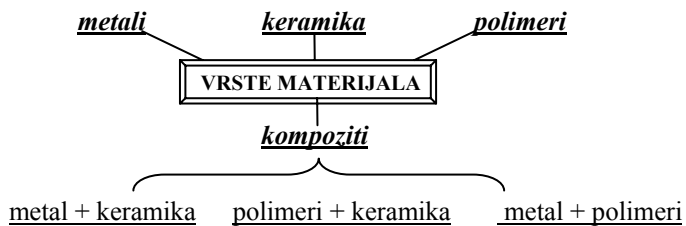


# 1. PODELA MATERIJALA



Slika 1.1. Četiri grupe materijala

**Metalni materijali**

**Keramički materijali**

**Polimeri**

**Kompozitni materijali**

Tabela 1.1: Osnovne karakteristike glavnih grupa materijala

Osobine	Metali	Keramika	Polimeri
Gustina, g/cm <sup>3</sup>	2 – 20	1 - 14	1 – 2.5
Električna provodljivost	visoka	niska	niska
Toplotna provodljivost	visoka	niska	niska
Duktilnost	visoka	niska	zadovoljavajuća
Zatezna čvrstoća, MPa	100 – 1500	100 – 400	-
Pritisna čvrstoća, MPa	100 – 1500	1000 – 5000	-
Žilavost loma, MNm <sup>-3/2</sup>	10 – 30	1 – 10	2 – 8
Max. radna temperatura, °C	1000	1800	250
Otpornost prema koroziji	niska	superiorna	srednja
Vrsta veze	metalna	jonska - kovalentna	kovalentna
Struktura	kristalna	kompleksna kristalna	amorfna

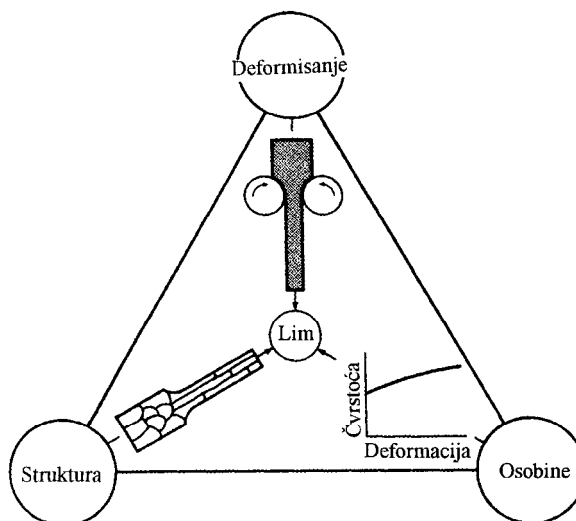
**inženjerski materijali**

**mašinski materijali**

**konstrukcioni materijali**

**pomoćni materijali**

**pogonski materijali**



Slika 1.2. Veza između strukture, svojstava i deformisanja materijala

## 2. OSNOVNA SVOJSTVA MATERIJALA

### 2.1. FIZIČKA SVOJSTVA MATERIJALA

*Temperatura topljenja/kristalizacije*

*omekšavanje*

*električna provodljivost*

*magnetna svojstva*

*Dijamagnetizam*

*Paramagnetizam*

*Feromagnetni materijali*

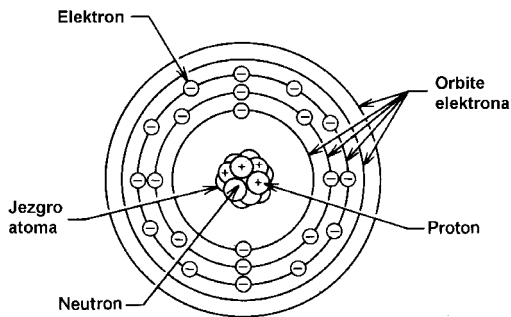
### 2.2. MEHANIČKA SVOJSTVA

- *Čvrstoća*
- *Tvrdoća*
- *Elastičnost*
- *Plastičnost*
- *Žilavost*

Tabela 2.1: Fizička i mehanička svojstva nekih metala

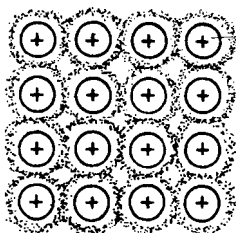
simbol elementa	gustina	temperatura topljenja	koeficijent linearnog širenja	specifična električna provodnost	tvrdoća po Brinellu	zatezna čvrstoća	modul elastičnosti	procentualno izduženje
	$\rho$ g/cm <sup>3</sup>	T, °C	$\alpha \times 10^{-6}$	$\gamma$ , MSm/m <sup>2</sup>	HB	R <sub>m</sub> , MPa	E, GPa	$\delta$ , %
Al	2,7	660	24,0	37,0	300	100	80	40
W	19,3	3370	4,0	18,1	1600	1100	400	-
Fe	7,87	1539	11,9	11,0	500	300	210	21-55
Co	8,9	1490	12,08	10,2	1250	700	200	3
Mg	1,74	651	25,7	23,0	250	200	45	15
Mn	7,44	1242	23,0	22,7	200	krt	krt	krt
Cu	8,94	1083	16,42	64,0	350	220	120	60
Ni	8,9	1452	13,7	8,5	600	450	220	40
Sn	7,3	232	22,4	8,5	80	300	40	40
Pb	11,34	327	29,5	4,9	50	18	12	50
Ti	4,5	1812	7,14	-	-	40	120	20-28
Cr	7,1	1550	8,1	38,4	1000	krt	krt	krt
Zn	7,14	419	32,6	17,4	350	150	100	5-20

## 2.3. HEMIJSKA SVOJSTVA MATERIJALA



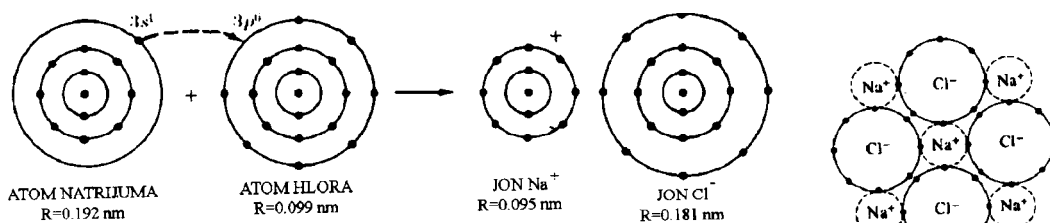
Slika 2.1. Šematski prikaz atoma

### *Metalna veza*



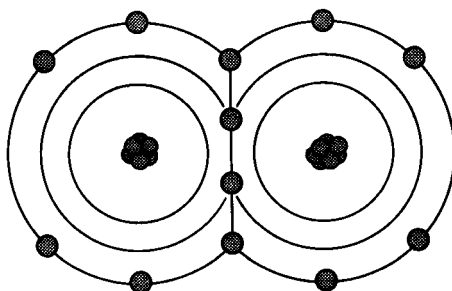
Slika 2.2. Metalna veza

### *Jonska veza*



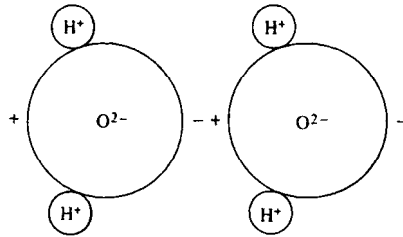
Slika 2.3. Jonska veza

### *Kovalentna veza*



Slika 2.4. Kovalentna veza - kiseonika ( $\text{O}_2$ )

