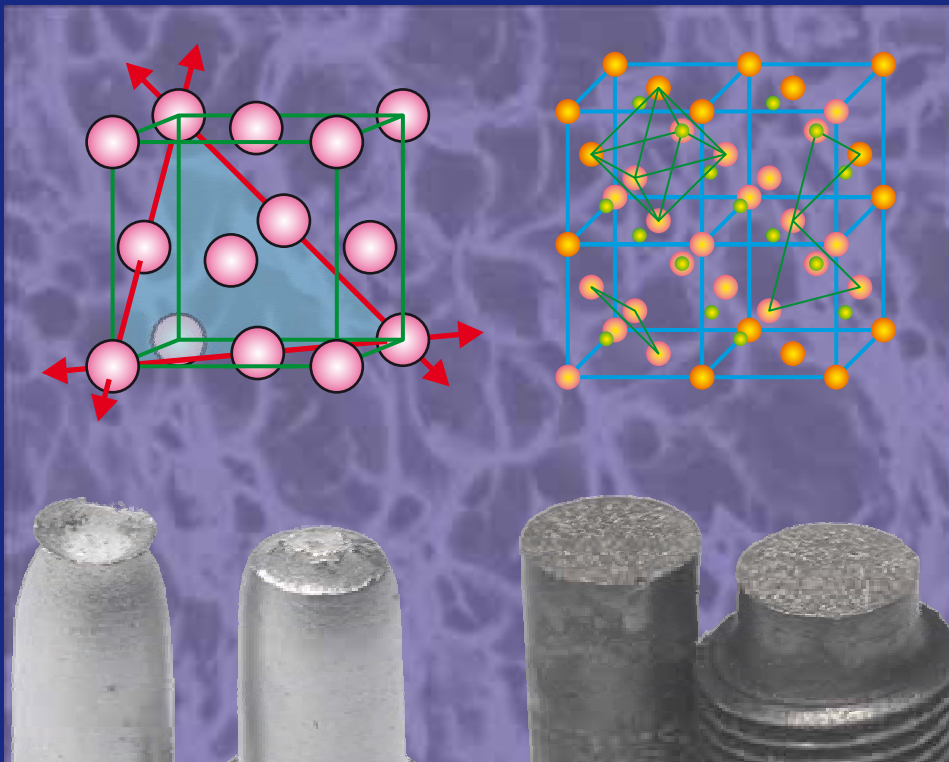


Univerzitet u Beogradu
Mašinski fakultet

Radica Prokić Cvetković
Olivera Popović

MAŠINSKI MATERIJALI 1



Beograd, 2012.

**UNIVERZITET U BEOGRADU
MAŠINSKI FAKULTET**

**Radica Prokić Cvetković
Olivera Popović**

**MAŠINSKI
MATERIJALI**

1



BEOGRAD, 2012.

Univerzitet u Beogradu
Mašinski fakultet

dr Radica Prokić Cvetković, dipl. inž. met., redovni profesor
dr Olivera Popović, dipl. inž. maš., vanredni profesor

MAŠINSKI MATERIJALI 1

I izdanje

RECENZENTI :

Prof. dr Vera Šijački Žeravčić, Mašinski fakultet u Beogradu
Prof. dr Nenad Radović, Tehnološko – metalurški fakultet u Beogradu

IZDAVAČ:

Mašinski fakultet
Univerziteta u Beogradu
ul. Kraljice Marije 16, Beograd
tel. (011) 3370-760
fax. (011) 3370-364

ZA IZDAVAČA:

Prof. dr Milorad Milovančević, dekan

GLAVNI I ODGOVORNI UREDNIK:

Prof. dr Aleksandar Obradović

Odobreno za štampu odlukom dekana Mašinskog fakulteta u Beogradu
broj 220/12 od 27.11.2012.

