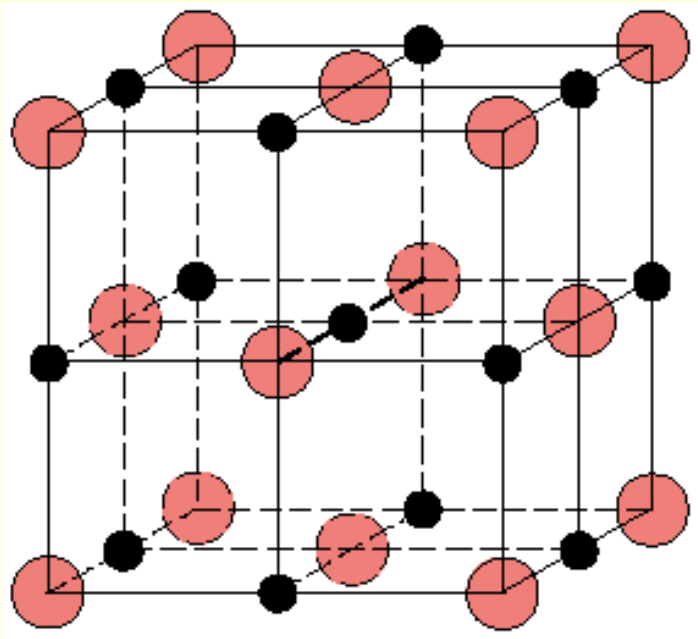
koordinacioni broj
= 6

odgovara strukturi = NaCl



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

Primer: MgO struktura



$$r_{\text{Mg}}/r_{\text{O}} = 0.514$$

katjoni se smeštaju u oktaedarska mesta

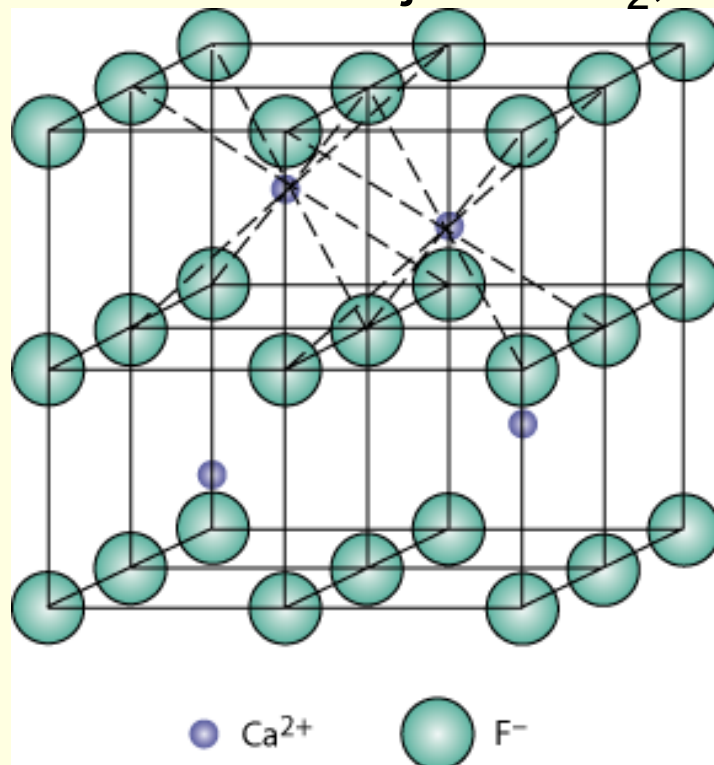
svaki jon O²⁻ ima 6 susednih jona Mg²⁺

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

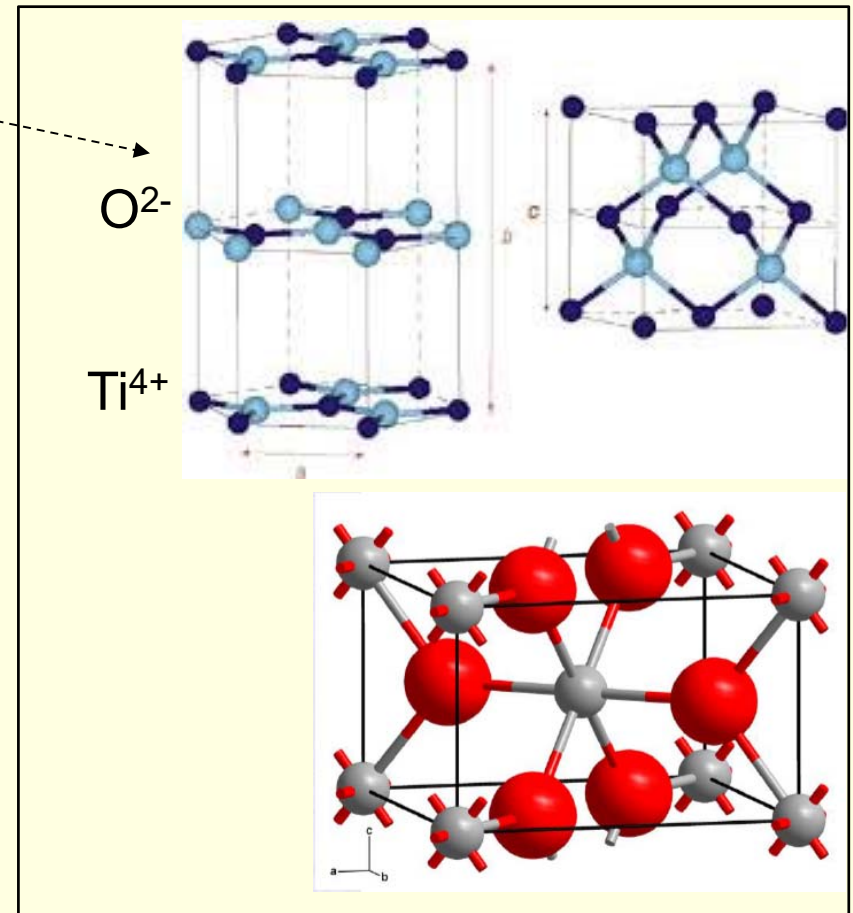
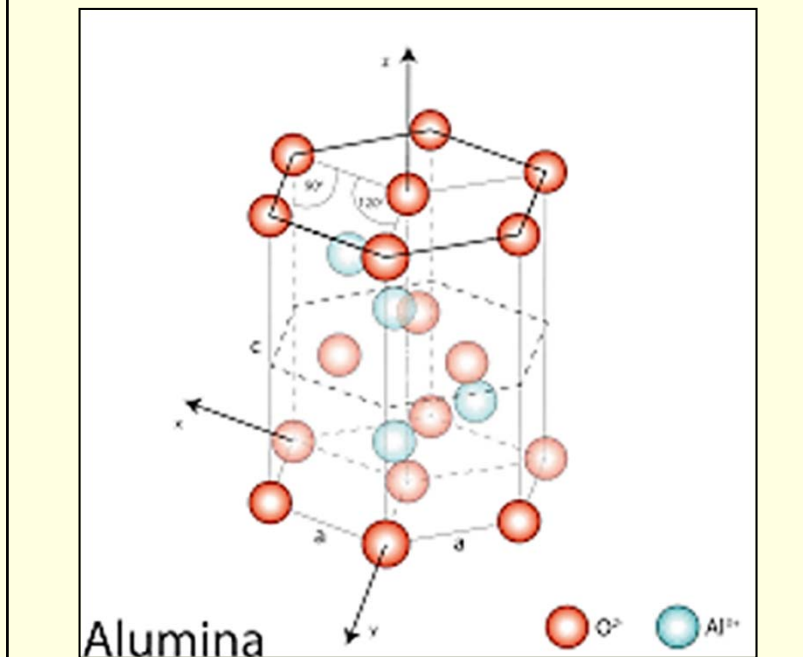


CaF_2

Primer: rutil TiO_2

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

i oksid Al_2O_3 ima HGP rešetku

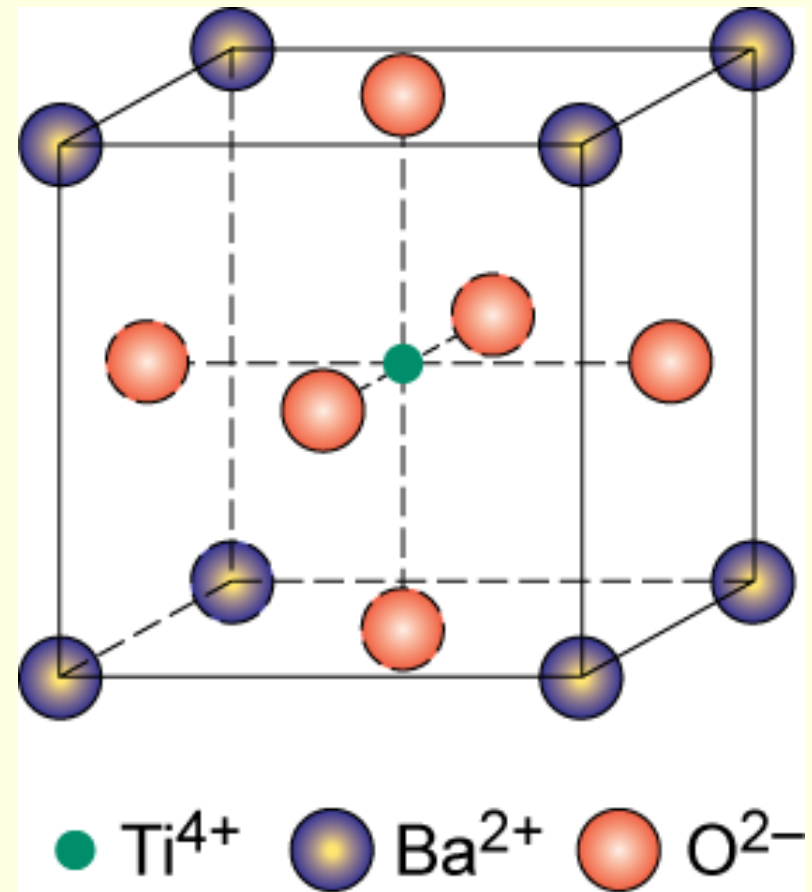


katjoni se smeštaju u oktaedarska mesta

ABX₃ kristalna struktura keramika

Primer:
kompleksni oksid BaTiO₃
(perovskit)