## Van der Valsova veza

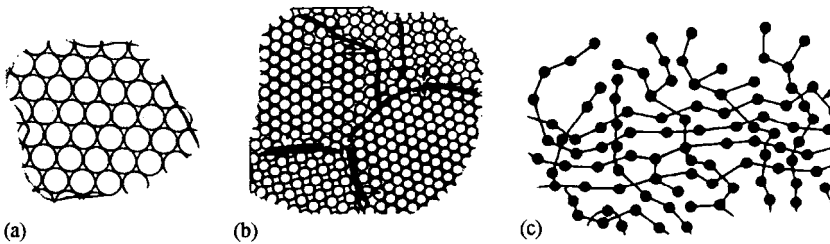


Slika 2.5. Van der Valsova veza - molekuli vode

## IZBOR MATERIJALA

### 3. KRISTALNA STRUKTURA I GEOMETRIJA ELEMENTARNIH KRISTALNIH REŠETKI

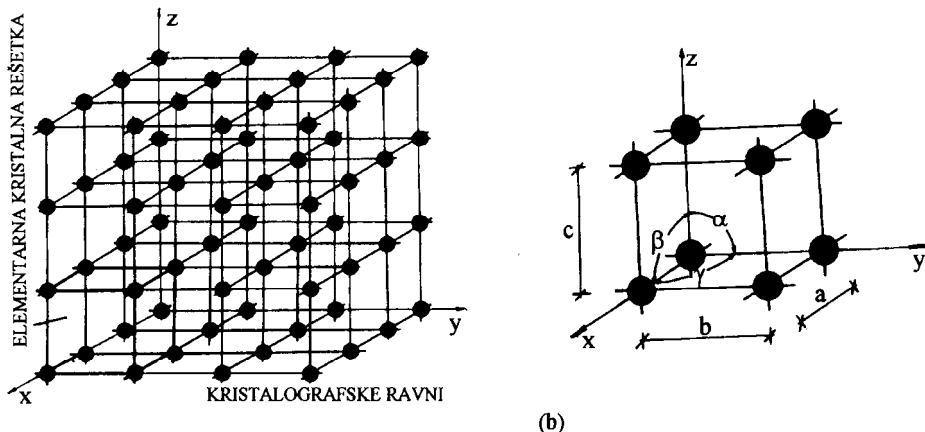
*kristalna struktura, monokristal, polikristal, kvazi izotropnost, amorfna struktura*



Slika 3.1. Struktura čvrstih materijala: (a) monokristal; (b) polikristal; (c) amorfni

## Kristalna struktura

*kristalografske ravni, kristalna rešetka, elementarna kristalna rešetka, parametri elementarne kristalne rešetke*



Slika 3.2 (a) Prostorna kristalna rešetka idealnog kristalnog tela; (b) Parametri elementarne kristalne rešetke

## Kristalni sistemi

Tabela 3.1. Podela kristalnih rešetki po kristalnim sistemima

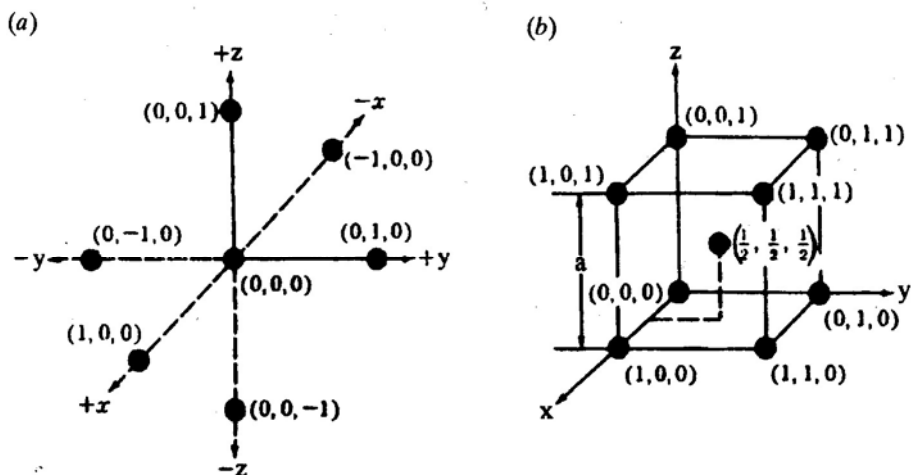
Kristalni sistem	Parametri rešetke	Prostorna rešetka
kubni	$a=b=c$ $\alpha=\beta=\gamma=90^\circ$	prosta kubna prostorno-centrirana površinski-centrirana
tetragonalni	$a=b \neq c$ $\alpha=\beta=\gamma=90^\circ$	prosta tetragonalna prostorno-centrirana
ortorombični	$a \neq b \neq c$ $\alpha=\beta=\gamma=90^\circ$	prosta ortorombična prostorno-centrirana površinski-centrirana bazno-centrirana
romboedarski	$a=b=c$ $\alpha=\beta=\gamma \neq 90^\circ$	prosta romboedarska
heksagonalni	$a=b \neq c$ $\alpha=\beta=90^\circ \quad \gamma=120^\circ$	prosta heksagonalna
monoklinični	$a \neq b \neq c$ $\alpha=\gamma=90^\circ \neq \beta$	prosta monoklinična bazno-centrirana
triklinični	$a \neq b \neq c$ $\alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ$	prosta triklinična

### 3.1 GEOMETRIJA ELEMENTARNIH KRISTALNIH REŠETKI

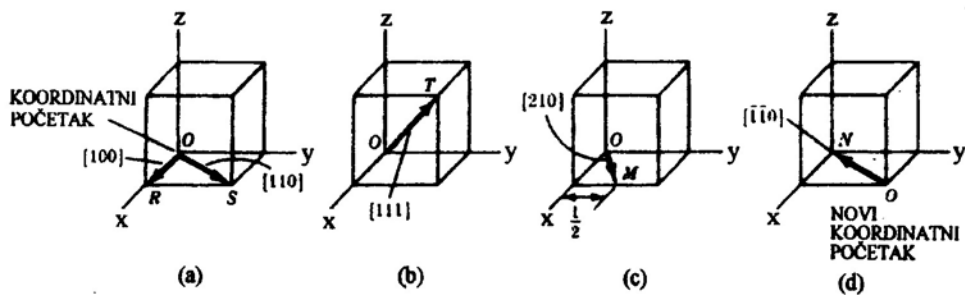
#### 3.1.1. Položaj atoma u kubnoj elementarnoj kristalnoj rešetki