TIRAŽ:

1000 primeraka

ŠTAMPA:

PLANETA-print
ul. Ruzveltova 10, Beograd
tel./fax. (011) 3088-129

ISBN 978-86-7083-774-4

*Preštampavanje ili fotokopiranje nije dozvoljeno.
Sva prava zadržavaju izdavač i autori.*

Sadržaj

Predgovor	v
Simboli	vii
1 Uvod	1
1.1. Istorijski razvoj materijala	1
1.2. Nauka o materijalima i inženjerstvo materijala	2
1.3. Podela materijala	3
1.4. Svojstva materijala	4
1.5. Metali	5
1.6. Keramika	7
1.7. Polimeri	7
1.8. Kompoziti	9
1.9. Napredni materijali	9
2 Hemijska i fizička svojstva materijala	15
2.1. Struktura atoma	15
2.2. Periodni sistem elemenata	17
2.3. Veze između atoma	18
2.3.1. Jonska veza	18
2.3.2. Kovalentna veza	19
2.3.3. Metalna veza	21
2.3.4. Sekundarne veze	23
2.4. Fizička, električna i magnetna svojstva materijala	24
3 Kristalna struktura materijala	29
3.1. Kristalna i amorfna struktura materijala	29

3.2.	Elementarna kristalna rešetka	31
3.2.1.	Zapreminski centrirana kubna struktura	34
3.2.2.	Površinski centrirana kubna struktura	34
3.2.3.	Gusto složena heksagonalna struktura	35
3.3.	Alotropija i polimorfija	36
3.4.	Položaj atoma, ravni i pravci u kristalnoj strukturi	38
4	Greške u kristalnoj strukturi	45
4.1.	Tačkaste greške	46
4.1.1.	Praznine	46
4.1.2.	Supstitucijski atom	47
4.1.3.	Intersticijski atom	47
4.2.	Linijske greške	48
4.3.	Površinske greške	49
4.3.1.	Zrna i granice zrna	50
4.3.2.	Granice subzrna	52
4.4.	Zapreminske greške	52
5	Plastična deformacija i mehanizmi ojačavanja	53
5.1.	Plastična deformacija monokristala	53
5.1.1.	Klizanje	54
5.1.2.	Dvojnikanje	57
5.2.	Plastična deformacija polikristalnih materijala	57
5.3.	Mehanizmi ojačavanja	58
5.3.1.	Ojačavanje granicama zrna	59
5.3.2.	Deformaciono ojačavanje	60
6	Difuzija	63
6.1.	Mehanizmi difuzije	64
6.2.	Difuzioni fluks	65
6.2.1.	Stacionarna difuzija – I Fikov zakon	66
6.2.2.	Nestacionarna difuzija – II Fikov zakon	67
7	Mehanička svojstva materijala	69
7.1.	Zatezanje	71
7.1.1.	Krive sila – izduženje i napon – deformacija	71

7.1.2.	Svojstva otpornosti	73
7.1.3.	Svojstva deformacije (duktilnost)	77
7.1.4.	Uticaj temperature na krive napon – deformacija	78
7.1.5.	Modul elastičnosti	79
7.2.	Pritisak	81
7.3.	Tvrdoća	83
7.3.1.	Brinel metoda (HB)	83
7.3.2.	Vickers metoda (HV)	84
7.3.3.	Rokvel metoda (HR)	84
7.3.4.	<i>Knoop</i> metoda (HK)	85
7.3.5.	Skleroskopska metoda (HS)	85
7.3.6.	Poldijeva metoda (HP)	85
7.4.	Žilavost	85
8	Oštećenja i lomovi	89
8.1.	Lom kristala	89
8.2.	Krti i duktilni lom	90
8.2.1.	Duktilni lom	92
8.2.2.	Krti lom	94
8.3.	Prelaz iz duktilnog u krti lom – <i>prelazna temperatura</i>	95
8.4.	Lom usled zamora materijala	97
8.4.1.	Određivanje dinamičke čvrstoće	99
8.5.	Lom na povišenim temperaturama – <i>puzanje</i>	103
8.6.	Lom usled korozije	108
9	Metali – teorija legura i dijagrami stanja	113
9.1.	Čvrsti rastvori	113
9.2.	Hemijska i intermetalna jedinjenja – faze	115
9.3.	Mehaničke smeše	116
9.4.	Ravnotežni dijagrami stanja i krive hlađenja	117
9.5.	Binarni dijagrami stanja	118
9.5.1.	Dijagram stanja sa potpunom rastvorljivošću komponentata u čvrstom stanju	120
9.5.2.	Dijagram stanja sa potpunom nerastvorljivošću komponentata u čvrstom stanju	123

