Sadržaj

Predgovor **vii**

Simboli **ix**

1 Osnovni pojmovi u zavarivanju **1**
1.1. Elementi zavarenog spoja, vrste spojeva i položaji pri zavarivanju 1
1.2. Klasifikacija postupaka zavarivanja po različitim kriterijumima 3

2 Izvori toplote i toplotni procesi pri zavarivanju **7**
2.1. Toplotni izvori 7
2.1.1. Snaga toplotnog izvora i efikasnost toplotnog izvora 7
2.1.2. Gustina snage toplotnog izvora 8
2.1.3. Uneta količina toplote po jedinici dužine šava (linijska energija) . 12
2.1.4. Dimenzije MŠ. Koeficijent topljenja. Koeficijent oblika šava 14
2.1.5. Raspodela toplote pri zavarivanju 16
2.2. Toplotni ciklus zavarivanja 18

3 Zaostali naponi i deformacije u zavarenim spojevima **23**
3.1. Zaostali naponi u zavarenim spojevima 23
3.2. Deformacije u zavarenim spojevima 29
3.3. Smanjenje i kontrola napona i deformacije zavarenih spojeva 33

4 Metalurški procesi pri zavarivanju **39**
4.1. Reakcije između gasa i istopljenog metala 40
4.1.1. Azot 41
4.1.2. Kiseonik 43
4.1.3. Vodonik 44
4.2. Reakcija između troske i istopljenog metala 48

4.3. Isparavanje metala 50

5 Strukturne promene u zavarenim spojevima 53
5.1. Metal šava 54
5.2. Delimično istopljena zona 58
5.3. Zona uticaja toplote 58

6 Zavarljivost 65
6.1. Prsline u zavarenim spojevima 66
6.1.1. Tople prsline 67
6.1.2. Hladne prsline 80
6.1.3. Prsline žarenja 85
6.1.4. Lamelarne prsline (lamelarno cepanje) 86
6.2. Mehaničko tehnološka i strukturna karakterizacija zavarenih spojeva . . . 91
6.2.1. Ispitivanje zatezanjem 93
6.2.2. Ispitivanje savijanjem 96
6.2.3. Ispitivanje tvrdoće 97
6.2.4. Ispitivanje žilavosti 99
6.2.5. Strukturna ispitivanja 100
6.3. Prelazak u krto stanje 102
6.3.1. Prelaz iz duktilnog u krti lom – prelazna temperatura 103
6.3.2. Stvaranje i rast prsline 106

7 Termička obrada zavarenih spojeva 109
7.1. Predgrevanje, temperatura između prolaza, dogrevanje 109
7.2. Termička obrada posle zavarivanja 114
7.2.1. Žarenje radi smanjenja unutrašnjih (zaostalih) napona 116
7.2.2. Otpuštanje 118
7.2.3. Normalizaciono žarenje 118
7.2.4. Poboljšanje (kaljenje i otpuštanje) 119
7.2.5. Rastvarajuće žarenje sa ubrzanim hlađenjem – gašenje 121
7.2.6. Difuziono žarenje 121
7.3. Primeri predgrevanja, kontrole međuprolazne temperature i termičke obrade nakon zavarivanja 122

8 Čelici, podela i označavanje čelika 125
8.1. Uticaj sadržaja elemenata na svojstva čelika 125
8.1.1. Uticaj sadržaja ugljenika na svojstva i strukturu čelika 125
8.1.2. Uticaj ostalih elemenata na svojstva čelika 126
8.2. Uticaj legirajućih elemenata 128
8.2.1. Uticaj legirajućih elemenata na oblik dijagrama $Fe - Fe_3C$ 128
8.2.2. Uticaj legirajućih elemenata na položaj eutektoidne tačke 130

8.3. Raspodela legirajućih elemenata u čeliku . . . 131
8.4. Uticaj legirajućih elemenata na položaj i oblik TTT dijagrama i M_s i M_f temperature . . . 133
8.5. Obrazovanje legiranih karbida – sekundarno ojačavanje . . . 135
8.6. Uticaj legirajućih elemenata na veličinu zrna . . . 138
8.7. Čelici sa više legirajućih elemenata – Šeflerov dijagram . . . 140
8.8. Mehanizmi ojačavanja čelika . . . 141
8.9. Podela i označavanje čelika . . . 142
8.9.1. Podela čelika prema standardu SRPS EN 10020 . . . 142
8.9.2. Podela čelika prema standardu SRPS CEN ISO/TR 15608 . . . 144
8.9.3. Označavanje čelika . . . 145
8.10. Principi izbora čelika . . . 149

