

Univerzitet u Beogradu
Mašinski fakultet

Radica Prokić Cvetković
Olivera Popović
Gordana Bakić
Miloš Đukić

MAŠINSKI MATERIJALI 2



Beograd, 2021.

**UNIVERZITET U BEOGRADU
MAŠINSKI FAKULTET**

**Radica Prokić Cvetković
Olivera Popović
Gordana Bakić
Miloš Đukić**

**MAŠINSKI
MATERIJALI
2**



BEOGRAD, 2021.

Univerzitet u Beogradu
Mašinski fakultet

dr Radica Prokić Cvetković, dipl. inž. met., redovni profesor
dr Olivera Popović, dipl. inž. maš., redovni profesor
dr Gordana Bakić, dipl. inž. maš., redovni profesor
dr Miloš Đukić, dipl. inž. maš., vanredni profesor

MAŠINSKI MATERIJALI 2

I izdanje

RECENZENTI :

Prof. dr Nenad Radović, Tehnološko – metalurški fakultet u Beogradu
Prof. dr Aleksandar Sedmak, Mašinski fakultet u Beogradu

IZDAVAČ:

Univerzitet u Beogradu
Mašinski fakultet
ul. Kraljice Marije 16, Beograd
tel. (011) 3370-760
fax. (011) 3370-364
www.mas.bg.ac.rs

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 23/2021 od 24.08.2021.

TIRAŽ:

1000 primeraka

ŠTAMPA:

"Planeta-print", 11000 Beograd
www.planeta-print.rs

ISBN 978-86-6060-087-7

© Sva prava zadržavaju autori. Nije dozvoljeno da, bez prethodne pismene dozvole autora, bilo koji deo ovog praktikuma bude snimljen, emitovan ili reprodukovan, uključujući, ali ne i ograničavajući se na fotokopiranje, fotografiju, magnetni ili bilo koji drugi vid zapisa.

Sadržaj

Predgovor	ix
Simboli	xi
1 Železo i njegove legure	1
1.1. Čisto železo – Fe	2
1.2. Ugljenik	3
1.3. Intersticijski čvrsti rastvori	4
1.4. Dijagrami stanja Fe i C	6
1.4.1. Metastabilni dijagram stanja Fe – Fe ₃ C	6
1.4.2. Podela legura železa	8
1.5. Transformacije austenita pri laganom hlađenju	9
1.5.1. Čelik eutektoidnog sastava	9
1.5.2. Podeutektoidni čelici	11
1.5.3. Nadeutektoidni čelici	12
1.6. Pravilo poluge i krive hlađenja	13
2 Dobijanje gvožđa i čelika	17
2.1. Procesi u visokoj peći	18
2.2. Dobijanje čelika	20
2.2.1. Konvertorski postupak	20
2.2.2. Dobijanje čelika u elektropečima	22
2.3. Livenje čelika	23
2.4. Dezoksidacija čelika	24
3 Čelici, podela i označavanje čelika	27
3.1. Uticaj sadržaja pojedinih elemenata na svojstva čelika	27
3.1.1. Uticaj sadržaja ugljenika na svojstva i strukturu čelika	27
3.1.2. Uticaj pratećih i legirajućih elemenata na svojstva čelika	28
3.2. Uticaj legirajućih elemenata na izgled karakterističnih dijagrama	30

3.2.1.	Uticaj legirajućih elemenata na oblik dijagrama stanja Fe – Fe ₃ C	30
3.2.2.	Uticaj legirajućih elemenata na položaj eutektoidne tačke	32
3.2.3.	Raspodela legirajućih elemenata u čeliku	33
3.2.4.	Uticaj legirajućih elemenata na veličinu zrna	35
3.2.5.	Čelici sa više legirajućih elemenata – Šeflerov dijagram	36
3.3.	Podela čelika	37
3.3.1.	Podela čelika prema sadržaju ugljenika i legirajućih elemenata	38
3.3.2.	Niskougljenični čelici	39
3.3.3.	Srednjeugljenični čelici	39
3.3.4.	Visokougljenični čelici	40
3.3.5.	Nerđajući čelici	40
3.3.6.	Podela čelika prema standardu SRPS EN 10020	40
3.4.	Označavanje čelika	42
3.5.	Principi izbora čelika	46
4	Liveana gvožđa	49
4.1.	Dijagram stanja Fe – C	49
4.2.	Struktura livenih gvožđa	50
4.2.1.	Sivo liveno gvožđe (sivi liv)	53
4.2.2.	Nodularno liveno gvožđe (nodularni liv)	54
4.2.3.	Belo liveno gvožđe	55
4.2.4.	Temper liv	55
4.2.5.	Vermikularni liv	56
4.3.	Označavanje livenih gvožđa	56
4.3.1.	Klasifikacija prema mehaničkim svojstvima	57
4.3.2.	Klasifikacija prema hemijskom sastavu	57
5	Transformacije pothlađenog austenita	59
5.1.	Mikrostrukture pothlađenog austenita	59
5.1.1.	Perlit	59
5.1.2.	Beinit	60
5.1.3.	Sferoidni perlit	61
5.1.4.	Martenzit	62
5.2.	Povezanost mikrostrukture i mehaničkih svojstava	65
5.3.	Dijagrami transformacije pothlađenog austenita	66
5.3.1.	Izotermalno razlaganje austenita – TTT (<i>time – temperature – transformation</i>) dijagrami	67
5.3.2.	Razlaganje austenita pri kontinuiranom hlađenju – CCT (<i>Continuous – Cooling – Transformation</i>) dijagrami	69