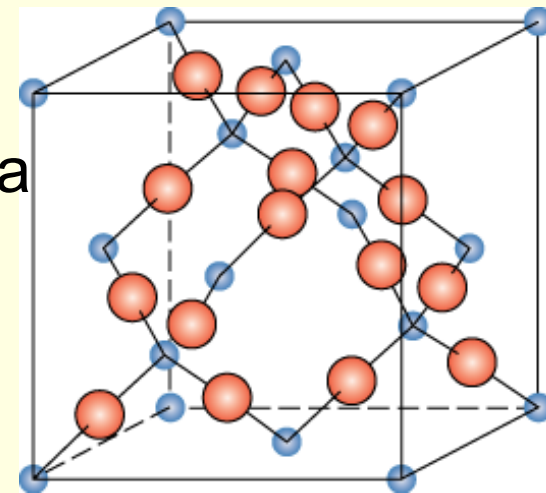
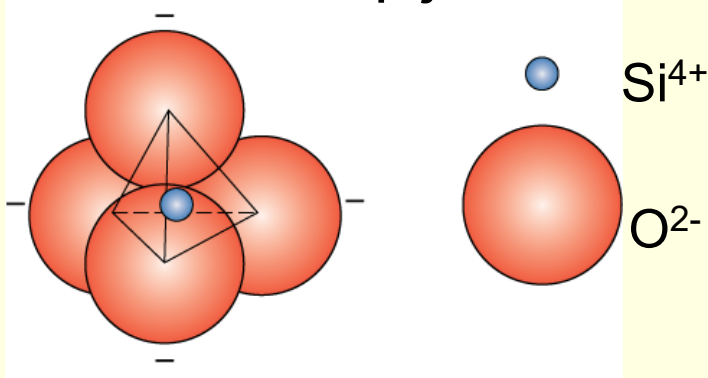
- koristi se za fuel cells
- piezoelektrična keramika
(polarizuje se kada se deluje silom na nju)
- kubna rešetka



Silikatne keramike

Najčešći elementi na našoj planeti su Si & O

Atom silicijuma se smešta u tetraedarsku šupljinu rešetke kiseonika

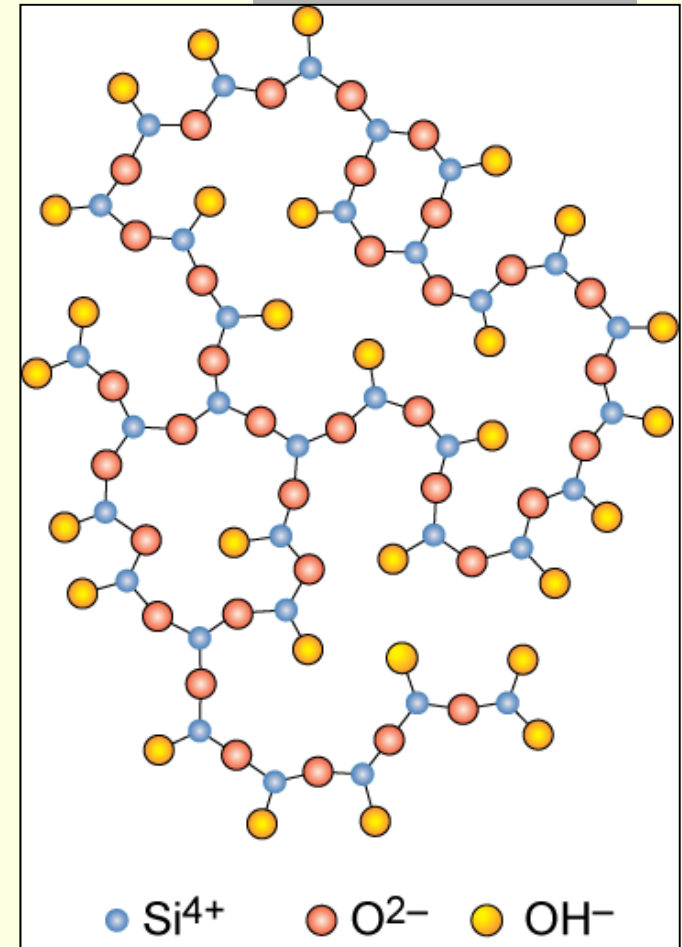


kristobalit

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

Amorfna struktura SiO_2

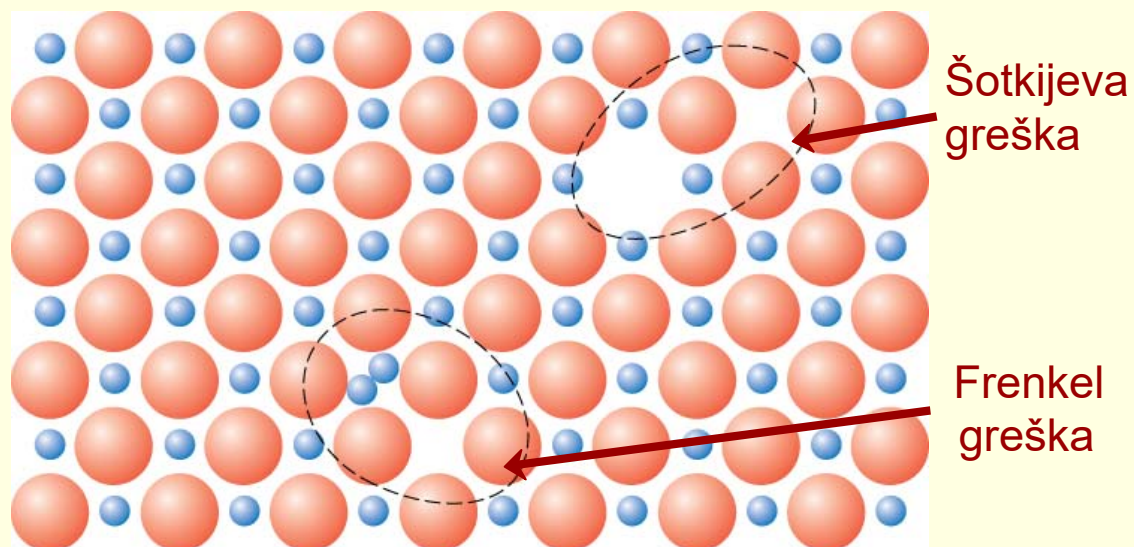
- **Primer: Amorfni SiO_2 - silika gelovi**
 - Si^{4+} i O^{2-} formiraju neuređene rešetke
 - naelektrisanje je uravnoteženo sa H^+ (koji formira OH^-) na krajevima lanaca
 - ovaj oblik SiO_2 je vrlo stabilan i nereaktivan
- **Primer: staklo je takođe oblik amornog SiO_2 , samo ima veliku gustinu**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

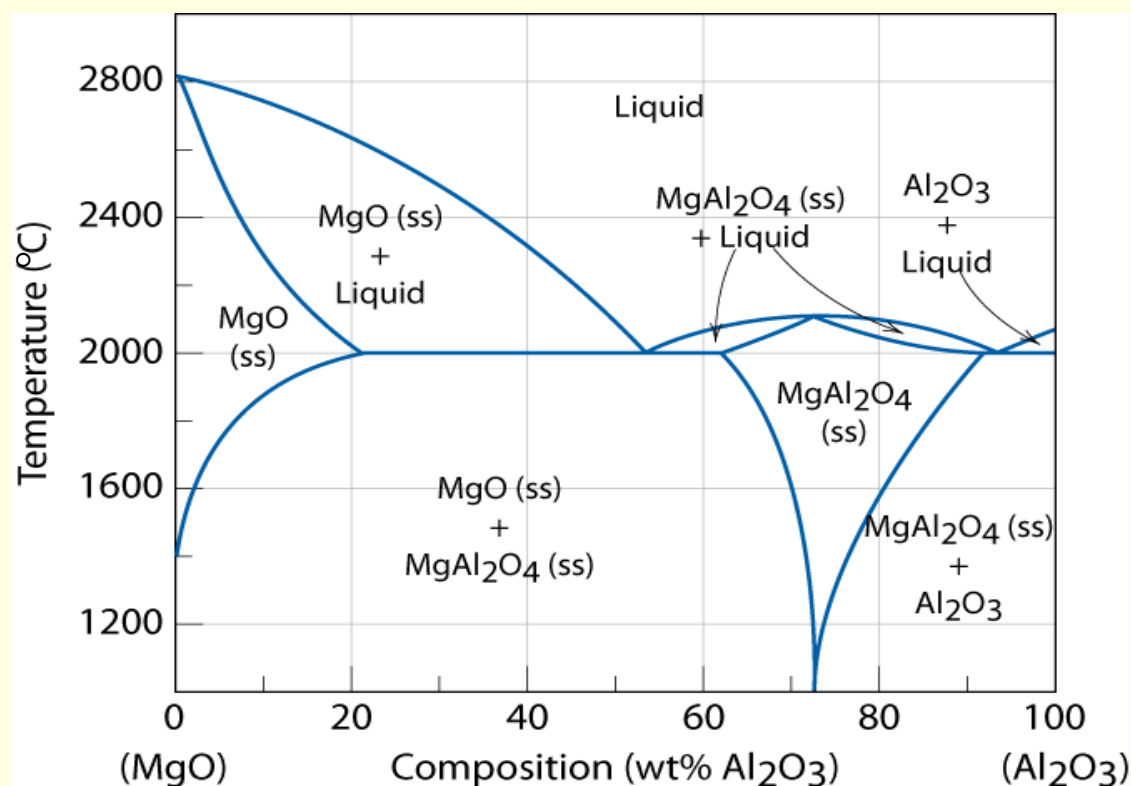


- postiže se ravnotežna koncentracija grešaka (f-ja T) $\sim e^{-Q_D / kT}$
- **nečistoće se smeštaju tako da se zadrži neutralno naelektrisanje**
- **nema dislokacija**

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-Al₂O₃ :

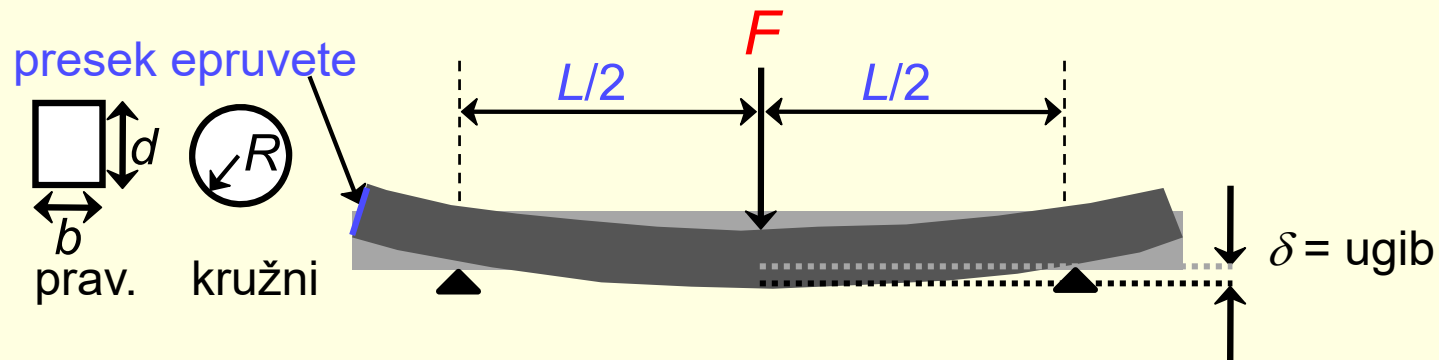


Mehaničke osobine keramika

- 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

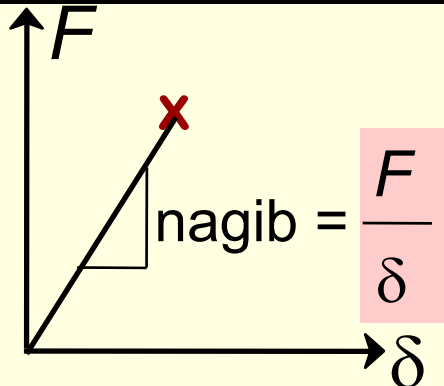
- najčešće se koristi **ispitivanje savijanjem u 3 tačke**



Ispitivanjem se dobija **kriva zavisnosti sile i ugiba** (umesto $F-\Delta L$).

