

SADRŽAJ

Predgovor

1. Uvod	1
<i>Literatura</i>	4
2. Kristalna struktura metala	5
2.1 Prostorna kristalna rešetka.....	6
2.2 Kristalni sistemi.....	6
2.3 Tipične kristalne strukture metala.....	11
2.3.1. Prostorno centrirana kubna rešetka.....	11
2.3.2. Površinski centrirana kubna rešetka.....	13
2.3.3. Gusto složena heksagonalna rešetka.....	14
2.4 Kristalografske ravni i pravci.....	16
2.4.1. Orijehtacija kristalografskih ravni.....	16
2.4.2. Orijehtacija kristalografskih pravaca.....	19
2.5 Gustina slaganja atoma u ravnima i duž pravaca.....	21
2.6 Složene kristalne strukture.....	22
2.6.1. Kristalna struktura CsCl.....	22
2.6.2. Kristalna struktura NaCl.....	24
2.6.3. Kristalna struktura cink blende.....	24
2.6.4. Kristalna struktura dijamanta.....	24
2.6.5. Kristalna struktura CaF ₂	24
2.7 Greške u kristalima.....	25
2.7.1 Tačkaste greške.....	25
2.7.2 Linijske greške.....	27
2.7.3 Ravanske greške.....	30
2.8 Metode određivanja kristalne strukture.....	34
2.8.1 Rendgenostruktorna analiza.....	34
2.8.1.1 Dobijanje i apsorpcija X-zraka.....	34
2.8.1.2 Difrakcija X-zraka.....	35
2.8.1.3 Difraktometarska metoda.....	37
2.8.2 Difrakcija neutrona.....	40
2.8.3 Difrakcija elektrona.....	40
<i>Literatura</i>	43
3. Mikrostruktura	44
3.1 Mikroskopsko ispitivanje mikrostrukture.....	44
3.1.1 Svetlosna mikroskopija.....	45
3.1.1.1 Koso osvetljavanje.....	50
3.1.1.2 Osvetljavanje u tamnom polju.....	51
3.1.1.3 Polarizovano svetlo.....	52
3.1.1.4 Fazni kontrast.....	54
3.1.1.5 Interferentni kontrast po Nomarskom.....	55
3.1.1.6 Mikroskop za povišene temperature.....	57
3.1.1.7 Određivanje mikrotvrdoće.....	58
3.1.2. Elektronska mikroskopija.....	59
3.1.2.1 Transmisiona elektronska mikroskopija.....	61
3.1.2.2 Skenirajuća elektronska mikroskopija.....	64
3.1.2.3 Auger elektronska spektroskopija.....	68

3.1.3. Mikroskopija skenirajućom sondom	69
3.1.3.1 Skenirajuća tunelska mikroskopija	69
3.1.3.2 Mikroskopija atomskih sila	70
3.1.4. Jonska mikroskopija	71
3.2 Metode termijske analize	72
3.2.1. Diferencijalna termijska analiza (DTA)	72
3.2.2. Diferencijalna skenirajuća kalorimetrija (DSC)	73
3.3 Metalografska priprema uzoraka	75
3.3.1 Izrada metalografskih uzoraka	75
3.3.1.1 Uzorkovanje	76
3.3.1.2 Rezanje i gruba obrada	77
3.3.1.3 Montiranje i označavanje	80
3.3.1.4 Brušenje	82
3.3.1.5 Poliranje	85
3.3.2 Razvijanje mikrostrukture	89
3.3.2.1 Hemijsko nagrivanje	91
3.3.2.1.1 Otkrivanje strukture zrna	92
3.3.2.1.2 Otkrivanje mikrostrukture višefaznih legura	96
3.3.2.2 Elektrolitičko nagrivanje	103
3.3.2.3 Termičko nagrivanje	107
3.3.2.4 Nagrivanje deponovanjem interferentnih filmova u vakuumu	107
3.3.2.5 Jonsko nagrivanje	108
<i>Literatura</i>	109
4. Kvalitativno definisanje mikrostrukture	112
<i>Literatura</i>	118
5. Kvantitativna mikrostrukturna analiza	119
5.1 Metoda poređenja sa standardnim kartama	121
5.2 Tehnike merenja i uređaji	126
5.2.1 Manuelna metoda merenja	126
5.2.2 Poluautomatska metoda merenja	127
5.2.3 Automatska metoda merenja	128
5.3 Osnovni stereološki pojmovi i simboli	131
5.4 Geometrijski parametri mikrostrukture	132
5.4.1 Geometrija mikrokonstituenata	135
5.4.1.1 Zapreminski udeo V_V	135
5.4.1.2 Površinska gustina S_V	137
5.4.1.3 Specifična površina S_V/V_V	138
5.4.1.4 Veličina čestica	139
5.4.1.5 Oblik čestica	141
5.4.1.6 Srednji slobodni put λ	143
5.4.1.7 Širina sekundarnih dendritnih grana (SDAS)	145
5.4.2 Geometrija metalnog zrna	146
5.4.2.1 Određivanje 3D parametara zrna	146
5.4.2.1.1 Veličina zrna	146
5.4.2.1.2 Stepen orijentisanosti strukture	149
5.4.2.1.3 Oblik zrna	149
5.4.2.2 Određivanje 2D parametara zrna	150
5.4.2.2.1 Veličina zrna	150

