

Tehnologija zavarivanja

1

Tehnologija zavarivanja

1

Prvo izdanje

Miroslav M. Mijajlović

Niš
jun, 2017

Docent dr Miroslav M. Mijajlović, dipl. inž. maš, IWE
TEHNOLOGIJA ZAVARIVANJA 1
I izdanje

Recenzenti:

Dr Vencislav Grabulov, naučni savetnik, Institut IMS, Beograd
Prof. dr Miomir Vukićević, Fakultet za mašinstvo i građevinarstvo, Kraljevo

Tehnička priprema:

Dr Miroslav Mijajlović, dipl. inž. maš, IWE

Korice:

Bojana Mitrović, dipl. prav.
Dr Miroslav Mijajlović, dipl. inž. maš, IWE

Izdavač:

Univerzitet u Nišu
Mašinski fakultet Niš
Aleksandra Medvedeva 14
18000 Niš, Srbija
www.masfak.ni.ac.rs

Za izdavača:

Prof. dr Nenad T. Pavlović, dekan

CIP - Каталогизација у публикацији - Народна библиотека Србије, Београд
MIJAJLOVIĆ, Miroslav M., 1979-
Tehnologija zavarivanja 1 / Miroslav M. Mijajlović. - 1. izd. - Niš :
Univerzitet, Mašinski fakultet, 2017 (Niš : Unigraf X-Copy). - 225, [44] str.
: ilustr. ; 30 cm

Tiraž 150. - Prilog: str. [1-44]. - Bibliografija uz svako poglavlje. -
Napomene i bibliografske reference uz tekst.

ISBN 978-86-6055-089-9
621.791(075.8)
a) Заваривање
COBISS.SR-ID 235912460

Odlukom Nastavno-naučnog veća Mašinskog fakulteta u Nišu br 612-280-3-1/2017 od 18.05.2017, ova knjiga je dobila status univerzitetskog udžbenika i odobreno je njeno štampanje.

Tiraž štampe: **150 primeraka**

Štampa: **UNIGRAF X-COPY, Aleksandra Medvedeva 14, Niš**

Zabranjeni su svi oblici umnožavanja ovog udžbenika bez pisanog odobrenja autora. Prekršioći ove zabrane sносиće posledice saglasno Zakonu o autorskom i srodnim pravima („Sl. glasnik RS”, br. 104/2009, 99/2011, 119/2012 i 29/2016 – odluka US).

Predgovor

Tehnologija zavarivanja je obimna naučno-stručna priča koja je pričana i prepričana mnogo puta. Ona ne može da bude završena – tehnologija zavarivanja napreduje pa je neophodno da se priča prepričava ponovo. Tu je moje opravdanje za prepričavanje već ispričane priče. Uočio sam da je mnogo novina u zavarivanju, koje nisu prisutne u postojećoj literaturi na srpskom jeziku, pa sam kroz opisanu materiju dao sveža (ali i stara, proverena) iskustva, preporuke i pregled važećih standarda (zaključno sa krajem februara 2017. godine) iz zavarivanja.

Prosečan student današnjice nema vremena (a ni strpljenja) da se posveti učenju iz obimnih i brojnih knjiga – živimo u „instant” vremenu i da bi nas „instant” generacija razumela, takav mora da bude pristup njihovom obrazovanju. Zbog toga sam se usudio da važni deo tehnologije najprimenjivanih postupaka zavarivanja svedem na 280 stranica, koliko ima ova knjiga. Po mojoj proceni, to je osnova tehnologije zavarivanja koju prosečan student mašinstva treba da zna i ova knjiga je namenjena studentima mašinstva koji imaju mala ili nikakva znanja o zavarivanju. Za sve preko „osnova” preporučujem ostalu literaturu i kažem – studirajte.

Nazivom „Tehnologija zavarivanja 1” odvojio sam najkorišćenije postupke zavarivanja od ostalih, veoma brojnih i interesantnih, postupaka zavarivanja. Knjiga „Tehnologija zavarivanja 2” biće posvećena tim ostalim postupcima.

Knjiga ima 14 poglavlja. Prvo poglavlje sadrži uvod u zavarivanje, istorijski razvoj tehnologije zavarivanja, opis najprimenjivanih postupaka zavarivanja, sistem obeležavanja i prikazivanja postupaka u tehničkoj dokumentaciji itd. Zavarivanje gasnim postupkom je poglavlje posvećeno zavarivanju sagorevanjem gasa. Uvod u elektrotehniku, električni luk, izvori električne struje i uvod u zavarivanje u atmosferi zaštitnih gasova su poglavlja koja predstavljaju uvod u postupke zavarivanja električnim lukom. Posebna poglavlja su elektrolučni postupci zavarivanja poznatiji kao: TIG, MIG/MAG, REL i EPP. Kao završna poglavlja, prikazani su bezbednosni zahtevi u zavarivanju, predlog praktičnih vežbi iz zavarivanja i prilog.

Ideja za pisanje ove knjige rodila se 2009. godine u glavi Save Đurića, diplomiranog inženjera mašinstva, vrsnog stručnjaka za zavarivanje iz IMK „14. oktobar” iz Kruševca. Ovaj veliki čovek tada nije imao vremena za ovaj poduhvat, a ja nisam imao snage. Na žalost, ni Sava, ni „14. oktobar” nisu sačekali da ja sakupim snagu već su nestali pre toga. Nema sumnje da bi ova knjiga bila kvalitetnija da su mi pomogli. Zbog toga, u njihovu čast, ovu knjigu ponosno nazivam našom.

Iskrenu zahvalnost dugujem recenzentima: dr Vencislavu Grabulovu, naučnom savetniku sa Instituta IMS iz Beograda i prof. dr Miomiru Vukićeviću, sa Fakulteta za mašinstvo i građevinarstvo iz Kraljeva. Njihovo višegodišnje iskustvo i temeljan rad, pretočeni u iskrene i korisne sugestije koje su mi uputili, podigli su kvalitet ove knjige.

Moja supruga Bojana, uložila je značajan trud i potrošila je puno vremena, tražeći i ispravljajući slovne i gramatičke greške u tekstu, na čemu sam joj neizmerno zahvalan. Odgovornost za sve preostale greške, propuste i neistine, snosim samo ja. Svi dobronamerni komentari i sugestije su dobrodošli.

Za ukradeno i potrošeno vreme, neka Bojani i meni, naša Lena, oprosti.

Miroslav M. Mijajlović

*...za svu našu decu
i neke dane bez srama...*

Milan Đurđević
Priča o nama
2016.

Sadržaj

1	OPŠTI UVOD U TEHNOLOGIJU ZAVARIVANJA.....	1
1.1	Istorija.....	1
1.1.1	Nastanak i razvoj gasnog postupka zavarivanja.....	2
1.1.2	Nastanak i razvoj elektrolučnih postupaka zavarivanja.....	3
1.2	Teorijski model zavarivanja.....	7
1.3	Realni model zavarivanja.....	9
1.4	Postupci zavarivanja koji se najviše primenjuju.....	10
1.4.1	Gasni postupak zavarivanja.....	10
1.4.2	Ručni elektrolučni postupak zavarivanja obloženom topivom elektrodom.....	11
1.4.3	Elektrolučni postupci zavarivanja topivom elektrodnom žicom u atmosferi zaštitnog gasa.....	12
1.4.4	Elektrolučni postupak zavarivanja netopivom volframovom elektrodom u atmosferi zaštitnog gasa.....	13
1.4.5	Elektrolučni postupak zavarivanja pod praškom.....	14
1.5	Terminologija u zavarivanju i položaji zavarivanja.....	14
1.6	Prikazivanje zavarenih spojeva na tehničkim dokumentima.....	20
1.7	Klasifikacija i obeležavanje postupaka zavarivanja.....	22
	Literatura.....	25
2	ZAVARIVANJE GASNIM POSTUPKOM.....	29
2.1	Osnovni principi postupka.....	29
2.2	Klasifikacija postupka.....	30
2.3	Gorivi gasovi.....	30
2.3.1	Osobine gorivih gasova.....	30
2.3.2	Hemijske reakcije sagorevanja.....	32
2.4	Plamen.....	33
2.4.1	Zone plamena.....	34
2.4.2	Tipovi plamena.....	34
2.5	Efekti prenosa toplote.....	35
2.6	Osnovna oprema za zavarivanje.....	36
2.6.1	Boce za skladištenje tehničkih gasova.....	36
2.6.2	Ispusni ventili na bocama.....	39
2.6.3	Regulacioni ventili pritiska.....	40
2.6.4	Merači protoka gasova.....	42
2.6.5	Osigurači.....	42
2.6.6	Creva za razvod gasova.....	44
2.6.7	Centralizovani razvod gasova.....	47
2.6.8	Gorionici.....	47
2.7	Dodatni materijal.....	49
2.8	Topitelji.....	50
2.9	Tehnologija zavarivanja.....	51
2.9.1	Priprema materijala za zavarivanje.....	51
2.9.2	Rad sa opremom za zavarivanje.....	52
2.9.3	Zavarivanje.....	53
2.9.4	Tehnika zavarivanja.....	54
2.9.5	Parametri zavarivanja (preporuke).....	57

2.9.6	Prekidanje zavarivanja.....	57
2.9.7	Obezbeđenje gasne instalacije.....	58
2.10	Opseg primene postupka, tipični problemi i nesavršenosti.....	58
2.10.1	Zavarivanje niskougljeničnih čelika sa maksimalno 0,22% C.....	58
2.10.2	Zavarivanje ugljeničnih čelika sa 0,22-0,35% C.....	58
2.10.3	Zavarivanje ugljeničnih čelika sa 0,35-0,60% C.....	58
2.10.4	Zavarivanje niskolegiranih čelika.....	59
2.10.5	Zavarivanje visokolegiranih čelika otpornih na koroziju.....	59
2.10.6	Zavarivanje čeličnog liva.....	59
2.10.7	Zavarivanje livenog železa.....	59
2.10.8	Zavarivanje bakra.....	60
2.10.9	Zavarivanje mesinga.....	60
2.10.10	Zavarivanje bronz.....	60
2.10.11	Zavarivanje aluminijuma.....	61
2.10.12	Zavarivanje cinka.....	61
2.10.13	Zavarivanje olova.....	61
2.10.14	Zavarivanje magnezijuma.....	61
2.10.15	Zavarivanje kalaja.....	61
2.10.16	Zavarivanje srebra.....	61
2.10.17	Zavarivanje zlata.....	62
	Literatura.....	63
3	ELEKTROTEHNIKA, PREGLED.....	67
3.1	Osnove elektriciteta i elektronike (definicija električne struje, napona i otpornosti).....	67
3.1.1	Električna struja.....	68
3.2	Jednosmerna struja (JS), polaritet, naizmenična struja (NS).....	68
3.2.1	Električni napon.....	71
3.2.2	Električni otpor.....	71
3.3	Prosto električno kolo. Omov zakon.....	72
3.4	Kapacitet, kondenzator.....	72
3.5	Indukcija, induktori (kalemovi).....	72
3.6	Prosto električno kolo sa otpornikom, kalemom i kondenzatorom – RLC kolo.....	74
3.7	Složeno električno kolo.....	75
3.7.1	Redno električno kolo.....	75
3.7.2	Paralelno električno kolo.....	76
3.8	Poluprovodničke komponente u elektronskim kolima.....	77
3.8.1	Dioda.....	77
3.8.2	Tiristor.....	78
3.8.3	Tranzistor.....	79
3.9	Transformator.....	80
3.10	Energetski pretvarači.....	80
3.11	Opasnosti od električne struje. Zdravlje i bezbednost.....	84
	Literatura.....	87
4	ELEKTRIČNI LUK.....	89
4.1	Fizika električnog luka.....	89