9.5.3. Dijagram stanja sa ograničenom rastvorljivošću komponentata u čvrstom stanju	126
10 Keramika	135
10.1. Keramika – struktura, svojstva i primena	135
10.1.1. Struktura keramike	135
10.1.2. Svojstva keramike	136
10.1.3. Primena keramike	138
10.2. Stakla	143
10.2.1. Opšta svojstva stakla	144
10.2.2. Staklokeramika	145
10.3. Ugljenik	146
11 Polimeri	151
11.1. Uvod	151
11.2. Struktura i svojstva polimera	153
11.2.1. Polimerizacija i vrste hemijskih veza	155
11.2.2. Uticajni faktori na svojstva polimera	156
11.2.3. Temperatura ostakljivanja (prelaza u staklasto stanje) . . .	160
11.3. Klasifikacija polimera prema svojstvima i oblasti primene	161
12 Kompozitni materijali	167
12.1. Kompoziti sa polimernom matricom	169
12.1.1. Primena kompozita sa polimernom osnovom	172
12.2. Kompoziti sa metalnom osnovom	174
12.3. Kompoziti sa keramičkom osnovom	175
Pojmovi	177
Literatura	181

Predgovor

Ovaj udžbenik je namenjen studentima koji slušaju predmet **Mašinski materijali 1**, na osnovnim akademskim studijama u drugom semestru sa fondom časova 1+1, a napisan je prema nastavnom planu i programu. Osnovna namena ovog udžbenika je da pomogne studentima u savladavanju osnovnih znanja *iz nauke o materijalima*, koja su im potrebna u toku daljeg studiranja. Pred autorima je bilo velikih dilema kako, da na jasan način izlože veoma komplikovanu i raznovrsnu materiju, imajući u vidu da prethodno stečeno srednjoškolsko znanje studenata, iz fizike i hemije, nije ujednačeno.

Nakon uvodnih razmatranja o istorijskom razvoju i podeli materijala, prelazi se na strukturu atoma i veze između atoma, kao i na kristalnu strukturu materijala i greške u kristalnoj strukturi. Objasnjen je mehanizam difuzije u čvrstom stanju, mehanička svojstva materijala, kao i oštećenja i vrste lomova u materijalima. Takođe je razmatrana teorija legura i osnovne vrste dvokomponentnih dijagrama stanja. Nastavnim planom i programom je predviđeno da se osim metalnih materijala razmatraju, u manjoj meri, polimeri, keramike i kompozitni materijali. Imajući u vidu stalni razvoj materijala kao i pojavu novih inženjerskih materijala, svakako se vodilo računa da se i njima posveti odgovarajuća pažnja.

Na kraju knjige navedena je i literatura koja može da se koristi u cilju proširenja znanja iz oblasti nauke o materijalima.

Tokom pisanja ove knjige ideja je bila da se materija izloži u što jasnijem, a donekle, i popularnom stilu da bi bila dostupna i razumljiva studentima sa manjim obimom predznanja iz ove oblasti. Zbog toga, strogo se vodilo računa da se, gde god je to moguće, reči zamene dobrom slikom ili dijagramom.

Ukoliko uspešno savladaju ovo gradivo studenti mogu biti sigurni da će imati solidnu osnovu za savladavanje gradiva iz određenih predmeta tokom studiranja, kao i da će u praksi primeniti stečeno znanje.

Autori se zahvaljuju recenzentima i kolegama na korisnim primedbama i sugestijama. Posebno se zahvaljujemo profesorima dr Veri Šijački Žeravčić i dr Nenadu Radoviću koji su svojim korisnim predlozima i sugestijama doprineli poboljšanju

kvaliteta knjige. Takođe se zahvaljujemo dr Draganu Cvetkoviću za pruženu moralnu podršku i nesebičnu pomoć pri tehničkoj obradi.

Svojim studentima želimo puno uspeha u životu i daljem studiranju!