9 Zavarivanje nelegiranih konstrukcionih čelika 151
9.1. Nelegirani konstrukcioni čelici . . . 151
9.2. Zavarljivost nelegiranih konstrukcionih čelika . . . 155
9.2.1. Uticaj stepena dezoksidacije . . . 156
9.2.2. Uticaj sadržaja ugljenika . . . 157
9.2.3. Predgrevanje . . . 158
9.2.4. Uneta količina toplote . . . 159
9.2.5. Primena bazičnih elektroda . . . 160
9.2.6. Žarenje . . . 160

10 Zavarivanje čelika visoke čvrstoće 161
10.1. Proizvodnja čelika visoke čvrstoće . . . 163
10.1.1. Proizvodnja konvencionalno dobijenih čelika: normalizovanih (N) i kaljenih i otpuštenih (Q) čelika . . . 168
10.1.2. Proizvodnja termomehanički kontrolisano valjanih čelika (TM ili TMCP) . . . 170
10.2. Zavarljivost čelika visoke čvrstoće u zavisnosti od načina proizvodnje . . . 175
10.3. Niskolegirani čelici visoke čvrstoće i njihova zavarljivost . . . 179
10.3.1. Finozrni čelici (HSLA) . . . 180
10.3.2. Niskolegirani termički obradivi čelici (HTLA) . . . 187
10.4. HISTAR čelici i njihova zavarljivost . . . 188
10.5. Napredni čelici visoke čvrstoće (AHSS) . . . 192
10.5.1. TRIP, TWIP, DP i martenzitni (MS) čelici . . . 193
10.5.2. Zavarljivost DP, TRIP, TWIP i MS čelika . . . 199
10.6. Primena konstrukcionih čelika visoke čvrstoće . . . 202
10.6.1. Brodovi i platforme . . . 202
10.6.2. Mostovi . . . 203
10.6.3. Zgrade . . . 205
10.6.4. Automobilska industrija . . . 206

11 Zavarivanje čelika za rad na niskim temperaturama 209
11.1. Uticaj temperature na ponašanje materijala 210
11.2. Vrste čelika za rad na niskim temperaturama 211
11.3. Čelici legirani niklom i njihova zavarljivost 212
11.3.1. Čelici sa sadržajem $3,5\%\,\mathrm{Ni}$ 213
11.3.2. Čelici sa sadržajem $5\%\,\mathrm{Ni}$ i $9\%\,\mathrm{Ni}$ 213

12 Zavarivanje čelika otpornih na puzanje 215
12.1. Mehanizmi puzanja materijala 215
12.2. Ocena otpornosti na puzanje 218
12.3. Vrste čelika otpornih na puzanje 220
12.4. Zavarivanje čelika otpornih na puzanje 222
12.4.1. Zavarivanje nelegiranih čelika 222
12.4.2. Zavarivanje legiranih čelika 222

13 Zavarivanje nerđajućih čelika 231
13.1. Klasifikacija nerđajućih čelika 232
13.2. Karakteristični dijagrami za nerđajuće čelike 234
13.2.1. Šeflerov (*Scheffler*) dijagram 234
13.2.2. DeLongov dijagram 236
13.2.3. WRC (*Welding Research Council*) dijagram 238
13.3. Zavarljivost nerđajućih čelika 240
13.4. Čelici na bazi hroma 242
13.4.1. Feritni nerđajući čelici 243
13.4.2. Martenzitni i martenzitno-feritni nerđajući čelici 248
13.5. Čelici na bazi hroma i nikla 253
13.5.1. Austenitni nerđajući čelici ($\mathrm{Cr}-\mathrm{Ni}$) 254
13.5.2. Dupleks (feritno-austenitni) nerđajući čelici 264
13.5.3. Martenzitno-austenitni čelici 269
13.6. Toplotno otporni (vatrootporni) čelici 269