Zavisnost je **linearna** – ponašanje keramika je **linearno-elastično do loma**

- **Modul elastičnosti** se određuje:

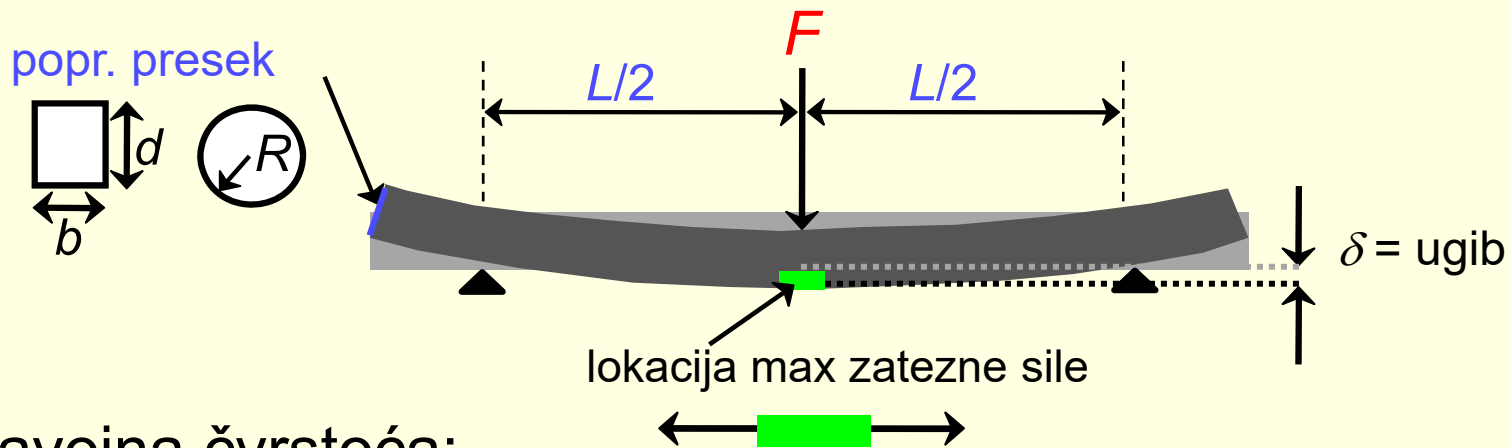


$$E = \frac{F}{\delta} \frac{L^3}{4bd^3} = \frac{F}{\delta} \frac{L^3}{12\pi R^4}$$

pravoug. presek epruvete	kružni presek epruvete
--------------------------------	------------------------------

Određivanje savojne čvrstoće

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



- savojna čvrstoća:

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

pravoug. presek

kružni presek

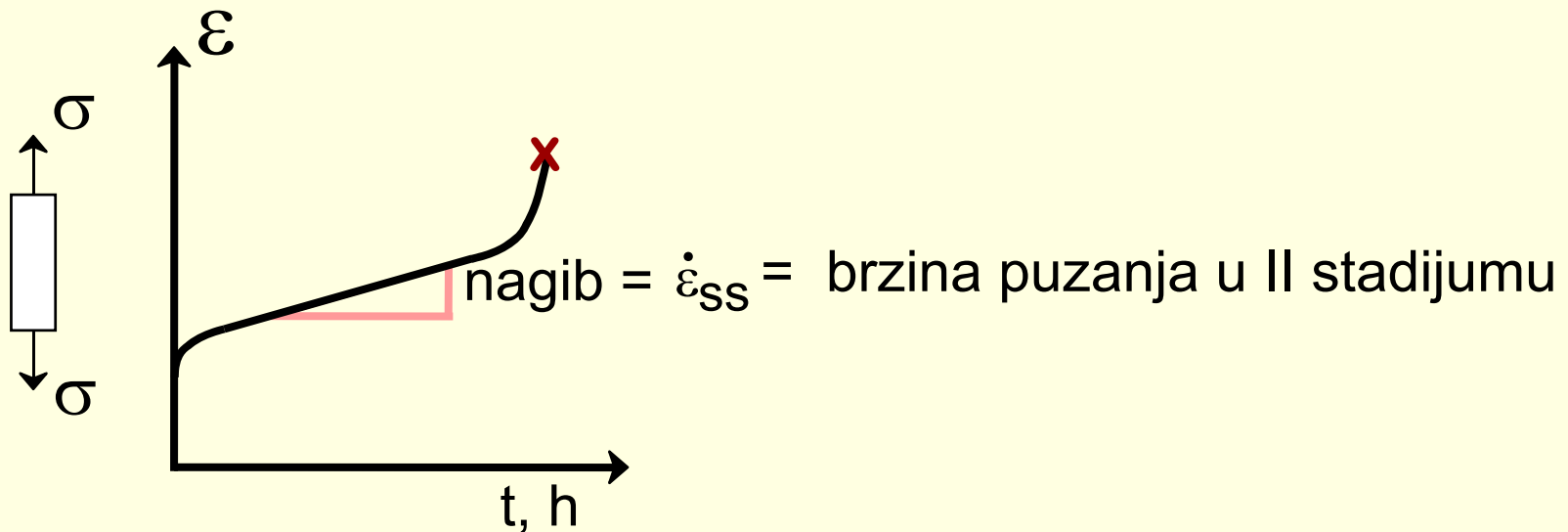
F , F_f , δ , δ_{fs}

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 $T > 0.4 T_t$.



Polimeri

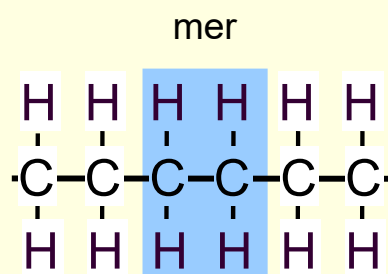
Polimeri

Šta su polimeri?

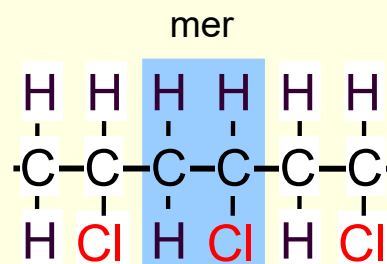
Poli **mer**

mного

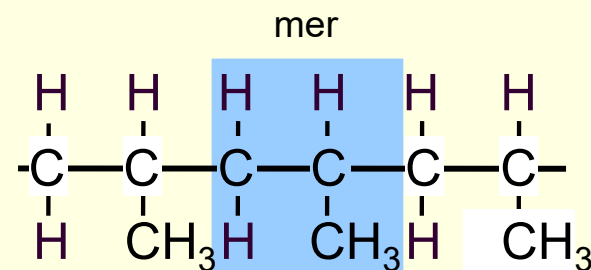
ćelija koja se ponavlja



Polietilen (PE)



Polivinil hlorid (PVC)



Polipropilen (PP)

Istorija polimera

■ Prirodni polimeri

- drvo – guma
- pamuk – vuna
- koža – svila

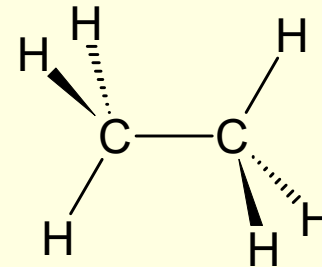
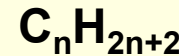
■ Najstariji podaci o primeni su npr.

- gumene lopte Inka
- katran

Sastav polimera

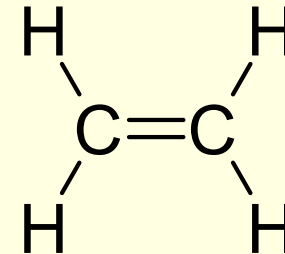
Najveći broj polimera grade H i C

- **Zasićeni** ugljovodonici nemaju slobodne veze za polimerizaciju

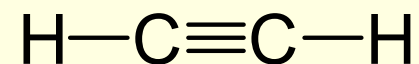


- **Nezasićeni ugljovodonici** – C atomi vezani sa dvogubom ili trogubom vezom koje mogu da se raskinu tako da su reaktivni i mogu da grade nove veze

- **Dvoguba veza** – npr. etilen - C_nH_{2n}



- **Troguba veza** – acetilen - C_nH_{2n-2}



Sastav, molekularna struktura i tačka ključanja pojedinih ugljovodonika

Naziv	sastav	molekularna struktura	tačka ključanja, °C
metan	CH ₄	$ \begin{array}{c} \text{H} \\ \\ \text{H}-\text{C}-\text{H} \\ \\ \text{H} \end{array} $	-164
etan	C ₂ H ₆	$ \begin{array}{c} \text{H} \quad \text{H} \\ \quad \\ \text{H}-\text{C}-\text{C}-\text{H} \\ \quad \\ \text{H} \quad \text{H} \end{array} $	-88.6
propan	C ₃ H ₈	$ \begin{array}{c} \text{H} \quad \text{H} \quad \text{H} \\ \quad \quad \\ \text{H}-\text{C}-\text{C}-\text{C}-\text{H} \\ \quad \quad \\ \text{H} \quad \text{H} \quad \text{H} \end{array} $	-42.1
butan	C ₄ H ₁₀		-0.5
pentan	C ₅ H ₁₂		36.1
heksan	C ₆ H ₁₄		69.0

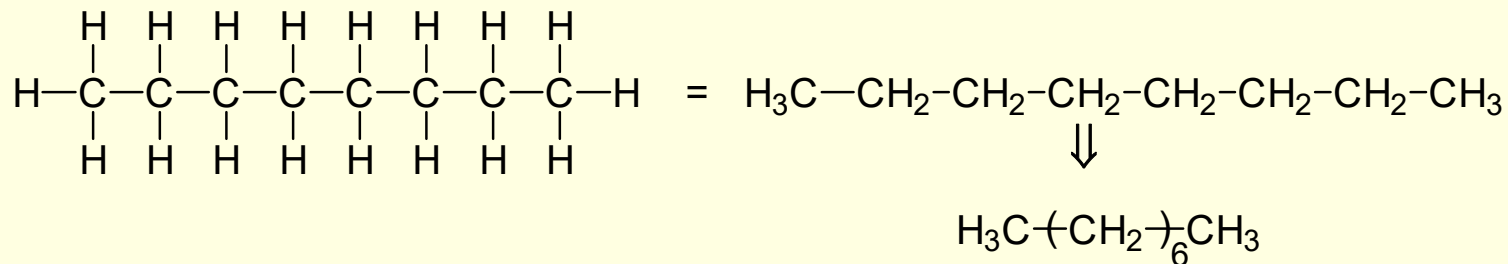
Izomeri

■ Izomeri

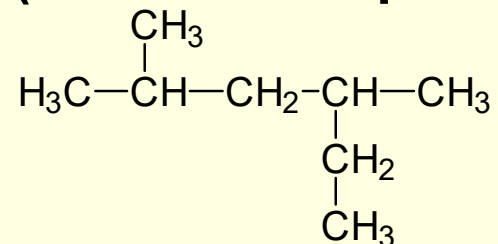
- Izomeri su jedinjenja sa istim hemijskim sastavom (hemijska formula ista) koja imaju različitu strukturu

