

Mašinski materijali 3

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

1

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?

2

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, karbidi, nitridi, sulfidi)
 - Visoka čvrstoća, modul elastičnosti, krte
 - izolatori
 - staklaste površine

3

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, naparavanje, rezanje, spajanje/zavarivanje, termička obrada, itd.
- **Kod materijala postoji neraskidiva veza:**
struktura i način izrade određuju osobine

4

Primer izbora materijala

Inženjerski problem – zamena kuka

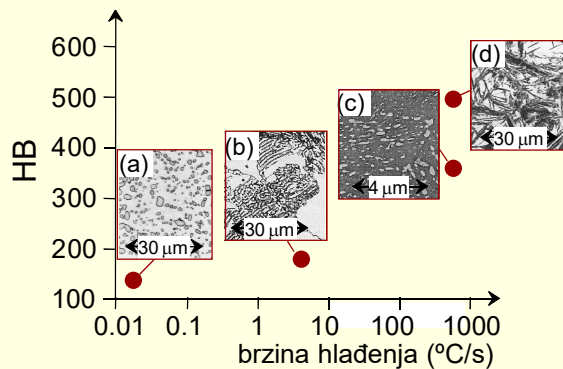
- Starenjem zglobovi se “troše” tj habaju.
- Zahtevi za materijal za izradu veštačkog kuka:
 - dinamička čvrstoća
 - dobro podmazivanje - svojstva podmazivanja *kapice* - ne smeju da se izdvajaju čestice usled habanja
 - biokompatibilnost
- **Najveći problemi pri izradi:**
 - Kako učvrstiti *kapicu*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



Korelacija - izrada, mikrostruktura & osobine

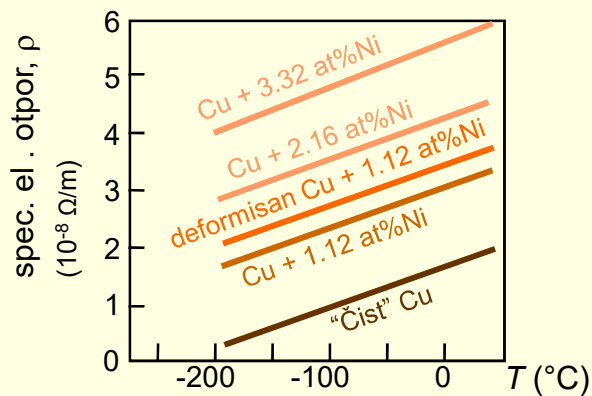
Primer: tvrdoća čelika

- 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.

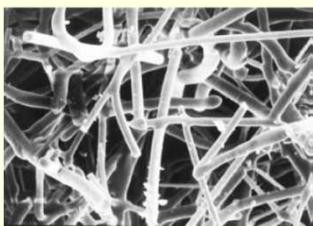
7

Korelacija - izrada, mikrostruktura & osobine

Primer: toplotna provodljivost

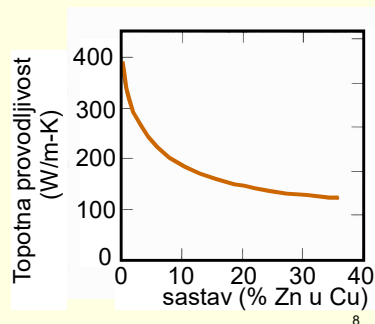


- Pločice za Space Shuttle: Vlakna SiO_2 imaju vrlo malu **toplotnu provodnost**



← 100 μm →

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

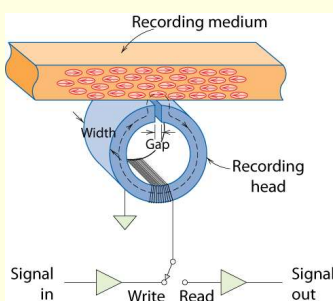


Korelacija - izrada, mikrostruktura & osobine

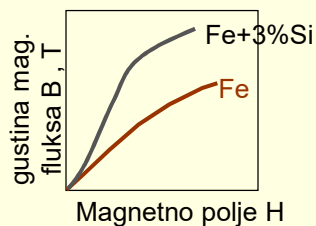
Primer: magnetne osobine

- 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!

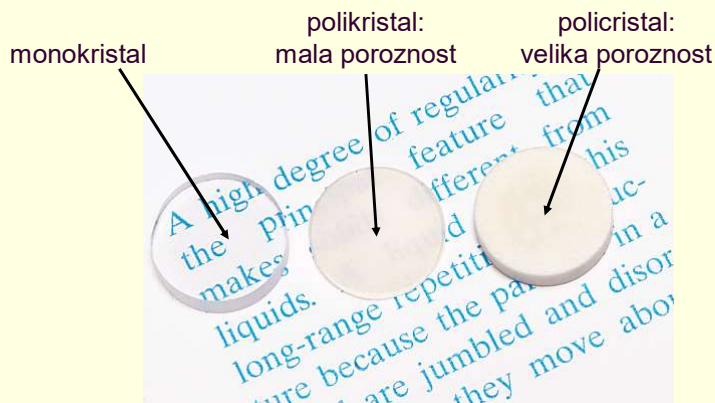


9

Korelacija - izrada, mikrostruktura & osobine

Primer: optičke osobine

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



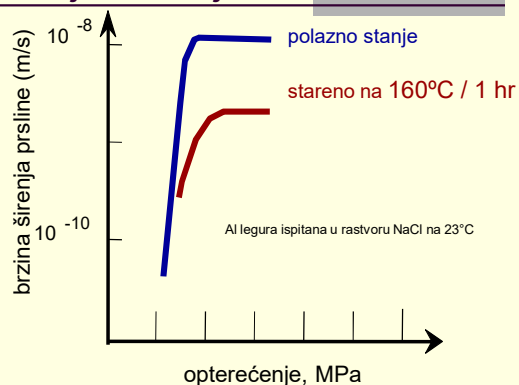
10

Korelacija - izrada, mikrostruktura & osobine

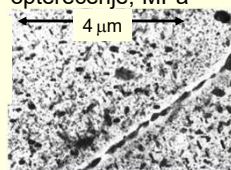
Primer: način degradacije materijala

- Kod nekih legura Al napon & morska voda izazivaju prsline naponske korozije!

- **Termička obrada** usporava brzinu širenja prslina naponske korozije u slanoj vodi!

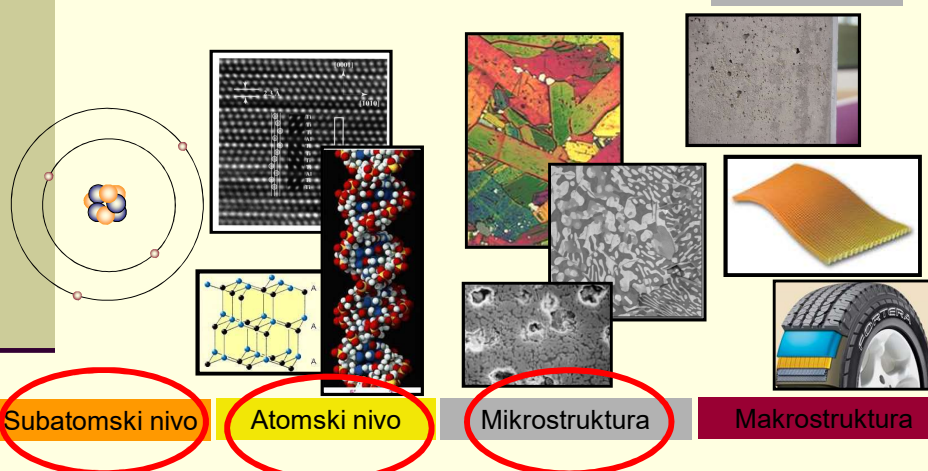


-materijal:
Al legura
(Zn,Cu,Mg,Zr)