5.4. Uticaj legirajućih elemenata na položaj i oblik TTT (CCT) dijagrama i M_s i M_f temperature	72
6 Termička obrada čelika	75
6.1. Parametri termičke obrade	75
6.2. Postupci žarenja	76
6.2.1. Žarenje za smanjenje zaostalih napona	77
6.2.2. Meko žarenje (sferoidizacija)	78
6.2.3. Rekristalizaciono žarenje – rekristalizacija	79
6.2.4. Normalizacija	81
6.2.5. Visokotemperaturno žarenje	82
6.2.6. Homogenizacija (difuziono žarenje)	83
6.2.7. Gašenje – rastvarajuće žarenje sa ubrzanim hlađenjem	84
6.3. Kaljenje	84
6.3.1. Određivanje prokaljivosti čelika	87
6.3.2. Površinsko kaljenje	91
6.4. Otpuštanje	92
6.5. Poboljšanje	94
6.6. Austempering	95
6.7. Pojava grešaka u čeliku u procesu termičke obrade	97
7 Termomehanička i termohemijska obrada	99
7.1. Termomehanička obrada čelika	99
7.1.1. Niskotemperaturna termomehanička obrada (NTMO)	100
7.1.2. Visokotemperaturna termomehanička obrada (VTMO)	101
7.1.3. Izotermalno oblikovanje	101
7.2. Termohemijska obrada čelika	102
7.2.1. Cementacija	102
7.2.2. Nitiranje	105
7.2.3. Zasićenje površine čelika ugljenikom i azotom (cijanizacija)	107
7.2.4. Hromiranje	108
7.2.5. Boriranje	108
7.2.6. Alitiranje	108
7.2.7. Siliciranje	108
8 Obojeni metali	109
8.1. Aluminijum i legure aluminijuma	110
8.1.1. Označavanje legura aluminijuma	111
8.1.2. Podela legura aluminijuma	111

8.2.	Bakar i legure bakra	119
8.2.1.	Legure bakra	120
8.2.2.	Označavanje legura bakra	120
8.2.3.	Legure bakra sa cinkom – mesing	121
8.2.4.	Legure bakra sa drugim metalima – bronzе	123
8.3.	Nikl i legure nikla	124
8.3.1.	Legure nikla koje ojačavaju obrazovanjem supstitucijskih čvrstih rastvora	125
8.3.2.	Legure nikla koje ojačavaju starenjem	126
8.3.3.	Legure nikla disperzno ojačane oksidima	127
8.4.	Titan i njegove legure	127
8.5.	Superlegure	131
8.6.	Lakotopljivi metali	132
8.7.	Teškotopljivi metali	133
9	Uvod u zavarivanje	135
9.1.	Osnovni pojmovi u zavarivanju	136
9.2.	Klasifikacija postupaka zavarivanja po različitim kriterijumima	138
9.3.	Zavarljivost	142
9.3.1.	Ocena sklonosti ka pojavi toplih prslina	144
9.3.2.	Ocena sklonosti ka pojavi hladnih prslina	144
9.3.3.	Ocena sklonosti ka pojavi prslina žarenja	146
9.3.4.	Ocena sklonosti ka pojavi lamelarnih prslina	146
10	Elektrolučno zavarivanje	147
10.1.	Osnovni pojmovi u elektrolučnom zavarivanju	147
10.1.1.	Električna struja	147
10.1.2.	Jon	147
10.1.3.	Plazma	148
10.1.4.	Polaritet	148
10.1.5.	Jednosmerna i naizmjenična struja	149
10.2.	Teorija električnog luka	150
10.2.1.	Potencijal jonizacije	152
10.2.2.	Strujno kolo	152
10.2.3.	Statička karakteristika električnog luka	153
10.2.4.	Stabilnost električnog luka	154
10.2.5.	Skretanje električnog luka	154
10.2.6.	Zavarivački luk kao izvor toplote	155