Primer: C_8H_{18}

■ n-oktan

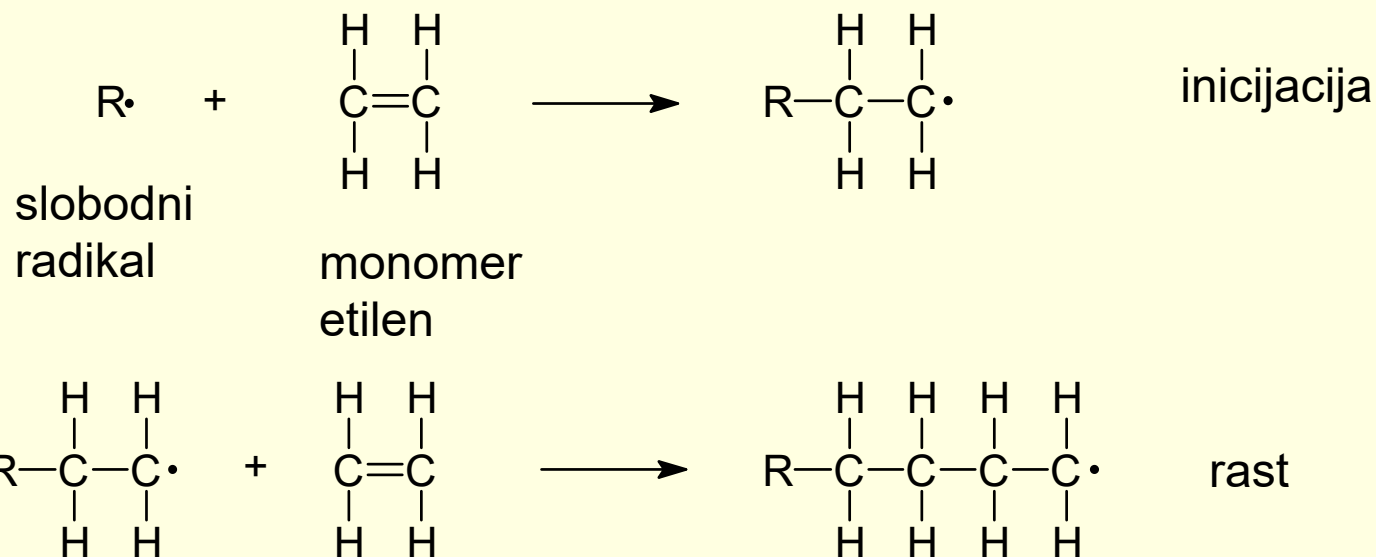


■ Izooktan (2-metil-4-etil pentan)