4.1.1	Uspostavljanje električnog luka.....	89
4.1.2	Jonizacija gasa.....	90
4.1.3	Energija jonizacije/potencijal jonizacije.....	91
4.1.4	Osnovne zone električnog luka.....	92
4.1.5	Raspodela napona duž električnog luka.....	92
4.1.6	Opšti kriterijum gorenja i stabilnosti električnog luka.....	93
4.1.7	Regulacija električnog luka.....	93
4.1.8	Sile u električnom luku.....	94
4.2	Generisanje toplote na katodi i anodi.....	95
4.3	Polaritet i osobine električnog luka kod NS i JS električnog luka za osnovne elektrolučne postupke zavarivanja.....	96
4.4	Raspodela temperature u električnom luku i efekti.....	97
4.5	Uticaj magnetnih polja na električni luk.....	98
	Literatura.....	101
5	IZVORI ELEKTRIČNE STRUJE ZA ELEKTROLUČNE POSTUPKE ZAVARIVANJA.....	103
5.1	Klasifikacija izvora struje za elektrolučno zavarivanje.....	103
5.1.1	Električni generatori (Rotacioni pretvarači).....	103
5.1.2	Električni ispravljači.....	104
5.1.3	Transformatori.....	104
5.1.4	Invertori.....	105
5.2	Statičke karakteristike izvora struje i električnog luka.....	105
5.3	Veza između statičke karakteristike izvora struje i postupka zavarivanja.....	107
5.4	Radna tačka.....	108
5.5	Intermitencija izvora struje.....	108
5.6	Poređenje osobina različitih izvora struje.....	109
	Literatura.....	110
6	UVOD U ELEKTROLUČNO ZAVARIVANJE U ATMOSFERI ZAŠTITNOG GASA.....	111
6.1	Fizički fenomen.....	111
6.2	Zaštitni gasovi i njihov uticaj na osobine električnog luka.....	112
6.3	Uporedne osobine najkorišćenijih zaštitnih gasova i mešavina.....	115
6.4	Manipulacija i skladištenje gasova (pregled).....	116
6.5	Uticaj vrste zaštitnog gasa na morfologiju šava.....	116
6.6	Standardi za zaštitne gasove.....	116
	Literatura.....	117
7	ELEKTROLUČNI POSTUPCI ZAVARIVANJA NETOPIVOM VOLFRAMOVOM ELEKTRODOM U ATMOSFERI ZAŠTITNOG GASA.....	119
7.1	Osnovni principi postupka.....	119
7.2	Klasifikacija i podela postupka.....	120
7.3	Osnovna oprema za zavarivanje.....	120
7.3.1	Izvori električne struje, karakteristike izvora električne struje.....	120
7.3.2	Tipičan kontrolni panel izvora struje.....	121
7.3.3	Pištolj.....	121
7.3.4	Mlaznice.....	122

7.3.5	Sistem za hlađenje.....	122
7.3.6	Provodnici.....	122
7.4	Potrošni materijali.....	123
7.4.1	Netopive elektrode.....	123
7.4.2	Sistem za snabdevanje zaštitnim gasom. Zaštitni gasovi.....	124
7.4.3	Dodatni materijali.....	124
7.5	Tehnologija zavarivanja.....	125
7.5.1	Priprema osnovnog materijala za zavarivanje.....	126
7.5.2	Priprema volframove (netopive) elektrode.....	127
7.5.3	Rad sa opremom, priborom, dodatnim i potrošnim materijalima za zavarivanje.....	128
7.5.4	Zavarivanje.....	128
7.5.5	Paljenje električnog luka: metode paljenja električnog luka i neophodna oprema.....	128
7.5.6	Tehnika zavarivanja.....	129
7.5.7	Parametri zavarivanja.....	132
7.5.8	Prekidanje zavarivanja.....	133
7.5.9	Efekat tipa električne struje i polaritet: JSIP, JSDP, NS.....	133
7.5.10	Specifični zahtevi pri zavarivanju aluminijuma.....	134
7.6	Zavarivanje impulsnom strujom (pulsna tehnika zavarivanja).....	135
	Literatura.....	137
8	ELEKTROLUČNI POSTUPCI ZAVARIVANJA TOPIVOM ELEKTRODNOM ŽICOM U ATMOSFERI ZAŠTITNOG GASA.....	141
8.1	Osnovni principi postupka.....	141
8.2	Podela i klasifikacija postupka.....	142
8.3	Osnovna oprema za zavarivanje.....	142
8.3.1	Izvor električne struje.....	143
8.3.2	Karakteristike izvora električne struje.....	143
8.3.3	Pištolj.....	143
8.3.4	Poliprovodnik.....	144
8.3.5	Mehanizam za dodavanje žice.....	144
8.3.6	Sistem za dovod zaštitnog gasa.....	145
8.3.7	Mlaznica.....	146
8.3.8	Sistem za hlađenje.....	146
8.3.9	Kontrolna tabla.....	146
8.4	Dodatni i potrošni materijal.....	147
8.4.1	Dodatni materijali.....	147
8.4.2	Potrošni materijali.....	148
8.5	Tehnologija zavarivanja.....	148
8.5.1	Priprema osnovnog materijala za zavarivanje.....	148
8.5.2	Rad sa opremom, priborom, dodatnim i potrošnim materijalima za zavarivanje.....	150
8.5.3	Zavarivanje.....	150
8.5.4	Paljenje električnog luka.....	150
8.5.5	Tehnika zavarivanja.....	151
8.5.6	Parametri zavarivanja.....	154

8.5.7	Efekat tipa električne struje i polariteta.....	155
8.5.8	Tipovi prenosa metala i njihova primena.....	155
	Literatura.....	163
9	ELEKTROLUČNI POSTUPAK ZAVARIVANJA TOPIVOM PUNJENOM ELEKTRODNOM ŽICOM U ATMOSFERI ZAŠTITNOG GASA.....	167
9.1	Podela i klasifikacija postupka.....	167
9.2	Osnovna oprema za zavarivanje.....	168
9.3	Dodatni i potrošni materijali.....	168
9.3.1	Podela dodatnih materijala.....	168
9.3.2	Klasifikacija dodatnih materijala.....	169
9.4	Tehnologija zavarivanja.....	169
	Literatura.....	171
10	RUČNI ELEKTROLUČNI POSTUPCI ZAVARIVANJA OBLOŽENOM TOPIVOM ELEKTRODOM.....	173
10.1	Osnovni principi postupka.....	173
10.2	Podela i klasifikacija postupka.....	174
10.3	Osnovna oprema za zavarivanje.....	174
10.3.1	Izvor električne struje.....	174
10.3.2	Kontrolna tabla.....	175
10.3.3	Električni provodnici.....	176
10.3.4	Držač elektrode.....	177
10.3.5	Klešta za povezivanje naponskog kabela.....	177
10.3.6	Radni sto, sistem za odvođenje produkata sagorevanja, zavarivački alat i pribor.....	178
10.4	Potrošni i dodatni materijali.....	179
10.4.1	Hemijski sastav obložene elektrode.....	180
10.4.2	Funkcija obložene elektrode.....	180
10.4.3	Klasifikacija, podela i tipovi obloženih elektroda.....	181
10.4.4	Sagorevanje obloge elektroda – osnovne hemijske reakcije.....	185
10.4.5	Proizvodnja elektroda.....	185
10.4.6	Upotreba i skladištenje elektroda.....	186
10.5	Tehnologija zavarivanja.....	187
10.5.1	Priprema osnovnog materijala za zavarivanje.....	188
10.5.2	Oprema, pribor, dodatni i potrošni materijali za zavarivanje.....	189
10.5.3	Zavarivanje.....	190
10.5.4	Uspostavljanje i prekidanje električnog luka.....	190
10.5.5	Tehnika zavarivanja.....	192
10.5.6	Parametri zavarivanja.....	195
10.5.7	Prekidanje zavarivanja.....	197
	Literatura.....	198
11	ELEKTROLUČNI POSTUPAK ZAVARIVANJA POD PRAŠKOM.....	201
11.1	Osnovni principi postupka.....	201
11.2	Klasifikacija i podela postupka.....	202
11.3	Osnovna oprema za zavarivanje.....	202
11.3.1	Sistem za upravljanje.....	202

11.3.2	Izvori električne struje, karakteristike izvora električne struje.....	203
11.3.3	Pištoli za zavarivanje.....	204
11.3.4	Sistem za snabdevanje dodatnim materijalom.....	205
11.3.5	Sistem za snabdevanje potrošnim materijalom (praškom).....	205
11.3.6	Sistem za stabilizaciju i pozicioniranje radnih komada.....	206
11.4	Dodatni i potrošni materijali.....	206
11.4.1	Elektrodne žice.....	206
11.4.2	Prašak za zavarivanje.....	207
11.4.3	Funkcije praška i žice.....	207
11.4.4	Tipovi praškova i žica.....	208
11.4.5	Proizvodnja i podela potrošnih materijala prema načinu proizvodnje (način dobijanja, tipični defekti).....	208
11.4.6	Korišćenje i skladištenje potrošnih materijala (uslovi skladištenja, naknadno sušenje).....	208
11.5	Tehnologija zavarivanja.....	209
11.5.1	Priprema osnovnog materijala za zavarivanje.....	209
11.5.2	Rad sa opremom, priborom, dodatnim i potrošnim materijalima za zavarivanje.....	210
11.5.3	Zavarivanje.....	210
11.5.4	Metode uspostavljanja električnog luka.....	211
11.5.5	Tehnika zavarivanja.....	211
11.5.6	Prekidanje električnog luka.....	215
11.5.7	Efekat tipa električne struje i polariteta.....	215
11.5.8	Parametri zavarivanja.....	215
11.5.9	Prekidanje zavarivanja.....	215
	Literatura.....	217
12	ZDRAVSTVENI I BEZBEDNOSNI ZAHTEVI SPECIFIČNI ZA ZAVARIVANJE.....	219
	Literatura.....	221
13	PRAKTIČNE VEŽBE.....	223
	Literatura.....	225
	PRILOG.....	227

1 OPŠTI UVOD U TEHNOLOGIJU ZAVARIVANJA

Zavarivanje je proces izrade neraskidive, međuatomske veze između dva tela dejstvom toplotne i/ili mehaničke energije, a po potrebi uz dodatak trećeg tela. Zavarivanjem je moguće spajanje metala sa metalom, metala sa nemetalom i nemetala sa nemetalom, ali se, u opštem slučaju, zavarivanje vezuje za spajanje metala sa metalom.