10.3. Prenos dodatnog materijala kroz električni luk	155
10.4. Vrste i izvori struje	158
10.4.1. Radna tačka pri zavarivanju elektrolučnim postupcima	160
10.4.2. Strmopadajuća karakteristika izvora struje	160
10.4.3. Blagopadajuća karakteristika izvora struje	161
10.5. Izvori struje za zavarivanje	161
10.5.1. Transformatori	161
10.5.2. Ispravljači	163
10.5.3. Invertori	163
10.5.4. Agregati	164
10.5.5. Radni ciklus (intermitencija) izvora struje	165
11 Ručno elektrolučno zavarivanje obloženom elektrodom	167
11.1. Prednosti i mane E postupka zavarivanja	168
11.2. Dodatni materijal za ručno elektrolučno zavarivanje – obložena elektroda	169
11.2.1. Uloge obloge elektrode	170
11.2.2. Podela elektroda prema vrsti obloge	171
11.2.3. Preporuke za izbor obloženih elektroda	172
11.3. Vrste struje za zavarivanje	172
11.4. Izvori struje i oprema za zavarivanje	174
11.5. Regulacija dužine električnog luka	176
11.6. Načini uspostavljanja i prekidanja luka	177
12 Elektrolučno zavarivanje topljivom elektrodom žicom u zaštiti gasa – MIG/MAG postupak	179
12.1. MAG postupak zavarivanja	180
12.2. MIG postupak zavarivanja	181
12.3. Prednosti i mane MIG/MAG postupka zavarivanja	181
12.4. Prenos dodatnog materijala	182
12.5. Vrste i izvori struje	184
12.6. Oprema za zavarivanje	185
12.7. Podešavanje parametara zavarivanja	188
12.8. Uspostavljanje i prekidanje luka	190
12.9. Zaštitni gasovi	190
12.9.1. Inertni zaštitni gasovi	191
12.9.2. Aktivni zaštitni gasovi	191
12.9.3. Višekomponentne gasne mešavine	192
12.10. Elektrodna žica	192

12.11. Zaštita životne sredine pri zavarivanju	193
12.11.1. Dim i gasovi	194
12.11.2. Buka	195
12.11.3. Zračenje luka	195
12.11.4. Ergonomija	195
12.11.5. Rasprskavanje	196
13 Elektrolučno zavarivanje punjenom elektrodnom žicom	197
13.1. Osnovne karakteristike postupka	197
13.2. Prednosti i nedostaci postupka	198
13.3. Uloge praška za punjenje	199
13.4. Vrste i karakteristike punjenih žica	200
13.5. Samozaštitne punjene žice	202
14 Elektrolučno zavarivanje netopljivom elektrodom u zaštiti inertnog gasa – TIG postupak	203
14.1. Prednosti i mane TIG postupka	205
14.2. Vrste struje	205
14.3. Izvori struje	207
14.4. Oprema za TIG zavarivanje	207
14.5. Netopljiva elektroda	208
14.6. Zaštitni gasovi	211
14.7. Dodatni materijal – žice za TIG zavarivanje	212
14.8. Uspostavljanje luka	212
15 Elektrolučno zavarivanje pod praškom – EPP postupak	213
15.1. Prednosti i mane EPP postupka zavarivanja	214
15.2. Uređaj za EPP zavarivanje	215
15.3. Vrste i izvori struje	217
15.4. Dodatni materijali	217
15.4.1. Elektrodna žica	217
15.4.2. Prašak	218
15.5. Tehnologija zavarivanja	219
16 Elektrootporno zavarivanje	221
16.1. Elektrootporno tačkasto zavarivanje	223
16.1.1. Proces spajanja metala tačkastim zavarivanjem	225
16.1.2. Uređaji za elektrootporno tačkasto zavarivanje	227
16.1.3. Elektrode	228