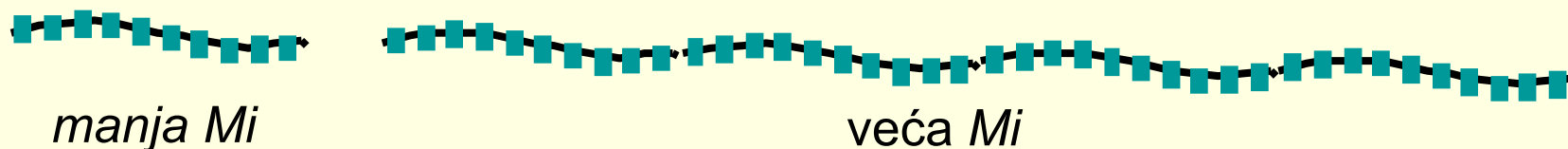
Polimerizacija

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



Veličine koje opisuju polimere

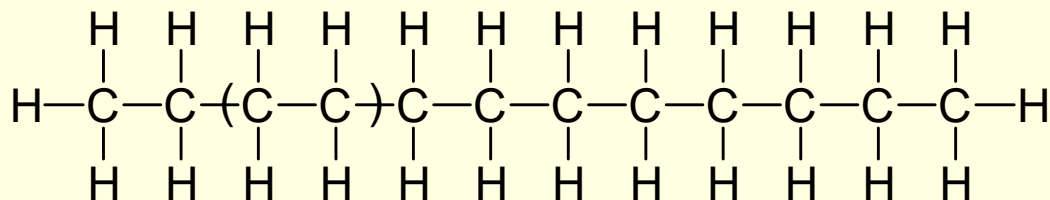
1.) Molarna masa M_i : masa mola lanca



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

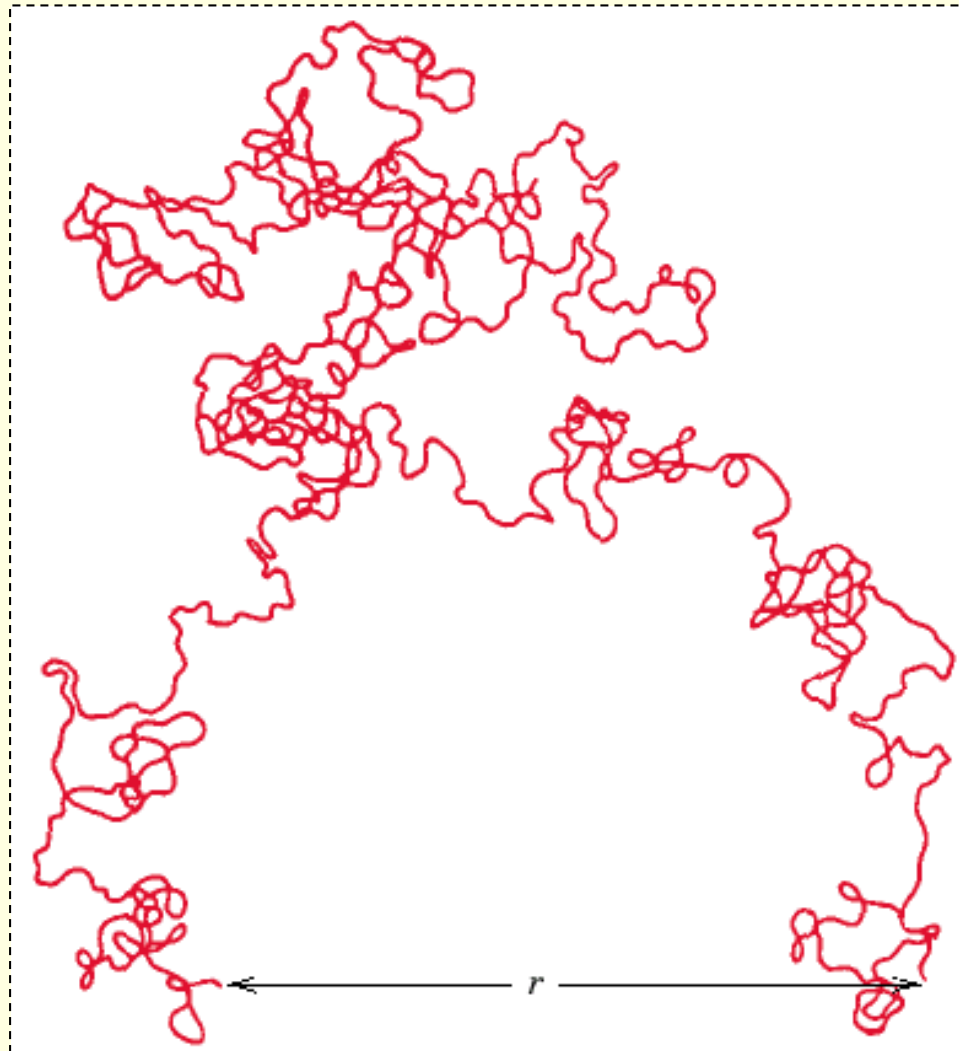
prosečna M_i

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



$$n_i = 6$$

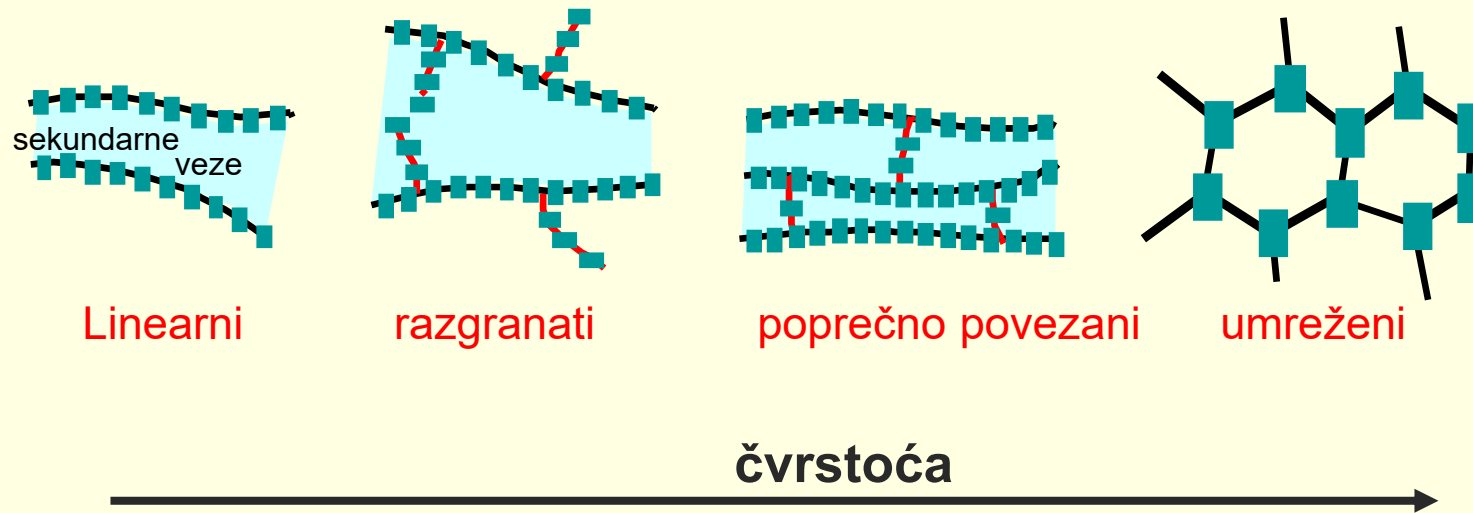
Rastojanje između krajeva lanca, r



određuje
elastomerna
svojstva

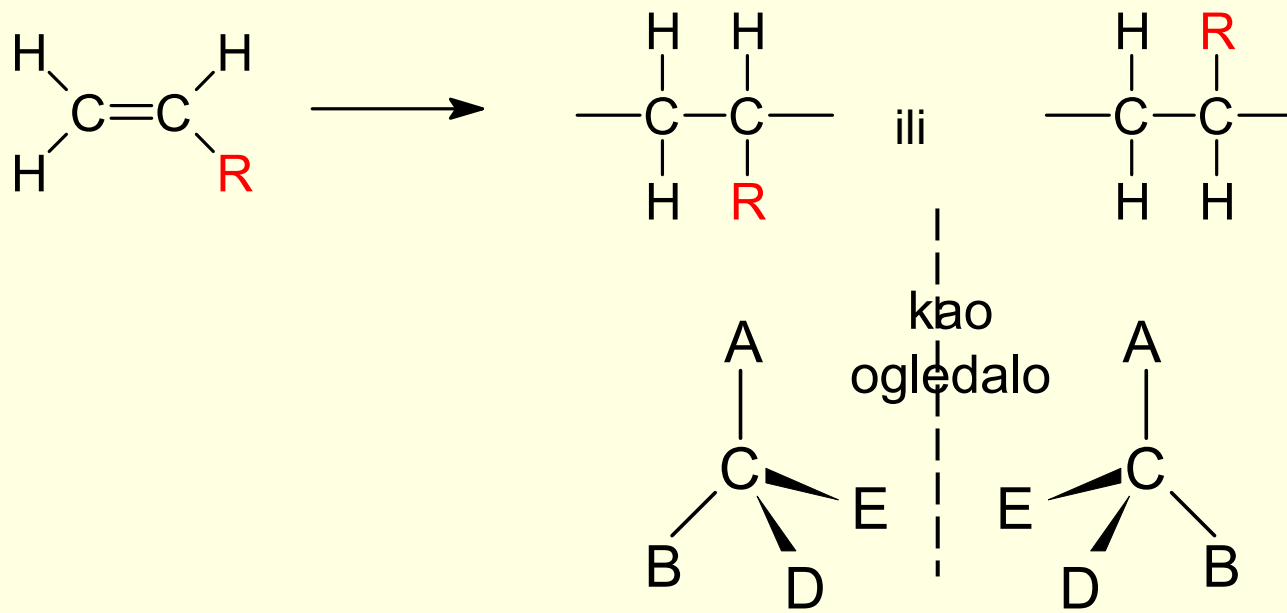
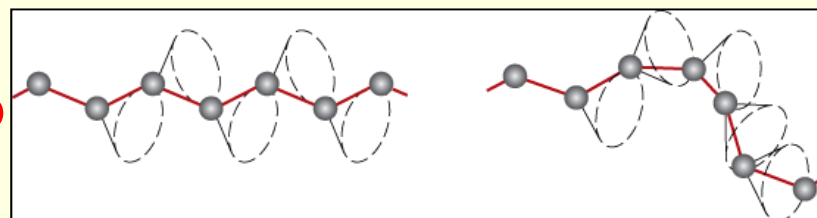
Struktura molekula

- Lanci svojim oblikom utiču na **čvrstoću**:



Oblik molekula

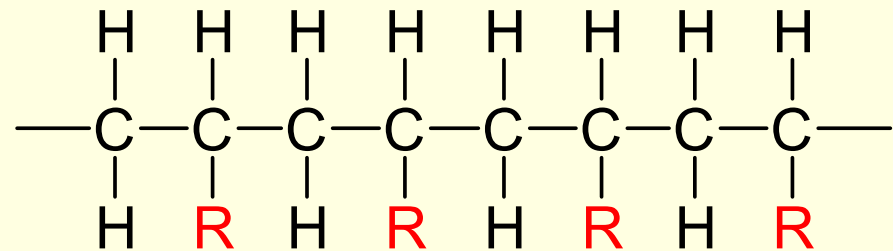
- orijentacija molekula može da se promeni rotacijom bez raskidanja veza
- rotacija obezbeđuje elastično ponašanje polimera



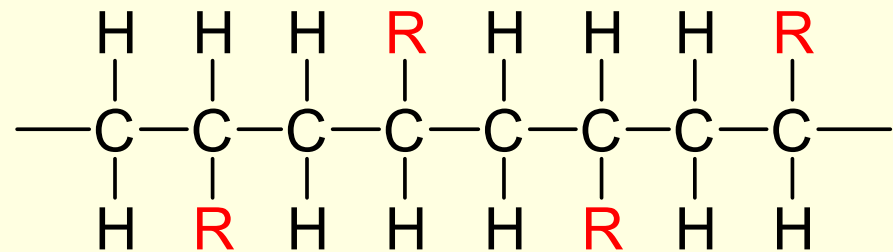
- za druge promene – veze se raskidaju

Ponovljivost

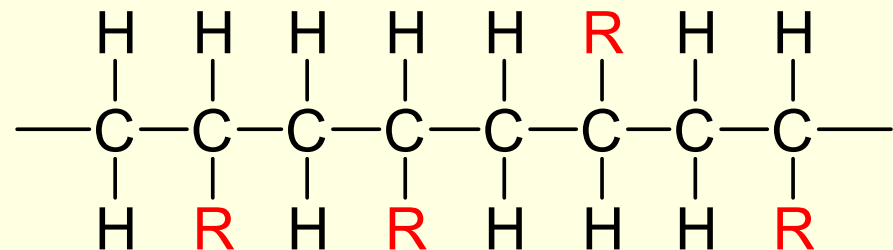
jednostrano – sve **R** grupe su na istoj strani



dvostrano – **R** grupa menja stranu



ataktični – **R** slučajni raspored

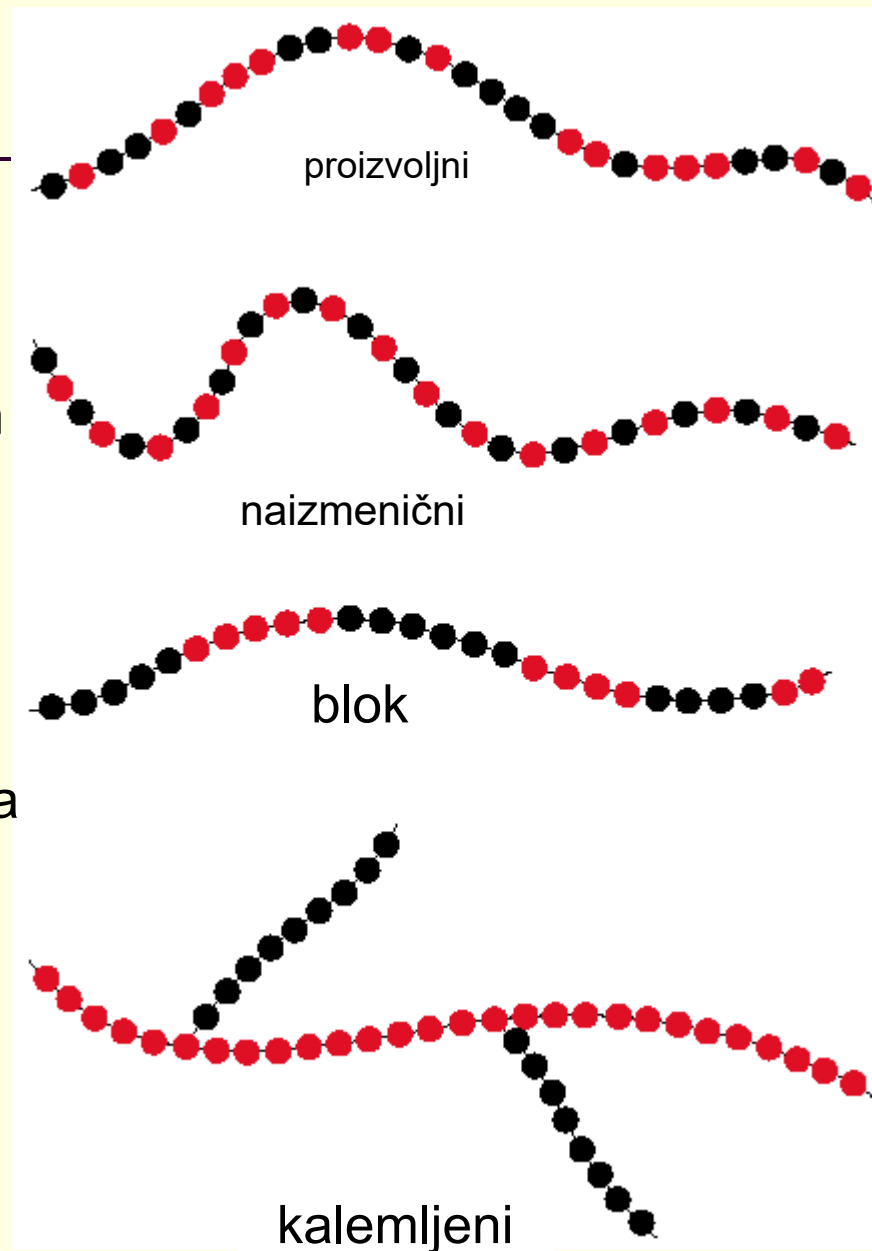


Kopolimeri

dva ili više **monomera**

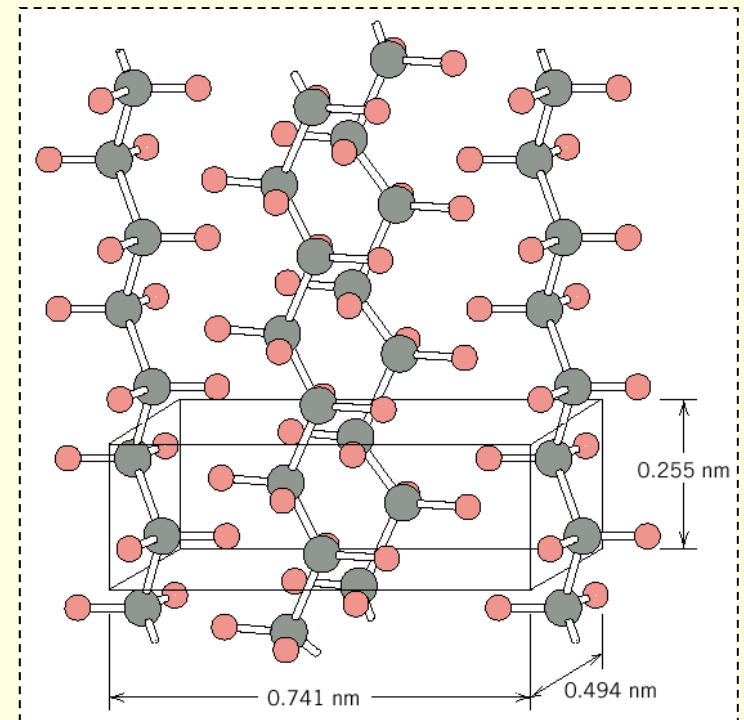
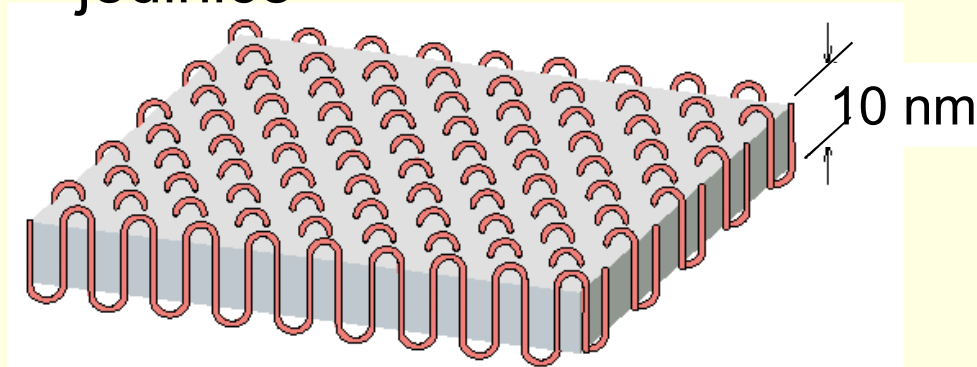
- **proizvoljni** – A i B imaju slučajan raspored
- **naizmenični** – A i B se naizmenično ponavljaju
- **blok** – veliki blokovi A i B se naizmenično ponavljaju
- **kalemljeni** – lanci B se vezuju na osnovni lanac A

