Sadržaj

Predgovor **ix**

Simboli **xi**

1. Uvod u zavarivanje **1**

1.1. Osnovni pojmovi u zavarivanju 3

1.1.1. Priprema materijala za zavarivanje 6

1.2. Klasifikacija postupaka zavarivanja po različitim kriterijumima 7

1.3. Zavarljivost 11

1.4. Prikazivanje zavarenih spojeva na crtežu 12

1.4.1. Osnovne i dopunske oznake 13

1.4.2. Položaj referentne linije 14

1.4.3. Mere šavova 15

1.4.4. Dodatne oznake 18

2. Uvod u elektrolučno zavarivanje **21**

2.1. Osnovni pojmovi elektrotehnike 21

2.1.1. Provodnici, poluprovodnici i izolatori 21

2.1.2. Električna struja 22

2.1.3. Jon 22

2.1.4. Plazma 23

2.1.5. Konvencionalni (tehnički) smer struje 23

2.1.6. Jačina struje 24

2.1.7. Gustina struje 24

2.1.8. Električna otpornost . . . 25
2.1.9. Omov zakon . . . 25
2.1.10. Redno i paralelno vezivanje otpornika . . . 25
2.1.11. Džulov zakon . . . 26
2.1.12. Kondenzator; kapacitivnost . . . 27
2.1.13. Induktivnost . . . 28
2.1.14. Elektromotorna sila samoindukcije . . . 29
2.1.15. Elektromagnetizam . . . 30
2.1.16. Polaritet . . . 31
2.1.17. Jednosmerna i naizmenična struja . . . 31
2.1.18. Trofazna struja . . . 32
2.2. Teorija električnog luka . . . 34
2.2.1. Potencijal jonizacije . . . 37
2.2.2. Strujno kolo . . . 38
2.2.3. Statička karakteristika električnog luka . . . 38
2.2.4. Stabilnost električnog luka . . . 39
2.2.5. Skretanje električnog luka . . . 40
2.2.6. Zavarivački luk kao izvor toplote . . . 44
2.3. Prenos dodatnog materijala kroz električni luk . . . 45
2.4. Vrste i izvori struje . . . 49
2.4.1. Radna tačka pri zavarivanju elektrolučnim postupcima . . . 50
2.4.2. Strmopadajuća karakteristika izvora struje . . . 51
2.4.3. Blagopadajuća karakteristika izvora struje . . . 51
2.4.4. Podešavanje izvora struje za zavarivanje . . . 52
2.4.5. Dinamička karakteristika izvora struje . . . 54
2.5. Izvori struje za zavarivanje . . . 55
2.5.1. Pretvarači . . . 58
2.5.2. Transformatori . . . 59
2.5.3. Ispravljači . . . 62
2.5.4. Invertori . . . 64
2.5.5. Agregati . . . 65
2.5.6. Dalji pravci razvoja . . . 66
2.5.7. Trajan i intermitentan rad izvora električne energije . . . 68

3. Ručno elektrolučno zavarivanje obloženom elektrodom – E postupak 71
3.1. Prednosti i mane E postupka zavarivanja . . . 71
3.2. Dodatni materijal za ručno elektrolučno zavarivanje - obložena elektroda . 73
3.2.1. Podela elektroda prema vrsti obloge . . . 75
3.2.2. Proizvodnja elektroda . . . 78
3.2.3. Preporuke za izbor obloženih elektroda . . . 79
3.3. Vrste struje za zavarivanje . . . 79
3.4. Izvori struje i oprema za zavarivanje . . . 82
3.5. Regulacija dužine električnog luka . . . 83
3.6. Načini uspostavljanja luka i vođenje elektrode . . . 85
3.7. Mehanizacija E postupka . . . 86
3.8. Osnovne preporuke za izbor parametara kod E postupka zavarivanja . . . 87
3.9. Priprema spojeva . . . 88
3.10. Najčešće greške pri zavarivanju E postupkom . . . 88
3.11. Označavanje elektroda . . . 89