#### 3.1.2 Pravci kod kubne elementarne kristalne rešetke

*kristalografski indeksi pravaca*

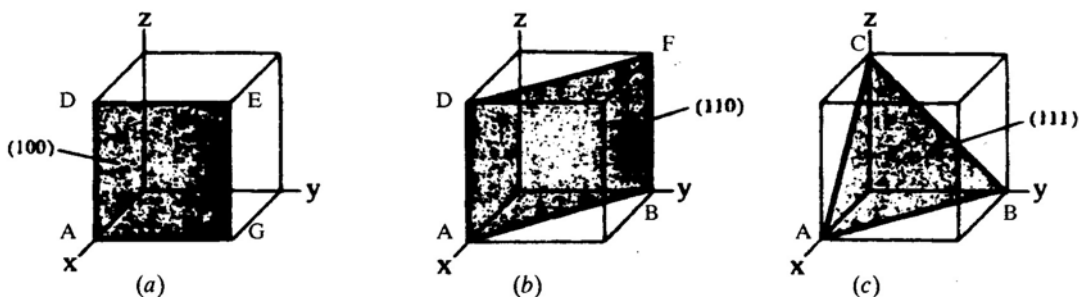


Slika 3.2.1 (a) Dekartov koordinatni sistem za određivanje položaja atoma u elementarnoj rešetki; (b) Položaj atoma kod prostorno-centrirane rešetke.



Slika 3.2.2 Pravci kod kubne elementarne kristalne rešetke  
kristalografski ekvivalentni pravci, familija pravaca

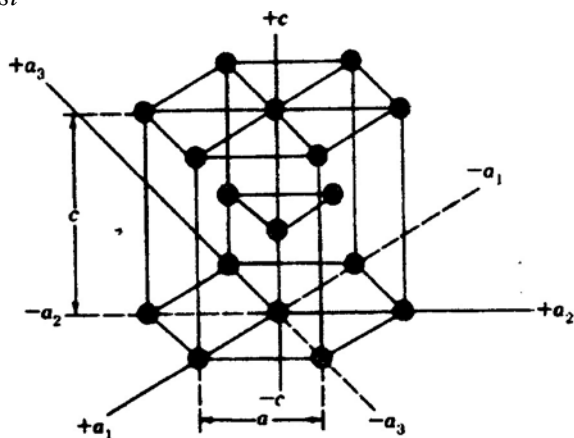
### 3.1.3 Kristalografske ravni kubne elementarne kristalne rešetke. Milerovi indeksi



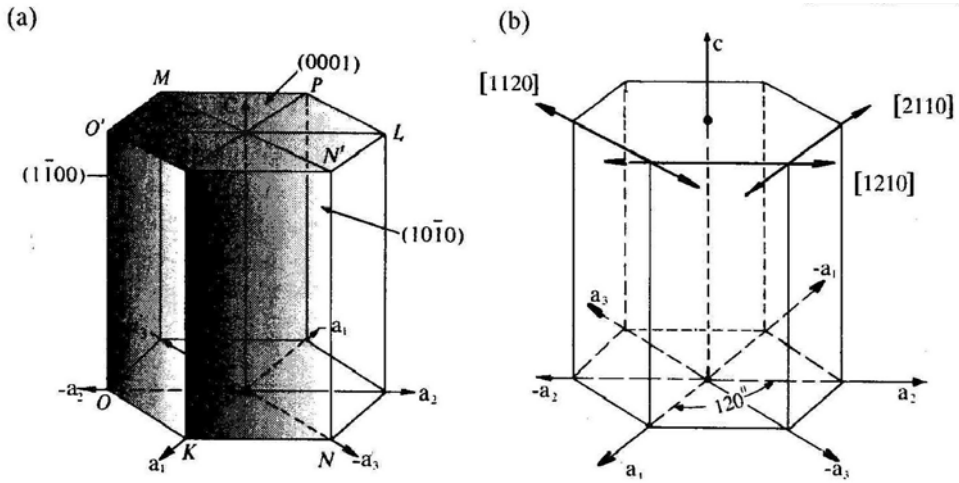
Slika 3.2.3 Milerovi indeksi za neke važnije ravni kubne kristalne rešetke  
kristalografski ekvivalentne ravni, familija ravni

### 3.1.4 Kristalografske ravni i pravci kod heksagonalne kristalne rešetke

Miler-Braveovi indeksi



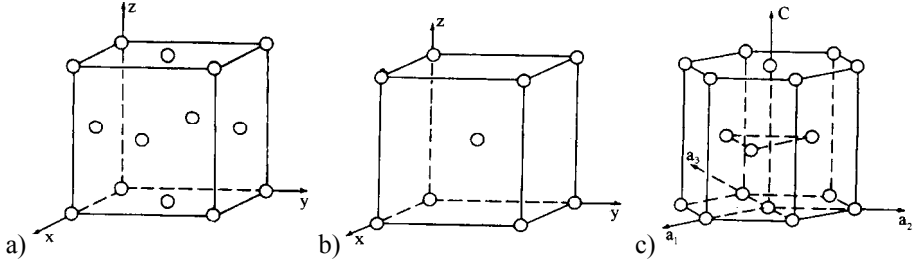
Slika 3.2.4 Četiri koordinatne ose kod heksagonalne kristalne rešetke



Slika 3.2.5 Milerovi indeksi za neke ravni heksagonalne kristalne rešetke.