11

STRUKTURA MATERIJALA



12

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

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

imaju malu gustinu –

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

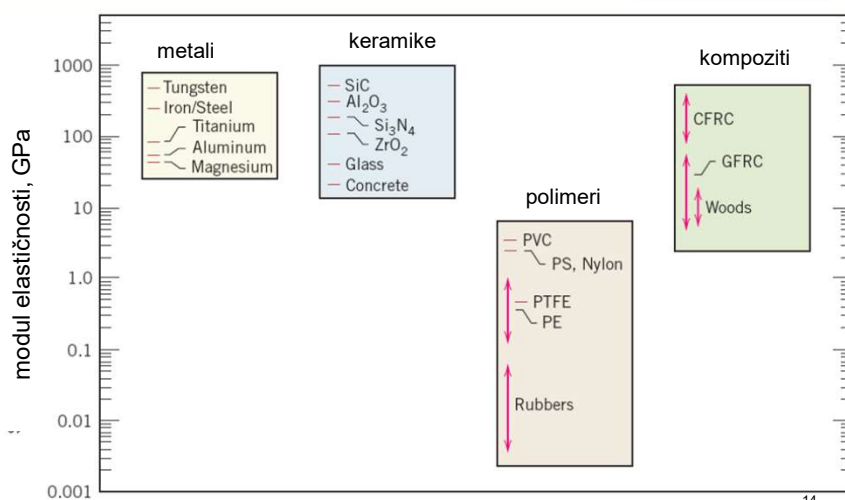
Kompoziti

osobine zadržavaju od
gradivnih komponenti i
daju nove

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

13

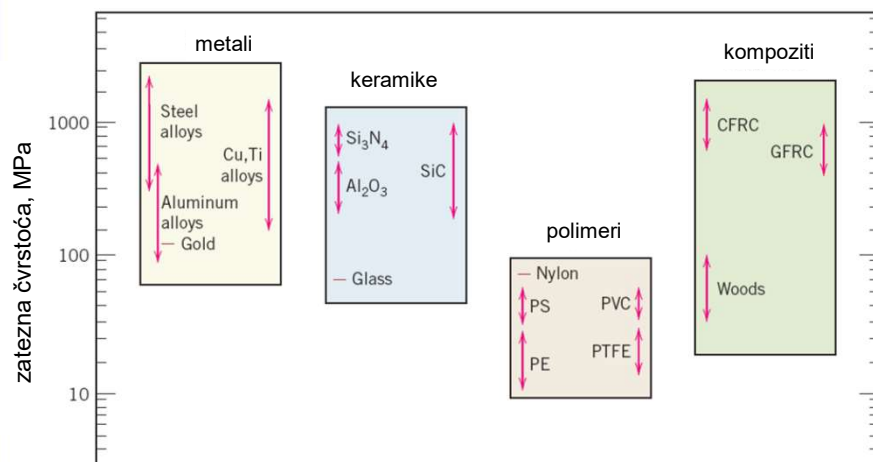
Poređenje osnovnih grupa materijala: prema modulu elastičnosti



Modul elastičnosti određuje krutost konstrukcije

14

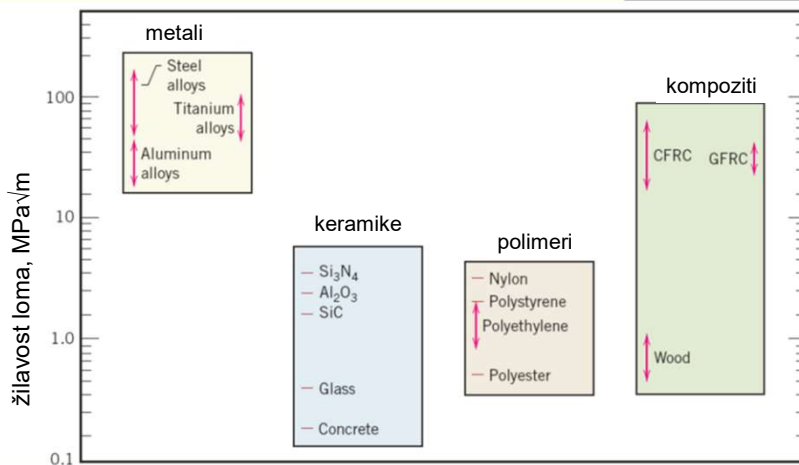
Poređenje osnovnih grupa materijala: R_m



Zatezna čvrstoća određuje nosivost konstrukcije do loma.

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

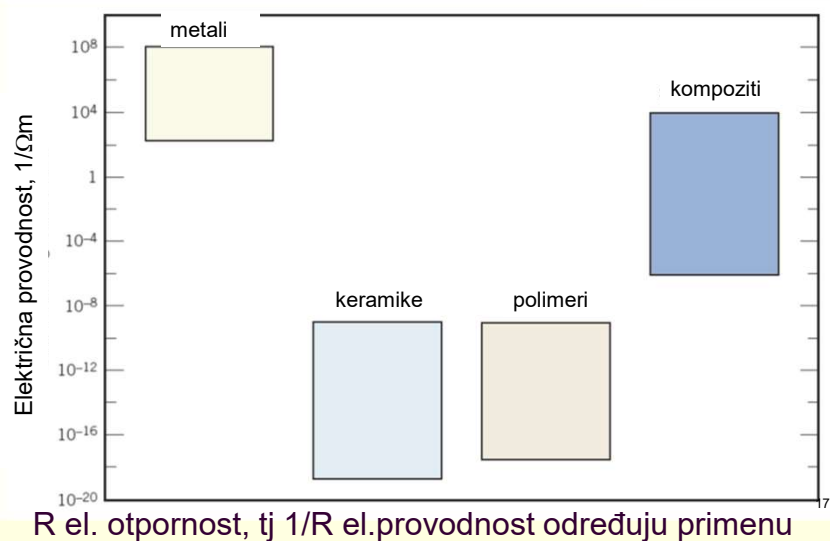
Poređenje osnovnih grupa materijala: K_{IC}



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

16

Poređenje osnovnih grupa materijala – $1/R$



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

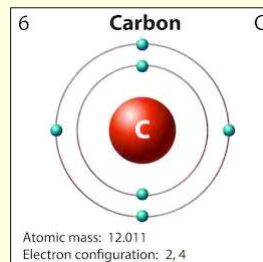
nizak E

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)



valentni elektroni

19

Periodni sistem elemenata

- Kolone: Slična **valentnost**

Elektonegativnost – mera privlačenja elektrona

Elektonegativnost 0.7 - 4.0. Visoke vrednosti: primaju elektron

•

Elektropozitivni elementi:
otpuštaju elektrone
i postaju + ioni

Elektronegativni elementi:
primaju elektrone i postaju - joni.²⁰

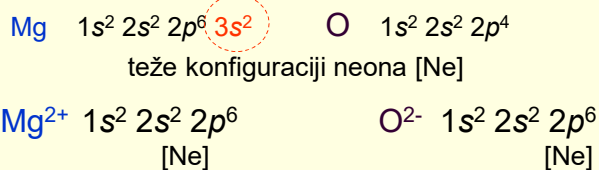
Jonska veza – metal + nemetal

daje
elektrone

prima
elektrone

Odlika jonske veze je velika razlika u elektronegativnosti

npr: MgO



21

Primeri jonske veze

- Dominantna veza kod **keramika**

dominantná väzba kovářská

NaCl

MgO

CaF₂

CsCl

IA																	0		
H	IIA																He		
2.1	Li	Be															-		
1.0	1.0	1.5															-		
Na	Mg	IIIB		IVB	VB	VIB	VIIIB	VIII				IB	IIB	IIIA	IVA	VA	VIA	VIIA	Ar
0.9	1.2												Al	Si	P	S	Cl		
													1.5	1.8	2.1	2.5	3.0		
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