4. MIG/MAG postupak 93
4.1. MAG postupak zavarivanja . . . 94
4.2. MIG postupak zavarivanja . . . 95
4.3. Prednosti i mane MIG/MAG postupka zavarivanja . . . 95
4.4. Prenos dodatnog materijala . . . 96
4.5. Vrste i izvori struje . . . 103
4.6. Oprema za zavarivanje . . . 104
4.7. Podešavanje parametara zavarivanja . . . 111
4.8. Uspostavljanje i prekidanje luka . . . 115
4.9. Zaštitni gasovi . . . 116
4.9.1. Inertni zaštitni gasovi . . . 117
4.9.2. Aktivni zaštitni gasovi . . . 117
4.9.3. Dvokomponentne gasne mešavine . . . 119
4.9.4. Klasifikacija zaštitnih gasova i gasnih smeša . . . 119
4.9.5. Protok zaštitnog gasa . . . 120
4.10. Elektrodna žica . . . 121
4.11. Visokoproduktivni modifikovani postupci MIG/MAG zavarivanja . . . 124
4.11.1. Postupci sa jednom žicom . . . 125
4.11.2. Postupci sa dve žice (twin-arc i tandemsko zavarivanje) . . . 126
4.11.3. MIG/MAG postupci sa malom unetom količinom toplote . . . 128

4.11.4. Tačkasto MIG/MAG zavarivanje . . . 128
4.12. Greške u zavarenim spojevima . . . 129
4.13. Zaštita životne sredine pri zavarivanju . . . 131
4.13.1. Dim i gasovi . . . 131
4.13.2. Buka . . . 132
4.13.3. Zračenje luka . . . 132
4.13.4. Ergonomija . . . 133
4.13.5. Rasprskavanje . . . 134

5. Elektrolučno zavarivanje punjenom elektrodnom žicom 135
5.1. Osnovne karakteristike postupka . . . 135
5.2. Prednosti i nedostaci postupka . . . 136
5.3. Uloge praška za punjenje . . . 138
5.4. Vrste i karakteristike punjenih žica . . . 138
5.5. Samozaštitne punjene žice . . . 140

6. TIG postupak 143
6.1. Prednosti i mane TIG postupka . . . 145
6.2. Vrste struje . . . 145
6.2.1. Oblici izlaznog talasa naizmenične struje . . . 146
6.3. Izvori struje . . . 148
6.4. Oprema za TIG zavarivanje . . . 151
6.5. Netopljiva elektroda . . . 155
6.6. Zaštitni gasovi . . . 158
6.6.1. Primena zaštitnih gasova za zavarivanje pojedinih grupa materijala . . . 160
6.7. Dodatni materijal – žice za TIG zavarivanje . . . 161
6.8. Izbor parametara za TIG postupak . . . 161
6.9. Uspostavljanje luka . . . 162
6.10. Varijante TIG postupka . . . 163
6.10.1. Orbitalno zavarivanje . . . 166

7. EPP postupak 171
7.1. Prednosti i nedostaci EPP postupka zavarivanja . . . 172
7.2. Uređaj za EPP zavarivanje . . . 173
7.2.1. Pomoćna oprema za mehanizovano zavarivanje . . . 174
7.3. Vrste i izvori struje . . . 174

7.3.1. Uspostavljanje i prekidanje luka . . . 176
7.4. Metalurške reakcije pri zavarivanju . . . 177
7.5. Dodatni materijali . . . 178
7.5.1. Elektrodna žica . . . 179
7.5.2. Prašak . . . 181
7.6. Tehnologija zavarivanja . . . 188
7.6.1. Priprema spoja . . . 190
7.7. Varijante EPP postupka . . . 192
7.7.1. Zavarivanje sa jednom žicom . . . 192
7.7.2. Varijante EPP zavarivanja sa dve i više žica . . . 193