### 3.2. Kristalna struktura metala

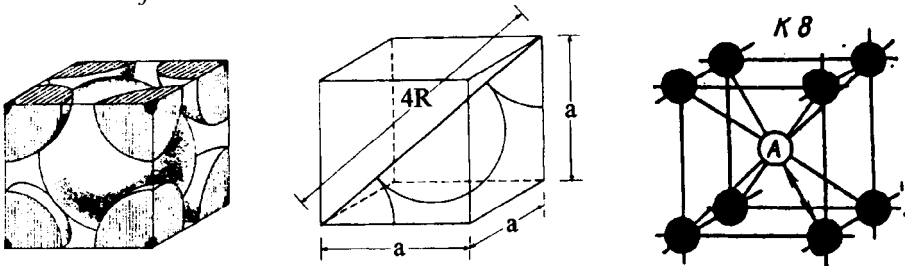
kubnu prostorno centrirana rešetka, kubna površinski-centrirana rešetka, heksagonalna gusto pakovana rešetka



Slika 3.3. Elementarne kristalne rešetke po kojima kristališu metali: (a) kubna prostorno centrirana; (b) kubna površinski centrirana; (c) heksagonalna gusto pakovana

#### Kubna prostorno-centrirana rešetka

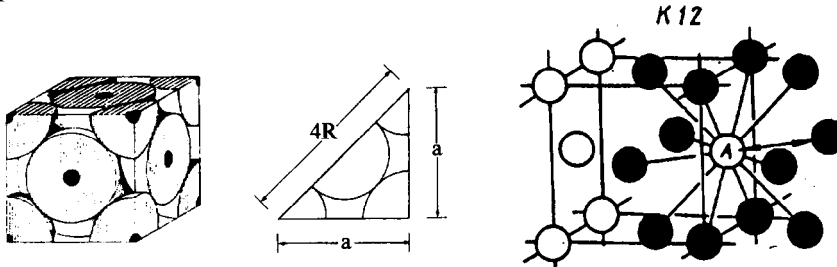
koordinacioni broj



Slika 3.4. Kubna prostorno centrirana rešetka metala

koeficijent ispunjenja rešetke

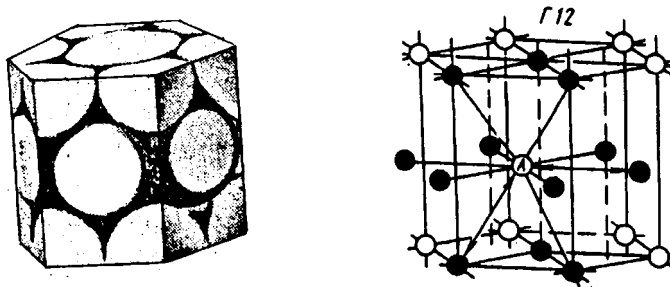
## Kubna površinski centrirana kristalna rešetka



Slika 3.5. Kubna površinski centrirana rešetka metala

koordinacioni broj, koeficijent ispunjenja rešetke

## Heksagonalna gusto pakovana kristalna rešetka



Slika 3.6. Heksagonalna gusto pakovana kristalna rešetka metala

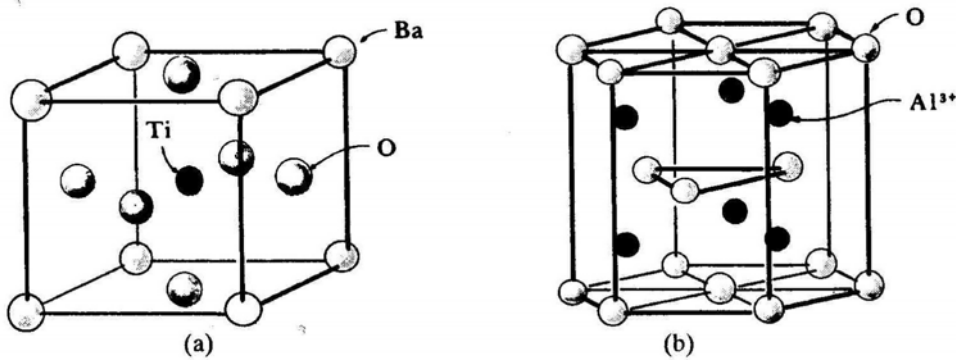
## Polimorfija, Alotropija, Anizotropija

Tabela 3.2. Alotropske promene kristalne rešetke nekih metala.

Metal	Kristalna rešetka na sobnoj temperaturi	Na drugoj temperaturi
Kobalt (Co)	(HGP)	KPC (>427°C)
Gvožđe (Fe)	(KZC)	KPC (912°-1394°C); KZC (>1394°C)
Litijum (Li)	(KZC)	HGP (<-193°C)
Titan (Ti)	(HGP)	KZC (>883°C)
Cirkonijum (Zr)	(HGP)	KZC (>872°C)



### 3.3. STRUKTURA KERAMIČKIH MATERIJALA

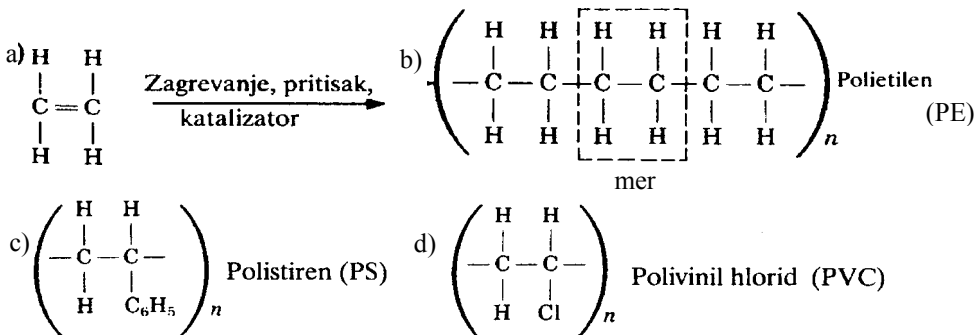


Slika 3.7 Prikaz kristalne strukture keramičkih materijala: (a) BaTiO<sub>3</sub>, i (b) Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

Tabela 3.3 Elektronegativnost nekih elemenata

Element	Si	C	Al	O	Zr	N	B
	1,8	2,5	1,5	3,5	1,4	3,0	2,0

### 3.4. Struktura polimera



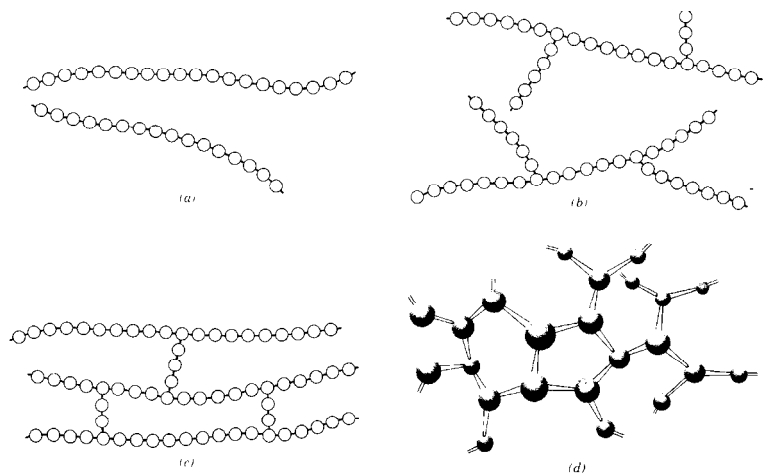
Slika 3.8. Osnovne strukture polimernih molekula: a) molekul etilena, b) polietilen, lanac sačinjen od velikog broja molekula etilena, c), polistiren, d) PVC