16.1.4. Režimi zavarivanja	228
16.1.5. Skretanje struje – šantiranje	230
16.2. Elektrootporno šavno zavarivanje	231
16.3. Elektrootporno bradavičasto zavarivanje	233
16.4. Elektrootporno sučeono zavarivanje zbijanjem	234
16.5. Elektrootporno sučeono zavarivanje varničanjem	235
17 Gasno zavarivanje	237
17.1. Gorivi gasovi	238
17.2. Plamen acetilen – kiseonik	239
17.3. Oprema za gasno zavarivanje	242
17.3.1. Boce za kiseonik i acetilen	242
17.3.2. Rukovanje bocama	244
17.3.3. Redukcioni ventili	244
17.3.4. Osigurači	245
17.3.5. Gorionici	245
17.3.6. Gumena creva	246
17.4. Uspostavljanje i gašenje plamena	247
17.5. Obezbeđenje radnog mesta	247
17.6. Dodatni materijali i topitelji	248
17.7. Tehnike zavarivanja	249
18 Postupci rezanja	251
18.1. Gasno rezanje	252
18.1.1. Uređaj za gasno rezanje	254
18.1.2. Rezanje sa dodatkom metalnog praha	256
18.1.3. Rezanje kiseoničnim kopljem	257
18.2. Rezanje vodenim mlazom	257
19 Ispitivanja zavarenih spojeva	259
19.1. Ispitivanje zavarenih spojeva metodama sa razaranjem	259
19.1.1. Ispitivanja zatezanjem	260
19.1.2. Ispitivanje savijanjem	263
19.1.3. Ispitivanje tvrdoće	265
19.1.4. Ispitivanje žilavosti	266
19.1.5. Metalografska (strukturna) ispitivanja	267
19.2. Ispitivanje zavarenih spojeva metodama bez razaranja	268
19.2.1. Vizuelno ispitivanje	269
19.2.2. Ispitivanje penetrantima	270

19.2.3. Ispitivanje magnetnim fluksom	271
19.2.4. Ispitivanje ultrazvukom	272
19.2.5. Ispitivanje radiografijom	273
19.3. Greške u zavarenim spojevima	275
20 Lemljenje	281
20.1. Formiranje zalemljenog spoja	282
20.1.1. Topitelji	283
20.1.2. Dodatni materijal – lem	283
20.2. Tvrdo i meko lemljenje	284
20.2.1. Meko lemljenje	284
20.2.2. Tvrdo lemljenje	285
20.3. Postupci lemljenja	286
20.3.1. Gasno lemljenje	286
20.3.2. Elektrolučno lemljenje	286
20.3.3. Elektrootporno lemljenje	287
20.3.4. Lemljenje potapanjem u lem	287
20.3.5. Lemljenje u pećima	288
20.3.6. Indukciono lemljenje	288
20.3.7. Meko lemljenje talasanjem	289
20.3.8. Meko lemljenje lemlicom	290
20.3.9. Zavarivačko lemljenje	290
Literatura	291

Predgovor

Predmeti koji nas okružuju izrađeni su od različitih vrsta materijala, pa je poznavanje njihovih osobina, načina proizvodnje, postojanosti u radnom okruženju, mogućnosti nabavke i cene od velikog značaja pri izboru materijala za konkretnu namenu. Tendencije savremenog načina života su usmerene ka smanjenju potrošnje energije i zaštite životne sredine, pa se pred inženjere, projektante i konstruktore postavljaju zahtevi da izaberu materijal koji ima što manju cenu i masu uz istovremeno zadovoljavajuće fizičke, hemijske, mehaničke, tehnološke ili neke specifične osobine. U svetu se dosta novca ulaže u istraživačke i razvojne projekte za razvoj novih materijala ili modifikaciju osobina postojećih materijala.

Ovaj udžbenik je namenjen studentima Osnovnih akademskih studija koji slušaju predmet Mašinski materijali 2 sa fondom časova 5 u trećem semestru na Mašinskom fakultetu Univerziteta u Beogradu. Gradivo u ovom udžbeniku prati kontinuitet gradiva izloženog u knjizi Mašinski materijali 1, pa je za praćenje nastave iz predmeta Mašinski materijali 2 neophodno predznanje iz tog predmeta. Cilj autora je bio da ovako složenu problematiku što jednostavnije prikažu, a da se pri tome održi odgovarajući akademski nivo. Uvek, kada je to bilo moguće, autori su se potrudili da odgovarajuće objašnjenje ilustruju dobrom slikom.

Plan i program predmeta Mašinski materijali 2 se sastoji iz dve celine i to: metalni materijali i postupci spajanja materijala zavarivanjem i lemljenjem.

U prvom delu udžbenika opisani su metalni materijali, njihov način dobijanja, kao i fizička, hemijska i mehanička svojstva. Od metalnih materijala najviše pažnje je posvećeno železu i njegovim legurama jer su to još uvek najzastupljeniji konstrukcioni materijali u mašinstvu. Železo gradi dve grupe legura: čelike i gvožđa; pa je opisan način njihovog dobijanja, mehaničke i fizičke osobine, kao i njihovo označavanje po najnovijem standardu. Takođe su opisane neravnotežne transformacije pri hlađenju čelika, kao i termička, termomehanička i termohemijska obrada. U nastavku je dosta pažnje posvećeno aluminijumu i njegovim legurama, jer su oni po zastupljenosti odmah posle čelika. Bakar, nikel, titan i drugi obojeni metali su takođe prikazani.