5.4.2.2.2 Oblik zrna	154
5.5 Statistička obrada podataka i greške pri merenju	154
5.5.1 Eksperimentalne greške	155
5.5.1.1 Neadekvatna metalografska priprema uzoraka	155
5.5.1.2 Efekat nagrizanja	155
5.5.1.3 Izbor uvećanja mikroskopa	156
5.5.2 Statističke greške	157
5.5.2.1 Uzimanje mernih polja	157
5.5.2.2 Određivanje broja mernih polja	158
5.6 Način prikazivanja rezultata merenja	160
<i>Literatura</i>	161
6. Fazni dijagrami i mikrostruktura	164
6.1 Komponente i faze sistema	164
6.2 Ravnotežni fazni dijagrami stanja	165
6.3 Pravilo faza	167
6.4 Stabilnost faza	169
6.4.1 Koncept slobodne energije	169
6.4.2 Promena slobodne energije sa temperaturom	170
6.4.3 Promena slobodne energije sa sastavom	171
6.4.3.1 Slobodna energija čvrstih rastvora	171
6.4.3.2 Slobodna energija smeše faza	175
6.4.3.3 Hemijski potencijal	177
6.5 Eksperimentalno određivanje ravnotežnih dijagrama	178
<i>Literatura</i>	182
7. Fazna ravnoteža u jednokomponentnim sistemima	183
7.1 Fazni dijagram stanja	183
7.2 Očvršćavanje iz rastopa	185
7.2.1 Termodinamički uslovi kristalizacije	185
7.2.2 Stvaranje klica	188
7.2.2.1 Homogeno stvaranje klica	188
7.2.2.2 Heterogeno stvaranje klica	192
7.2.3 Rast kristala	197
7.2.3.1 Atomska struktura granične površine čvrsto/tečno	197
7.2.3.2 Brzina rasta kristala	200
7.2.3.3 Stabilnost granične površine	202
7.2.3.4 Mehanizam rasta kristala	202
7.2.3.4.1 Kontinuirani rast	203
7.2.3.4.2 Bočni rast	203
7.2.4 Morfologija rasta kristala	207
7.2.4.1 Pozitivni temperaturni gradijent	207
7.2.4.2 Negativni temperaturni gradijent	208
7.2.4.3 Rast iz razblaženog rastopa	212
<i>Literatura</i>	212
8. Fazna ravnoteža u dvokomponentnim sistemima	214
8.1 Struktura legura	216
8.1.1 Čvrsti rastvori	216
8.1.1.1 Supstitucijski čvrsti rastvori	217