Beograd, 2012. godine

Autori

Simboli

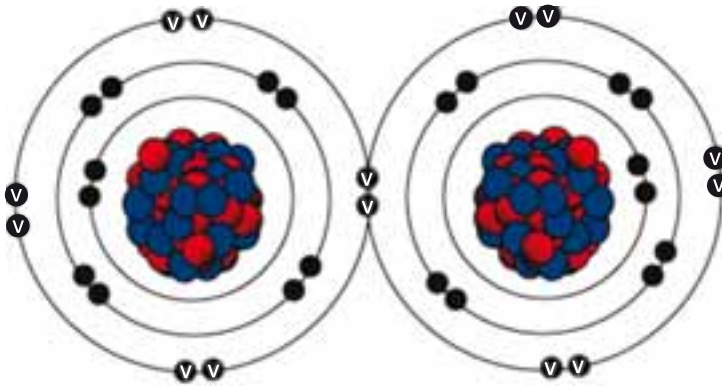
Navedeni su simboli po abecednom redu i glave i poglavlja u kojima su objašnjeni.

A	.....	atomska masa (2.1)
A	.....	procentualno izduženje (7.1.3)
a	.....	dužina stranice elementarne rešetke duž x ose (3.2)
A, B, C	.....	čisti metali (9.1)
A _c	.....	procentualno skraćenje (7.2)
b	.....	dužina stranice elementarne rešetke duž y ose (3.2)
c	.....	dužina stranice elementarne rešetke duž z ose (3.2)
c	.....	koncentracija (6.2)
c	.....	specifična toplota (2.4)
D	.....	koeficijent difuzije (6.2.1)
d	.....	prečnik epruvete (7.1)
d	.....	prečnik zrna (5.3.1)
E	.....	eutektikum (9.5.2)
E	.....	<i>Young</i> – ov modul elastičnosti (7.1.5)
F	.....	sila (7)
F _{ce}	.....	sila na granici gnječenja (7.2)
F _{cm}	.....	maksimalna pritisna sila (7.2)
F _{cp0.2}	.....	konvencionalna sila na granici gnječenja (7.2)
F _e	.....	sila na granici tečenja (7.1.2)
f _L	.....	udeo rastopa (9.5.1)
F _m	.....	maksimalna sila (7.1.2)

$F_{p0.2}$	konvencionalna sila na granici tečenja (7.1.2)
f_s	udeo čvrste faze (9.5.1)
GSH	gusto složena heksagonalna rešetka (3.2)
HB	tvrdoća po Brinel metodi (7.3.1)
HBS	tvrdoća po Brinelu određena sa čeličnim utiskivačem (7.3.1)
HBW	tvrdoća po Brinelu određena sa utiskivačem od tvrdog metala (7.3.1)
HK	tvrdoća po <i>Knoop</i> metodi (7.3.4)
HP	tvrdoća po Poldijevoj metodi (7.3.6)
HRB, HRC	tvrdoća po Rokvel metodi (7.3.3)
HS	tvrdoća po skleroskopskoj metodi (7.3.5)
HV	tvrdoća po Vickers metodi (7.3.2)
J	difuzioni fluks (6.2)
k	<i>Hall – Pechov</i> faktor (5.3.1)
KB	koordinacioni broj – broj najbližih susednih atoma (3.2)
L	rastop (9.4)
l	trenutna dužina epruvete (7)
l_0	početna merna dužina epruvete (7)
l_u	dužina epruvete posle kidanja (7.1.3)
n	broj atoma u elementarnoj ćeliji (3.2)
N	broj ciklusa (8.4.1)
N	broj neutrona (2.1)
N_d	granični broj ciklusa (8.4.1)
P	gustina slaganja atoma (3.2)
PCK	površinski centrirana kubna rešetka (3.2)
R	poluprečnik atoma (3.2.1)
R_{ce}	granica gnječenja (7.2)
R_{cm}	pritisna čvrstoća (7.2)
$R_{cp0.2}$	konvencionalna granica gnječenja (7.2)
R_d	dinamička čvrstoća (8.4.1)
R_e	napon tečenja (7.1.2)