U drugom delu udžbenika dati su osnovni pojmovi u zavarivanju i opisani su konvencionalni postupci zavarivanja. Takođe su prikazana ispitivanja zavarenih spojeva metodama sa razaranjem i bez razaranja, greške u zavarenim spojevima i nivoi kvaliteta zavarenih spojeva. Kao postupak spajanja materijala, pored zavarivanja, može da se koristi i lemljenje, pa su na kraju opisani njegovi osnovni principi.

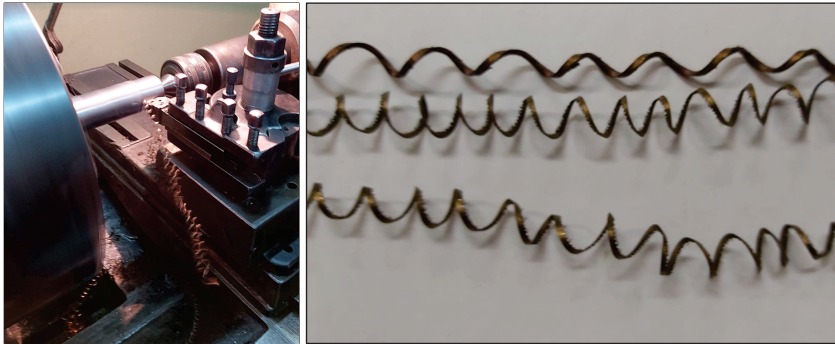
Na kraju knjige navedena je literatura koja može da se koristi u cilju proširenja znanja iz ovih oblasti.

Autori se zahvaljuju recenzentima, dr Nenadu Radoviću, redovnom profesoru Tehnološko-metalurškog fakulteta Univerziteta u Beogradu i dr Aleksandru Sedmaku, profesoru emeritus Mašinskog fakulteta Univerziteta u Beogradu, koji su svojim korisnim predlozima i sugestijama doprineli poboljšanju kvaliteta knjige. Takođe se zahvaljujemo i kolegama iz laboratorije "KonMat" koji su nam ustupili slike iz IBR-a, kao i kolegi dr Radovanu Puzoviću, profesoru Mašinskog fakulteta, na nesebičnoj pomoći.

I na kraju, ne kao manje važno, želimo da istaknemo da ova knjiga sigurno na bi ovako izgledala da nije bilo ogromnog truda i strpljenja prof. dr Dragana Cvetkovića, i na tome mu neizmerno hvala.

Beograd, septembar 2021. godine

Autori

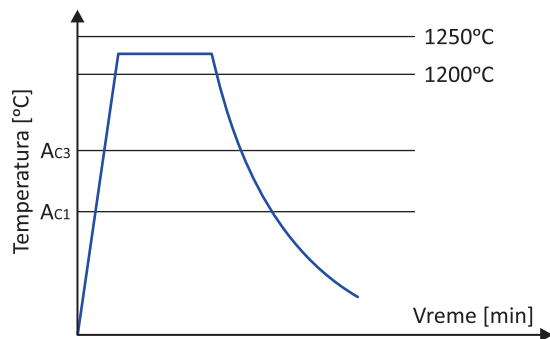


Slika 6.10. Dugačka strugotina kod žilavih i deformabilnih materijala

Ukoliko je potrebno povratiti izgubljena mehanička svojstva nakon obrade rezanjem, onda je neophodno izvršiti normalizaciju nakon rezanja.

6.2.6. Homogenizacija (difuziono žarenje)

Difuziono žarenje se izvodi na visokim temperaturama (iznad 1200°C) i ima za cilj smanjenje mikrosegregacija. Mikrosegregacije nastaju tokom procesa očvršćavanja čelika. Prvi kristali koji nastaju pri očvršćavanju imaju manje ugljenika. Ovi kristali pri hlađenju dalje rastu i na kraju očvršćavanja se sudaraju i nastaju granice zrna. Sadržaj ugljenika na granicama zrna je veći. Imajući u vidu neravnomaran sadržaj ugljenika u kristalima, temperature početka i završetka martenzitne transformacije biće različite. Slojevi bogatiji ugljenikom imaju više zaostalog austenita nakon kaljenja, a oni siromašniji imaju martenzit manje tvrdoće. Zbog toga je neophodno ukloniti ove mikrosegregacije. Da bi se obezbedila što potpunija difuzija, zagrevanje mora biti visoko u austenitnom području kako bi pokretljivost atoma ugljenika bila što veća (slika 6.11). Vreme zadržavanja na visokim temperaturama zavisi od veličine komada i može iznositi i do $80 \div 100$ h. Temperatura zagrevanja ne sme biti viša od temperature topljenja na granicama zrna (imaju najnižu temperaturu topljenja). Posledica homogenizacionog žarenja je značajan rast zrna i gubitak žilavosti i duktilnosti. To se naziva pregrevanje čelika. Nakon homogenizacije najčešće se vrši normalizacija radi usitnjavanja zrna.