8. Elektrootporno zavarivanje 197
8.1. Elektrootporno tačkasto zavarivanje . . . 199
8.1.1. Proces spajanja metala tačkastim zavarivanjem . . . 203
8.1.2. Varijante tačkastog zavarivanja . . . 203
8.1.3. Uređaji za elektrootporno tačkasto zavarivanje . . . 205
8.1.4. Vrste struje . . . 207
8.1.5. Elektrode . . . 208
8.1.6. Režimi zavarivanja . . . 210
8.1.7. Mogući problemi kod elektrootpornog tačkastog zavarivanja . . . 212
8.2. Elektrootporno šavno zavarivanje . . . 217
8.3. Elektrootporno bradavičasto zavarivanje . . . 218
8.4. Elektrootporno sučeono zavarivanje zbijanjem . . . 220
8.5. Elektrootporno sučeono zavarivanje varničenjem . . . 221
8.6. Ispitivanja elektrootpornih zavarenih spojeva . . . 222

9. Gasno zavarivanje 225
9.1. Gorivi gasovi . . . 226
9.2. Plamen acetilen – kiseonik . . . 228
9.3. Oprema za gasno zavarivanje . . . 232
9.3.1. Boce za kiseonik i acetilen . . . 232
9.3.2. Redukcioni ventili . . . 235
9.3.3. Osigurači . . . 236
9.3.4. Gorionici . . . 237
9.3.5. Gumena creva . . . 238
9.4. Uspostavljanje i gašenje plamena . . . 239
9.5. Obezbeđenje radnog mesta . . . 239

9.6. Dodatni materijali i topitelji 239
9.7. Tehnike zavarivanja 241
9.8. Tehnologija zavarivanja 242
9.8.1. Ugao nagiba gorionika 242

10. Postupci zavarivanja velikom gustinom snage 243
10.1. Zavarivanje plazmom 243
10.1.1. Prednosti i nedostaci plazma postupka 245
10.1.2. Prenosni i neprenosni luk plazme 246
10.1.3. Podela plazma postupaka 247
10.1.4. Oprema za plazma zavarivanje 247
10.1.5. Polarnost jednosmerne struje 249
10.1.6. Gasovi za plazma postupak 250
10.1.7. Priprema spoja 251
10.2. Zavarivanje laserom 252
10.2.1. Prednosti i nedostaci laserskog zavarivanja 254
10.2.2. Formiranje snopa 255
10.2.3. Efekat laserskog zračenja 256
10.2.4. Podela lasera 258
10.3. Zavarivanje elektronskim snopom 263
10.3.1. Prednosti i nedostaci zavarivanja elektronskim snopom 266
10.3.2. Oprema za zavarivanje elektronskim snopom 267
10.3.3. Vrste spojeva 270

11. Specijalni postupci zavarivanja 271
11.1. Električno zavarivanje pod troskom i elektrogasno zavarivanje 271
11.2. Aluminotermitno zavarivanje 274
11.3. Elektrolučno zavarivanje rotirajućim magnetnim lukom 275
11.4. Zavarivanje trenjem 277
11.5. Zavarivanje trenjem sa mešanjem 279
11.6. Zavarivanje ultrazvukom 280
11.7. Visokofrekventno zavarivanje 282
11.8. Zavarivanje eksplozijom 284
11.9. Zavarivanje difuzijom 286
11.10. Zavarivanje na hladno 288

12. Postupci rezanja i žlebljenja 291
12.1. Gasno rezanje . . . 292
12.1.1. Uređaj za gasno rezanje . . . 294
12.1.2. Tehnologija gasnog rezanja . . . 296
12.1.3. Rezanje sa dodatkom metalnog praha . . . 297
12.1.4. Rezanje kiseoničnim kopljem . . . 298
12.2. Rezanje plazmom . . . 298
12.3. Rezanje laserom . . . 301
12.4. Elektrolučno rezanje . . . 304
12.5. Rezanje vodenim mlazom – Water Jet rezanje . . . 305
12.6. Žlebljenje . . . 306

13. Navarivanje i metalizacija 309
13.1. Navarivanje . . . 309
13.1.1. Dodatni materijali za navarivanje . . . 311
13.1.2. Postupci navarivanja . . . 312
13.2. Metalizacija . . . 315
13.2.1. Postupci metalizacije . . . 317
13.2.2. Primena metalizacije i zaštita na radu . . . 324