Iako nije prva i najstarija tehnologija obrade metala, zavarivanje je danas jedna od najkorišćenijih i najstandardizovanijih tehnologija. Procenjuje se da je 40%-60% [1] svih obrada metala povezano sa nekim od brojnih postupaka zavarivanja¹.

1.1 Istorija

Sa pronalaskom metala, i uviđanjem njegovih prednosti u odnosu na drvo i kamen (koji su predstavljali osnovu života i rada prvobitnog čoveka), nastale su i tehnologije obrade metala. Koristeći ih, ljudi su izrađivali metalne predmete koje su koristili u svakodnevnom životu.

Najstarije tehnologije obrade metala su livenje i kovanje, te su one bile osnovica izrade svih alata, oružja i nakita koje je čovek koristio. Livenje i kovanje su tehnologije koje su ubrzale i olakšale razvoj civilizacije.

Zavarivanje metala je nastalo kao veština

koju su livci, kovači, a posebno zlatari, koristili pri izradi alata, nakita, svakodnevnih predmeta i građevina. Majstori svoga zanata su livenje i kovanje koristili da spoje metalne delove delimično (ili potpuno) pretačajući, pa potom i otkivajući metalne delove u jednu celinu. Takvim pristupom obradi metala nastajali su predmeti koji klasičnim livenjem ili kovanjem ne bi bili izradivi ili ne bi imali željene dimenzije, oblike, a samim tim, ne bi imali i željene osobine. Tako je formirana klica nove tehnologije spajanja – *kovačko zavarivanje*.

Najstariji pisani dokument u kome se pominje primena kovačkog zavarivanja pri obradi metala je „Istorija” [2] koju je napisao Herodot². Pored istorijskih događaja, Herodot je u svojoj knjizi opisao povezivanje postolja metalnih posuda sa pozlaćenim ukrasima i to postupkom kovanja uz delimično topljenje. Tako je Herodot opisao stanje tehnologije obrade metala civilizacije, šest vekova pre nove ere (p.n.e).

Brojni kitnjasti mačevi, noževi i slična sečiva pronađena na tlu drevne Mesopotamije³, Kine i Indije, izrađeni su kovačkim zavarivanjem [3]. Procenjeno je da oni potiču iz kasnog bronzanog doba, odnosno, nastali su oko 1600. godine p.n.e [4]. Za nakit od metala pronađen u egipatskim grobnicama, procenjeno je da je nastao oko 3000. godine p.n.e. – u periodu ranog bronzanog doba [5]. I za njega je karakteristično da ima različite ukrase koji su pričvršćeni za osnovu finim kovanjem ivica od srebra, zlata i platine. To je najstariji materijalni dokaz spajanja raznorodnih plemenitih metala.

¹ Prema statističkim podacima Biroa za zapošljavanje Sjedinjenih Američkih Država (SAD) 2015. godine prosečna godišnja neto plata zavarivača bez radnog iskustva iznosila je 38 150 \$, odnosno, zarada je 18,34 \$/h. Tokom 2015. godine, na birou rada bilo je 397 890 radnih mesta za zavarivače a maksimalan broj nezaposlenih zavarivača bio je 2053. Prosečna starost zavarivača je 32,7 godina. Tipičan zavarivač u SAD ima srednju stručnu spremu – 88%, dok je 11% zavarivača sa nižom stručnom spremom a ostatak su zavarivači sa visokom stručnom spremom – 1%. Približno 45% zavarivača su građani Amerike rođeni u SAD. Radno mesto „zavarivač” je, prema anketi američkih srednjoškolaca, na 49. mestu, od 100 ponuđenih „poslova iz snova”.

² Herodot (grčki: *Ηρόδοτος*), istoričar iz antičke Grčke, živeo je u petom veku p.n.e (oko 484. do 425. godine p.n.e.). Naziva se „ocem istorije” zbog svog naučno-istraživačkog pristupa pisanju istorije. Oko 440. p.n.e napisao je „Istoriju” koja predstavlja svedočanstvo o tradiciji, politici, geografiji, usponima i padovima kultura i država poznatih tadašnjoj Grčkoj.

³ Teritorija današnjeg Iraka, okolina grada Basra.

Prema tome, na osnovu pisanih i materijalnih dokaza, može se reći da je kovačko zavarivanje nastalo tokom bronzanog doba, na teritoriji Bliskog Istoka, u istočnom Mediteranu ili na teritoriji južne ili istočne Azije.

Međutim, zavarivanje nije napredovalo dalje od kovačkog zavarivanja gotovo 25 vekova. Nivo tehnologije je bio takav da nije postojao postupak obrade kojim bi se delovi od metala jednostavnije i efikasnije doveli u stanje kada ih je moguće spajati bez da se celi pretapaju i ponovo slivaju u celinu. Tek intenzivan privredni rast čovečanstva tokom industrijske revolucije⁴, stvorio je preduslove za razvoj tehnologija zavarivanja. Dodatno ubrzanje razvoju tehnologije zavarivanja dala je složena geopolitička situacija tokom 18. i 19. veka. Međusobna trvenja velikih svetskih sila, užurbane pripreme za ratove i nezaustavljiva glad za resursima su dodatno ubrzali istraživanja i razvoj tehnologija kojima bi se brže, jeftinije i lakše dolazilo do još veće materijalne moći.

Za zavarivanje metala bilo je važno pronaći odgovarajuće izvore energije, koji bi se jednostavnije koristili i kojima bi se lakše manipuliralo. Otkriće gorivih gasova, kiseonika⁵, ponovno otkriće električnog luka, primena električne struje, razvoj tehnologija za proizvodnju i čuvanje električne struje bili su inicijalne kapisle brzog razvoja tehnologije zavarivanja⁶.

⁴ Industrijska revolucija predstavlja značajnu istorijsku prekretnicu kada je veliki deo tadašnjeg razvijenog sveta prešao na nove proizvodne procese – prešlo se sa ručne na mašinsku obradu, povećala se potrošnja energije, poboljšao se proces dobijanja čelika i ostalih metala/legura, a samim tim se poboljšala izrada oruđa i oružja. Industrijska revolucija je počela sredinom 1760. godine i trajala do 1820, odnosno, 1840. godine [6].

⁵ Otkriće kiseonika se vezuje za godinu 1772. i Karla Šela (šve. Carl Wilhelm Scheele, 09.12.1742. – 21.05.1786), hemičara iz Švedske [7].

⁶ Kako se ova knjiga bavi gasnim postupcima zavarivanja i najčešće korišćenim elektrolučnim postupcima zavarivanja, u daljem delu uvoda biće reči samo o istorijskom razvoju tih postupaka zavarivanja, sa osvrtom na glavne preduslove koji su njihov razvoj omogućili.

1.1.1 Nastanak i razvoj gasnog postupka zavarivanja

Profesor Edmund Dejvi⁷ je 1836. godine, zagrevajući kalijumkarbonat, dobio supstancu⁸ koja je reagovala sa vodom i oslobodila „novi gorivi gas”. U svojim prvim radovima [9, 10], Dejvi je taj gas opisao kao „pogodan za osvetljavanje a jeftin za proizvodnju“, ali dalje istraživanje ovog gasa i njegove primene, profesor Dejvi nije sproveo do kraja. Godine 1860, tragajući za gasom koji dobro gori, Pjer Marselin Bertelot⁹ je ponovio proces dobijanja gasa koji je dobio profesor Dejvi. Marselin je dobijeni gas nazvao „acetilen” i od tada počinje njegova skromna primena za osvetljavanje gradskih ulica u Francuskoj, kod rudarskih lampi itd.

Tokom 1892. godine, Tomas Vilson¹⁰ je usavršio postupak dobijanja kalcijum-karbida (koji u reakciji sa vodom oslobađa acetilen). To je bio prvi efikasan i industrijski primenljiv postupak dobijanja acetilena koji je cenu dobijanja acetilena snizio gotovo sto puta [13].

U istraživanju objavljenom 1895. godine, Henri Luj Lešatelj¹¹ je pokazao da acetilenski plamen dostiže visoku temperaturu ali da ubrzava oksidaciju metala. Time je potvrđena upotrebljivost acetilena za topljenje, livenje i zavarivanje, uz oprez od oksidacije.

Profesor Karl Fon Linde¹² je 1902. godine u Bavarskoj izgradio prvo efikasno postrojenje za dovođenje vazduha u tečno stanje, a potom i za izdvajanje i čuvanje čistog kiseonika. To se dogodilo gotovo 130 godina nakon otkrića kiseonika [16].

Sa mogućnošću proizvodnje i stabilnog „pakovanja” acetilena i kiseonika, vrlo brzo se

⁷ Eng. Edmund Davy (1785. – 05.11.1857), profesor hemije iz Engleske [8].

⁸ U pitanju je kalcijum-karbid (CaC_2).

⁹ Fra. Pierre Eugène Marcellin Berthelot (25.10.1827. – 18.03.1907), hemičar i političar iz Francuske [11].

¹⁰ Eng. Thomas Leopold „Carbide” Willson (14.03.1860. – 20.12.1915), pronalazač iz Kanade [12].

¹¹ Fra. Henry Louis Le Châtelier (08.10.1850. – 17.09.1936), hemičar iz Francuske [14].

¹² Nem. Carl Paul Gottfried Linde ili Carl Von Linde (11.06.1842. – 16.11.1934), profesor iz Nemačke [15].

javila ideja za korišćenje energije sagorevanja acetilena u atmosferi kiseonika za obradu metala. Problem je predstavljala velika eksplozivnost acetilena – nije bilo moguće bezbedno skladištiti velike količine ovog gorivog gasa. Prva sistematična istraživanja eksplozivnosti acetilena pod pritiskom pripisuju se Džordžu Klaudu¹³ (1896). Klaud je uspešno skladištio i čuvao aceten pod pritiskom od 15 bar u čeličnoj boci [17-19].

Paralelno sa razvojem tehnologija dobijanja i čuvanja acetilena i kiseonika, u periodu između 1901-1903. godine, francuski inženjeri Edmond Fuše¹⁴ i Čarls Pikard¹⁵ razvili su postupak zavarivanja čelika sagorevanjem acetilena uz dodatak čistog kiseonika¹⁶. Fuše se pripisuje usavršavanje tehnologije bezbednog čuvanja acetilena pod pritiskom u čeličnim cilindrima ali mu se pripisuje i konstruisanje modernog gorionika za gasni postupak zavarivanja.

Već 1906. godine u Njujorku je postojala prva zavarivačka radionica za gasni postupak zavarivanja koja je radila remont vojnih patrolnih čamaca koristeći Fuševog gorionike. Radnik/Izumitelj po imenu Eugen Bornonvil¹⁷ [18] je tokom 1907. godine u ovoj radionici, gasnim postupkom vršio isecanje otvora prečnika 14 inča, u čeličnim pločama debljine 3 inča za fenomenalnih 12 minuta po otvoru. On je ove otvore isecao sam, a do tada je mehaničko isecanje ovakvog otvora trajalo i do pet radnih dana, uz angažovanje i do petoro ljudi [19].