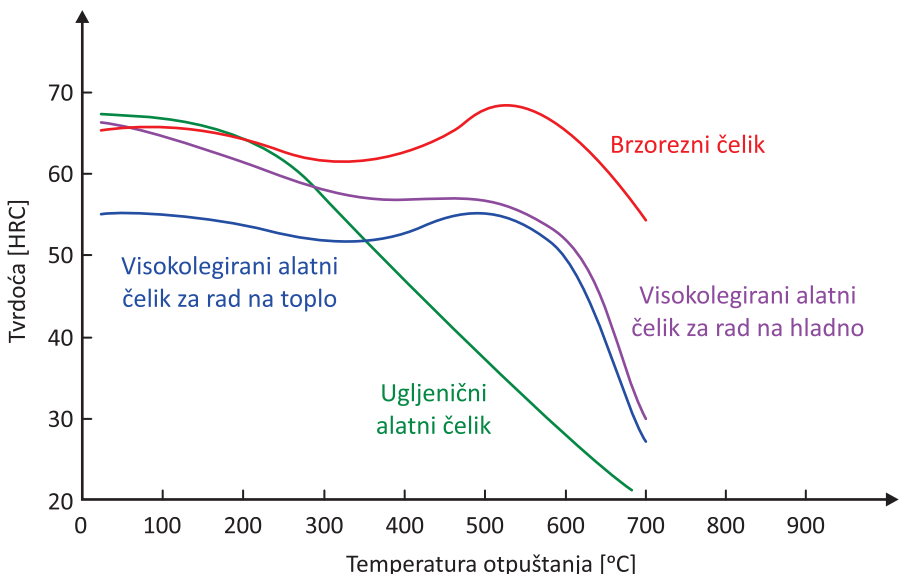


Slika 6.11. Temperaturni ciklus homogenizacije

- srednje otpuštanje – temperatura otpuštanja je između 220°C i 400°C i
- visoko otpuštanje – temperatura otpuštanja je između 400°C i A_{C1} .











Pri otpuštanju ugljeničnih čelika, nastali martenzit koji je neravnotežna struktura teži da se transformiše u ravnotežnu. Pri niskom otpuštanju dolazi do difuzije atoma ugljenika. Njihov sadržaj u rešetki martenzita se smanjuje tako da se dobija kubni martenzit. Posle izlaska iz martenzita, atomi ugljenika sa atomima železa stvaraju prelazni ϵ - *karbid* (Fe_2C karbid). Pri srednjem otpuštanju u kubnom martenzitu se i dalje smanjuje sadržaj ugljenika tako da se prethodno nastali karbid obogaćuje železom i transformiše u χ ("hi") karbid (Fe_5C_2). Oba pomenuta karbida imaju manje železa od karbida Fe_3C . Tako nastaje struktura gde su karbidi fino dispergovani u feritnoj osnovi. Pri visokom otpuštanju χ karbid se dalje obogaćuje železom prelazeći tako u Fe_3C . Istovremeno dolazi do ukрупnjavanja cementita, tako da se dobijaju sferoidni oblici cementita raspoređeni po feritnoj osnovi, koji ima značajnu žilavost. Na kraju se može reći da se izborom temperature otpuštanja postiže željena struktura, a samim tim i čvrstoća i žilavost.

Pri otpuštanju legiranih čelika mogu nastati različite vrste karbida u zavisnosti od sadržaja i prisustva legirajućih elemenata (npr. $Cr_{23}C_6$; Cr_7C_3 ; Fe_4W_2C ; WC; Mo_2C ; V_4C_3). Kod njih pri otpuštanju takođe može doći do transformacije zaostalog austenita u martenzit i karbide. Tada je tvrdoća otpuštene strukture veća od tvrdoće dobijene pri kaljenju (npr. kod brzoreznih čelika), pa se ova pojava zove sekundarno ojačavanje. Na slici 6.24 prikazana je promena tvrdoće u zavisnosti od temperature otpuštanja za ugljenični alatni čelik, visokolegirane alatne čelike i brzorezni čelik.