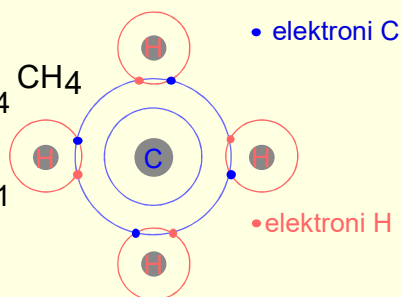
22

Kovalentna veza

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

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

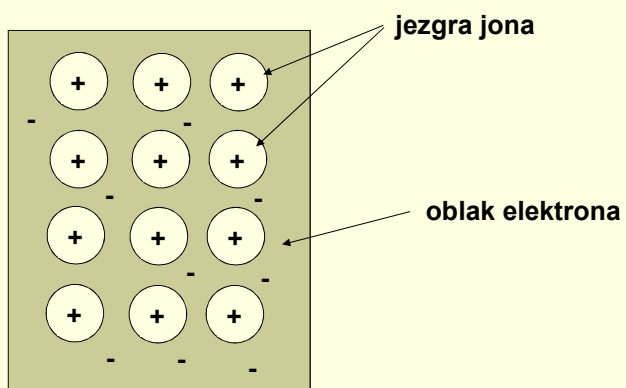
H: ima 1 valentni e^- ,
potreban mu je još 1



*mala razlika u elektronegativnosti

23

Metalna veza – čisto da je spomenemo!



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

24

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

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

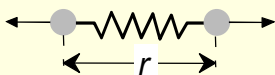
$$\% \text{ jonski deo} = \left(1 - e^{-\frac{(3.5 - 1.3)^2}{4}} \right) \times (100\%) = 70.2\% \text{ jonska}$$

25

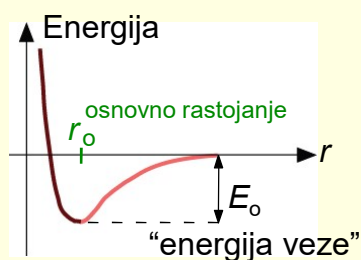
Šta zavisi od energije veze?

Npr. temperatura topljenja: T_t

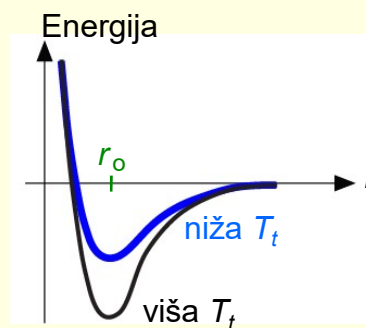
- rastojanje, r



- energija veze, E_o



- temperatura topljenja, T_t

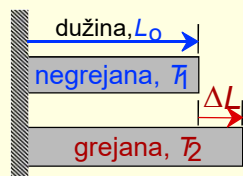


T_t je viša ako je energija veze viša tj. E_o ima višu vrednost.

26

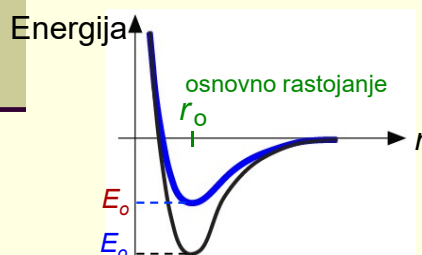
Šta još zavisi od energije veze? α

- Koeficijent lin. širenja, α



Koeficijent lin. širenja

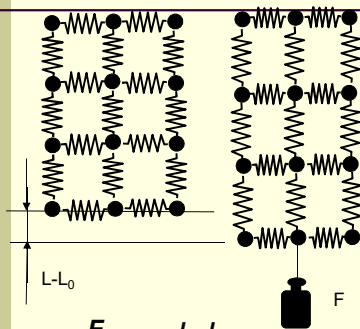
$$\frac{\Delta L}{L_0} = \alpha (T_2 - T_1)$$



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

27

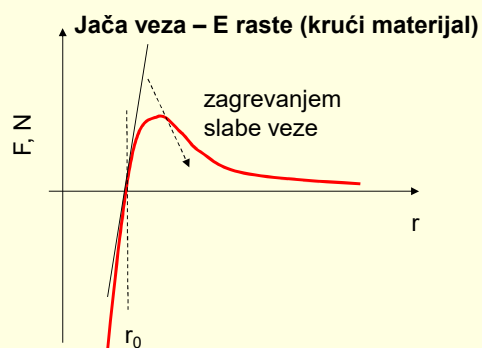
Šta još zavisi od energije veze? E



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

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

Hukov zakon
E – Jungov modul elastičnosti



Sa porastom temperature
slabe veze i E opada

28

Sekundarne veze - VAN DER WAALS

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

- **promenljivi dipoli**

asimetrično naelektrisanje

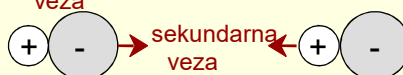


npr: tečni H_2
 $H_2 \rightarrow \leftarrow H_2$

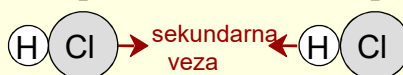


- **stalni dipoli**

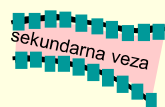
-opšti slučaj:



-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

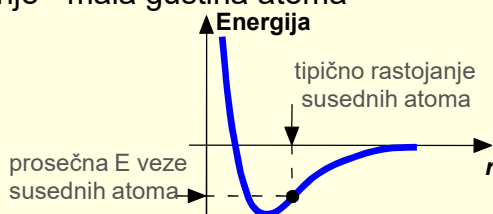
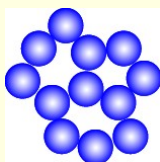
Atomske veze - poređenje

Tip	Energija veze	Napomena
Jonska	Velika!	Neusmerena (keramike)
Kovalentna	različita 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

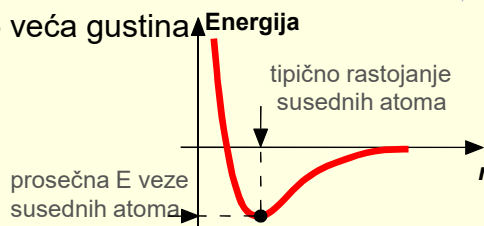
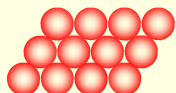
³⁰

Raspored atoma

- **nasumično** pakovanje - mala gustina atoma



- **uređeno** pakovanje- veća gustina



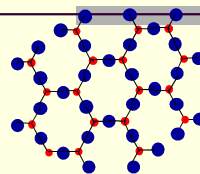
Uređene, gusto pakovane strukture imaju **jaču** vezu

31

Raspored atoma

Kristalni materijali...

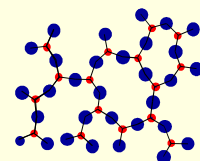
- periodično, prostorno pakovanje
- tipično za
 - metale
 - mnoge keramike
 - neke polimere



kristalni SiO₂

Nekristalni ili amorfni materijali...

