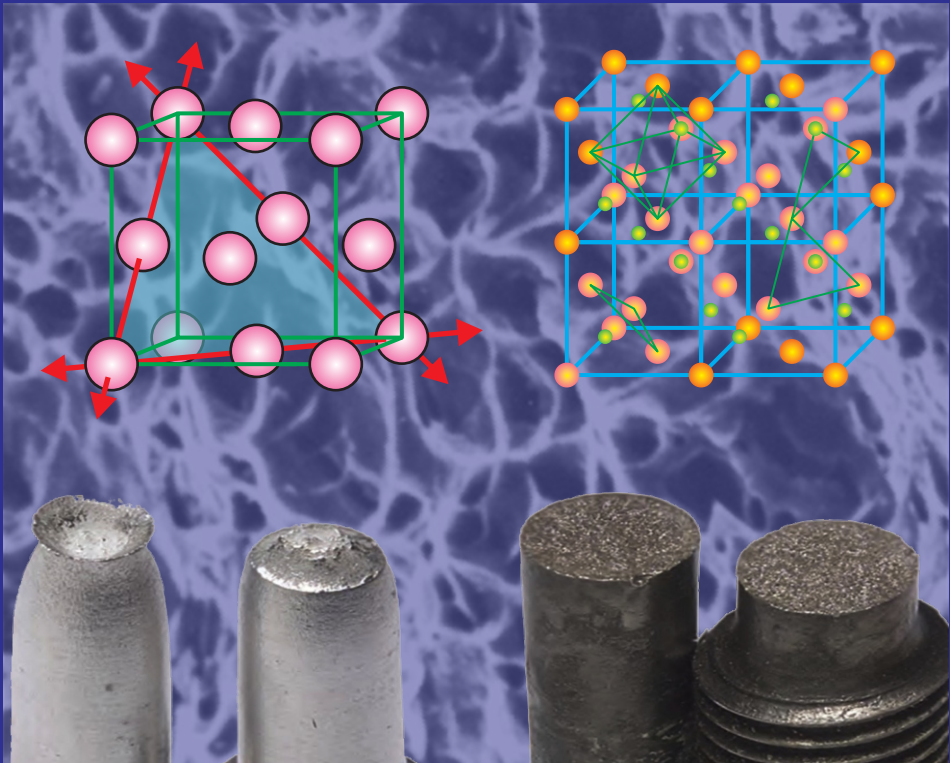


Univerzitet u Beogradu
Mašinski fakultet

Radica Prokić Cvetković
Olivera Popović

MAŠINSKI MATERIJALI 1



Beograd, 2022.

**UNIVERZITET U BEOGRADU
MAŠINSKI FAKULTET**

**Radica Prokić Cvetković
Olivera Popović**

**MAŠINSKI
MATERIJALI**

1



BEOGRAD, 2022.

Univerzitet u Beogradu
Mašinski fakultet

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

MAŠINSKI MATERIJALI 1

III izdanje

RECENZENTI :

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

IZDAVAČ:

Univerzitet u Beogradu
Mašinski fakultet
ul. Kraljice Marije 16, Beograd
tel. (011) 3370-760
fax. (011) 3370-364
www.mas.bg.ac.rs

ZA IZDAVAČA:

Prof. dr Vladimir Popović, dekan

GLAVNI I ODGOVORNI UREDNIK:

Prof. dr Milan Lečić

Odobreno za štampu odlukom dekana Mašinskog fakulteta u Beogradu
broj 02/2022 od 23.02.2022.

TIRAŽ:

1000 primeraka

ŠTAMPA:

"Planeta-print", 11000 Beograd
www.planeta-print.rs

ISBN 978-86-6060-111-9

© Sva prava zadržavaju autori. Nije dozvoljeno da, bez prethodne pismene dozvole autora, bilo koji deo ovog praktikuma bude snimljen, emitovan ili reprodukovan, uključujući, ali ne i ograničavajući se na fotokopiranje, fotografiju, magnetni ili bilo koji drugi vid zapisa.