Od 1910. godine se registruje masovnija primena gasnog postupka za sečenje metala u Sjedinjenim Američkim Državama [19]. Postupak je postao popularan nakon nekoliko spektakularno izvedenih pljački banaka na Američkom „Divljem Zapadu” i to primenom Fuševog i Pikardovog sistema za zavarivanje

koji je vešto prepravljen u sistem za sečenje¹⁸. Brzina kojom su isečeni čelični sefovi debljine nekoliko desetina milimetara je bila neverovatno velika za početak dvadesetog veka [20]. Postalo je jasno koliko efikasan može da bude postupak gasnog zavarivanja/sečenja.

Tokom narednih decenija gasni postupak je neprekidno tehnološki napredovao – razvijene su efikasnije konstrukcije gorionika, poboljšana je pouzdanost gasne instalacije (a samim tim i bezbednost radnika), počelo se sa upotrebom propana, butana i drugih gorivih gasova, razvijeni su sistemi za bolje kontrolisanje pritiska gasova, razvijena je tehnologija bezbednijeg skladištenja velike količine kiseonika i acetilena u relativno malim rezervoarima itd [21].

Procenjuje se da se oko 20% svih zavarenih spojeva danas izrađuje gasnim postupkom zavarivanja (acetilenom) dok gotovo 40% sečenja i pripreme žlebova za zavarene spojeve bude urađeno gasnim (acetilenskim) postupkom sečenja. Gasni postupak zavarivanja je trenutno najjeftiniji komercijalni postupak zavarivanja [22].

1.1.2 Nastanak i razvoj elektrolučnih postupaka zavarivanja

Elektricitet je pojava poznata još iz antičkih vremena, međutim, sa efikasnim i masovnijim korišćenjem električne struje (kao pojave prouzrokovane električnošću) počelo se tek sredinom 18. veka nove ere. Kako se čovečanstvo razvijalo (intenzivnije tokom doba industrijske revolucije), javila se potreba za izvorima lako upotrebljive energije i primena električne struje se lagano nametala, sama po sebi. U to vreme tek su se istraživale mogućnosti primene električne struje i nakon nekoliko važnih otkrića, primena električne

¹³ Fra. Georges Claude (24.09.1870. – 23.05.1960), inženjer i izumitelj iz Francuske [17-19].

¹⁴ Fra. Edmond Fouché (1861 – 1931), inženjer mašinstva iz Francuske [17].

¹⁵ Fra. Charles Picard (1872 – 1957), inženjer hemije iz Francuske [17].

¹⁶ Godine 1894. izvršeno je prvo gasno zavarivanje vodonikom kao gorivim gasom [19].

¹⁷ Eng. Eugene Bournonville.

¹⁸ Nije ostalo zabeleženo ko su lica koja su ove prepravke izvela. Sin Britanca Brauna, koji je 1890. godine bezuspešno pokušao pljačku banke u Londonu sečenjem sefa gasnim plamenom, učestvovao je u pljački banke u Vičiti, Kansas, 1912. godine kao operater na gorioniku, pa je moguće da su Braunovi izveli prepravku Pikardovog sistema.

struje za zavarivanje je postala očigledna.

Otkriće električnog luka ne može da se pripiše niti jednom čoveku jer je električni luk, kao pojava, vidljiv u prirodi i prepoznat je još u prastorijskim vremenima. Istraživačima može da se pripiše otkriće principa po kojima se električni luk uspostavlja, razvoj mašina i uređaja koje proizvode električni luk, održavanje i podešavanje električnog luka itd, ali ne i njegovo otkriće.

Hemfri Dejvi¹⁹ je 1801. godine objavio naučni rad gde je opisao varnicu: koristeći Voltinu bateriju, spajajući pa zatim razdvajajući kontakte baterije, Dejvi je formirao kratkotrajan električni luk koji je zagrejao bakarne kontakte do usijanja [24]. Luk je bio nestabilan, promenljivih dimenzija, oblika i mesta nastajanja ali je „goreo” sve dok je bilo razlike potencijala u bateriji. Dejvi je tako postao „pionir” veštačkog električnog luka međutim, on je, pored toga, istraživač zaslužan za otkriće nekoliko alkalnih metala (kalcijum, kalijum, natrijum) [24].

Nezavisno od Dejvija, Vasilij Petrov²⁰ je 1802. godine ponovio „otkriće” električnog luka radeći na, u to vreme, najvećoj i najmoćnijoj Voltinoj bateriji, sastavljenoj od 4000 ploča od bakra i cinka. U svojim radovima iz 1803-1805. godine [26], Petrov je opisao svoje eksperimente i detaljno je opisao stabilan električni luk koji se formirao tokom realizacije eksperimenata. Petrov je detaljno opisao kako bi ovakav električni luk mogao da se koristi za veštačko osvetljenje, topljenje i livenje metala, uz aktivno umanjeње oksida iz rastopine. Međutim, Petrov i njegova istraživanja su ubrzo posle njegove smrti zaboravljeni. Tek krajem osamdesetih godina 19. veka su razvijena električna postrojenja i električni uređaji bazirani na eksperimentima Vasilija Petrova [26, 27].

Krajem sedamdesetih godina 19. veka,

August Demeriten²¹ je koristio toplotu dobijenu iz gorućeg električnog luka za spajanje olovnih ploča kod baterija/akumulatora [27]. Električni luk je uspostavljan između netopive ugljenične elektrode i olovne ploče. Temperatura zavarivanja kod ovog postupka spajanja je bila veoma niska i postupak se pokazao kao neprimenjiv za zavarivanje čelika. Prilikom Demeritenovog eksperimenta su korišćene kožne rukavice i kećelja, hermetički zatvorene maske, naočare sa dimom zatamnjanim staklima i sistem cevi za odvod otrovnih olovnih isparenja, sve kako bi se umanjio negativan uticaj zavarivanja na radnika. To je prvi zabeleženi slučaj kompletne primene lične zaštite za zavarivača na radnom mestu [27].

Demeriten je 1881. godine patentirao postupak zavarivanja u Francuskoj te je Demeritenov postupak zavarivanja olovnih ploča postao prvi patentirani elektrolučni postupak zavarivanja na svetu a Francuska prva zemlja na svetu koja je zvanično definisala elektrolučni postupak zavarivanja [29].

Demeritenov učenik Benardos²² i njegov kolega Olscevski²³ su, koristeći Petrove baterije i netopivi grafitni štap, izveli prvo elektrolučno zavarivanje čelika u Francuskoj, odnosno, prvo zabeleženo elektrolučno zavarivanje čelika na svetu. Dobijeni šav je bio tvrd i veoma krt zbog uključaka od grafitne elektrode a imao je i brojne poroznosti zbog gasova iz atmosfere. Takođe, ovaj postupak elektrolučnog zavarivanja je bio vrlo nepraktičan, ali je davao dobre osobine za reparaturno zavarivanje i navarivanje te je jedno vreme aktivno korišćen u Evropi. Izumitelji su patentirali ovaj postupak u Francuskoj (1883. godine), Velikoj Britaniji (1885. godine) i Americi (1887. godine) te je ovo prvi međunarodno patentirani postupak

¹⁹ Eng. Humphry Davy (17.12.1778. – 29.05.1829), hemičar i izumitelj iz Engleske [23].

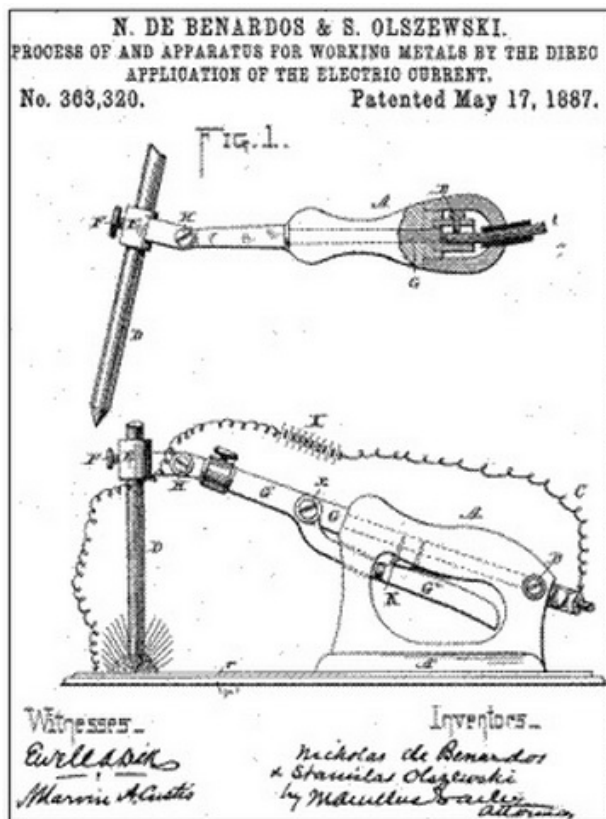
²⁰ Rus. Василий Владимирович Петров (19.07.1761. – 15.08.1834), fizičar, akademik Ruske akademije nauka [25].

²¹ Fran. Baron Auguste de Méritens (1834. – 1898.), elektro-inženjer iz Francuske [28].

²² Rus. Николай Николаевич Бенардос (07.08.1842. – 21.09.1905.), izumitelj iz Rusije [30].

²³ Polj. Stanisław Olszewski (06.01.1852 – 15.07.1898.), inženjer i izumitelj iz Poljske [31].

elektrolučnog zavarivanja čelika [32]. Patentirani postupak je nazvan „Elektrogefest” (slika 1.1), međutim, ovaj naziv nikada nije zaživeo u industrijskoj upotrebi.



Slika 1.1 Šema Benardosovog i Olszewskog patenta u Americi iz 1887. godine za elektrolučni postupak zavarivanja netopivom grafitnom elektrodom nazvan „Elektrogefest” [32]

Krajem 1888. i početkom 1889. godine, Nikolaj Slavjanov²⁴ je koristio generator jednosmerne struje od 1000 A za zavarivanje električnim lukom, pri čemu je, za razliku od Benardosovog „Elektrogefest” postupka, koristio topivu metalnu elektrodu. Zavarivanje je izvedeno na livenom železu u kalupu a dobijeni šav je imao dobru žilavost i malu krtost zbog masivne troske koja se formirala iznad tečnog kupatila [34]. Međutim, i ovako zavareni spoj je imao brojne pukotine, prsline i poroznosti unutar zapremine materijala.

Do početka 20. veka, većina zavarenih spojeva, dobijenih elektrolučnim postupcima zavarivanja, imali su problem sa uključcima i

poroznostima koje su nastajale usled dejstva različitih gasova iz atmosfere. Istraživanja elektrolučnih postupaka zavarivanja su se tokom 20. veka lagano usmerila ka rešavanju ovog problema.

Čarls Kofin²⁵ je 1890. godine u Sjedinjenim Američkim Državama patentirao postupak zavarivanja čelika metalnom elektrodom. Kofin je među prvima u Americi skrenuo pažnju na problem oksidacije metalnih elektroda prilikom zavarivanja, a predvideo je (i predlagao je) uvođenje zaštitnih gasova pri zavarivanju radi poboljšanja osobina zavarenih spojeva [36].