#### Molekulska struktura

- Linearni polimeri
- Razgranati polimeri
- Poprečno povezani polimeri
- Umreženi polimeri

Slika. Šematski prikaz:

- a) linearni polimer;
- b) razgranati polimer;
- c) poprečno povezani polimer;
- d) umreženi polimer

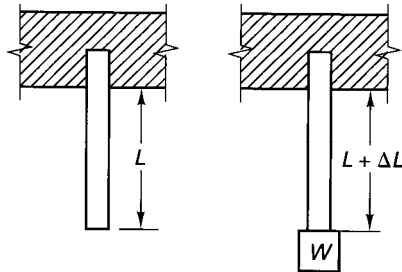


## 4. PONAŠANJE MATERIJALA U USLOVIMA DELOVANJA MEHANIČKOG OPTEREĆENJA

*mehanička ispitivanja*

### 4.1. Napon i deformacija

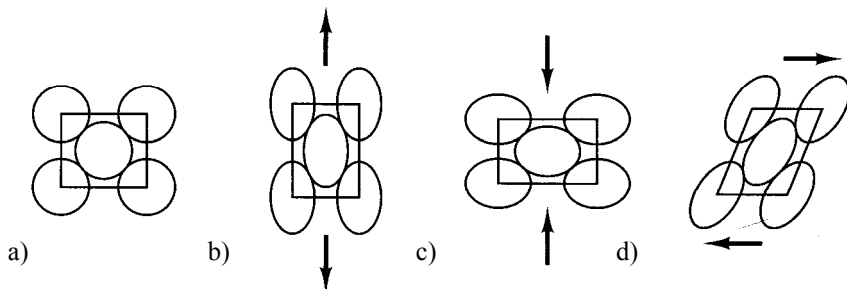
*jedinično izduženje*



Slika 4.1. Zatezno opterećenje i rezultujuće izduženje

*elastična i plastična deformacija*

*Napon, zatezni, pritisni, smicajni, deformacije*



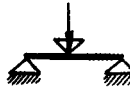




Slika 4.2. Deformacija kristalne rešetke pri dejstvu različitih vrsta sila;  
a) neopterećena; b) zatezanje; c) pritisak; d) smicanje

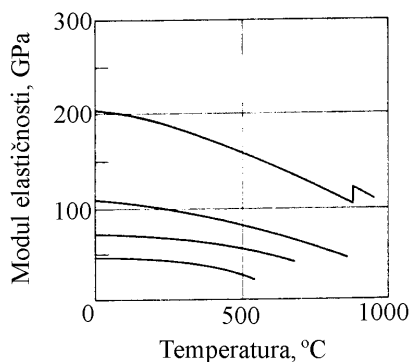
*statičko opterećenje, statičke metode*

*dinamičko opterećenje, dinamičke metode*

Tabela 4.1. Vrste sila, osobine koje se određuju i primena

Karakter dejstva sile	Vrsta sile	Osobine	Primena
 zatezanje	statička	zatezna čvrstoća, izduženje, suženje	svi materijali izuzev kamena
	statička dugotrajna	trajna čvrstoća, trajno izduženje, granica puzanja	metalni materijali na povišenim temperaturama
	udarna	specifičan rad udara pri lomu	retko
	dinamička	dinamička čvrstoća	svi materijali izuzev kamena
 pritisak	statička	pritiska čvrstoća skraćenje, proširenje	građevinski materijali, metali za ležišta
	udarna	specifičan rad udara pri lomu	retko u primeni
	na izvijanje	čvrstoća na izvijanje	delovi konstrukcija
	dinamička	dinamička čvrstoća	sivi liv
 savijanje	statička	savojna čvrstoća, ugib pri lomu, krutost	građevinski materijal drvo, sivi liv
	udarna	specifičan rad savijanja pri lomu	veštački materijali drvo, Zn i legure, odlivci od sivog liva
	udarna pri zarezanoj epruveti	žilavost	drvo, plastični materijali, metali
	dinamička	dinamička savojna čvrstoća	metalni materijali
 uvijanje	statička	uvojna čvrstoća	retko
	udarna	specifičan rad uvijanja pri lomu	alatni čelici
	dinamička	dinamička uvojna čvrstoća	metalni materijali
 smicanje	statička	smicajna čvrstoća	sivi liv, drvo, čelik

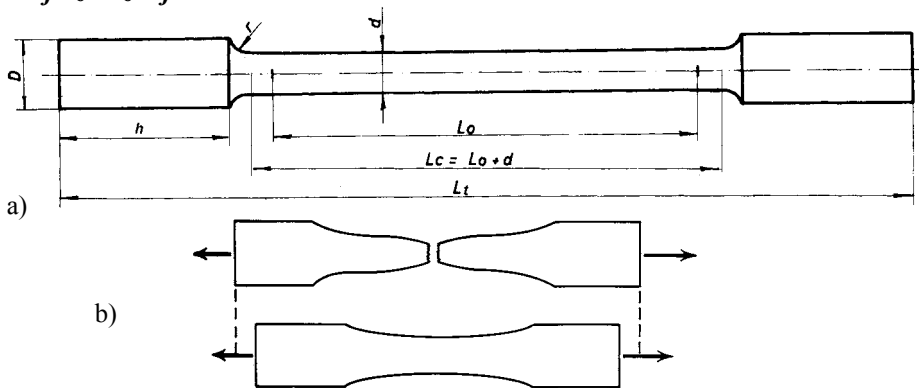
## Elastične deformacije Modul elastičnosti



Slika 4.3. Krive zavisnosti modula elastičnosti  $E$  - temperature  $T$ , za neke metale