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.	Vikers 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 komponenata 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, 2022. godine

Autori



Slika 1.9. Predmeti izrađeni od metalnih materijala

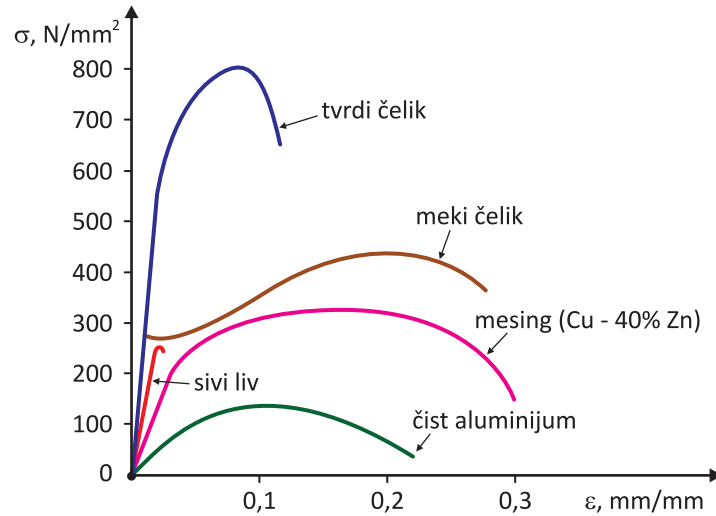
1.6. Keramika

Keramike su jedinjenja metala i nemetala, najčešće oksidi, nitridi i karbidi. Najčešće se pominju neki od keramičkih materijala kao što su: aluminijum oksid (Al_2O_3), silicijum karbid (SiC), silicijum dioksid (SiO_2), silicijum nitrid (Si_3N_4). Takozvane tradicionalne keramike se sastoje od minerala gline (porcelan), a tu spadaju i cement i staklo. Keramički materijali poseduju krutost i čvrstoću, slično kao kod metalnih materijala, dok su im duktilnost i otpornost na lom veoma male. Slabi su provodnici struje i toplote, ali su otporniji na povišene temperature i agresivne sredine od metala i polimera. Poseduju znatno veću krtost od metalnih materijala, pa su osetljivi na koncentraciju napona. Na slici 1.10 su prikazani različiti predmeti izrađeni od keramičkih materijala.

1.7. Polimeri

Plastika i guma su dve najpoznatije grupe polimera. To su u stvari organska hemijska jedinjenja na bazi ugljenika, vodonika i drugih nemetala (O, N i Si). Sastoje se od velikog broja molekula međusobno povezanih u dugačke lance. Najpoznatiji polimeri su: polietilen (PE), polivinil hlorid (PVC), najlon, polistiren (PS). Mehanička svojstva, kao na primer krutost i čvrstoća, su dosta niža nego kod metalnih i keramičkih materijala. Nasuprot tome, veoma su duktilni i savitljivi. Hemijski su

Na slici 7.9 prikazane su $\sigma - \epsilon$ krive za neke metalne materijale.



Slika 7.9. Dijagrami $\sigma - \epsilon$ za različite metalne materijale

7.1.3. Svojstva deformacije (duktilnost)

Važno svojstvo materijala koje se određuje prilikom ispitivanja zatezanjem je duktilnost. To je u stvari stepen plastične deformacije materijala pre nego što dođe do loma. Postoje dva kvantitativna pokazatelja duktilnosti, koja nazivamo svojstvima deformacije, i to su:

- procentualno izduženje, A i
- procentualno suženje poprečnog preseka epruvete, Z .

Procentualno izduženje, A

$$A = \frac{l_u - l_0}{l_0} \times 100, \quad [\%] \quad (7.5)$$

gde su l_0 i l_u početna merna dužina epruvete i dužina epruvete nakon loma (kao što je prikazano na slici 7.10).

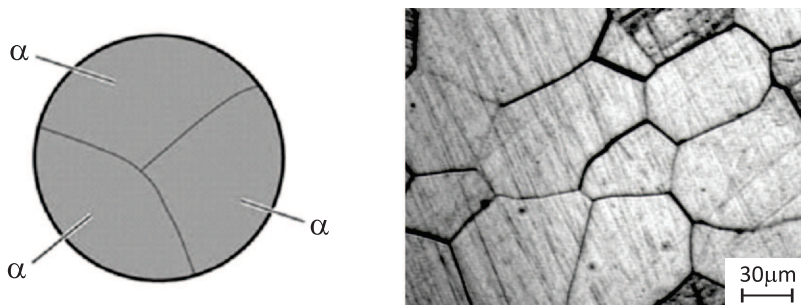
Procentualno suženje poprečnog preseka epruvete, Z

$$Z = \frac{S_0 - S_u}{S_0} \times 100, \quad [\%] \quad (7.6)$$

gde su S_0 i S_u početna i krajnja površina poprečnog preseka.