Posle 1900. godine, započeo je intenzivan razvoj obloženih metalnih (topivih) elektroda za zavarivanje. U periodu između 1900. i 1912. godine, Artur Stromenger²⁶ je usavršavao metalnu elektrodu obloženu glinom i krečnjakom sa ciljem da stabilizuje električni luk i zaštiti elektrodu od korozije. Međutim, iako veoma dobro obložena i sa stabilnim električnim lukom, ova elektroda nije postala masovno upotrebljavana zbog svojih dimenzija, ali, prvenstveno, zbog svoje visoke cene. Oskar Kjelberg²⁷ je 1907. godine patentirao svoju prvu obloženu elektrodu za elektrolučni postupak zavarivanja, koja ima jezgro od čistog železa koje je obloženo debelim slojem silikata i karbonata. Takva elektroda je davala šavove dobrih karakteristika, i kod čelika i kod livenih železa, a pri tom je bila jeftina. Sa Kjelbergovom elektrodom započela je nova era zavarivanja – era zavarivanja elektrodama koje štite metal šava od uticaja gasova: kiseonika, vodonika, azota itd [39].

Sa prepoznavanjem gasova iz atmosfere i gasova koji nastaju kao produkti sagorevanja tokom zavarivanja, kao parametara koji značajno utiču na kvalitet zavarenog spoja, dalji razvoj elektrolučnih postupaka

²⁵ Eng. Charles L. Coffin, izumitelj, predsednik korporacije „Welded Steel Barrel” u SAD [35].

²⁶ Eng. Arthur Percy Strohmenger (1876. – 1943), izumitelj iz Engleske [37].

²⁷ Šve. Oscar Kjellberg (21.09.1870. – 05.07.1931), izumitelj i industrijalac iz Švedske, osnivač ESAB-a [38, 39].

²⁴ Rus. Никола́й Гаври́лович Славя́нов (05.05.1854. – 17.10.1897), izumitelj iz Rusije [33].

zavarivanja je usmeren na umanjeње uticaja gasova na kvalitet zavarenog spoja. Istraživanja su usmerena na eliminaciju tih gasova iz zone zavarivanja ili upotrebu gasova koji formiraju zaštitnu atmosferu oko metala šava, koji opet – ne dozvoljavaju prisustvo štetnih gasova u zoni zavarivanja.

Irving Langmuir²⁸ je tokom 1924/1925. godine izveo prvo uspešno zavarivanje čelika netopivom volframovom elektrodom u zaštitnoj atmosferi vodonika. Postupak je nazvan „ark-atom²⁹” i predstavlja prvi postupak zavarivanja plazmom. Postupak je primenjivan za zavarivanje čelika i aluminijumovih legura. Tokom 1941. godine, Rasel Meredith³⁰ je usavršio postupak zavarivanja netopivom volframovom elektrodom u atmosferi helijuma. Postupak je prvobitno nazvan „Heliark” [42], međutim, u svetu je danas poznatiji kao TIG (eng. *Tungsten Inert Gas*) postupak zavarivanja. U Evropi se često umesto helijuma, za uspostavljanje zaštitne atmosfere, koristi argon zbog njegove niže cene u odnosu na helijum. „Heliark” postupak zavarivanja se prvobitno koristio za zavarivanje lakih/tankih pancir ploča na avionima ratnog vazduhoplovstva Sjedinjenih Američkih Država, potom se primena proširila na ostale nemagnetične metale, ali i na čelike velikih debljina. Osnovna mana postupka je mala brzina zavarivanja [39].

Paralelno sa poboljšanjem karakteristika zavarenih spojeva, istraživanja su usmerena ka ubrzanju i automatizaciji realizacije zavarivanja.

Na „Battelle Memorial Institute” u Ohaju, Sjedinjene Američke Države [43], je tokom 1948. godine, pod sponzorstvom „Air Reduction Company”, TIG postupak modifikovan tako da je netopiva volframova elektroda zamenjena konstantno dodavanom elektrodom žicom koja predstavlja dodatni materijal. Električni luk je uspostavljen

između žice i radnih komada a zaštitni gas (argon ili helijum) je uduvavan u zonu zavarivanja pored žice za zavarivanje. Ovakva izmena je omogućila primenu električne žice malog prečnika i izvore električne struje konstantnog napona.

Ljobavski³¹ i Novožilov³² su 1953. godine objavili članak gde su opisali uspešno zavarivanje čelika topivom elektrodom u atmosferi ugljendioksida (CO₂). Oprema koju su koristili bila je istovetna opremi za TIG postupak, međutim, upotreba višestruko jeftinijeg ugljendioksida u odnosu na argon ili helijum, doprinela je brzom rastu popularnosti postupka. Danas korišćeni postupak, odnosno, usavršeni postupak Ljobavskog i Novožilova, se popularno naziva MAG (srp. *Metal Aktivni Gas*) postupak zavarivanja. Kasnije modifikacije postupka dovele su do razvoja jednoručnog pištolja za zavarivanje, sistema za hlađenje itd. koji su mnogo povećali proizvodnost MAG postupka. Od šezdesetih godina dvadesetog veka u upotrebi je MIG (srp. *Metal Inertni Gas*) postupak zavarivanja kod koga se koriste inertni helijum ili argon.

Procenjuje se da se oko 40% zavarenih spojeva danas izrađuje MAG/MIG postupcima zavarivanja [1, 17].

Razvoj automatizovanih i mehanizovanih elektrolučnih postupaka zavarivanja počeo je tokom treće decenije dvadesetog veka i odnosi se na sve (tada) postojeće elektrolučne postupke zavarivanja. Automatizovani i mehanizovani postupci zavarivanja su precizniji i efikasniji u odnosu na ručne postupke, daju stabilne osobine zavarenog spoja, ali kao problem se javlja pojava otvorenog električnog luka i veliko tečno kupatilo koje se brzo hladi pa se formiraju nepovoljne metalne strukture u metalu šava. Radi eliminacije takvih nedostataka, istraživanja su se orijentisala na

²⁸ Eng. Irving Langmuir (31.01.1881. – 16.08.1957), hemičar/fizičar iz Sjedinjenih Američkih Država [40].

²⁹ Eng. *Arc-atom welding*, odnosno, *Atomic hydrogen welding* [41].

³⁰ Eng. Russell Meredith (1901. – ?), inženjer iz Sjedinjenih Američkih Država [42].

³¹ Rus. КОНСТАНТИН ВАСИЛЬЕВИЧ ЛЮБАВСКИЙ (04.09.1907. – 1984), tehnolog zavarivanja i metalurg iz Sovjetskog Saveza [44].

³² Rus. НИКОЛАЙ МИХАЙЛОВИЧ НОВОЖИЛОВ (1916 – ?), inženjer, tehnolog-metalurg iz Sovjetskog Saveza/Rusije [45].

formiranje električnog luka pod praškom određene hemijske strukture koji štiti zavareni spoj tokom i nakon zavarivanja.

Prvo pominjanje postupka zavarivanja pod praškom vezuje se za Dimitrija Dulčevskog³³, i godinu 1923. U jednom od svojih radova, Dulčevski je detaljno opisao metalurški uticaj praška na zavareni spoj a krajem 1927. godine patentirao je postupak zavarivanja bakra pod praškom. Od 1930. godine, kompanija „Western Pipe and Steel Company” iz San Franciska formirala je proizvodnu liniju za zavarivanje cevi postupkom zavarivanja pod praškom. Već 1935. godine, „Linde Air Products Company” iz Minhena (osnivač je profesor Karl Fon Linde) je prema postojećim patentima započela zavarivanje čeličnih ploča debljina 75 mm, brzinom od 10 m/h. Američki industrijalci su prepoznali mogućnosti i prednosti ovog postupka tako da je do 1944. godine u Americi bilo aktivno preko 3000 mašina sposobnih za ovakve režime zavarivanja i većina je bila angažovana u brodogradilištima, na izradi ratnih i trgovačkih brodova [17].

Tokom 1938. godine Konstantin Hrenov³⁴ je razvio postupak zavarivanja pod praškom sa keramičkom podloškom, na „E. O. Paton Electric Welding Institute” u Kijevu. Godinu dana kasnije, postupak je usavršen, a već 1940. godine su predstavljeni mašina za zavarivanje i elektrodne žice kojima se zavarivanje vrši brzinom od 32 m/h i to na debljini materijala od 200 mm. Sredinom 1941. godine, ovaj postupak je osnovni postupak zavarivanja oklopa i kupola tenkova u SSSR-u. Čuveni T-34 tenkovi³⁵ imali su oko

50% delova oklopa izrađena postupkom zavarivanja pod praškom.

Do današnjih dana, svi elektrolučni postupci su doživeli transformacije, usavršavanja i poboljšanja. Veliki broj postupaka je dobio svoje podvarijante koje imaju prednosti jedna u odnosu na drugu za određene materijale, položaje zavarivanja i okruženje. Ipak, činjenica je da su tokom dvadesetog veka, elektrolučni postupci zavarivanja evoluirali u najbrojnije i najkorišćenije postupke spajanja metala.

1.2 Teorijski model zavarivanja

Teorijski model zavarivanja razmatra spajanje idealnih tela. Idealno telo ima savršenu kristalnu strukturu (idealni metal), idealno ravne površine i nema nečistoće. Zavarivanje idealnih tela, takođe, podrazumeva da tela imaju slične kristalne rešetke (tip rešetke, parametar rešetke, orijentaciju rešetke).

Na slici 1.2, a, prikazana su dva idealna tela na rastojanju l jedno od drugog. Potreban (i dovoljan) uslov formiranja zavarenog spoja je dovođenje graničnih slojeva dva idealna tela na rastojanje manje ili jednako parametru kristalne rešetke (slika 1.2, b) [49, 50]. Tokom vremena, uz dodatak energije zavarivanja, granični spojevi idealnih tela reaguju i uspostavljaju međusobne (neraskidive) veze (slika 1.2, c). Tako nastaje monolitni (zavareni) spoj dva idealna metalna tela.

Uspostavljanje veze između graničnih slojeva idealnih tela uslovljeno je sumom privlačnih i odbojnih sila atoma u graničnim slojevima. Po Borovom modelu atoma, atom je sastavljen od pozitivno naelektrisanog jezgra i negativno naelektrisanih elektrona koji kruže po ustaljenim orbitama oko jezgra. Kada je rastojanje atoma u graničnim slojevima (l) veće od parametra kristalne rešetke (p), u atomima postoje uravnotežene unutrašnje privlačne/odbojne sile (između jezgra atoma i elektrona, između elektrona) sa

³³ Rus. Дмитрий Антонович Дульчевский (16.09.1879. – 1961.), izumitelj iz Rusije [46].