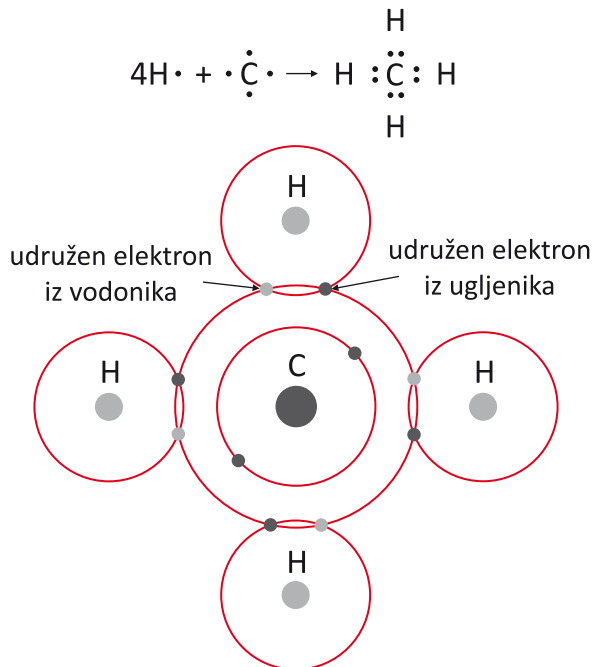
R_{eH}	gornji napon tečenja (7.1.2)
R_{eL}	donji napon tečenja (7.1.2)
R_k	napon kidanja (7.1.2)
R_m	zatezna čvrstoća (7.1.2)
$R_{p0.2}$	konvencionalni (tehnički) napon tečenja (7.1.2)
S	čvrsta faza (9.4)
S_0	početna površina poprečnog preseka (7)
S_u	površina poprečnog preseka epruvete posle kidanja (7.1.3)
T	temperatura (8.5)
t	vreme (6.2.1, 8.5)
T_g	temperatura ostakljivanja (10.2, 11.2.3)
T_t	temperatura topljenja (2.4)
V_p	brzina puzanja (8.5)
Z	procentualno suženje poprečnog preseka (7.1.3)
Z	broj protona (2.1)
Z_c	procentualno proširenje (7.2)
ZCK	zapreminski centrirana kubna rešetka (3.2)
α	ugao elementarne rešetke između y i z ose (3.2)
$\alpha, \beta, \gamma, \delta$	čvrsti rastvori (9.1)
α_{Fe}	železo sa ZCK rešetkom (3.3)
β	ugao elementarne rešetke između x i z ose (3.2)
γ	ugao elementarne rešetke između x i y ose (3.2)
γ_{Fe}	železo sa PCK rešetkom (3.3)
δ_{Fe}	železo sa ZCK rešetkom (3.3)
Δl	izduženje (7)
ε	deformacija (7)
λ	toplotna provodljivost (2.4)
ρ	gustina (2.4)
ρ	specifični električni otpor (2.4)
σ	napon (7)

σ	specifična električna provodljivost (2.4)
σ_0	napon potreban da izazove klizanje unutar zrna (5.3.1)
σ_a	amplitudni napon (8.4.1)
σ_d	donji napon, najmanji napon u ciklusu (8.4.1)
σ_g	gornji napon, najveći napon u ciklusu (8.4.1)
σ_{max}	teorijska kohezijska čvrstoća (8.1)
σ_{SR}	srednji napon (8.4.1)
σ_y	napon tečenja po <i>Hall – Pechov</i> – o j jednačini (5.3.1)



Slika 2.6. Šematski prikaz obrazovanja zajedničkog elektronskog para

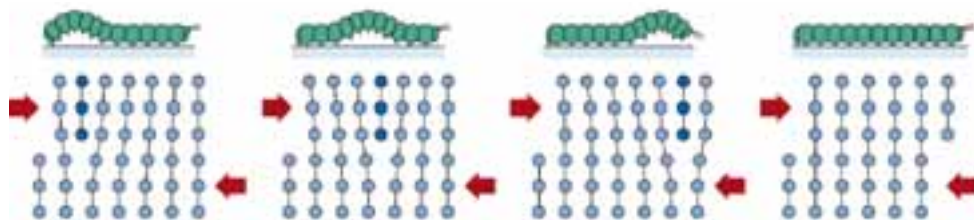
Svaki atom učestvuje u vezi bar sa jednim valentnim elektronom pri čemu se obrazuje elektronski par koji podjednako pripada i jednom i drugom atomu. Kovalentna veza je šematski prikazana na slici 2.7 na primeru nastajanja molekula metana CH_4 (tačkicama su prikazani valentni elektroni).



