

**Univerzitet u Beogradu
Mašinski fakultet**

**Radica Prokić Cvetković
Olivera Popović**

METALURGIJA ZAVARIVANJA



Beograd, 2019.

**UNIVERZITET U BEOGRADU
MAŠINSKI FAKULTET**

**Radica Prokić Cvetković
Olivera Popović**

METALURGIJA ZAVARIVANJA



BEOGRAD, 2019.

Univerzitet u Beogradu
Mašinski fakultet

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

METALURGIJA ZAVARIVANJA

I izdanje

RECENZENTI :

Prof. dr Nenad Radović, Tehnološko-metalurški fakultet u Beogradu
dr Vencislav Grabulov, naučni savetnik, Institut IMS u Beogradu
Prof. dr Aleksandar Sedmak, Mašinski fakultet u Beogradu

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 28/2019 od 19.09.2019.

TIRAŽ:

300 primeraka

ŠTAMPA:

PLANETA-print, Beograd

ISBN 978-86-6060-024-2

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

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 krto 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 (zaostalnih) 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 ₃ C	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% Ni	213
11.3.2. Čelici sa sadržajem 5% Ni i 9% 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 (<i>Scheffler</i>) dijagram	234
13.2.2. DeLongov dijagram	236
13.2.3. WRC (<i>Welding Research Council</i>) 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 (Cr – 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 – bronzе	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