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

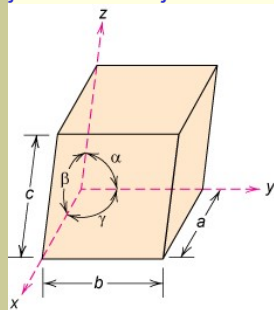


nekristalni SiO₂

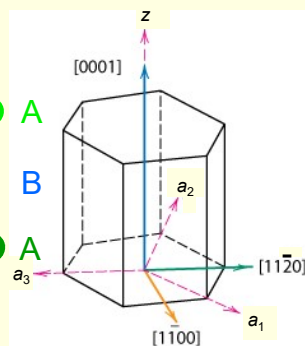
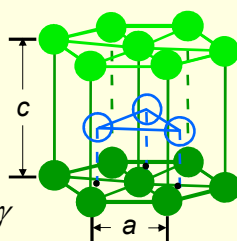
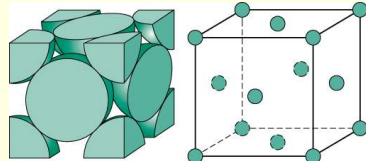
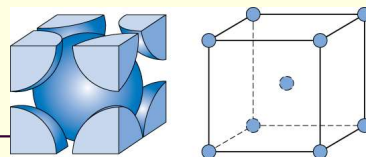
32

Kristalne rešetke

jedinična ćelija



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



14 Braveovih rešetki

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

Teorijska gustina materijala, ρ

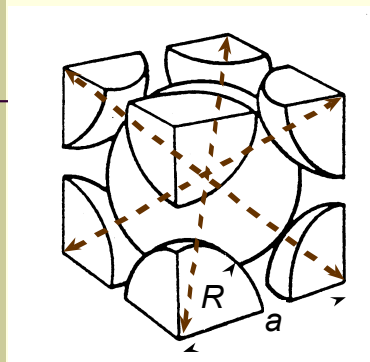
$$\text{gustina} = \rho = \frac{\text{masa atoma u jediničnoj ćeliji}}{\text{zapremina jedinične ćelije}}$$

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

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

35



Primer: Cr

Cr (ZCK)
 $A = 52.00$ g/mol
 $R = 0.125$ nm
 $n = 2$

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

$$\rho = \frac{\frac{\text{atoma}}{\text{jed. ćeliji}} \cdot \frac{\text{g}}{\text{mol}}}{\frac{\text{zapremina}}{\text{jed. ćelija}} \cdot \frac{\text{atoma}}{\text{mol}}}$$

Diagram showing the calculation of density for Chromium (Cr) using the BCC unit cell parameters. The numerator consists of the number of atoms per unit cell (2) multiplied by the atomic mass (52.00 g/mol). The denominator consists of the volume of the unit cell (0.2887³) multiplied by Avogadro's number (6.023 x 10²³). The final result is compared with the measured density.

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

36

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

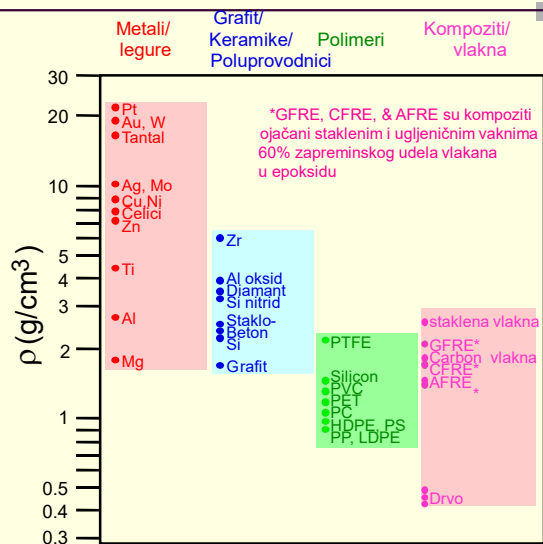
Polimeri...

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

Kompoziti nisu navedeni u poređenju jer...

- zavise od čega su sastavljeni – negde su između₃₇

Poređenje osnovnih grupa materijala po gustini



38

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



39

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).

40

Poređenje monokristala i polikristala

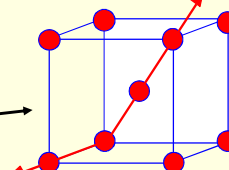
- Monokristal

-Osobine zavise od pravca

anizotropan.

-Npr: modul elastičnosti kod KZC rešetke Fe

E (dijagonala) = 273 GPa



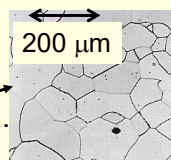
E (ivica) = 125 GPa

- Polikristali

-Mogu da budu **kvaziizotropni**

ili anizotropni

Npr.: poligonalna struktura je: **kvaziizotropna.**



($E_{\text{poli Fe}} = 210$ GPa): hladno deformisana struktura

(tekstura) je **anizotropna.**



41

Polimorfija

■ Promena kristalne rešetke - sa temperaturom i pritiskom

■ Ti - α (HGP), β -Ti (KZC)

■ CrO_2 - α , β oblik

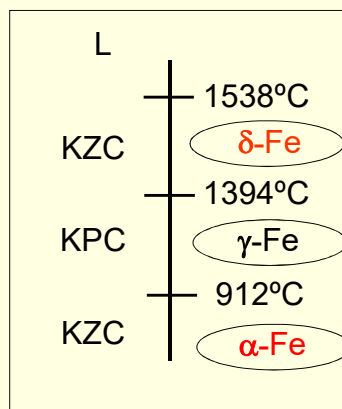
■ SiC - heksagonalna, romboedarska i KPC

■ Sn - kalaj

α ili sivi kalaj sa kubnom rešetkom i

β ili beli kalaj sa tertragonalnom reš.

Fe



KERAMIKE

43

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

Kristalna struktura keramika

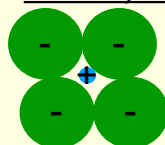
Struktura oksida kao primer (M+O)

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

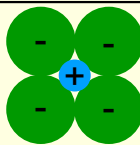
47

Jonska veza kod keramika

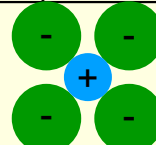
- Stabilnost strukture određuje veličina jona:
- metalni jon po veličini treba da bude što sličniji veličini šupljine



nestabilna veza



stabilna veza

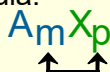


stabilna veza

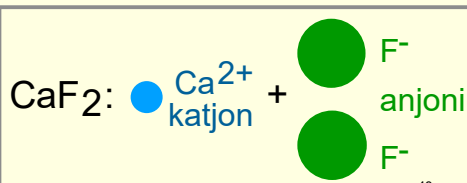
- Ukupno **naelektrisanje je neutralno**:

-ukupno naelektrisanje treba da bude 0.