A – ● B – ●



Kristalna struktura polimera

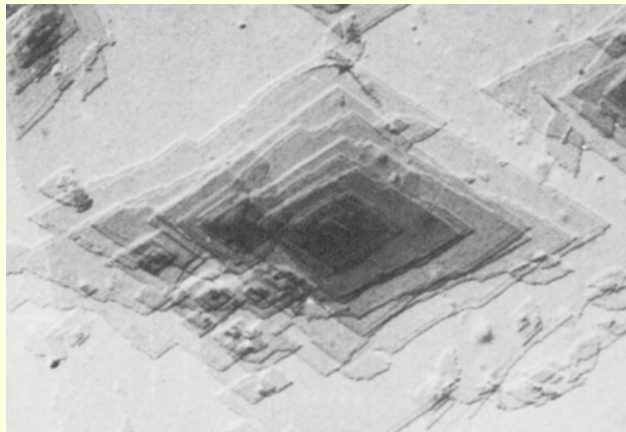
- Lance polimera je moguće urediti u neku vrstu kristalne strukture
- Spakovani lanci imaju uređeni raspored i formiraju pravilne jedinice



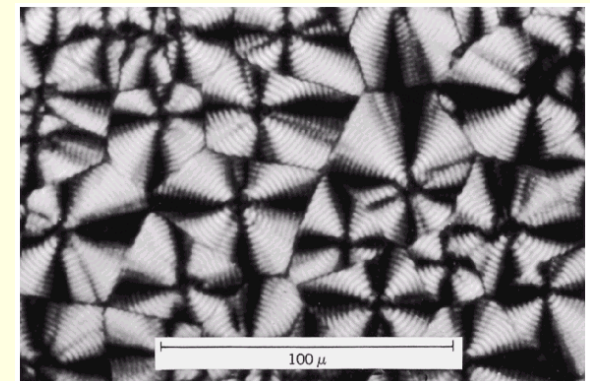
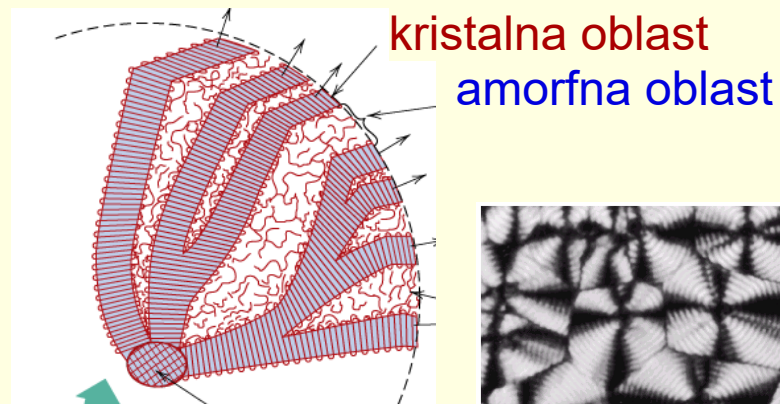
Kristalna struktura polimera

- Brzinom očvršćavanja se reguliše udeo kristalne strukture kod polimera

- **spori rast**
- monokristal



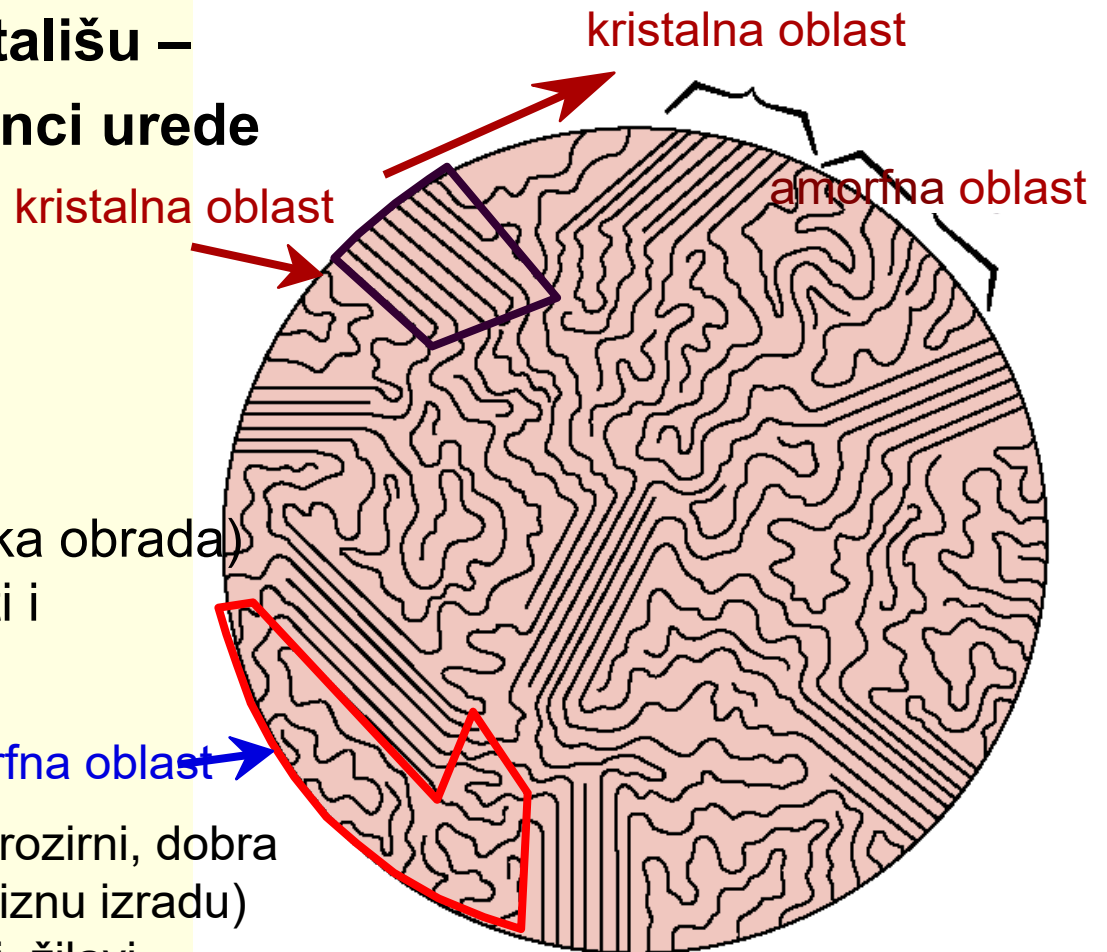
- **brzi rast (sferuliti) – lamelarna (slojevita) struktura**



Kristalna struktura polimera

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

- zbog toga se određuje **% kristalne strukture**
 - R_m 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/m³),
 - 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, polistiro, poliamidi, polimetilmetakrilat, polivinilacetat, poliizobutilen i dr.*

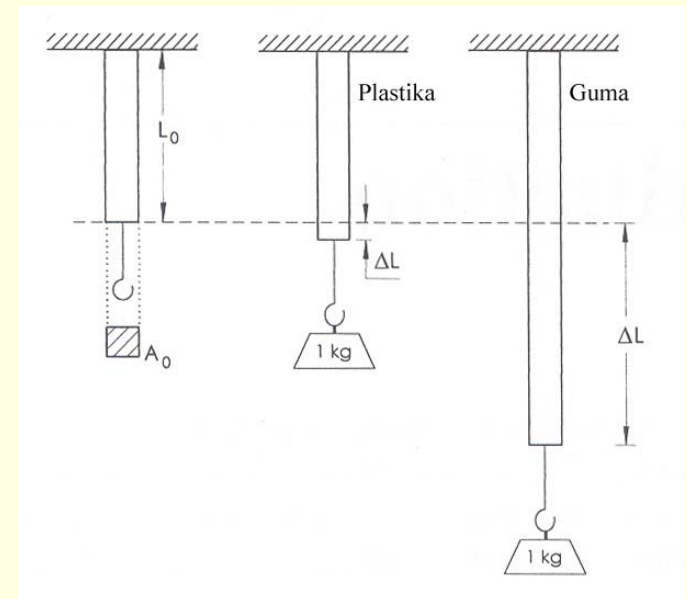
Termostabilni polimeri

- Termostabilni polimeri zagrevanjem **moгу 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 R_m i modul elastičnosti E polimera, a raste žilavosti.
 - U termostabilne polimere spadaju: *fenolaldehidi, epoksidi, poliestri, poliuretani, silicijum-organski polimeri (silikoni) i dr.*