## 4.1.1. Statičke metode

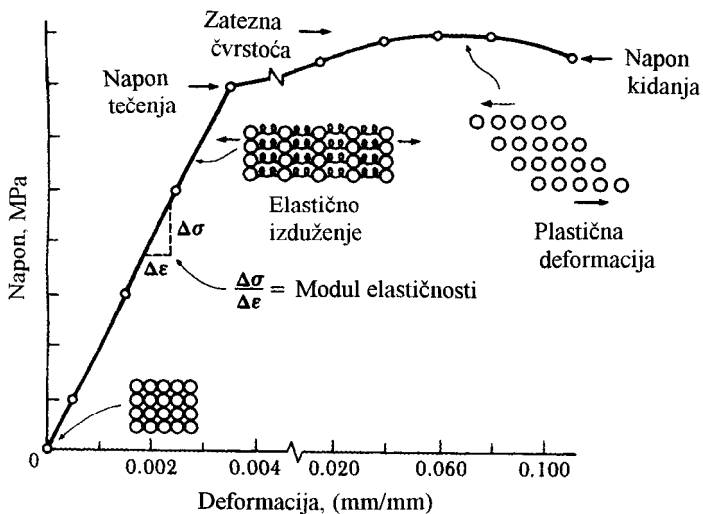
### Ispitivanje zatezanjem



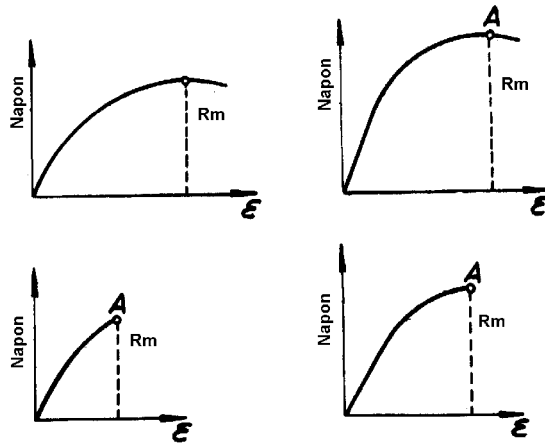
Slika 4.5. Proporcionalna epruveta za ispitivanje zatezanjem a); Lokalizovanje deformacije na mestu loma b)

Tabela 4.2. Podela i opšte dimenzije karakteristike epruveta za ispitivanje zatezanjem

Vrsta epruvete	oblik poprečnog preseka	površina poprečnog preseka, $S_0$	koeficijent proporcionalnosti $L_0$ prema $S_0$	merna dužina, $L_0$
proporcionalna duga epruveta	kružni $d$	$(d)^2\pi / 4$	10	$10d$
proporcionalna kratka epruveta	kružni $d$	$(d)^2\pi / 4$	5	$5d$
proporcionalna duga epruveta	kvadratni, pravougaoni	$a^2$ $a b$	11,3	$11,3\sqrt{S_0}$
proporcionalna kratka epruveta	kvadratni, pravougaoni	$a^2$ $a b$	5,65	$5,65\sqrt{S_0}$
tehničke epruvete	bez posebne pripreme, nema definisanih odnosa površine i dužine epruvete, ispitivanje gotovih elemenata: žica, cevi, lanaca			



Slika 4.7. Dijagram napon – deformacija za meki čelik

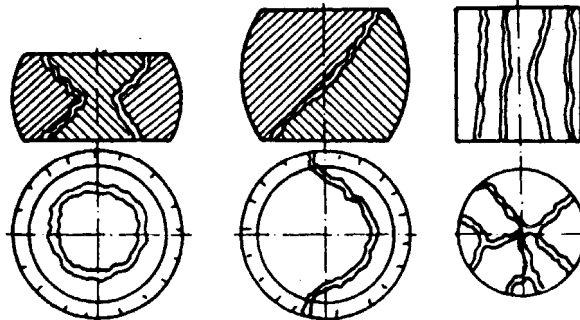


Slika 4.8. Opšti tipovi dijagrama napon-deformacija

zatezna čvrstoća, granica (napon) tečenja, granica elastičnosti, granica proporcionalnosti, modul elastičnosti, trenutno izduženje, jedinično izduženje, procentualno izduženje, procentualno suženje

### *Ispitivanje na pritisak*

granica gnječenja, pritisna čvrstoća, skraćenje, jedinično skraćenje, raširenje





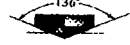

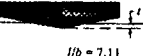





Slika 4.9. Šematski prikaz loma epruveta pri ispitivanju na pritisak

### *Ispitivanje tvrdoće*

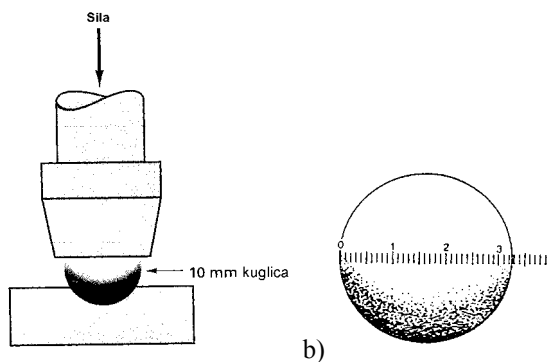
Brinelova, Vickersova, Rokvelova i Knupova metoda

Šorova – skleroskopska metoda, i Kirnerova – duroskopska metoda

Tabela 4.3. Osnovne karakteristike metoda ispitivanjaje tvrdoće

Naziv metode	Utiskivač	Oblik utiskivača		Opterećenje	Obrazac za izračunavanje vrednosti tvrdoće
		Pogled sa strane	Pogled odozgo		
<b>Brinelova</b>	Kuglica od čelika ili tvrdog metala prečnika 1, 2, 2,5, 5 i 10 mm			P	$HB = \frac{2P}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$
<b>Vikersova</b>	Dijamantska piramida			P	$HV = 1.72 \frac{P}{d_1^2}$
Mikrotvrdoća po <b>Knupu</b>	Dijamantska piramida			P	$HK = 14.2 \frac{P}{l^2}$
<b>Rokvelova</b>					
A	Dijamantska kupa			60 kg	HRA= } HRC= } 100 – 500t HRD= }
C				150 kg	
D				100 kg	
B	Čelična kuglica prečnika 1/16in			100 kg	HRB= } HRF= } 130 – 500t HRG= }
F				60 kg	
G				150 kg	
E	Čelična kuglica prečnika 1/8in			100 kg	HRE= }

**Metoda po Brinelu**

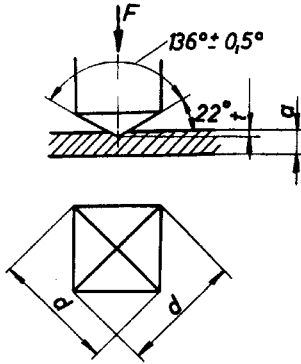


Slika 4.10. Šematski prikaz utiskivanja (a) i površinski izgled otiska (b)

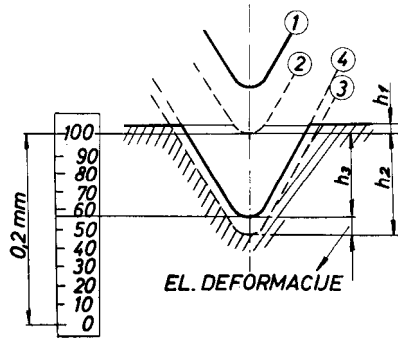
Tabela 4.4: Izbor veličina sile za Brinelovu metodu

Vrsta materijala	Veličina sile
Sivi liv i čelik	30 D <sup>2</sup>
Sivi liv i tvrde legure bakra	10 D <sup>2</sup>
Meke legure Cu, Al i legura za ležišta	5 D <sup>2</sup>
Beli metali i meke legure	2,5 D <sup>2</sup>
Olovo i meke legure	D <sup>2</sup>