-Uopštena formula:



m, p – su određeni neutralnošću naelektrisanja



48

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

49

Koordinacioni broj - definiše građu

Koordinacioni broj zavisi od odnosa r_k/r_a i definiše:
broj aniona 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		 ZnS (cink sulfid) Sfalerit ruda Zn
0.414 - 0.732	6	oktaedarska		 NaCl
0.732 - 1.0	8	kubna		 CsCl (cezijum hlorid)

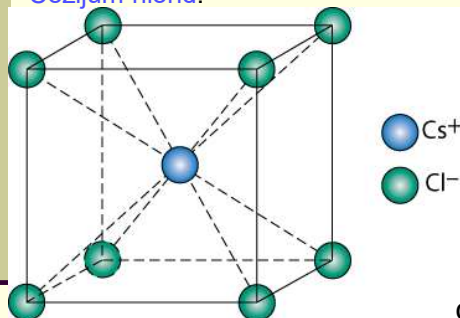
(npr. KPC rešetka ima 4 oktaed. mesta i 8 tetraed. mesta)

50
prazno mesto čela
prosta kubna rešetka

AX kristalna struktura keramika

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

Cezijum hlorid:



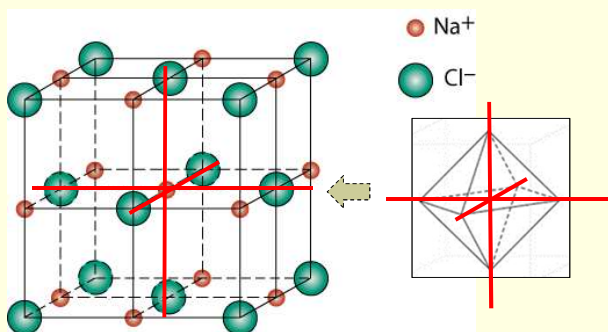
$$\frac{r_{\text{Cs}^+}}{r_{\text{Cl}^-}} = \frac{0.170}{0.181} = 0.939$$

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

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

51

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^- ima 6 susednih jona Na^+

52

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

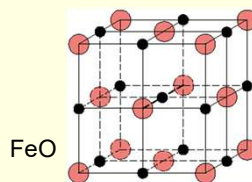
Cl^- 0.181

F^- 0.133

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

koordinacioni broj
= 6

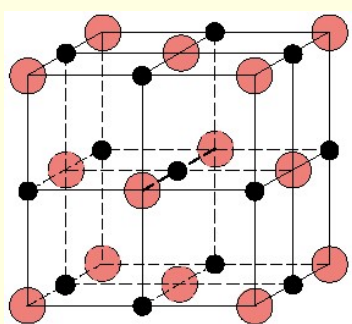
odgovara strukturi = NaCl



Pitanje: u koju vrstu praznih mesta se smeštaju katjoni Fe^{2+} ?

53

Primer: MgO struktura



O^{2-} $r_{\text{O}} = 0.140 \text{ nm}$

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

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

katjoni se smeštaju u oktaedarska mesta

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

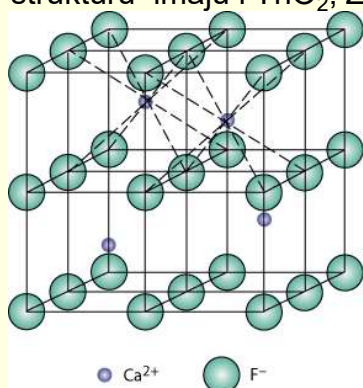
MgO takođe ima NaCl strukturu (kao i FeO)

54

AX_2 kristalna struktura keramika

Primer:

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



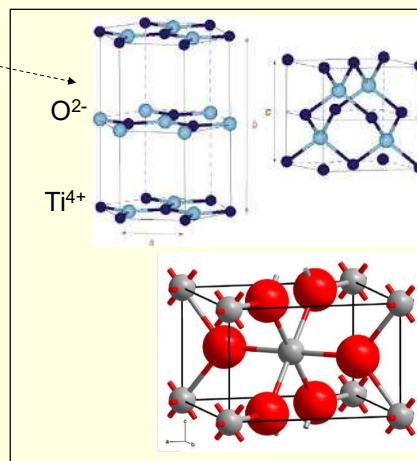
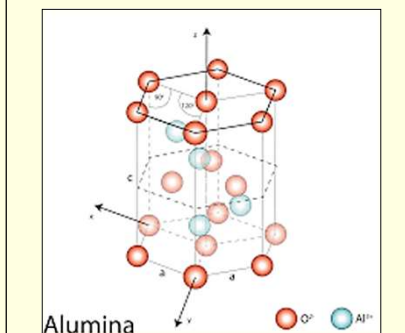
CaF_2

55

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



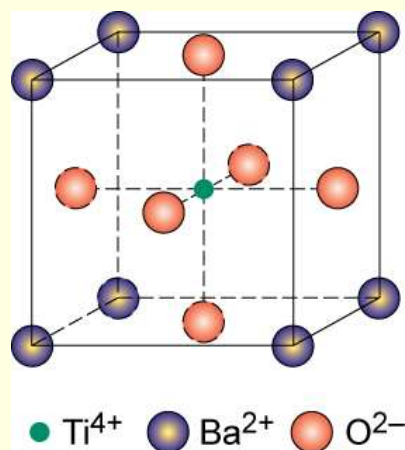
katjoni se smeštaju u oktaedarska mesta

56

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

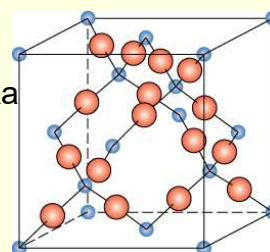
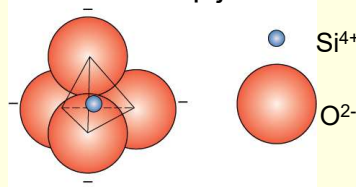


57

Silikatne keramike

Najčešći elementi na našoj planeti su Si & O

Atom silicijuma se smešta u tetraedarsku šupljinu rešetke kiseonika



kristobalit

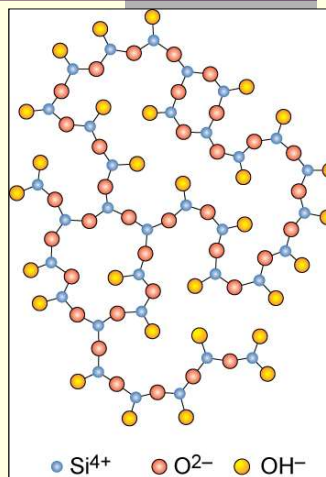
- SiO₂ struktura je npr. kvarc, kristobalit
- veza Si-O je jaka tako da je T_{topljenja} visoka (1710°C)

58

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

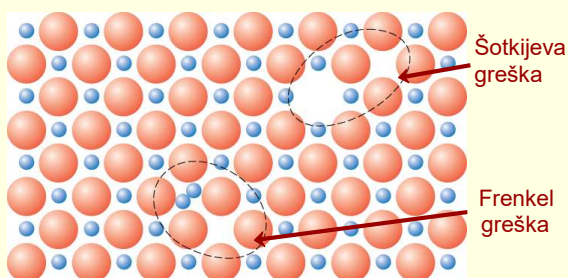
- naelektrisanje je uravnoteženo dodatkom katjona tipa Na^+
- kada se dodaje bor (**B**) dobija se **borosilikatno staklo** ili vatrootporno staklo (**pyrex**) koje ima višu T primene i manje je krto u odnosu na na obično staklo

59

Greške kristalne rešetke kod keramika

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

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



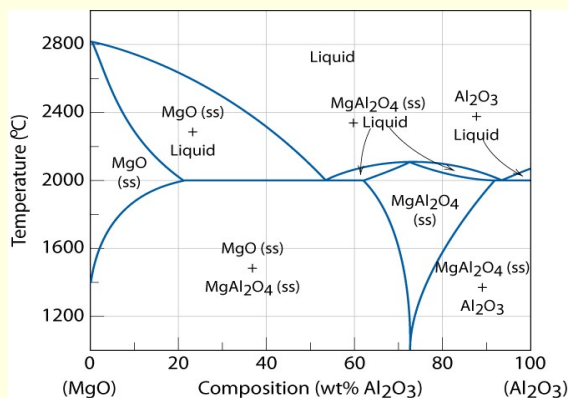
- postiže se ravnotežna koncentracija grešaka ($f_{+ - j a T}$) $\sim e^{-Q_D / kT}$
- nečistoće se smeštaju tako da se zadrži neutralno naelektrisanje
- nema dislokacija

60

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 :



61

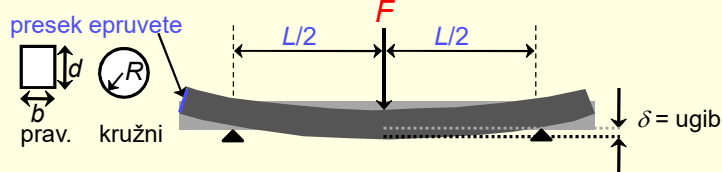
Mehaničke osobine keramika

- 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 krtnim lomom**.
- Ispitivanje zatezanjem je vrlo teško izvodljivo kod krtnih materijala.