Procentualno izduženje i procentualno suženje su, uglavnom, međusobno povezani kao što je prikazano na slici 7.11 za neke metale.

utiče na povećanje čvrstoće i tvrdoće (u odnosu na čist metal), odnosno do ojačavanja. Ovaj vid ojačavanja se zove **ojačavanje čvrstih rastvora (rastvarajuće ojačavanje)**.



Slika 9.2. Šematski prikaz α čvrstog rastvora

9.2. Hemijska i intermetalna jedinjenja – faze

Hemijska jedinjenja su složene strukture koja mogu da se sastoje od dva metala, metala i metaloida, kao i metala i nemetala, pri čemu između njih ne mora da bude zadovoljen stehiometrijski odnos. Rastvoreni atomi i atomi rastvarača prisutni su u određenim proporcijama, a tip veze može da bude u opsegu od metalne do jonske. Ove faze se obrazuju ako je izražena sklonost atoma ka vezivanju i povoljni su geometrijski uslovi.

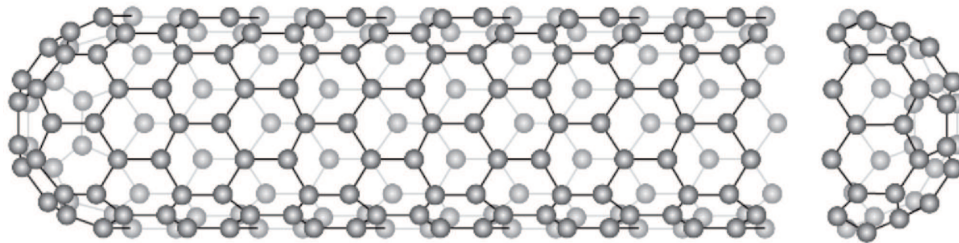
Intermetalna jedinjenja nastaju između atoma metala i odlikuju se čvrstoćom, tvrdoćom i krta su. Kristalna struktura intermetalne faze se najčešće razlikuje od strukture polaznih metala. Tako na primer:

- $MgCu_2$ ima kubnu rešetku dok polazne komponente imaju heksagonalnu gusto složenu (Mg), odnosno površinski centriranu kubnu rešetku (Cu);
- $CuAl_2$ ima tetragonalnu rešetku, dok polazne komponente imaju površinski centriranu kubnu rešetku (Cu i Al).

Zbog visoke temperature topljenja, velike čvrstoće na povišenim temperaturama, dobre otpornosti na oksidaciju i relativno male gustine, intermetalna jedinjenja su dobri kandidati za napredne materijale za izradu gasnih turbina. Tipičan primer su aluminidi titana (Ti_3Al), nikla (Ni_3Al) i železa (Fe_3Al).

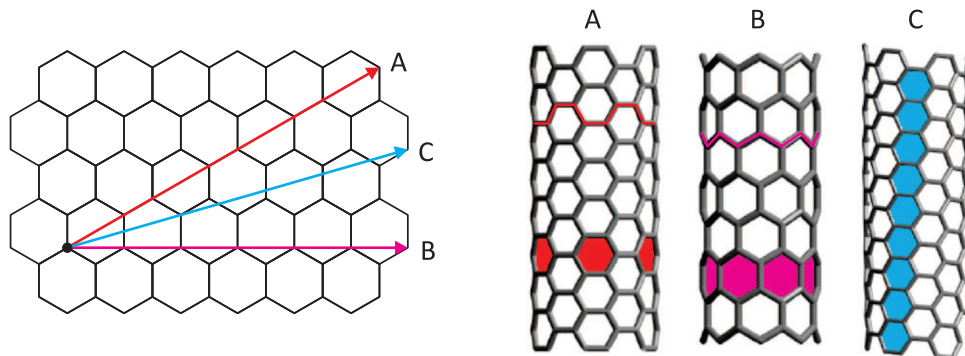
Primer nastajanja hemijskog jedinjenja između metala i nemetala je cementit Fe_3C koje se sastoji od Fe i 6,67%C. Čisto Fe na sobnoj temperaturi ima zapreminski centriranu kubnu rešetku, a ugljenik u obliku grafita ima prostu heksagonalnu, dok cementit ima ortorombičnu rešetku, slika 9.3.

molekulom fulerena, slika 10.20. Prečnik ove cevi je nekoliko nanometara i dužine nekoliko mikrometara. Nanocevi su izuzetno čvrste i krute, relativno duktilne. Njihova zatezna čvrstoća je $50 \div 200$ GPa i to je materijal sa najvećom poznatom zateznom čvrstoćom. Imaju malu gustinu, pa se koriste kao vlakna za ojačavanje u kompozitima (najnoviji ramovi za bicikle, teniski reketi, palice za bejzbol). Zbog dobrih svojstava, smatraju se materijalima budućnosti u mašinstvu i građevinarstvu.