Mehaničke osobine polimernih materijala

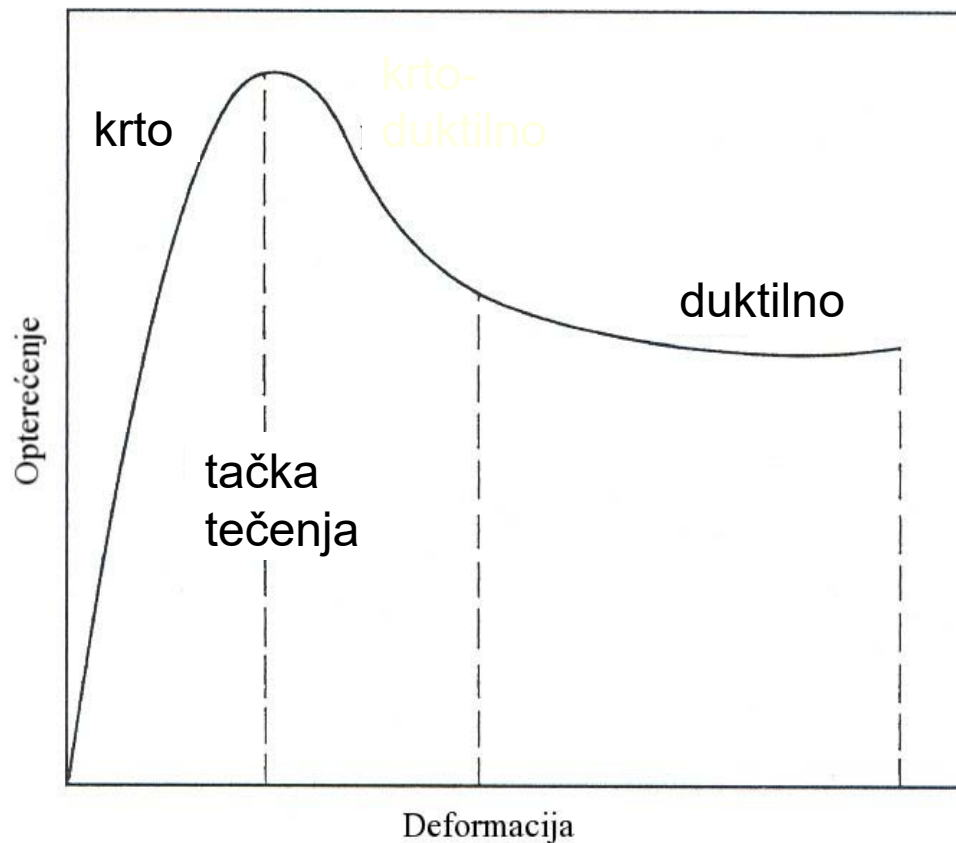
Kod polimera se ispituju:

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



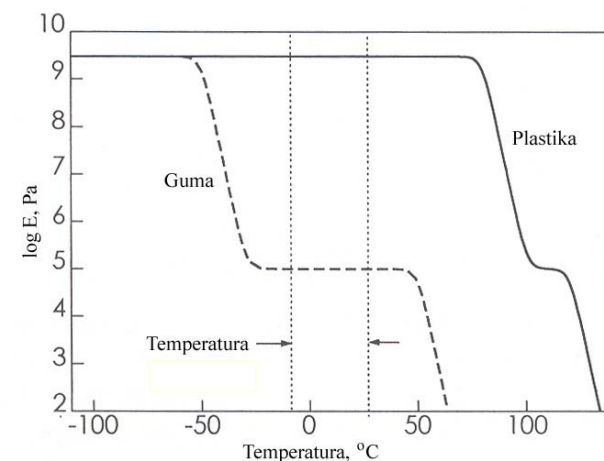
Polimeri imaju **viskoelastično** ponašanje (ponašaju se i kao elastični i kao viskozni materijali) Zbog viskoelastičnosti mehanička svojstva polimera se bitno razlikuju od svojstava metalnih i keramičkih materijala.

Tipična kriva zatezanja

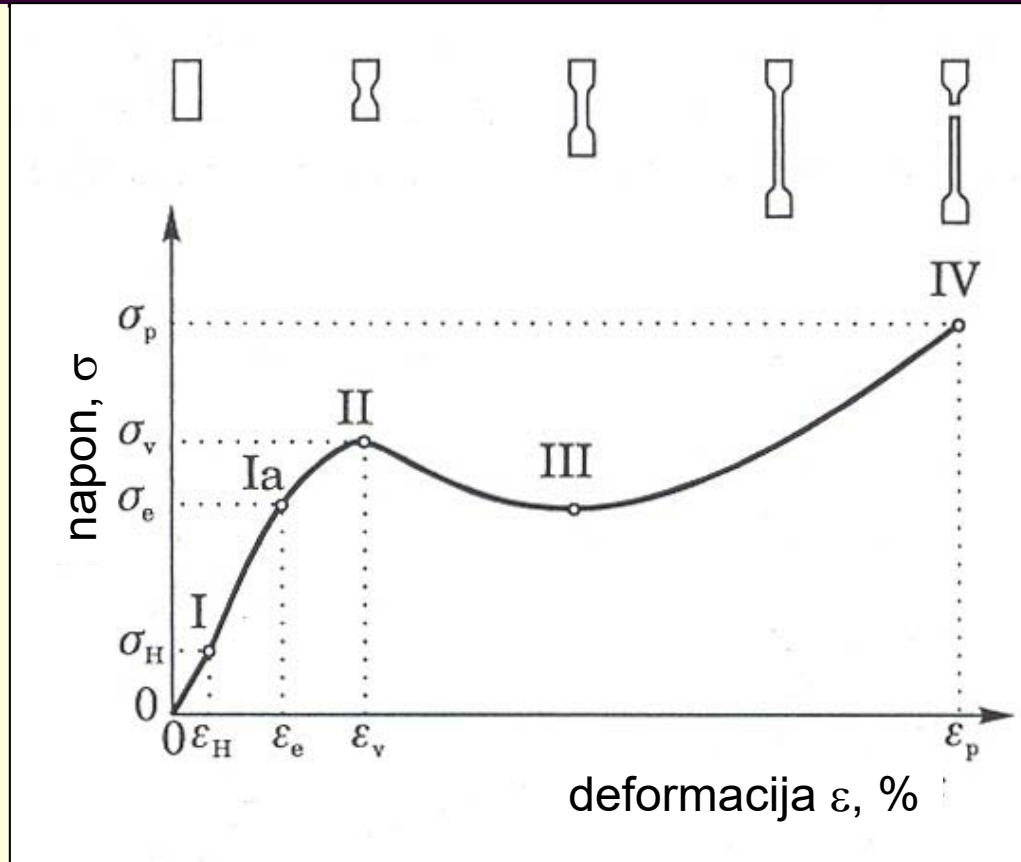


Zavisnost modula elastičnosti od temperature za plastiku i gumu

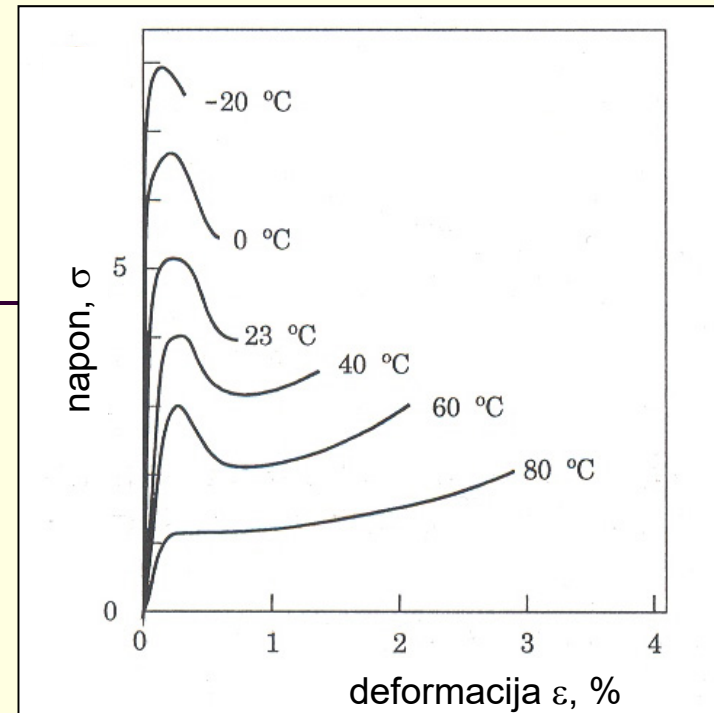
- Za neke polimerne materijale nema izraženog početnog linearnog dela $\sigma-\varepsilon$ dijagrama (ili je slabo izražen) pa se modul elastičnosti E određuje kao *tangenta*.
- Sa porastom temperature opada E



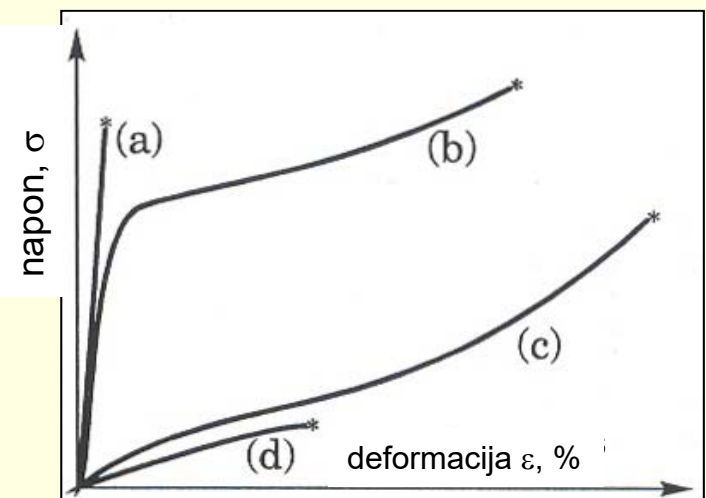
Dijagram zatezanja polimera



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



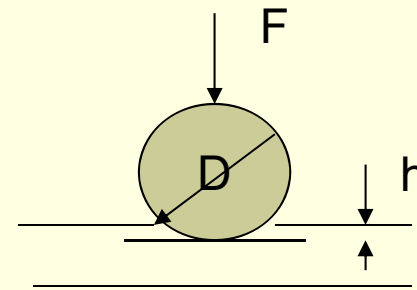
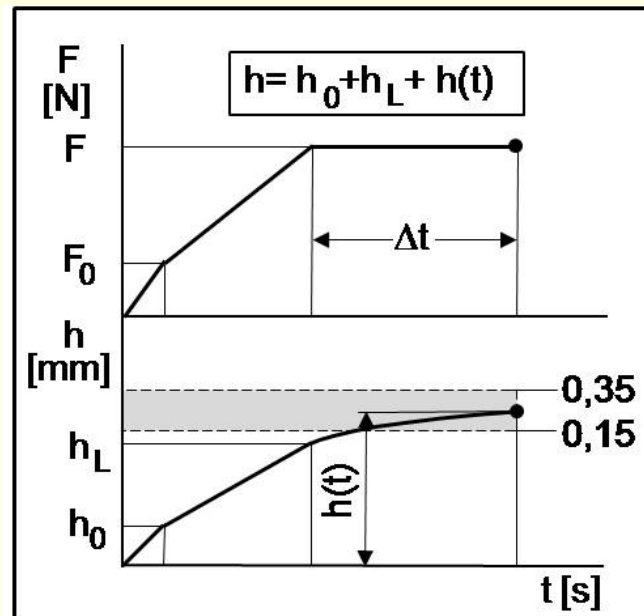
Promena zateznih osobina sa temperaturom ispitivanja



Tvrdoća polimera

Metode za određivanje tvrdoće najčešće su:

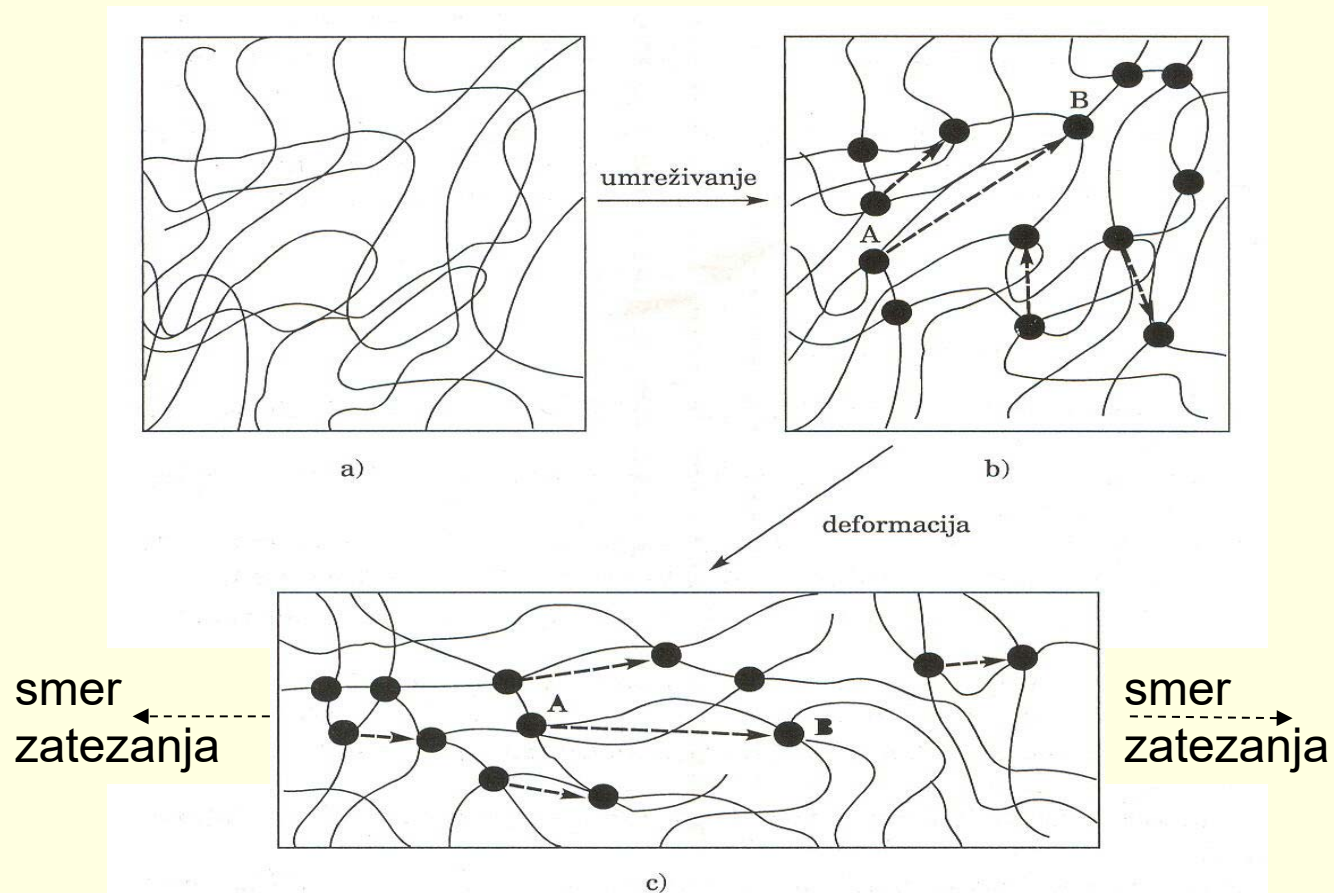
- Shore
- Brinel HB.



$D=5 \text{ mm}$

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

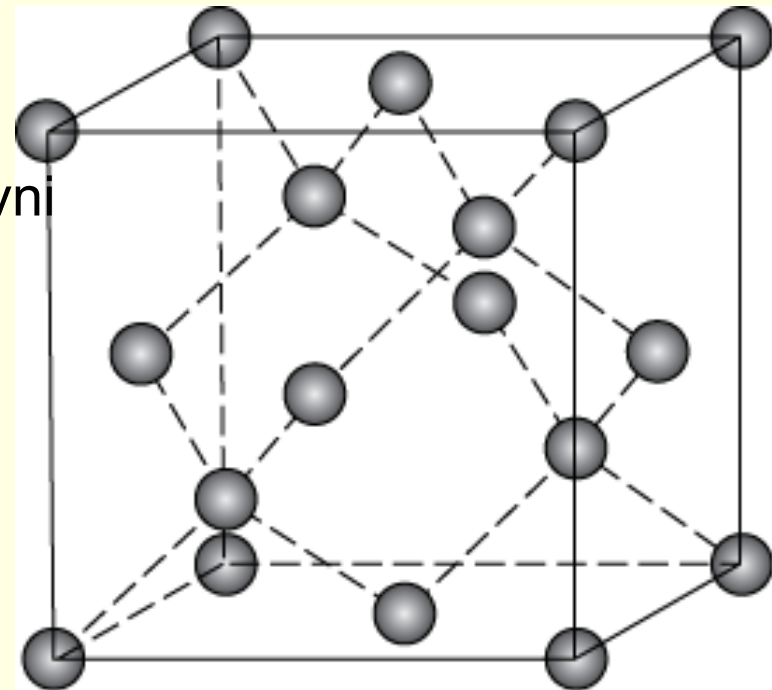
Efekat umrežavanja kod guma (elastomeri)



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

Ugljenik C – amorfan

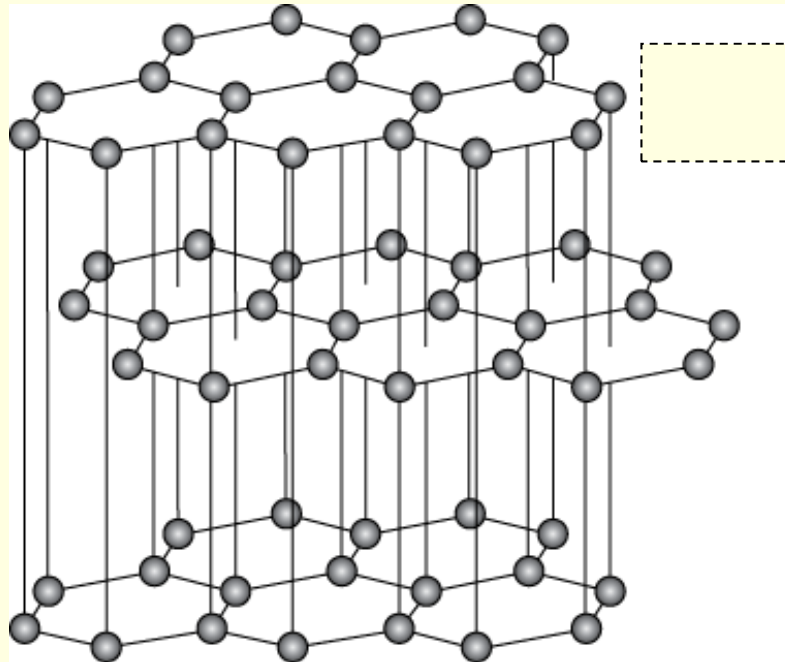
- Dijamant
 - tetraedarska rešetka C
 - tvrd – nema pogodne ravni klizanja
 - krt – može da se reže
 - veliki komadi – nakit
 - mali (veštački) komadi - za rezne alate za poliranje
 - filmovi
 - tvrda prevlaka za alate, medicinske uređaje, itd.



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

Grafit

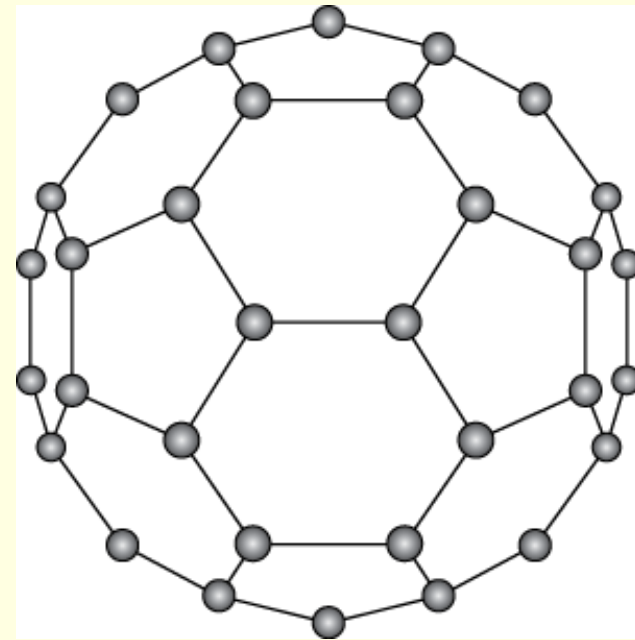
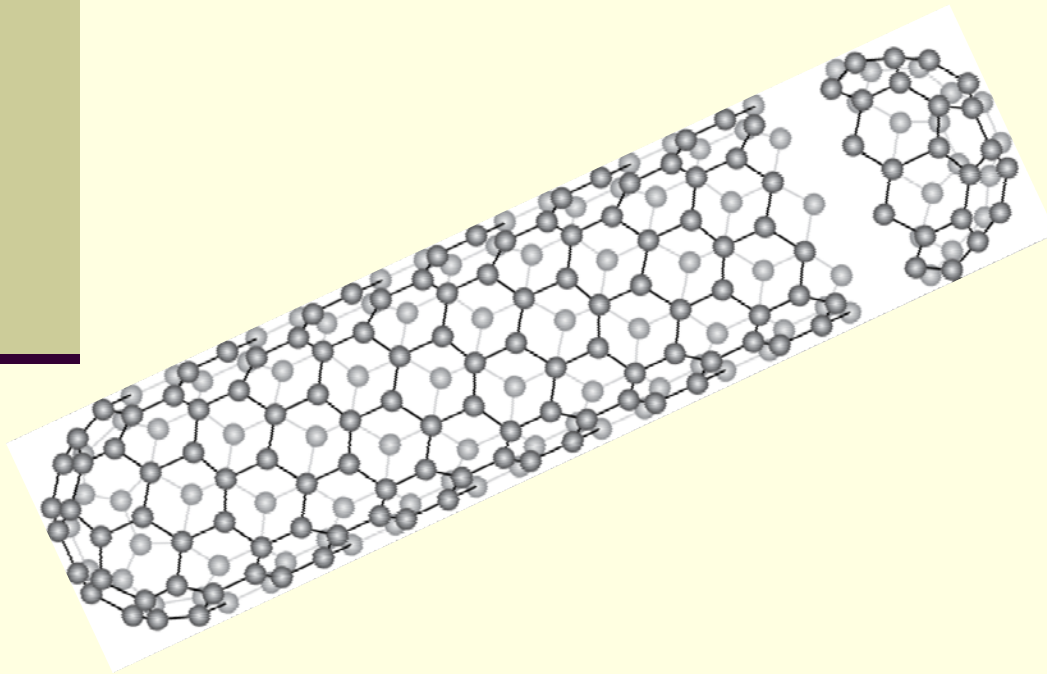
■ slojevita struktura



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

Složene strukture

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



■ Hvala na pažnji😊