Slika 6.24. Dijagram otpuštanja ugljeničnog alatnog, brzoreznog i visokolegiranih alatnih čelika

Tabela 14.1. Primeri označavanja TIG elektroda prema SRPS EN ISO 6848

Simbol	Dodatak	Udeo [%]	Označavanje po boji	Vrsta struje
WP	-	0	zelena 	NS
WTh10	Torijum (ThO ₂)	0,8-1,2	žuta 	JS
WTh20		1,7-2,2	crvena 	
WTh30		2,8-3,2	ljubičasta 	
WZr3	Cirkonijum (ZrO ₂)	0,15-0,5	smeđa 	NS
WZr8		0,7-0,9	bela 	
WLa10	Lantan (La ₂ O ₃)	0,8-1,2	crna 	NS, JS
WLa15		1,3-1,7	zlatna 	
WLa20		1,8-2,2	plava 	
WCe20	Cerijum (CeO ₂)	1,8-2,2	siva 	NS, JS

Temperatura topljenja čistog volframa je 3410°C (najviša od svih metala), pa se u zaštiti inertnog gasa ne topi pri zavarivanju. Tačnije, topi se samo mali deo, dok se ostatak hladi zahvaljujući visokoj termičkoj provodljivosti volframa koji odvodi toplotu, kao i sistemu za hlađenje vazduhom ili vodom.

Volframove elektrode se izrađuju u prečnicima: 0,25 ÷ 10 mm, sa dužinama 50, 75, 150, 175, 300 i 450 mm. Preporuka je da je dužina luka jednaka 1 ÷ 4 prečnika elektrode.

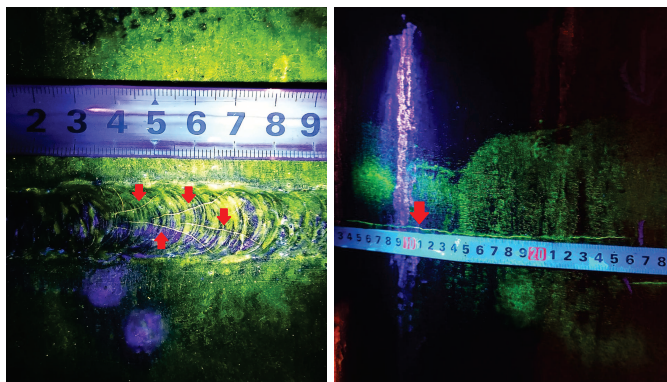
Preporuke za primenu netopljivih elektroda

a) Čista volframova elektroda sadrži min. 99,5% volframa, bez dodatih legirajućih elemenata. Jeftinije su od legiranih, ali ih treba koristiti samo pri zavarivanju naizmeničnom strujom. Osnovna mana volframa je veliki električni otpor (3,2 puta veći od bakra), što dovodi do brzog usijanjanja. Uglavnom se koristi za zavarivanje legura aluminijuma i magnezijuma. Primenom naizmenične struje, na vrhu elektrode se formira loptica koja obezbeđuje dobru stabilnost luka.

b) Volframove elektrode sa dodatkom 0,5; 1 ili 2% oksida torijuma (W – Th) imaju znatno manji električni otpor, pa se manje zagrevaju pri zavarivanju, i koriste se za poboljšanje uspostavljanja i održavanja luka i za zavarivanje jednosmernom strujom direktne polarosti. Mogu se opteretiti većom jačinom struje nego čist volfram, zadržavaju

Ovom metodom najbolje se otkrivaju površinske greške normalne na smer magnetnog polja. U cilju otkrivanja različito orjentisanih grešaka (uzdužne i poprečne) ispitivani predmet se magnetiše u dva međusobno normalna smera. Takođe se ne mogu identifikovati greške duboko ispod površine, kao ni dubina greške koja je otkrivena. Nakon svakog ispitivanja predmet ostane magnetičan, pa je neke radne komade neophodno demagnetisati nakon ispitivanja.

Na slici 19.24 prikazane su prsline otkrivene magnetnom metodom.



Slika 19.24. Prsline otkrivene magnetnom metodom

19.2.4. Ispitivanje ultrazvukom

Ispitivanje ultrazvukom zasniva se na svojstvu ultrazvuka da se širi kroz homogene materijale i da se odbija kada naiđe na graničnu površinu ili nehomogenost u materijalu. Ultrazvuk je vrsta mehaničkih talasa frekvencije iznad 20 KHz koju ljudsko uho ne registruje, a kod ispitivanja materijala najčešće se koriste frekvencije od $0,5 \div 10$ MHz. Ovim ispitivanjem može se utvrditi prisustvo unutrašnjih grešaka u materijalu, kao i dubina, oblik i položaj greške.