8.1.1.1.1 Nagib likvidus i solidus linije i uticaj elektronske koncentracije.....	221
8.1.1.1.2 Granica rastvorljivosti u čvrstom stanju.....	223
8.1.1.2 Intersticijski čvrsti rastvori.....	224
8.1.1.3 Rastvarajuće ojačavanje.....	227
8.1.2 Intermedijatne faze.....	229
8.1.2.1 Elektrohemijska jedinjenja.....	230
8.1.2.2 Jedinjenja faktora veličine.....	231
8.1.2.2.1 Intersticijska jedinjenja.....	232
8.1.2.2.2 Supstitucijska jedinjenja.....	234
8.1.2.3 Elektronska jedinjenja.....	235
8.1.3 Sređene strukture.....	237
8.2 Fazni dijagrami stanja.....	238
8.2.1 Dvokomponentni dijagram stanja sa dve faze u ravnoteži.....	239
8.2.1.1 Termodinamički aspekt izomornog dijagrama stanja.....	241
8.2.1.2 Analiza izomornog dijagrama stanja.....	242
8.2.1.3 Razvoj mikrostrukture pri hlađenju izomornih legura.....	246
8.2.1.4 Razvoj mikrostrukture pri neravnotežnom očvršćavanju.....	248
8.2.1.5 Kristalna segregacija.....	249
8.2.1.6 Raspodela rastvorene komponente pri očvršćavanju.....	251
8.2.1.6.1 Potpuna difuzija u čvrstoj fazi i rastopu.....	253
8.2.1.6.2 Bez difuzije u čvrstoj fazi sa potpunim mešanjem u rastopu.....	254
8.2.1.6.3 Bez difuzije u čvrstoj fazi sa ograničenom difuzijom i odsustvom konvekcije u rastopu.....	256
8.2.1.7 Čelijsko i dendritno očvršćavanje.....	259
8.2.1.8 Svojstva izomornih legura.....	268
8.2.1.9 Izomorfni dijagram stanja sa minimumom i maksimumom.....	269
8.2.1.10 Dijagrami stanja sa prekidom rastvorljivosti u čvrstom stanju.....	272
8.2.1.11 Dijagrami stanja sa sređenim fazama.....	275
8.2.2 Dvokomponentni dijagram stanja sa tri faze u ravnoteži.....	277
8.2.2.1 Dijagram stanja sa eutektičkom reakcijom.....	278
8.2.2.1.1 Analiza eutektičkog faznog dijagrama.....	281
8.2.2.1.2 Mikrostruktura legura eutektičkog sistema.....	282
8.2.2.1.3 Razvoj mikrostrukture pri hlađenju legura eutektičkog sistema.....	285
8.2.2.1.4 Uticaj brzine hlađenja na razvoj mikrostrukture legura eutektičkog sistema.....	292
8.2.2.1.5 Morfologija eutektičke mikrostrukture.....	294
8.2.2.1.6 Nukleacija i rast pravilnog eutektikuma.....	297
8.2.2.1.7 Uticaj nečistoća na rast metal – metal eutektikuma.....	302
8.2.2.1.8 Orijentisani rast faza u pravilnom eutektikumu.....	303
8.2.2.1.9 Oblast kooperativnog rasta eutektikuma - „udvojena zona“.....	304
8.2.2.1.10 Nukleacija i rast nepravilnog eutektikuma.....	307
8.2.2.1.11 Svojstva legura eutektičkog sistema.....	312
8.2.2.2 Dijagram stanja sa peritektičkom reakcijom.....	316
8.2.2.2.1 Analiza peritektičkog faznog dijagrama.....	317
8.2.2.2.2 Razvoj mikrostrukture pri hlađenju legura peritektičkog sistema.....	319
8.2.2.2.3 Neravnotežno očvršćavanje.....	321
8.2.2.3 Dijagram stanja sa monotektičkom reakcijom.....	324
8.2.2.3.1 Analiza monotektičkog faznog dijagrama.....	325
8.2.2.3.2 Razvoj mikrostrukture pri hlađenju legura monotektičkog sistema.....	327
8.2.2.3.3 Granični slučajevi monotektičkih faznih dijagrama.....	329
8.2.2.4 Dijagram stanja sa sintektičkom reakcijom.....	330