62

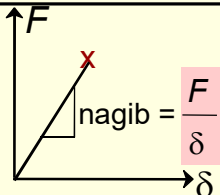
Merenje modula elastičnosti

- 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:



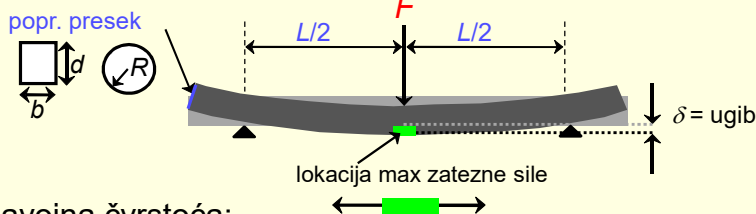
$$E = \frac{F}{\delta} \frac{L^3}{4bd^3} = \frac{F}{\delta} \frac{L^3}{12\pi R^4}$$

pravoug. presek epruvete kružni presek epruvete

63

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

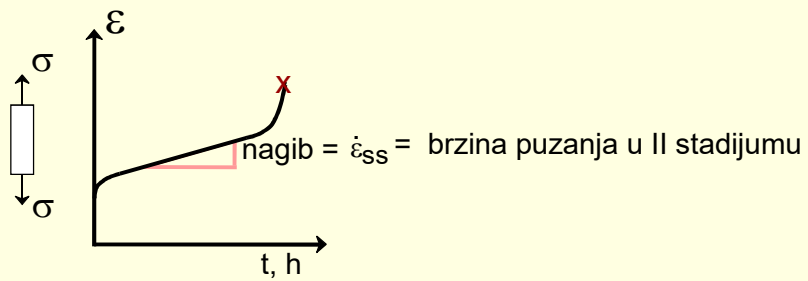
Vrednosti savojne čvrstoće i modula elastičnosti za neke keramike:

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

64

Ispitivanje na puzanje

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



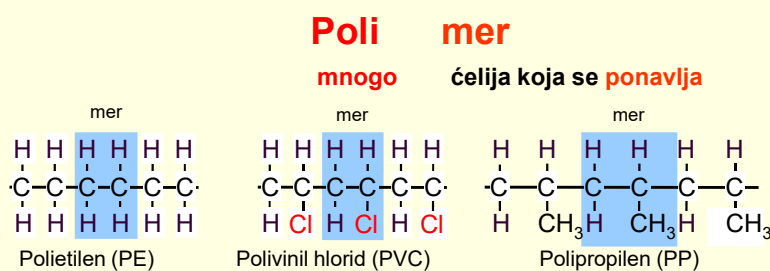
65

Polimeri

66

Polimeri

Šta su polimeri?



67

Istorija polimera

■ Prirodni polimeri

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

■ Najstariji podaci o primeni su npr.

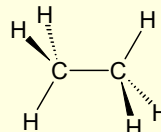
- gumene lopte Inka
- katran

68

Sastav polimera

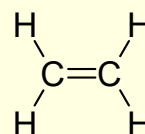
Najveći broj polimera grade H i C

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

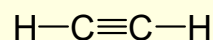


- **Nezasićeni ugljovodonici** – C atomi vezani sa dvogubom ili trogubom vezom koje mogu da se raskinu tako da su reaktivni i mogu da grade nove veze

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



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



69

Sastav, molekularna struktura i tačka ključanja pojedinih ugljovodonika

Naziv	sastav	molekularna struktura	tačka ključanja, °C
metan	CH ₄		-164
etan	C ₂ H ₆		-88.6
propan	C ₃ H ₈		-42.1
butan	C ₄ H ₁₀		-0.5
pentan	C ₅ H ₁₂		36.1
heksan	C ₆ H ₁₄		69.0

70

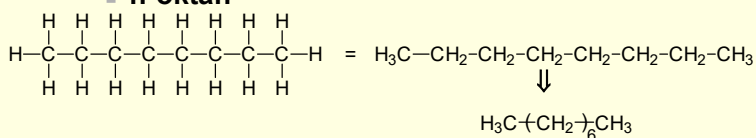
Izomeri

Izomeri

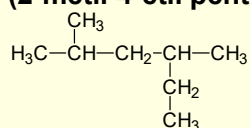
- Izomeri su jedinjenja sa istim hemijskim sastavom (hemijska formula ista) koja imaju različitu strukturu

Primer: C_8H_{18}

n-oktan



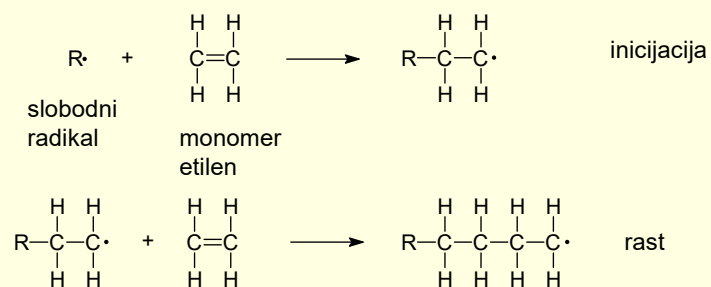
Izooktan (2-metil-4-etil pentan)



71

Polimerizacija

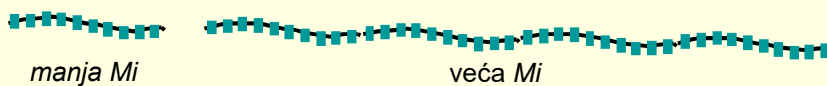
- Proces polimerizacije treba da se aktivira
- Aktivacija se obavlja slobodnim radikalima



72

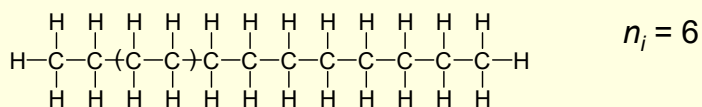
Veličine koje opisuju polimere

1.) Molarna masa M_i : masa mola lanca



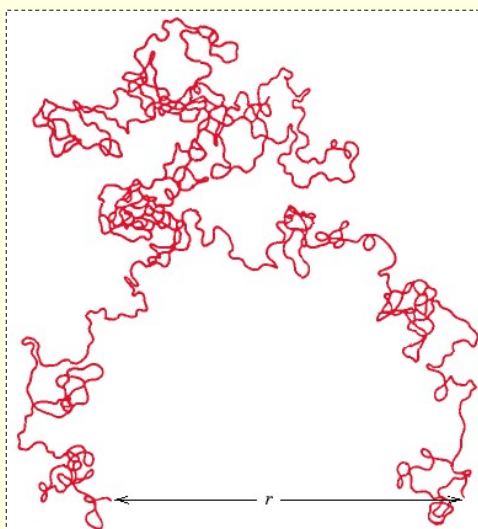
$$\bar{M}_n = \frac{\text{ukupna masa polimera}}{\text{ukupan broj molekula}} \quad \text{prosečna } M_i$$