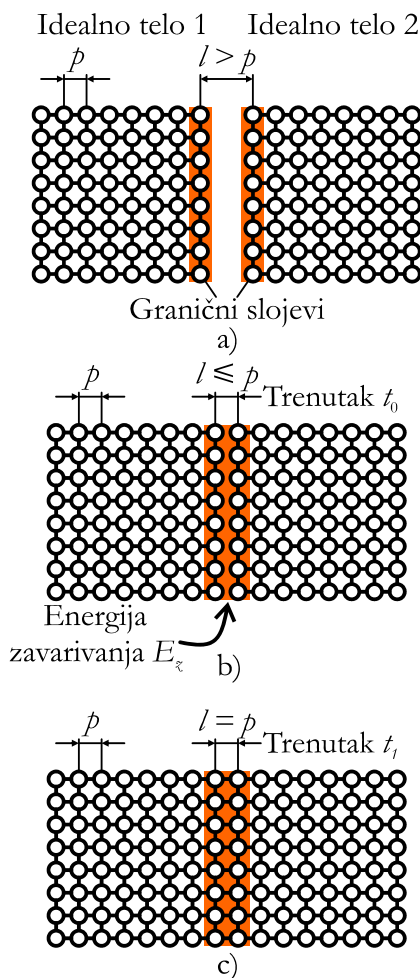
³⁴ Rus. Константин Константинович Хренов (25.02.1894. – 12.10.1984.), istraživač, pionir automatskog zavarivanja, metalurg i izumitelj iz Rusije [47].

³⁵ Od 1940. do 1945. godine, Sovjetski Savez je proizveo 34780 tenkova T-34, što je približno 6000 tenkova godišnje [48]. To je 7,5% više tenkova nego što je proizvodila nacistička Nemačka tokom istog vremenskog perioda, ali sa manjim brojem

proizvodnih pogona i manjim brojem angažovanih radnika.

uravnoteženim spoljašnjim privlačnim (F_{ps}) i odbojnim silama (F_{os}). Atomi jednog i drugog tela su suviše daleko da bi postojale sile između njih (slika 1.3, a).

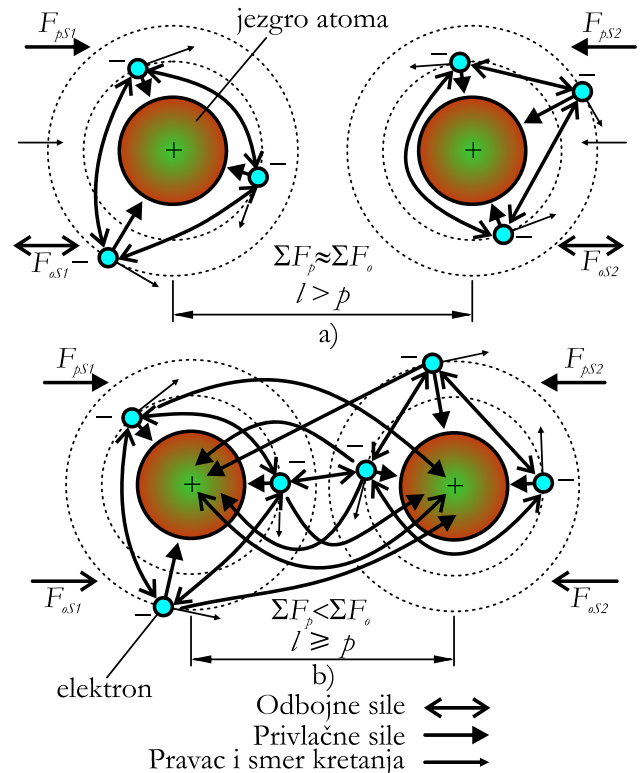
Približavanje graničnih slojeva, odnosno, približavanje atoma na rastojanje blisko parametru kristalne rešetke, dovodi do uspostavljanja privlačnih i odbojnih sila među atomima graničnih slojeva: jezgra atoma se međusobno odbijaju, elektroni takođe ali jezgro jednog atoma privlači elektrone drugog atoma i obrnuto. Na atome i dalje dejstvuju spoljašnje privlačne i odbojne sile (slika 1.3, b).



Slika 1.2 Teorijski proces zavarivanja, p – parametar kristalne rešetke, l – rastojanje graničnih slojeva idealnih tela, t_0 – početak zavarivanja, t_1 – kraj zavarivanja, E_z – energija zavarivanja: a) Početni položaj idealnih tela pre početka zavarivanja, b) početak uspostavljanja veze između graničnih slojeva – zavarivanje, c) kraj zavarivanja

Prema zakonima mehanike, tela u stabilnoj ravnoteži imaju težnju da ostanu u

tom stanju. Približavanje atoma graničnih slojeva je aktivnost koja vodi ka privlačenju pa je reakcija atoma indukcija odbojne sile. Rezultujuća sila je, u ovom slučaju, odbojna i ona teži ka povećanju rastojanja među atomima i uspostavljanju prvobitne ravnoteže. Ukoliko prestane aktivnost koja vodi ka približavanju slojeva, slojevi (tela) se udaljavaju na rastojanje veće od parametra kristalne rešetke i trajni monolitni spoj između slojeva nije uspostavljen.



Slika 1.3 Atomi u graničnim slojevima i dejstvo privlačnih i odbojnih sila: a) atomi su na rastojanju većem od parametra kristalne rešetke, b) atomi su na rastojanju bliskom parametru rešetke

Da bi se tela trajno spojila (preko graničnih slojeva) neophodno je da se uloži dodatni rad kojim se atomi graničnih slojeva približavaju na rastojanje manje od parametra kristalne rešetke ($l < p$). U tom slučaju su elektroni i atomska jezgra atoma oba sloja primorani da uspostave nove strukturne konfiguracije (dolazi do razmene elektrona, elektroni menjaju svoje orbite itd) i uspostavlja se metastabilna dinamička ravnoteža privlačnih i odbojnih sila atoma slojeva. Ukoliko je uloženi rad dovoljno veliki i njegovo dejstvo traje dovoljno dugo,

metastabilna dinamička ravnoteža privlačnih i odbojnih sila postaje stabilna statička ravnoteža. Po prestanku dejstva rada, tela ostaju spojena – ne postoji vidljiva granica među slojevima i tada se kaže da su tela „zavarena”.

Količina rada uložena tokom vremena koja je dovela do približavanja slojeva na kritično rastojanje i uspostavila stabilnu ravnotežu spojenih slojeva naziva se energijom aktivacije (zavarivanja). Energija aktivacije može da bude:

- čisto mehanička (primena sile velikog intenziteta u kratkom vremenskom periodu ili primena mehaničke sile malog intenziteta u dužem vremenskom periodu koje približavaju atome na kritično rastojanje, utiču na rekonfiguraciju atoma i formiraju zavareni spoj);
- čisto toplotna (zagrevanjem tela, atomi u slojevima pojačavaju intenzitet oscilovanja, povećava se intenzitet kretanja elektrona i povećavaju se orbite elektrona – usled toga dolazi do slabljenja odbojnih sila među atomima, atomi se lakše približavaju na kritično rastojanje i rekonfigurišu se, pa se nakon hlađenja uspostavlja stabilna ravnoteža i zavareni spoj);
- kombinacija mehaničke i toplotne.

Svi postojeći postupci zavarivanja koriste jedan od tri navedena tipa energije aktivacije. Gasni postupak i elektrolučni postupci zavarivanja koriste toplotnu energiju koju dobijaju sagorevanjem gorivog gasa ili transformacijom električne energije u toplotnu energiju posredstvom električnog luka.

1.3 Realni model zavarivanja

Približavanje graničnih slojeva na rastojanje jednako ili manje od parametra rešetke je uslov koji mora da bude ispunjen pri zavarivanju realnih tela. Međutim, realna tela su drugačija od idealnih:

- metali imaju kristalnu strukturu ali ona nije idealna niti je parametar rešetke konstantan,
- površine graničnih slojeva nisu idealno

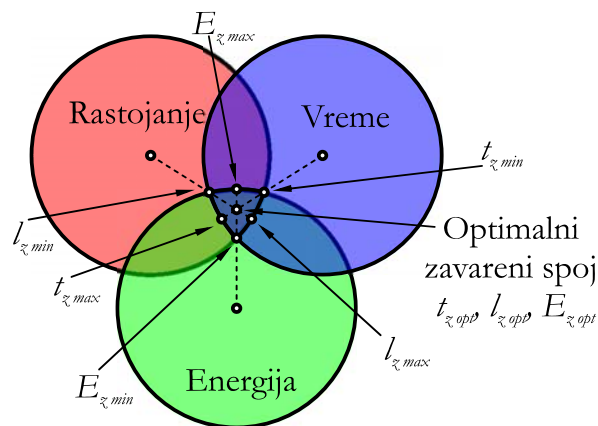
glatke niti su hemijski i fizički čiste.

Zbog toga je kod realnih tela teže dovesti granične slojeve na odgovarajuće rastojanje – potrebno je više energije, veza među atomima slojeva nije idealno uspostavljena pa nije moguće uspostaviti vezu preko samo dva reda atoma.

U svakom slučaju, zavarivanje predstavlja proces spajanja dva tela u neraskidivu (monolitnu) celinu, po površinama oba tela koje su na malom rastojanju jedna od druge, uz dodatak energije koja proces zavarivanja započinje i sprovodi tokom nekog vremenskog perioda.

Ovakvim opisom procesa zavarivanja, definisane su tri veličine koje moraju saglasno da dejstvuju na tela kako bi se zavarivanje izvršilo: rastojanje (dužina), energija i vreme.

Ukoliko se vreme, rastojanje i energija predstave kao skupovi mogućih pojava (grafički kao Venovi dijagrami), zavareni spoj je tačka koja pripada preseku sva tri skupa (slika 1.4).



Slika 1.4 Šematski prikaz zavarivanja u funkciji rastojanja, vremena i energije: $l_{z\min}$ – minimalno rastojanje na kome je zavarivanje moguće, $l_{z\max}$ – maksimalno rastojanje na kome je zavarivanje moguće, $t_{z\min}$ – minimalno potrebno vreme za zavarivanje, $t_{z\max}$ – maksimalno dopušteno vreme zavarivanja, $E_{z\min}$ – minimalna količina energije potrebna za zavarivanje, $E_{z\max}$ – maksimalna količina energije koja sme da se dovode pri zavarivanju, $t_{z\opt}$ – optimalno vreme zavarivanja, $l_{z\opt}$ – optimalno rastojanje, $E_{z\opt}$ – optimalna količina energije potrebna za zavarivanje

Analizom šeme na slici 1.4, lako se dolazi do zaključka da postoji više tačaka u preseku skupova koje zadovoljavaju navedeni kriterijum. Na primer, zavareni spoj može da

se dobije ukoliko zavarivanje traje nešto duže ali se dovede manje energije, ali može da se dobije i ukoliko traje nešto kraće ali se dovede više energije.

Skupovi daju donja i gornja ograničenja za sve veličine, odnosno, daju granice stvaranja zavarenog spoja ali i granice razaranja osnovnog metala bez nastajanja zavarenog spoja.

Centralna tačka preseka skupova je mesto optimalnog zavarenog spoja dobijenog optimalnim vrednostima rastojanja, utrošenog vremena i uložene energije. U realnosti se optimumu teži ali se on teško/retko ostvaruje.

1.4 Postupci zavarivanja koji se najviše primenjuju

Danas je u upotrebi preko 400 postupaka zavarivanja (mnogi su standardizovani [51]) namenjenih spajanju metala, nemetala i kombinacijama metala i nemetala. Neki od postupaka su stari više od 50 godina ali je veliki broj postupaka nastao u poslednjih 20-30 godina.