Slika 2.7. Šematski prikaz kovalentne veze u molekulu CH_4

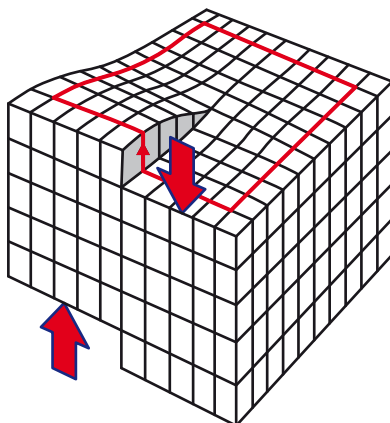
Atom ugljenika ima četiri valentna elektrona dok atomi vodonika imaju po jedan. Atom ugljenika udružuje svoja četiri valentna elektrona sa četiri atoma vodonika.

grbe ka drugom kraju. Sila neophodna da pomeri tepih na ovaj način je mnogo manja od one koja je potrebna da se tepih vuče duž poda.



Slika 4.7. Pomeranje jedne ivične dislokacije kroz kristalnu rešetku pod dejstvom smicajnog napreznja

Postojanje dislokacija u kristalima daje objašnjenje neslaganja između stvarne i teorijske čvrstoće metala. U idealnoj rešetki nema dislokacija, niti klizanja, pa je tangencijalni napon koji treba da raskine sve veze između atoma jednak teorijskoj čvrstoći. Nasuprot tome, kod realnih kristala ravan klizanja sadrži dislokaciju koja zahteva manji tangencijalni napon koji dovodi do klizanja.



Slika 4.8. Zavojna dislokacija

Zavojne dislokacije su tako nazvane zato što su atomi koji je čine pomereni tako da obrazuju zavojnicu, slika 4.8.

4.3. Površinske greške

Površinske greške su dvodimenzionalne greške, i u njih spadaju: **granice zrna** i **granice subzrna**. Nastaju kao posledica promena u slaganju atomskih ravni duž granice metalnog zrna u toku različitih procesa (očvršćavanje, deformacija itd.)

Kod materijala kod kojih nije izražena linearna zavisnost promene napona i deformacije, slika 7.14b, modul elastičnosti se menja u zavisnosti od napona i može se izraziti koeficijentom pravca tangente na krivu u tački koja odgovara datom naponu. U ovom slučaju modul elastičnosti nije konstantna veličina već opada sa porastom napona.

7.2. Pritisak

Za razliku od ispitivanja zatezanjem koje je najčešće mehaničko ispitivanje, ispitivanje pritiskom se retko izvodi, i uglavnom je ograničeno na legure koje će pri radu biti izložene pritiskim opterećenjima. Ispitivanju pritiskom se uglavnom podvrgavaju krti materijali kao što su sivi liv, mesing, beton itd., koji se pod dejstvom sile pritiska lome pa se mogu odrediti *svojstva otpornosti* (granica gnječenja i pritiska čvrstoća), kao i *svojstva deformacije* (procentualno skraćenje i procentualno proširenje).

Svojstva otpornosti:

$$\text{Pritisna čvrstoća, } R_{cm} = \frac{F_{cm}}{S_0}, \text{ [MPa]} \quad (7.9)$$

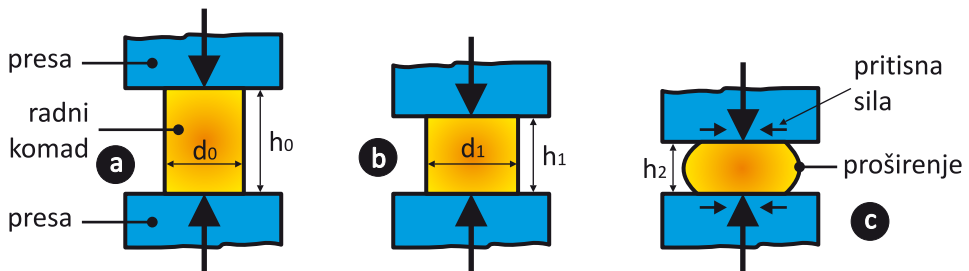
$$\text{Granica gnječenja, } R_{ce} = \frac{F_{ce}}{S_0}, \text{ odnosno, } R_{cp0.2} = \frac{F_{cp0.2}}{S_0} \text{ [MPa]} \quad (7.10)$$