## Metoda po Vickersu



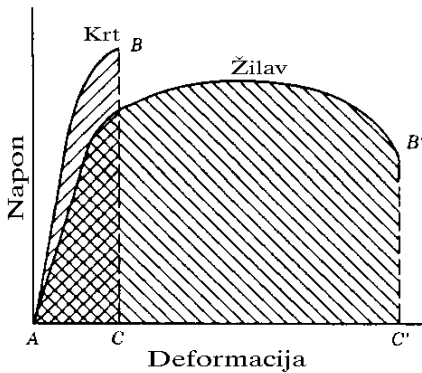
Slika 4.11. Utiskivač i otisak po Vickersovoj metodi



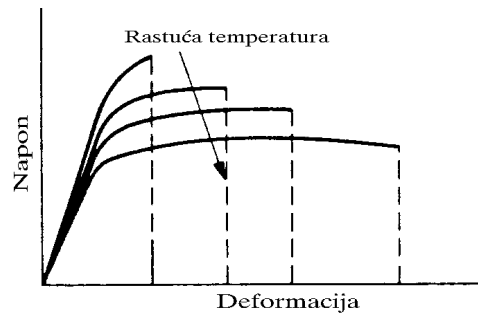
Slika 4.12. Faze utiskivanja kod Rokvel C metode

## Metoda po Rokvelu

### 4.1.2. Dinamička ispitivanja, žilavost



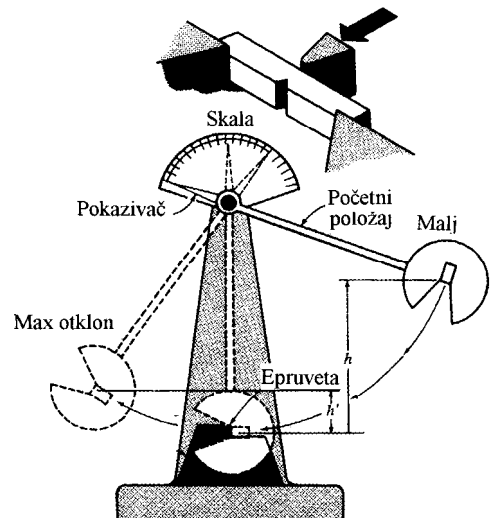
Slika 4.13. Šematski prikaz krivih napon – izduženje za krti i plastičan materijal

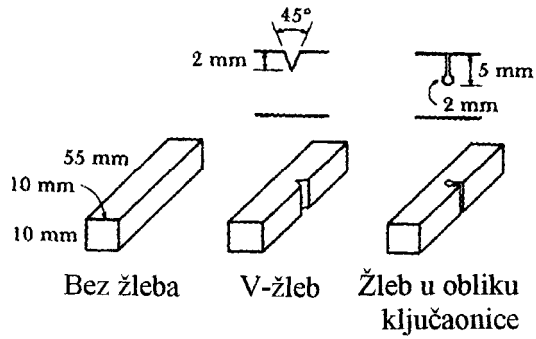


Slika 4.14. Uticaj temperature na krive napon - izduženje

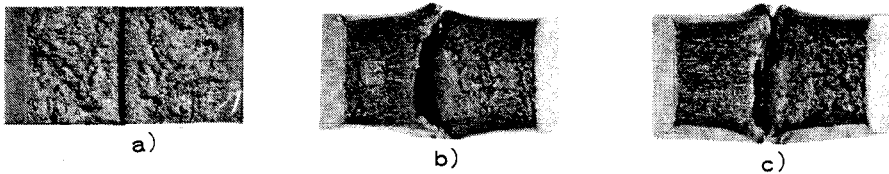
### Ispitivanje udarne žilavosti

Slika 4.15. Šarpijevo klatno





Slika 4.16. Epruvete za ispitivanje žilavosti



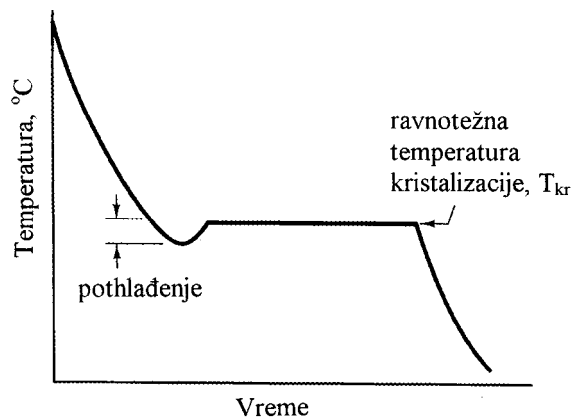
Slika 4.17. Izgled prelomne površine Šarpijeve epruvete a) krti lom; b) mešoviti lom; c) žilav lom