Međutim, oko 90% svih zavarenih spojeva izrađuje se primenom tek nekoliko postupaka zavarivanja. To su sledeći postupci:

- gasni postupak zavarivanja,
- ručni elektrolučni postupak zavarivanja obloženom elektrodom,
- elektrolučni postupci zavarivanja topivom elektrodom u atmosferi zaštitnog gasa,
- elektrolučni postupak zavarivanja netopivom volframovom elektrodom u atmosferi zaštitnog gasa,
- elektrolučni postupak zavarivanja pod praškom.

Svaki od navedenih postupaka ima svoje specifičnosti, prednosti i nedostatke, ograničenja i opseg primene.

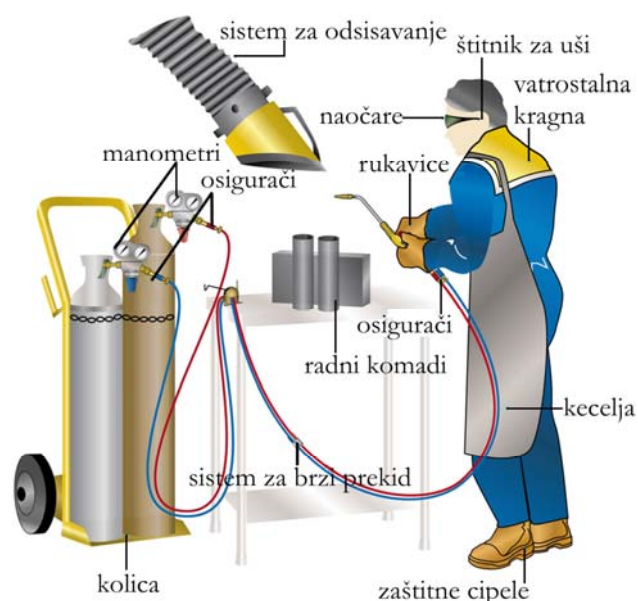
1.4.1 Gasni postupak zavarivanja

Gasni postupak zavarivanja danas podrazumeva postupak zavarivanja topljenjem gde se kao gorivi gas najčešće koristi acetilen

koji sagoreva u mešavini sa čistim kiseonikom ili u slobodnoj atmosferi. Koriste se i drugi gorivi gasovi: metan, propilen, butan itd. ali u manjem obimu nego acetilen. Količina toplote koja se oslobađa sagorevanjem gorivog gasa koristi se za topljenje osnovnog i dodatnog materijala (ili samo osnovnog metala), koji se mešaju u tečnom kupatilu i formiraju metal šava što na kraju rezultira formiranjem zavarenog spoja. Sagorevanje gorivog gasa dešava se nakon mešanja gorivog gasa i kiseonika u odgovarajućem uređaju za formiranje i kontrolisanje smeše.

Gorivi gasovi se čuvaju u odgovarajućim rezervoarima pod pritiskom i transportuju se do zone zavarivanja odgovarajućom fiksnom ili pokretnom instalacijom, koja se sastoji od brojnih elemenata za regulisanje protoka, pritiska gasa, osigurača od eksplozije itd.

Gasni postupak zavarivanja je najčešće ručni: radnik vrši zavarivanje koristeći jednu ili obe ruke – u jednoj ruci drži gorionik dok drugom rukom drži dodatni materijal u obliku elektrodne žice. Radi svoje zaštite, radnik na glavi nosi naočare za zaštitu od jake svetlosti, čepove za uši (ukoliko je buka velika), na rukama rukavice, radnu kecelju oko struka, kragu oko vrata i zaštitu za noge – kamašne. Ukoliko se zavarivanje vrši u zatvorenom prostoru, neophodan je sistem za odvođenje gasova i produkata sagorevanja.



Slika 1.5 Šematski prikaz opreme i radnog mesta za gasni postupak zavarivanja [52]

Na slici 1.5 prikazano je radno mesto za gasni postupak zavarivanja sa neophodnom opremom, priborom i uređajima.

Radnik može vrlo precizno da vodi postupak gasnog zavarivanja: on može da kontroliše brzinu zavarivanja, količinu materijala koji se nanosi i unos toplote u zavareni spoj. Količina toplote koja se unosi gasnim postupkom u spoj je relativno mala (u odnosu na elektrolučne postupke zavarivanja) i nije dobro koncentrisana te je potrebno duže zagrevanje zone zavarivanja, opet, u odnosu na elektrolučne postupke zavarivanja. Kao posledica dugog zagrevanja, javljaju se strukturne i metalurške promene osnovnog materijala u zoni i oko zone zavarivanja. Ove promene su, po pravilu, nepovoljne.

Gasnim postupkom zavarivanja se najčešće spajaju tanki limovi i cevi manjeg prečnika³⁶, ali je postupak pogodan i za reparaturno zavarivanje, u svim položajima zavarivanja. Materijali koji se zavaruju gasnim postupkom su niskougljenični čelici i obojeni metali (bakar npr.). Gasni postupak se koristi i za sečenje, pripremu žlebova, ali se koristi i za ispravljanje, savijanje, predgrevanje, zagrevanje itd.

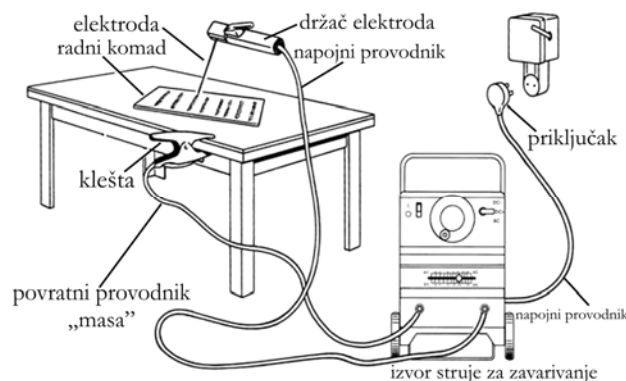
Pored naziva „gasni postupak zavarivanja”³⁷, u upotrebi su i *gasno zavarivanje*, a još češće se u svakodnevnom govoru sreće naziv *autogeno zavarivanje*.

1.4.2 Ručni elektrolučni postupak zavarivanja obloženom topivom elektrodom

Ručni elektrolučni postupak zavarivanja obloženom topivom elektrodom predstavlja postupak zavarivanja kod koga se električni luk uspostavlja između radnih komada i topive, obložene metalne elektrode. Uspostavljeni električni luk zagreva i topi deo osnovnog metala i jezgro elektrode a pri tom sagoreva oblogu elektrode. Istopljeno jezgro elektrode i deo osnovnog metala se mešaju u

tečnom kupatilu i nakon hlađenja formiraju metal šava. Tokom sagorevanja obloge, oslobađaju se gasovi, koji se ponašaju kao zaštita metalu šava, a na površini lica šava se deponuju produkti sagorevanja u vidu troske, koja se, takođe, ponaša kao zaštita.

Na slici 1.6 prikazana je šema radnog mesta za tipičan elektrolučni postupak zavarivanja obloženom elektrodom sa potrebnim izvorom struje za zavarivanje, opremom i priborom.



Slika 1.6 Šematski prikaz opreme i radnog mesta za ručni elektrolučni postupak zavarivanja obloženom topivom elektrodom

Po završetku zavarivanja i nakon delimičnog hlađenja šava, troska se uklanja zavarivačkim čekićem i metalnom četkom. Nanošenje novog sloja preko neočišćene površine (lica šava) nije dozvoljeno.

Postupak elektrolučnog zavarivanja obloženom topivom elektrodom je jedan od najprimenjivanijih postupaka zavarivanja danas zbog svoje jednostavnosti, širokog opsega primene (s obzirom na materijale, položaje, i oblike koji se uspešno zavaruju), cenu i brzinu zavarivanja. Postupak je primenjiv za veliku grupu čelika – pločastog ili cevastog oblika, debljina do nekoliko desetina milimetara, kako u radionici, tako i na terenu. Nedostatak postupka je česta izmena elektroda (zbog relativno brze potrošnje) što može da dovede do nesavršenosti zavarenog spoja na mestu prekida/uspostavljanja električnog luka ukoliko radnik nema dovoljno iskustva. Kvalitet zavarenog spoja mnogo zavisi od radnika – on mora da bude dobro obučan za realizaciju određenog posla, a obuka je dugotrajan, zahtevan i skup proces.

³⁶ Najčešće je do Ø150 mm, ali to nije pravilo.

³⁷ Na engleskom jeziku je *Oxyfuel gas welding*, na francuskom jeziku je *Soudage oxygaz* a na nemačkom jeziku je *Gasschweißen mit Sauerstoff-Brenngas-Flamme* [51].

Dodatni problem postupka je mala efikasnost rada zavarivača – čišćenje zavarenog spoja i uklanjanje troske nakon svakog prolaza zahteva mnogo radnog vremena.

Problem po zdravlje radnika mogu da predstavljaju jarko blještavo zračenje električnog luka kao i gasovi koji nastaju sagorevanjem obloge elektrode. I pored primene lične zaštite gasovi i zračenje mogu da naruše zdravlje zavarivača.

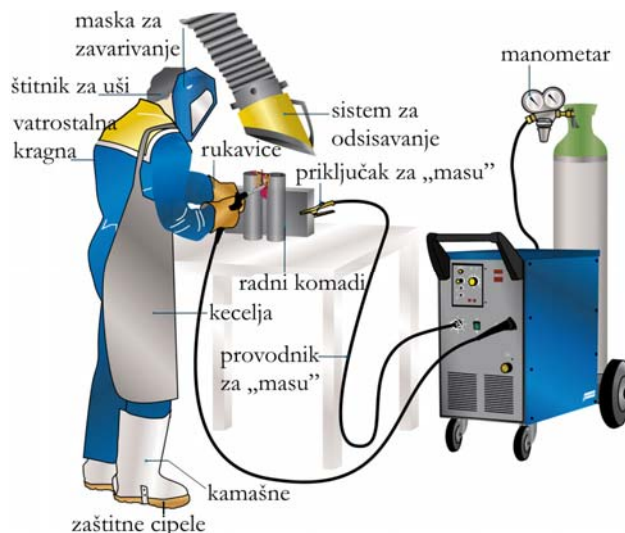
Pored naziva ručni elektrolučni postupak zavarivanja obloženom topivom elektrodom³⁸ u upotrebi je i E postupak zavarivanja (električni postupak zavarivanja), ali se u praksi češće sreće naziv REL postupak zavarivanja (skraćeno od *ručni elektrolučni postupak zavarivanja*).

1.4.3 Elektrolučni postupci zavarivanja topivom elektrodom žicom u atmosferi zaštitnog gasa

Kod elektrolučnih postupaka zavarivanja topivom elektrodom žicom u atmosferi zaštitnog gasa, električni luk se formira između radnih komada i topive (elektrodne) žice koja se kontinualno dovodi u zonu zavarivanja. Električni luk zagreva i topi žicu (dodatni materijal), ali i deo osnovnog materijala, tako da se metal šava formira mešanjem osnovnog i dodatnog materijala. Nekoliko trenutaka pre uspostavljanja električnog luka, tokom zavarivanja i nekoliko trenutaka nakon prekida električnog luka, oko elektrodne žice se uduvava zaštitni gas čija je osnovna funkcija zaštita zone zavarivanja i metala šava od gasova koji mogu pogoršati osobine zavarenog spoja.