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



73

Rastojanje između krajeva lanca, r

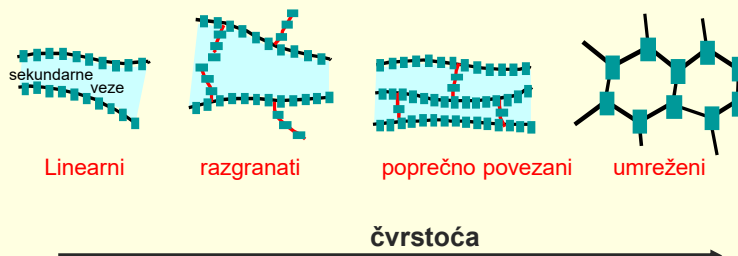


određuje
elastomerna
svojstva

74

Struktura molekula

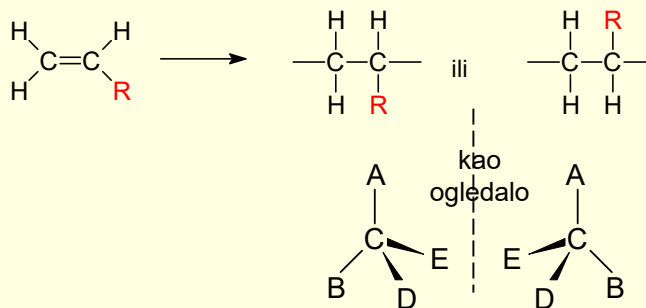
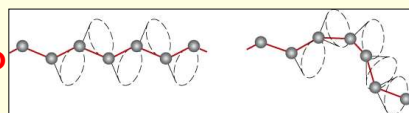
- Lanci svojim oblikom utiču na **čvrstoću**:



75

Oblik molekula

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

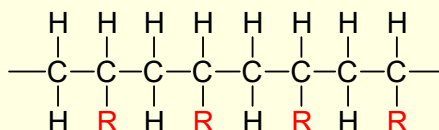


76

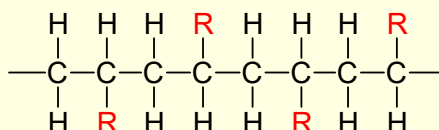
- za druge promene – veze se raskidaju

Ponovljivost

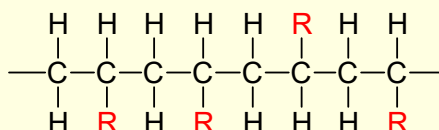
jednostrano – sve **R** grupe su na istoj strani



dvostrano – **R** grupa menja stranu



ataktični – **R** slučajni raspored



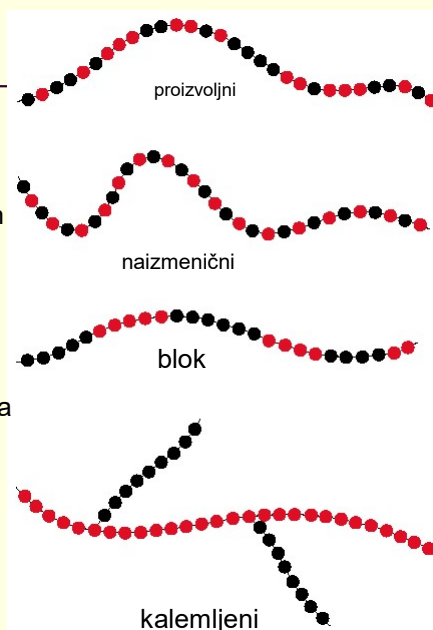
77

Kopolimeri

dva ili više **monomera**

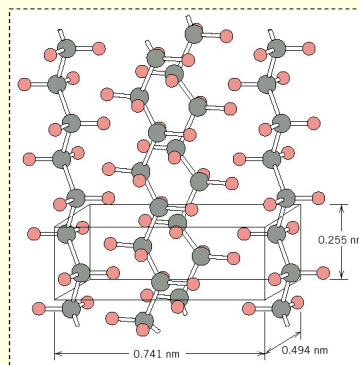
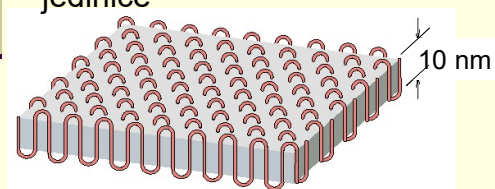
- **proizvoljni** – A i B imaju slučajan raspored
- **naizmenični** – A i B se naizmenično ponavljaju
- **blok** – veliki blokovi A i B se naizmenično ponavljaju
- **kalemljeni** – lanci B se vezuju na osnovni lanac A

A – ● B – ●



Kristalna struktura polimera

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

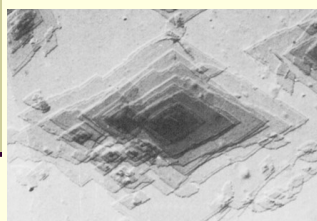


79

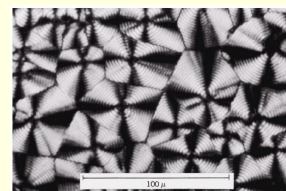
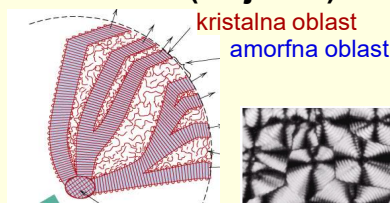
Kristalna struktura polimera

- Brzinom očvršćavanja se reguliše udeo kristalne strukture kod polimera

- **spori rast**
- monokristal



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

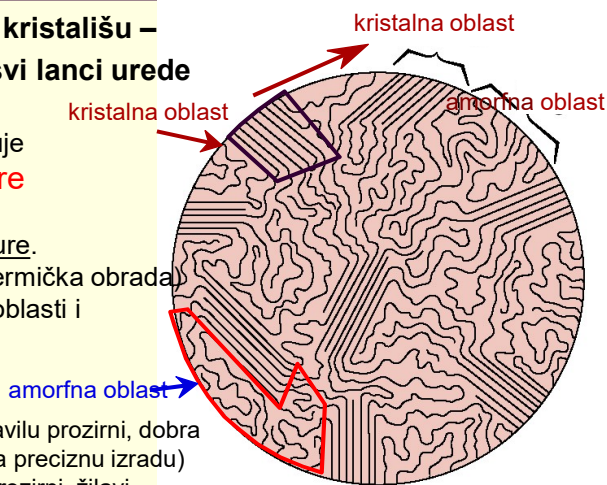


80

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

81

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 ($1000-1200 \text{ kg/m}^3$),
 - mala toplotna provodljivost i
 - visoka hemijska otpornost.
- Nedostaci:
 - nepostojanost na povišenim temperaturama,
 - nizak modul elastičnosti,
 - krtoost na nižim temperaturama,
 - sklonost ka starenju itd.
- U termoplastične polimere spadaju: *polietilen, polivinilhlorid, polistirof, poliamidi, polimetilmetakrilat, polivinilacetat, polizobutilen i dr.*

