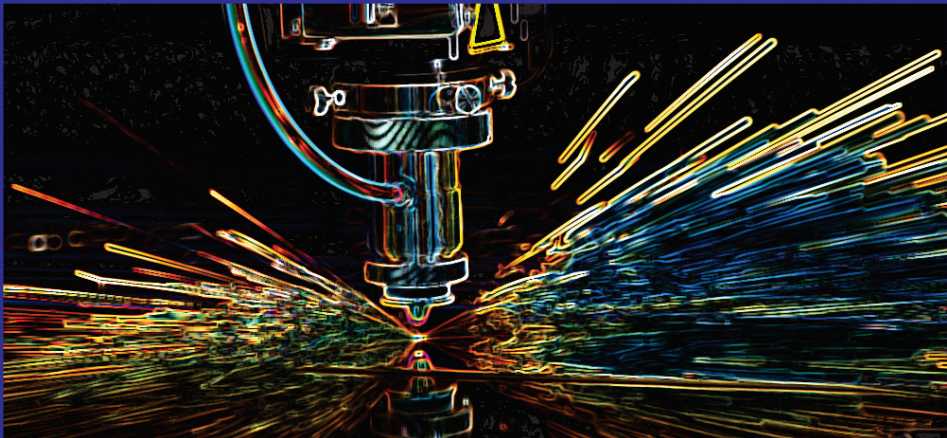


**Univerzitet u Beogradu
Mašinski fakultet**

**Olivera Popović
Radica Prokić Cvetković**

POSTUPCI ZAVARIVANJA



Beograd, 2016.

**UNIVERZITET U BEOGRADU
MAŠINSKI FAKULTET**

**Olivera Popović
Radica Prokić Cvetković**

**POSTUPCI
ZAVARIVANJA**



BEOGRAD, 2016.

Univerzitet u Beogradu
Mašinski fakultet

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

POSTUPCI ZAVARIVANJA

I izdanje

RECENZENTI :

Prof. dr Aleksandar Sedmak, Mašinski fakultet u Beogradu
Prof. dr Vukić Lazić, Fakultet inženjerskih nauka u Kragujevcu

IZDAVAČ:

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

ZA IZDAVAČA:

Prof. dr Radivoje Mitrović, dekan

GLAVNI I ODGOVORNI UREDNIK:

Prof. dr Milan Lečić

Odobreno za štampu odlukom dekana Mašinskog fakulteta u Beogradu
broj 17/2016 od 31.08.2016.

TIRAŽ:

300 primeraka

ŠTAMPA:

PLANETA-print

ISBN 978-86-7083-909-0

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

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. | Podješavanje 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. Aluminotermično 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. Tvrdi i meki lemljenje | 329 |
| 14.3.1. Meko lemljenje | 330 |
| 14.3.2. Tvrdi 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 lemlicom | 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 elektrodučnog 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 elektrodučno zavarivanje, postupci elektrodučnog zavarivanja (E, MIG/MAG, TIG, EPP), elektrotoporno 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 kompleksna 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.