Postupak ispitivanja ultrazvukom prikazan je na slici 19.25. Ultrazvučni talasi se pobuđuju u specijalnim sondama, a zahvaljujući piezoelektričnom efektu, oscilacije se prenose na nauljenu površinu ispitivanog materijala, radi osiguranja dobrog akustičnog kontakta. Pobuđivanje traje veoma kratko, a stvoreni talasi se prostiru kroz ispitivani materijal, odbijaju od donje ivice materijala i vraćaju nazad do kristala. Povratni talasi se registruju na ekranu kao signal povratnog talasa (slika 19.25a). Rastojanje između ulaznog i izlaznog signala (na ekranu uređaja) srazmerno je debljini datog predmeta. Ako talas naiđe na grešku, odnosno materijal bitno različitih akustičnih svojstava (npr. prsline ili poroznost), onda se deo talasa ranije odbija i registruje na ekranu kao signal greške između ulaznog i odbijenog signala (slika 19.25b).

Ispitivanje ultrazvukom zahteva visok nivo stručnosti operatera, jer je nedovoljnom obučenošću moguće prevideti postojanje grešaka, proglasiti velike greške zanemarljivim i slično. Samo ispitivanje je brzo i relativno jeftino. Uređaji su prenosivi i uglavnom rade na baterije, pa nisu opasni za rukovanje.

- lako popunjavanje uskih zazora u spoju, zahvaljujući efektu kapilarnosti;
- mali zaostali naponi i deformacije, zbog relativno malog unosa toplote i neznatnih strukturnih promena osnovnog materijala;
- lep površinski izgled spoja.

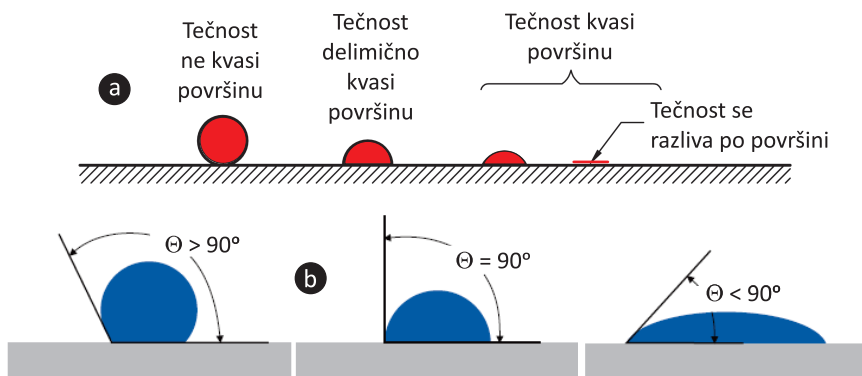
Nedostaci lemljenja su:

- mehanička svojstva spoja su obično niža od onih koja se postižu zavarivanjem;
- veća sklonost ka elektrohemijskoj koroziji;
- relativno visoka cena materijala za lemljenje.

20.1. Formiranje zalemljenog spoja

Zalemljeni spoj nastaje delovanjem tri mehanizma: kvašenja, kapilarnosti i difuzije.

Kvašenje omogućava dodatnom materijalu da se razlije preko osnovnog materijala. Da bi kvašenje površina osnovnog materijala lemom bilo zadovoljavajuće, potrebno je da lem ima manji površinski napon od osnovnog materijala, kao i da površinski napon između lema i topitelja bude što manji. Kao pokazatelj kvašenja se uzima ugao kvašenja (θ , slika 20.2). Idealno kvašenje je kada bi se lem potpuno razliva po površini osnovnog metala, odnosno ako je ugao kvašenja $\theta = 0$. U praksi, kvašenje je zadovoljavajuće ako je $\theta < 40^\circ$.



Slika 20.2. Mehanizam kvašenja pri formiranju zalemljenog spoja:

a) različito razlivanje tečnosti po površini; b) različiti uglovi kvašenja

Kapilarne sile su sile pomoću kojih istopljeni dodatni materijal popunjava svaki zazor između osnovnih materijala veličine do 0,25 mm. Ako je zazor veći od 0,25 mm, kapilarni efekat se gubi.

Kapilarne sile su veoma jake i suprotstavljajući se gravitaciji, pomažu ravnomerno raspoređivanje lema. Na slici 20.3 je prikazan mehanizam delovanja kapilarnih sila za vreme procesa lemljenja.