14 Zavarivanje raznorodnih materijala 273
14.1. Određivanje udela osnovnog metala u metalu šava 275
14.2. Zavarivanje raznorodnih čelika 276
14.2.1. Zavarivanje austenitnog CrNi nerđajućeg čelika sa drugim čelicima 279
14.2.2. Zavarivanje martenzitnog Cr nerđajućeg čelika sa drugim čelicima 282
14.3. Zavarivanje plakiranih materijala 283
14.4. Zavarivanje čelika sa drugim metalima 287
14.4.1. Zavarivanje čelika sa bakrom i legurama bakra 287
14.4.2. Zavarivanje čelika sa niklom i legurama nikla 288

15 Zavarivanje gvožđa **289**
15.1. Sivi liv . . . 292
15.1.1. Specifičnosti zavarivanja sivog livenog gvožđa . . . 293
15.1.2. Zavarivanje u hladnom stanju . . . 296
15.1.3. Zavarivanje u toplom i polutoplom stanju . . . 298
15.2. Nodularni liv . . . 301
15.3. Temper liv . . . 302
15.4. Sistem za označavanje livenog gvožđa . . . 303
15.4.1. Klasifikacija prema mehaničkim svojstvima . . . 304
15.4.2. Klasifikacija prema hemijskom sastavu . . . 305

16 Zavarivanje aluminijuma i legura aluminijuma **307**
16.1. Podela legura aluminijuma na osnovu sistema legiranja . . . 308
16.2. Podela legura aluminijuma prema načinu proizvodnje i na osnovu sadržaja legirajućih elemenata . . . 311
16.2.1. Termički neobradive legure aluminijuma . . . 312
16.2.2. Termički obradive legure aluminijuma . . . 314
16.3. Klasifikacija i označavanje legura aluminijuma . . . 318
16.4. Zavarljivost aluminijuma i njegovih legura . . . 319
16.5. Izvođenje zavarivanja aluminijuma i njegovih legura . . . 325
16.5.1. Postupci zavarivanja . . . 325
16.5.2. Priprema za zavarivanje . . . 325
16.5.3. Dodatni materijali . . . 326
16.5.4. Predgrevanje . . . 326

17 Zavarivanje bakra, nikla i njihovih legura **327**
17.1. Bakar i legure bakra . . . 327
17.1.1. Legure bakra . . . 328
17.1.2. Legure bakra sa cinkom – mesinzi . . . 330
17.1.3. Legure bakra sa drugim metalima – bronze . . . 332
17.1.4. Zavarljivost bakra i njegovih legura . . . 336
17.1.5. Postupci zavarivanja bakra i njegovih legura i dodatni materijali . . . 342
17.1.6. Termička obrada posle zavarivanja . . . 347
17.2. Nikl i legure nikla . . . 347
17.2.1. Legure nikla . . . 348
17.2.2. Zavarljivost nikla i njegovih legura . . . 357
17.2.3. Postupci zavarivanja i dodatni materijali . . . 360

18 Zavarivanje titana, njegovih legura i ostalih obojenih metala 361
18.1. Titan i njegove legure . . . 361
18.1.1. Legure titana . . . 362
18.1.2. Termička obrada legura titana . . . 366
18.1.3. Zavarljivost titana i njegovih legura . . . 368
18.1.4. Priprema za zavarivanje i postupci zavarivanja . . . 371
18.2. Magnezijum i legure magnezijuma . . . 374
18.2.1. Legure magnezijuma . . . 374
18.2.2. Zavarljivost magnezijuma i njegovih legura . . . 375
18.3. Cirkonijum i njegove legure . . . 376
18.3.1. Legure cirkonijuma . . . 376
18.3.2. Zavarljivost cirkonijuma i njegovih legura . . . 377
18.4. Tantal i njegove legure . . . 378
18.4.1. Legure tantala . . . 378
18.4.2. Zavarljivost tantala i njegovih legura . . . 378

19 Zavarivanje polimera, keramike i kompozita 379
19.1. Zavarivanje polimera . . . 379
19.1.1. Struktura i svojstva polimera . . . 379
19.1.2. Podela polimera . . . 381
19.1.3. Ponašanje termoplasta pri zavarivanju . . . 382
19.1.4. Postupci zavarivanja termoplasta . . . 384
19.2. Spajanje keramike . . . 388
19.3. Zavarivanje kompozita . . . 391

Literatura 397