Slika 10.20. Struktura nanocevi

Važno svojstvo nanocevi je veoma velika električna provodljivost. Mogu biti poluprovodnici ili provodnici, u zavisnosti o orijentacije grafita u nanocevi (slika 10.21). Upotrebljavaju se u elektronici pošto mogu da prenose energiju gotovo bez gubitaka, kao i u izradi LED monitora.



Slika 10.21. Moguće orijentacije grafita u nanocevi:

A – provodnik; B i C – poluprovodnici.

Grafen je dvodimenziona struktura ugljenika debljine jednog atomarnog sloja, slika 10.22. Naučnici su 2004. godine izdvojili grafen iz grafita. Za izdvajanje su koristili lepljivu traku i tako prvi put dobili minijaturne slojeve tog materijala. Grafit debljine jednog milimetra sadrži tri miliona slojeva grafena naslaganih jedan na drugi, ali slabo međusobno povezanih. Grafen je skoro potpuno providan, ali je istovremeno i toliko gust da ni najmanji atomi gasa ne mogu da prođu kroz njega. Ima odličnu električnu provodljivost i čvrstoću 100 puta veću od čelika. Grafen je istovremeno

Literatura

1. V. Đorđević, *Mašinski materijali I deo*, Mašinski fakultet Beograd, 1999.
2. S. Kalpakijan, S. R. Schmid, *Manufacturing Engineering and Technology*, Fift Edition, Prentice Hall, 2006.
3. S. Kalpakijan, S. R. Schmid, *Manufacturing Engineering and Technology*, Sixth Edition in SI units, Prentice Hall, 2010.
4. M. Jovanović i ostali, *Mašinski materijali*, Mašinski fakultet Kragujevac, 2003.
5. A. Sedmak, V. Šijački Žeravčić, A. Milosavljević, *Mašinski materijali*, Zavod za udžbenike i nastavna sredstva, Beograd 2006.
6. H. Šuman, *Metalografija*, Naučna knjiga, Beograd 1967.
7. S. Stojadinović, A. Ljevar, *Poznavanje materijala*, Tehnički fakultet, Zrenjanin, 2001.
8. V. Đorđević, M. Vukićević, *Mašinski materijali – praktikum za vežbe*, Mašinski fakultet Beograd, 1998.
9. Đ. Drobnjak, *Fizička metalurgija – fizika čvrstoće i plastičnosti 1*, Tehnološko-metalurški fakultet Beograd, 1990.
10. P. Terzić, *Ispitivanje metala – mehanička ispitivanja*, Tehnološko-metalurški fakultet Beograd, 1986.
11. G. Dieter, *Mechanical metallurgy*, McGraw-Hill Book Company, 1988.
12. W. Callister, *Materials science and engineering*, John Wiley & Sons, Inc., 2007.
13. R. Hertzberg, *Deformation and fracture mechanics of engineering materials*, John Wiley & Sons, Inc., 1996.

14. L. Šiđanin, *Mašinski materijali II*, Fakultet tehničkih nauka Novi Sad, 1996.
15. ASM Handbook – *Metallography and microstructures*, ASM International, 2004.
16. ASM Handbook Vol.12 – *Fractography*, ASM International, 1992.
17. ASM Handbook, Vol.3 – *Alloy phase diagrams*, ASM International, 1992.
18. ASM Handbook, Vol.10 – *Materials characterization*, ASM International, 1998.
19. ASM Handbook, Vol.11 – *Failure analysis and prevention*, ASM International, 2002.
20. ASM Handbook, Vol.11 – *Fatigue and fracture*, ASM International, 1997.
21. T. Matković i ostali, *Znanost o metalima – zbirka rešenih zadataka*, Sveučilište u Zagrebu, Metalurški fakultet, Sisak, 2010.