## 4.2. KRISTALIZACIJA METALA

*kristalizacija*

*kriva hlađenja*

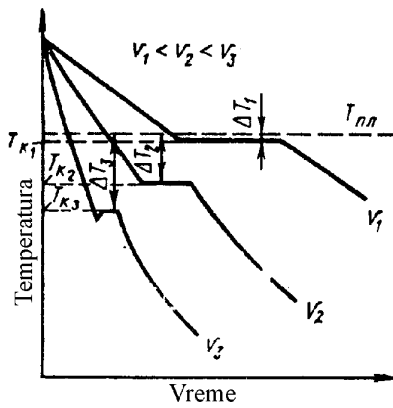
*temperatura kristalizacije*



Slika 4.3. Kriva hlađenja čistog metala

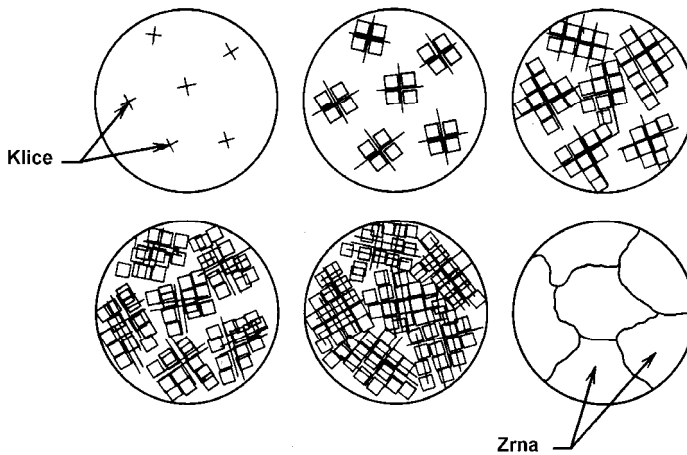
*stepen pothlađenja*



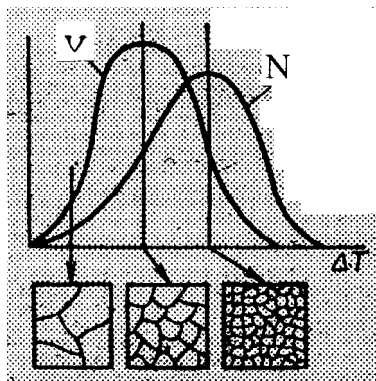


Slika 2.3.7 Kriva hlađenja pri kristalizaciji čvrstog tela

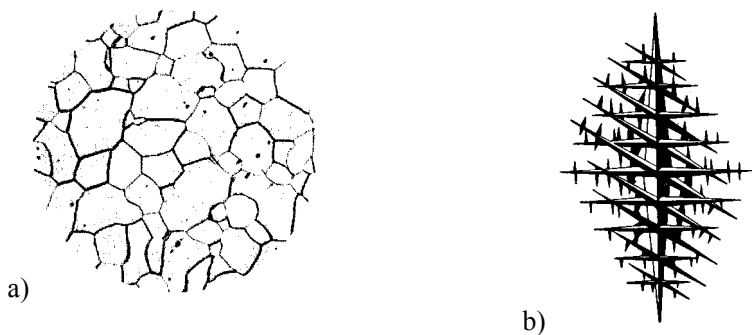
**granica zrna, polikristalna struktura**



Slika 4.4. Šematski prikaz procesa kristalizacije



Slika 4.5. Zavisnost veličine zrna od broja centara kristalizacije (N) i brzine rasta kristala (V)



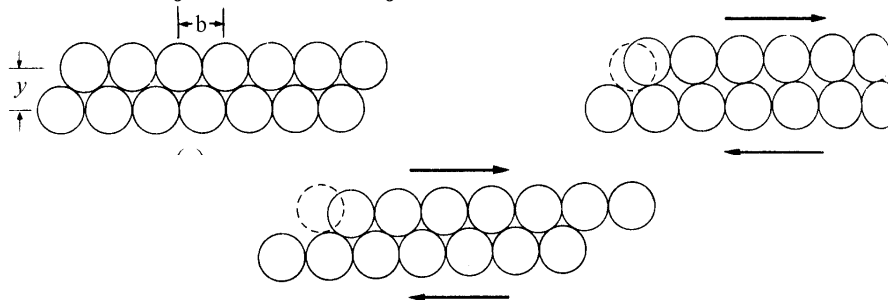
Slika 4.6. Izgled kristalnih zrna: a) poligonalna zrna; b) dendrit

## GREŠKE

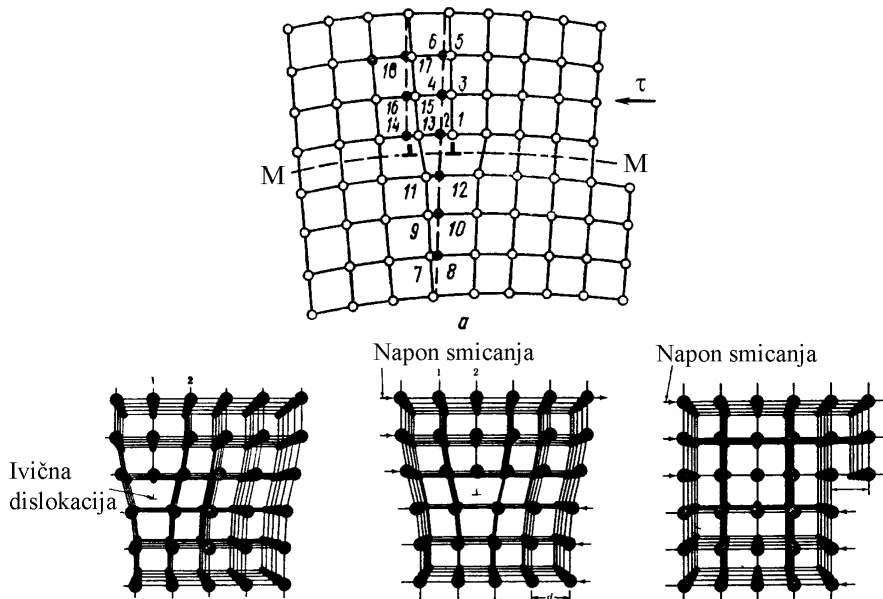
### Plastične deformacije kristala

*mehanizmi plastičnog deformisanja kristalne strukture*

### Plastična deformacija kristala klizanjem

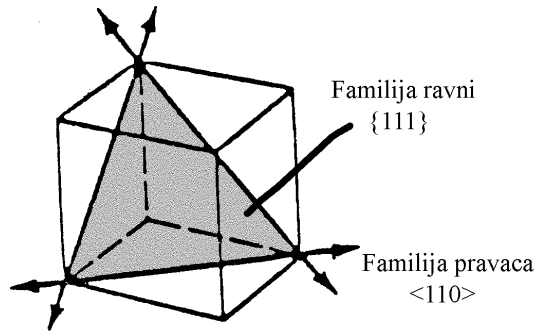


Slika 2.3.14. Pretpostavljeni model plastične deformacije kristala klizanjem



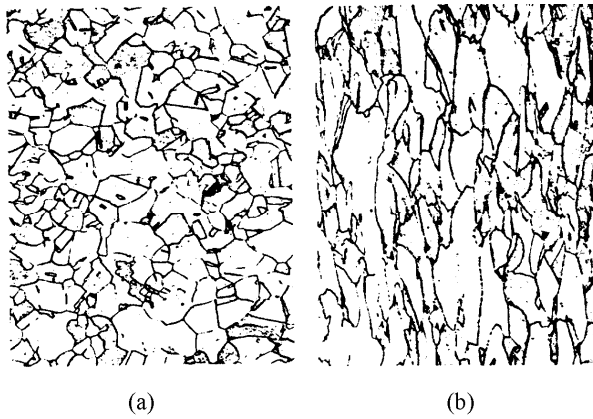
Slika 2.3.15. Kretanje ivične dislokacije: (a) šematski prikaz kretanja dislokacije, (b) faze kretanja dislokacija i njihov izlaz na površinu.

## Sistemi klizanja

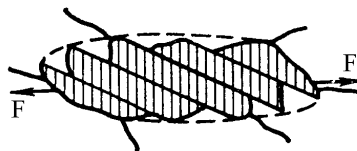


Slika 2.3.16. *Sistemi klizanja kod KPC rešetke*

## Plastična deformacija polikristalnih materijala



Slika 2.3.18 *Upoređenje izgleda metalnog zrna polikristalnog materijala, pre i posle plastične deformacije*



Slika 2.3.19. *Izmena oblika metalnog zrna, kao rezultat klizanja*