14. Lemljenje 327
14.1. Formiranje zalemljenog spoja . . . 328
14.2. Topitelji . . . 329
14.3. Tvrdo i meko lemljenje . . . 329
14.3.1. Meko lemljenje . . . 330
14.3.2. Tvrdo lemljenje . . . 331
14.4. Oblici dodatnog materijala – lema . . . 333
14.5. Vrste spojeva . . . 333
14.6. Postupci lemljenja . . . 335
14.6.1. Gasno lemljenje . . . 335
14.6.2. Elektrolučno lemljenje . . . 336
14.6.3. Lasersko lemljenje . . . 336
14.6.4. Elektrootporno lemljenje . . . 338
14.6.5. Lemljenje potapanjem u lem . . . 339
14.6.6. Lemljenje u pećima . . . 339
14.6.7. Indukciono lemljenje . . . 340
14.6.8. Meko lemljenje talasanjem . . . 340

14.6.9. Meko lemljenje lemilicom 341
14.6.10. Zavarivačko lemljenje 341

15. Mehanizacija i robotizacija u zavarivanju 343
15.1. Robotizovano zavarivanje 346
15.1.1. Programiranje robota 348
15.1.2. Zavarivanje u fleksibilnim tehnološkim sistemima 349
15.1.3. Tolerancije 350
15.2. Senzori 350
15.3. Primena i budućnost robotizacije u zavarivanju 357

Literatura 359

Predgovor

Ovaj udžbenik je, pre svega, namenjen studentima Mašinskog fakulteta Univerziteta u Beogradu koji slušaju predmet Postupci zavarivanja, ali i svim tehničkim licima koja žele da prošire i primene znanja iz ove oblasti. Zbog toga se može reći da u ovoj knjizi ima možda previše podataka za studente koji žele samo prelaznu ocenu, ali i nedovoljno podataka za rešavanje ozbiljnih inženjerskih problema. Cilj autora je bio da predstave ovu oblast zavarivanja na što jednostavniji i razumljiviji način, uz mnoštvo slika, istovremeno nastojeći da održe željeni nivo kvaliteta. Knjiga je pisana po ugledu na najnovije svetske udžbenike iz ove oblasti, uz želju autora da se studenti upoznaju sa gotovo svim savremenim dostignućima i trendovima.

Razvoj elektronike, kao i u drugim oblastima života, omogućio je nagli razvoj uređaja za zavarivanje i otvorio čitav spektar novih mogućnosti. Zbog toga je posebna pažnja posvećena osnovnim pojmovima iz elektrotehnike, kao i fenomenologiji električnog luka, ne iz želje da ulazimo u druge oblasti, već zbog neophodnosti određenog predznanja i boljeg razumevanja elektrolučnog zavarivanja. U pokušaju da što preglednije obrade i predstave ovu zahtevnu materiju, autori su odlučili da je izlože kroz sledeća poglavlja: uvod u zavarivanje, uvod u elektrolučno zavarivanje, postupci elektrolučnog zavarivanja (E, MIG/MAG, TIG, EPP), elektrootporno zavarivanje, gasno zavarivanje, postupci zavarivanja velikom gustinom snage (plazma, laser, elektronski snop), specijalni postupci zavarivanja, postupci rezanja i žlebljenja, navarivanje i metalizacija, lemljenje i mehanizacija i robotizacija u zavarivanju.

Zapažanje da "zavarivanje kao komleksna i interdisciplinarna naučna i inženjerska oblast predstavlja pravi izazov za autore, posebno kada je u pitanju pisanje udžbenika", potvrđuju i autori ovog udžbenika. Istina je da je veoma teško naći pravu meru i pravi način predstavljanja materije, između tradicionalnih znanja i modernog naučnog pristupa. To je verovatno i razlog odsustva više domaće literature iz ove oblasti, bez obzira na njenu aktuelnost danas.

I ovom prilikom se zahvaljujemo kolegama prof. dr Petru Lukiću i prof. dr Živani Jakovljević, kao i recenzentima, prof. dr Aleksandru Sedmaku i prof. dr Vukiću Laziću, na stručnim i korisnim sugestijama. Ogromno hvala kolegi prof. dr Draganu Cvetkoviću za nesebičnu pomoć da ovaj udžbenik dobije konačan oblik.

Beograd, avgust 2016. godine *Autori*