Svojstva deformacije:

$$\text{Procentualno skraćenje, } A_c = \frac{l_0 - l_u}{l_0} \times 100, \text{ [%]} \quad (7.11)$$

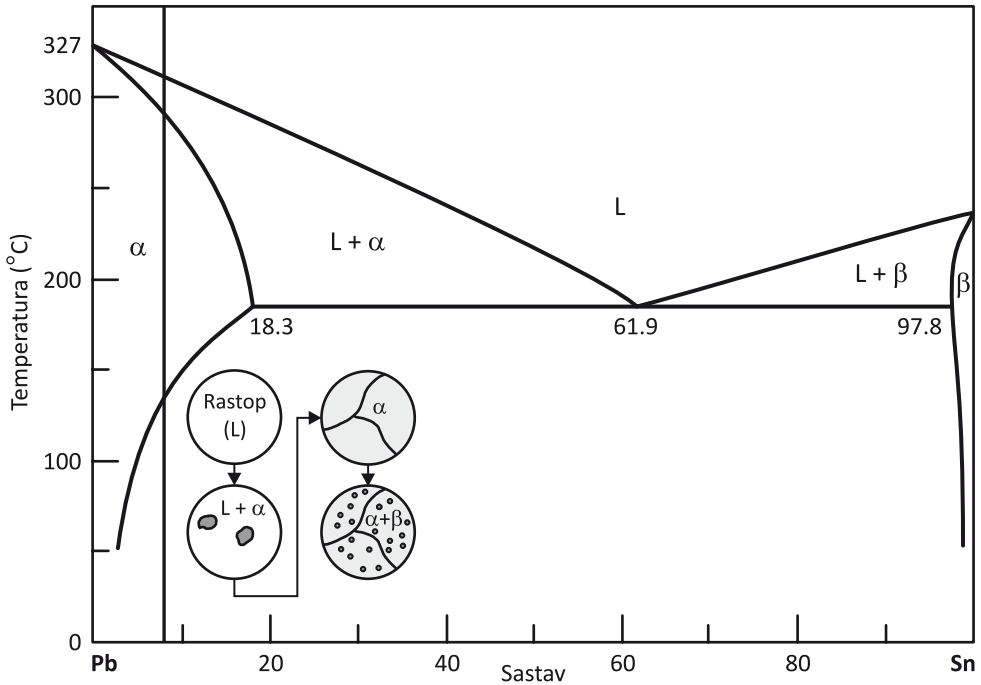
$$\text{Procentualno proširenje, } Z_c = \frac{S_u - S_0}{S_0} \times 100, \text{ [%]} \quad (7.12)$$

Na slici 7.15 je šematski prikazano ispitivanje na pritisak.