8.2.2.5 Dijagrami stanja sa intermedijatnom fazom ili jedinjenjem.....	331
8.2.2.5.1 Sistemi sa kongruentno topivom fazom	331
8.2.2.5.2 Sistemi sa nekongruentno topivom fazom	333
<i>Literatura</i>	335
9. Dvokomponentni dijagrami stanja sa transformacijama u čvrstom stanju	338
9.1 Dijagrami stanja sa eutektoidnom reakcijom	339
9.1.1 Mehanizam obrazovanja perlita	340
9.1.2 Kinetika obrazovanja.....	346
9.2 Dijagrami stanja sa peritektoidnom reakcijom	353
9.3 Dijagrami stanja sa monotektoidnom reakcijom	354
9.4 Dijagrami stanja sa polimorfnim preobražajem	355
9.5 Dijagrami stanja sa reakcijom taloženja.....	358
9.5.1 Taloženje bez metastabilnih faza.....	361
9.5.2 Widmanstätten-ova struktura.....	364
9.5.3 Čelijsko taloženje	365
9.5.4 Taloženje metastabilnih faza	366
9.5.4.1 Vrste metastabilnih faza	367
9.5.4.2 Ojačavanje termičkim taloženjem	372
<i>Literatura</i>	379
10. Dvokomponentni dijagrami stanja tehnički važnih legura	380
10.1 Dijagram stanja sistema železo-ugljenik (Fe-C)	380
10.1.1 Komponente sistema Fe-C.....	382
10.1.2 Čvrste faze u dijagramu stanja Fe-Fe ₃ C sistema	383
10.1.3 Nonvarijantne reakcije u dijagramu stanja Fe-Fe ₃ C sistema	384
10.1.4 Ravnotežna mikrostruktura legura Fe-Fe ₃ C sistema	385
10.1.4.1 Razvoj mikrostrukture ugljeničnih čelika.....	385
10.1.4.2 Razvoj mikrostrukture belog livenog gvožđa.....	392
10.1.5 Ravnotežna mikrostruktura legura Fe-C sistema	395
10.1.6 Uticaj pratioca železa.....	401
10.1.6.1 Mangan	401
10.1.6.2 Silicijum.....	403
10.1.6.3 Sumpor.....	403
10.1.6.4 Fosfor.....	404
10.2 Dijagram stanja sistema bakar-cink (Cu-Zn).....	405
10.3 Dijagram stanja sistema bakar-kalaj (Cu-Sn).....	409
<i>Literatura</i>	413
11. Uticaj brzine hlađenja na razlaganje austenita i mikrostrukturu čelika	414
11.1 Transformacija austenita u beinit	415
11.1.1 Gornji beinit	417
11.1.2 Donji beinit.....	418
11.1.3 Granularni beinit.....	420
11.2 Transformacija austenita u martenzit	420
11.2.1 Karakteristike martenzitne transformacije	420
11.2.1 Mehanizam martenzitne transformacije	423
11.2.2 Morfologija martenzitne mikrostrukture	426
11.2.3 Kinetika martenzitne transformacije	427
11.2.4 Temperature martenzitne transformacije i zaostali austenit.....	430