Termostabilni polimeri

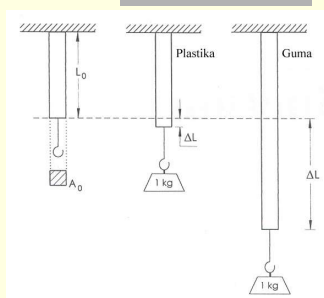
- Termostabilni polimeri zagrevanjem **moгу samo jednom** da omekšaju i pređu u plastično stanje.
- Pokazuju stabilnost na povišenim temperaturama.
- Na povišenim temperaturama mogu da se deformišu.
- Na visokim temperaturama sagorevaju.
- Najčešće radne temperature su u opsegu od **200 - 400°C**.
- 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.*

83

Mehaničke osobine polimernih materijala

Kod polimera se ispituju:

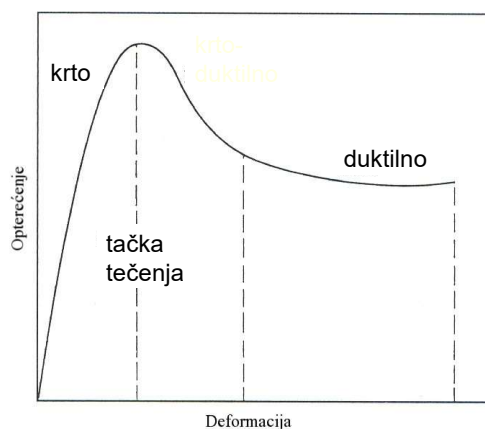
- čvrstoća
- modul elastičnosti (krutost)
- tvrdoća
- žilavost
- deformabilnost



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.

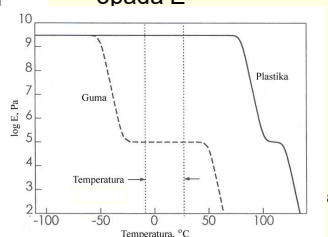
84

Tipična kriva zatezanja

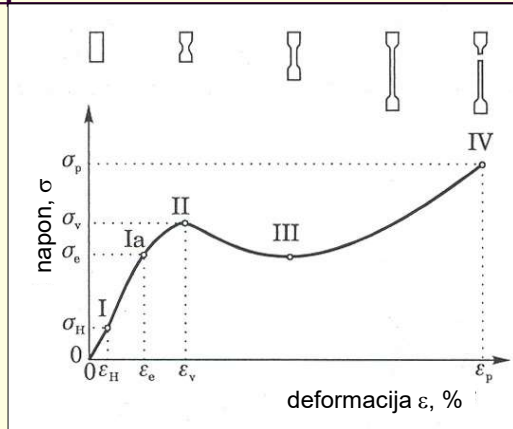


Zavisnost modula elastičnosti od temperature za plastiku i gumu

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

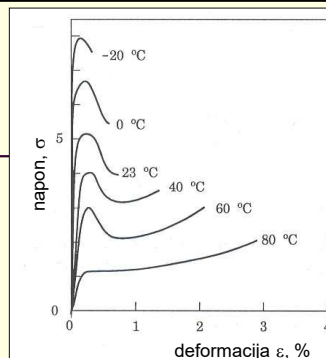


Dijagram zatezanja polimera

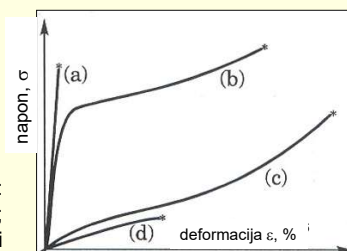


Oblici dijagrama zatezanja :

- a)-kruti i kruti polimeri; b)-tvrđi i žilavi polimeri;
c)-savitljivi i žilavi polimeri; d)-savitljivi i kruti polimeri



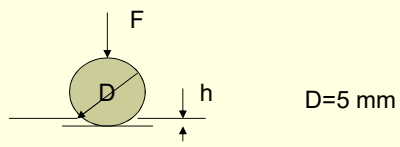
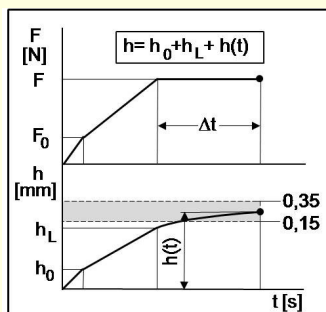
Promena zateznih osobina sa temperaturom ispitivanja



Tvrdoća polimera

Metode za određivanje tvrdoće najčešće su:

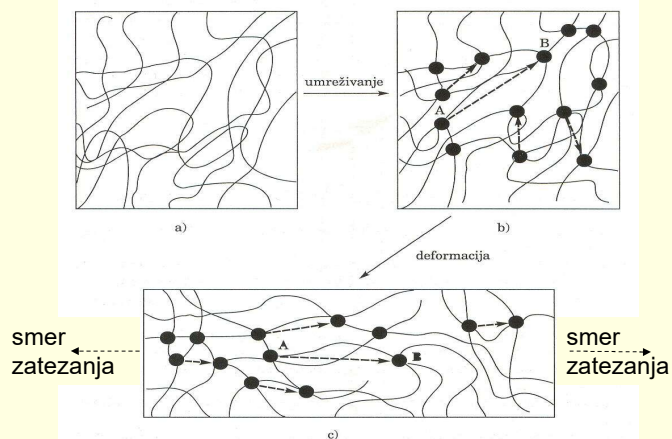
- Shore
- Brinel HB.



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

87

Efekat umrežavanja kod guma (elastomeri)



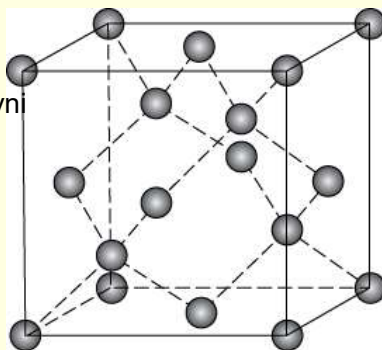
Šematski prikaz umrežavanja i deformacije elastomernih makromolekula:
a) linearna struktura, b) umrežena struktura, c) deformisana struktura

88

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.

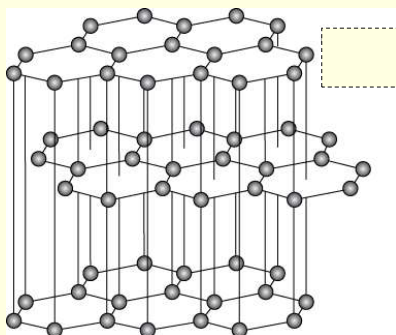


Adapted from Fig. 12.15, Callister 7e.

89

Grafit

■ slojevita struktura

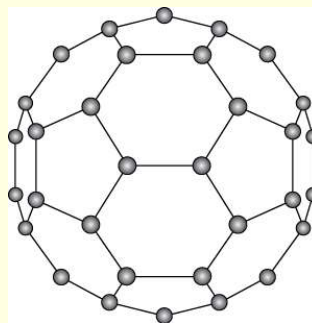
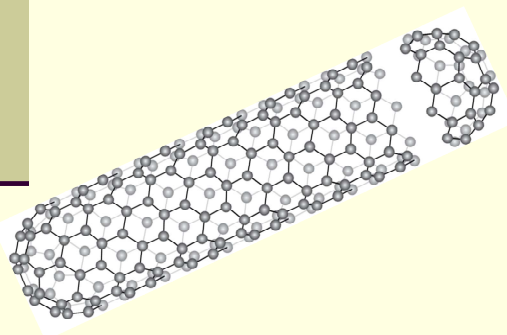


- slabe *van der Waal*-sove veze između slojeva
- ravni lako klizaju – dobar je kao sredstvo za podmazivanje
- spec površina. 1000 m²/g

90

Složene strukture

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



91

■ Hvala na pažnji😊

92