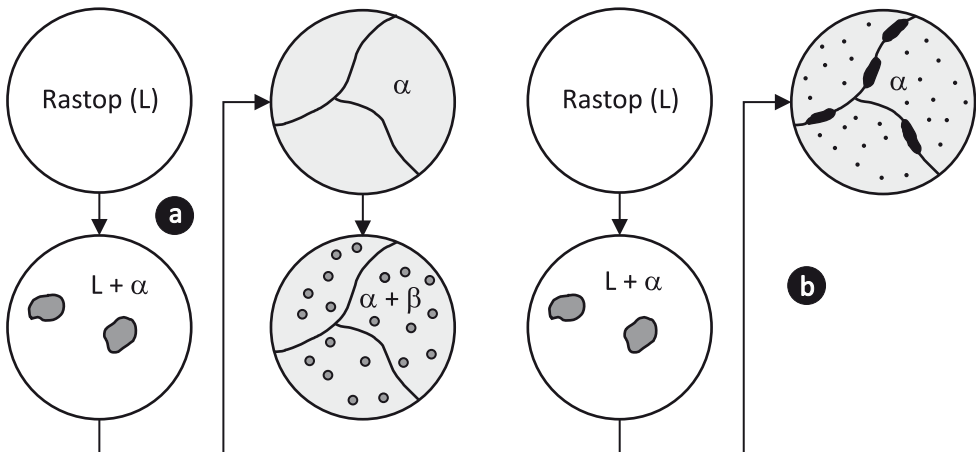


Slika 7.15. Šematski prikaz ispitivanja na pritisak

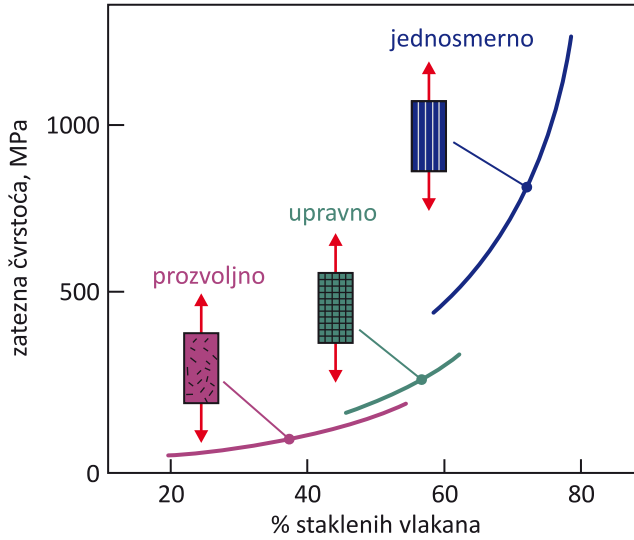
izlučivanja sekundarnih faza – taloženja najpre po granicama zrna, a pri nižim temperaturama unutar zrna, slika 9.24.



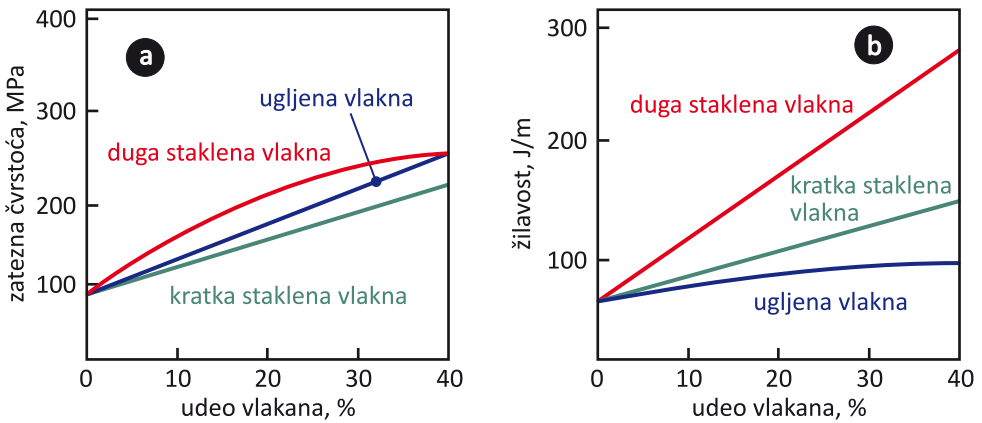
Slika 9.23. Ravnotežni dijagram Pb – Sn sa ograničenom rastvorljivošću komponentata u čvrstom stanju



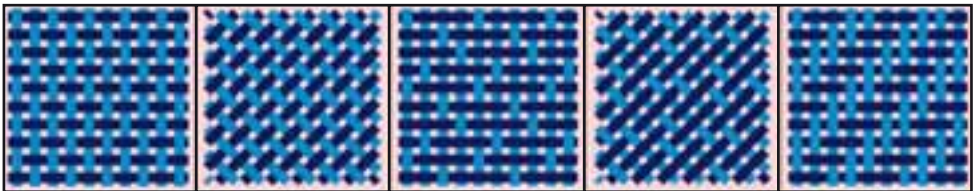
Slika 9.24. Mehanizam izdvajanja taloga:
a) unutar zrna; b) po granicama zrna i unutar zrna.



Slika 12.3. Zavisnost zatezne čvrstoće kompozita sa poliestarskom osnovom ojačanom staklenim vlaknima od sadržaja i orijentacije vlakana



Slika 12.4. Uticaj vrste, dužine i zapreminskog udela vlakana na: a) zateznu čvrstoću i b) žilavost kompozita sa osnovom od najlona (6,6).



Slika 12.5. Primeri različitih vrsta tkanja vlakana