11.2.5	Reverzibilnost martenzitne transformacije	432
11.2.6	Mehanička svojstva martenzita	432
11.2.7	Otpuštanje martenzita	434
11.3	Transformacija austenita pri kontinuiranom hlađenju	438
	<i>Literatura</i>	442
12.	Fazna ravnoteža u trokomponentnim sistemima	444
12.1	Prostorni model dijagrama stanja	445
12.2	Određivanje sastava trojnih legura i faza	446
12.3	Određivanje količine faza u trojnim legurama	448
12.4	Trokomponentni dijagrami stanja sa dve faze u ravnoteži	450
12.5	Trokomponentni dijagrami stanja sa tri faze u ravnoteži	455
12.5.1	Dijagrami ograničene rastvorljivosti u čvrstom stanju unutar sistema.....	456
12.5.2	Dijagrami ograničene rastvorljivosti u čvrstom stanju sa eutektičkom reakcijom	460
12.5.3	Dijagrami ograničene rastvorljivosti u čvrstom stanju sa peritektičkom reakcijom	464
12.5.4	Dijagrami ograničene rastvorljivosti u čvrstom stanju sa eutektičkom i peritektičkom reakcijom	467
12.5.5	Dijagrami ograničene rastvorljivosti u tečnom stanju sa monotektičkom reakcijom	468
12.6	Trokomponentni dijagrami stanja sa četiri faze u ravnoteži.....	469
12.6.1	Dijagrami sa trojnom eutektičkom reakcijom	469
12.6.2	Dijagrami sa trojnom kvaziperitektičkom reakcijom	481
12.6.3	Dijagrami sa trojnom peritektičkom reakcijom	485
12.7	Trokomponentni dijagrami stanja sa više od četiri faze	487
12.7.1	Dijagrami sa jednom kongruentno topivom dvojnog intermedijatnom fazom	487
12.7.2	Dijagrami sa jednom nekongruentno topivom dvojnog intermedijatnom fazom	492
12.7.3	Dijagrami sa više dvojnih intermedijatnih faza	495
12.7.4	Dijagrami sa trojnim intermedijatnim fazama	502
12.8	Neravnotežno očvršćavanje trokomponentnih legura	508
	<i>Literatura</i>	510
13.	Fazna ravnoteža u četvorokomponentnim sistemima	511
13.1	Predstavljanje fazne ravnoteže	511
13.1.1	Izobarno-izotermalni preseci	514
13.1.2	Politermalni preseci	514
13.2	Jednostavni četvorokomponentni dijagrami stanja	515
13.3	Složeni četvorokomponentni dijagrami stanja	522
	<i>Literatura</i>	533
14.	Mikrostruktura tro- i višekomponentnih legura	534
14.1	Uticaj legirajućih elemenata na mikrostrukturu čelika	534
14.1.1	Raspodela legirajućih elemenata	534
14.1.1.1	Austenit i ferit u legiranim čelicima	535
14.1.1.1.1	Temperaturna oblast stabilnosti alotropskih modifikacija	536
14.1.1.1.2	Položaj A_1 temperature i eutektoidne tačke	538
14.1.1.1.3	Kinetika razlaganja austenita	540

14.1.1.2	Karbidi i nitridi legirajućih elemenata.....	544
14.1.1.3	Intermetalna jedinjenja	550
14.1.2	Podela legiranih čelika prema mikrostrukturi	553
14.1.2.1	Feritni čelici.....	554
14.1.2.2	Poluferitni čelici	555
14.1.2.3	Austenitni čelici.....	555
14.1.2.4	Perlitni čelici.....	563
14.1.2.5	Ledeburitni čelici.....	565
14.2	Višekomponentne legure aluminijuma.....	567
14.2.1	Sekundarne faze u legurama aluminijuma.....	567
14.2.2	Legure sistema aluminijum-bakar-magnezijum	571
14.3	Legure olova i kalaja	574
	<i>Literatura</i>	579
15.	Uticaj procesa izrade na mikrostrukturu	581
15.1	Modificiranje mikrostrukture izmenom uslova kristalizacije.....	581
15.1.1	Struktura zrna nastala očvršćavanjem ingota	581
15.1.2	Uticaj brzine očvršćavanja pri kontinuiranom livenju	586
15.1.3	Očvršćavanje zavarenog spoja.....	586
15.1.4	Očvršćavanje kaljenjem iz rastopa	592
15.1.5	Modificiranje čestica sekundarnih faza	594
15.1.5.1	Obrazovanje manje štetnih faza u legurama aluminijuma.....	595
15.1.5.2	Modificiranje grafita u livenom gvožđu.....	596
15.2	Modificiranje primenom termičke obrade.....	598
15.2.1	Dobijanje ADI materijala	600
15.2.2	Dobijanje temper liva	601
	<i>Literatura</i>	602