Na slici 1.7 je šematski prikaz elektrolučnog postupka zavarivanja topivom elektrodom u atmosferi zaštitnog gasa.

Pored zaštite metala šava, zaštitni gas se koristi da poboljša gorenje električnog luka i da spreči prebrzo hlađenje zavarenog spoja.



Slika 1.7 Šematski prikaz opreme i radnog mesta za elektrolučni postupak zavarivanja topivom elektrodom u atmosferi zaštitnog gasa [52]

Za zavarivanje se koriste dve vrste zaštitnih gasova: aktivni i inertni. Inertni gasovi ne reaguju sa elementima u zoni zavarivanja već svojim prisustvom istiskuju „problematične“ gasove iz zone zavarivanja.

Aktivni gasovi dvojako utiču na elemente i jedinjenja iz atmosfere oko zone zavarivanja: oni istiskuju ostale gasove ali i reaguju sa pojedinim elementima te formiraju jedinjenja koja imaju povoljniji uticaj na zavareni spoj nego slobodna atmosfera. Od inertnih gasova, u Evropi se najčešće koristi argon (Ar) dok se u Sjedinjenim Američkim Državama češće koristi helijum (He). Kao inertni gas koriste se i mešavine argona i helijuma u određenim procentualnim sastavima. Od aktivnih gasova, najčešće se koristi ugljendioksid (CO_2) i mešavine ugljendioksida sa azotom, vodonikom. Koriste se i mešavine ugljendioksida sa inertnim gasovima – kao aktivni zaštitni gasovi.

Grupu postupaka elektrolučnih postupaka zavarivanja topivom elektrodom u atmosferi zaštitnog gasa čine MIG (skraćeno od *Metal Inert Gas*) i MAG (skraćeno od *Metal Active Gas*) postupci zavarivanja. MIG/MAG postupci zavarivanja se koriste za zavarivanje ugljeničnih i legiranih čelika ali i za zavarivanje obojenih metala. MIG/MAG postupci su manje fleksibilni nego REL postupak zavarivanja, ali su brži i efikasniji, nema pojave

³⁸ Na engleskom jeziku je *Manual metal arc welding (metal arc welding with covered electrode)* – MMA, u Sjedinjenim Američkim Državama je *Shielded metal arc welding* – SMAW, na francuskom jeziku je *Soudage manuel à l'arc avec électrode enrobée*, a na nemačkom jeziku je *Lichtbogenhandschweißen* [51].

troske (ili je ona mala) pa samim tim nema potrebe za čišćenjem površine šava. Osnovni nedostaci MIG/MAG postupaka u odnosu na REL postupak su viša cena uređaja za zavarivanje, viši troškovi održavanja uređaja, pojava rasprskavanja materijala ali i manja stabilnost električnog luka u odnosu na ručni elektrolučni postupak zavarivanja obloženom topivom elektrodom.

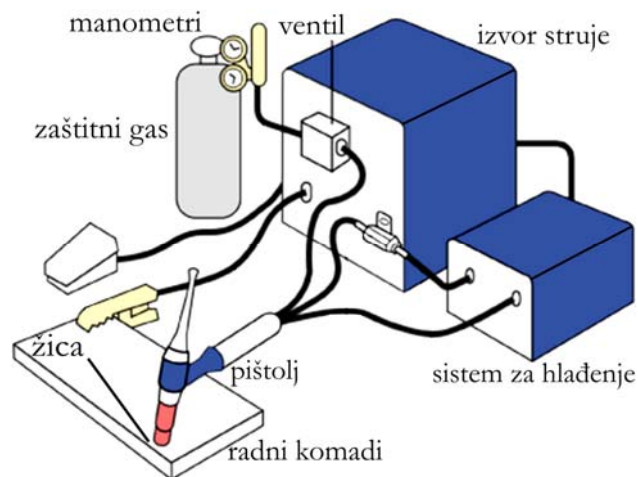
MIG/MAG postupci zavarivanja ili postupci zavarivanja u atmosferi zaštitnog gasa topivom elektrodom³⁹ se nazivaju postupcima zavarivanja u zaštitnoj atmosferi inertnog gasa topivom elektrodom ili postupcima zavarivanja u zaštitnoj atmosferi aktivnog gasa topivom elektrodom. MAG postupak se vrlo često naziva i *CO₂ postupak zavarivanja*. Vrlo često, MIG postupak nije prepoznat kao drugačiji postupak od MAG postupka zavarivanja već se za njega kaže *MAG sa argonom*. Oba naziva su nepravilna, neprecizna i netačna ali su, na žalost, rasprostranjeni u upotrebi.

1.4.4 Elektrolučni postupak zavarivanja netopivom volframovom elektrodom u atmosferi zaštitnog gasa

Elektrolučni postupak zavarivanja netopivom volframovom elektrodom u atmosferi zaštitnog gasa ili TIG postupak zavarivanja (skraćeno od *Tungsten Inert Gas*) je postupak zavarivanja gde se električni luk uspostavlja između radnih komada i netopive volframove (eng. *Tungsten*) elektrode. Topiva elektrodna žica, koja predstavlja dodatni materijal, se dodaje tokom zavarivanja i električni luk je zagreva, zajedno sa delom osnovnog materijala, te mešanjem rastopljenih metala nastaje metal šava. Zavarivanje je moguće i bez dodatnog materijala – rastapanjem samo osnovnog materijala. Nekoliko trenutaka pre početka zavarivanja, tokom trajanja zavarivanja i nekoliko

trenutaka nakon zavarivanja u zonu zavarivanja se uduvava zaštitni inertni gas čija namena su zaštita metala šava i poboljšanje karakteristika električnog luka.

Na slici 1.8 je prikazana šema elektrolučnog postupka zavarivanja netopivom volframovom elektrodom u atmosferi zaštitnog gasa. Kao zaštitni gasovi se uvek koriste inertni gasovi (argon, helijum i njihove mešavine).



Slika 1.8 Šematski prikaz opreme i radnog mesta za elektrolučni postupak zavarivanja netopivom volframovom elektrodom u atmosferi zaštitnog gasa [52]

U poređenju sa ostalim postupcima zavarivanja, TIG postupak zavarivanja je veoma spor i skup ali je kvalitet zavarenog spoja visok: nema pojave troske i nema rasprskavanja, a postiže se kontrolisan i koncentrisan unos energije u zavareni spoj. Takođe, TIG je efikasan i pouzdan postupak zavarivanja te se uvek koristi za odgovorne zavarene spojeve npr. pri izradi korenog šava kod sudova pod pritiskom.

Prvobitna primena TIG postupka bila je za obojene metale, ali se tokom vremena proširila i na čelike. Koristi se za sve položaje zavarivanja, kako kod pločastih, tako i kod cevastih radnih komada, u radionici i na terenu.

TIG postupak zavarivanja je jedan od najplaćenijih postupka zavarivanja, ali sa sobom nosi zdravstvene opasnosti po zavarivača: jako električno i ultraljubičasto zračenje, a produkti sagorevanja mogu biti toksični ukoliko dođe do paljenja volframove elektrode (koja u sebi ima, kao dodatak,

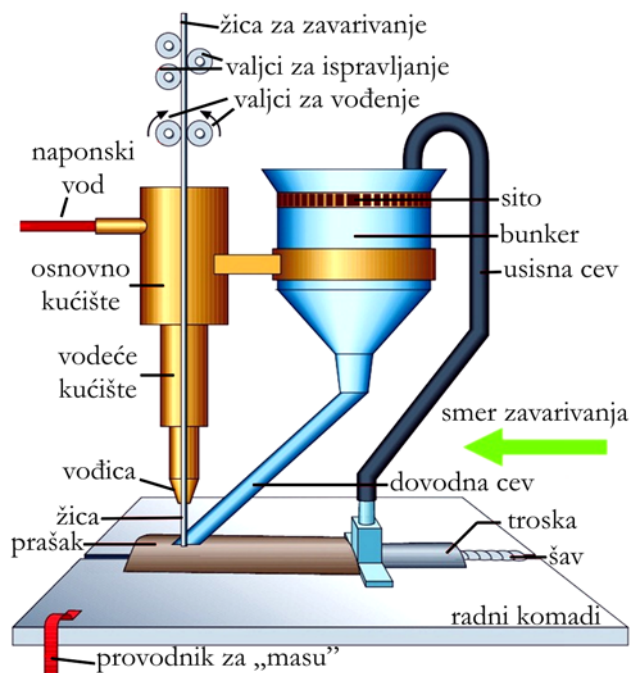
³⁹ Na engleskom jeziku je *Gas-shielded metal arc welding*, u Sjedinjenim Američkim Državama je *Gas metal arc welding*, na francuskom jeziku je *Soudage à l'arc avec électrode fusible sous protection gazeuse*, a na nemačkom jeziku je *Metall-Schutzgasschweißen* [51].

torijum).

Pored naziva elektrolučni postupak zavarivanja netopivom volframovom elektrodom u atmosferi zaštitnog gasa⁴⁰ u upotrebi je TIG postupak zavarivanja ili, ređe, WIG (skraćeno od *Wolfram Inert Gas*) postupak zavarivanja.

1.4.5 Elektrolučni postupak zavarivanja pod praškom

Kod elektrolučnog postupka zavarivanja pod praškom, električni luk se formira između radnih komada i topive elektrodne žice. Specifičnost ovog postupka je što se električni luk održava pod praškom koji se dovodi u zonu zavarivanja. Električni luk zagreva i topi deo osnovnog materijala, dodatni materijal i deo praška te metal šava nastaje mešanjem osnovnog materijala, dodatnog materijala i metalnog dela praška.



Slika 1.9 Šematski prikaz opreme i radnog mesta za elektrolučni postupak zavarivanja pod praškom [52]

Po površini šava ostaju produkti sagorevanja praška u vidu troske. Na slici 1.9

prikazana je šema elektrolučnog postupka zavarivanja pod praškom.

Funkcija zaštitnog praška je višestruka: formiranje zaštitne atmosfere i zaštitne troske oko metala šava, legiranje metala šava, usporavanje procesa hlađenja zavarenog spoja i stabilizacija gorenja električnog luka. Prašak može da se koristi više puta – po završenom zavarivanju, prašak se usisava u bunker, ponovo melje, seje i koristi za zavarivanje.

Elektrolučni postupak zavarivanja pod praškom se koristi za zavarivanje čeličnih delova velike debljine, brzinama zavarivanja koje višestruko nadmašuju brzine zavarivanja kod bilo kog drugog postupka zavarivanja. Postupak je zbog primene praška ograničen na zavarivanje u horizontalnom i koritastom položaju ukoliko se ne koriste posebni uređaji za kontrolu dovodenja i odvođenja praška iz zone zavarivanja. Za zavarivanje delova neophodno je korišćenje bakarnih podmetača sa korene strane.

Pored svih prednosti, glavni nedostaci postupka zavarivanja pod praškom su visoka cena uređaja za zavarivanje, visoki troškovi održavanja i velike temperaturne dilatacije tokom zavarivanja.

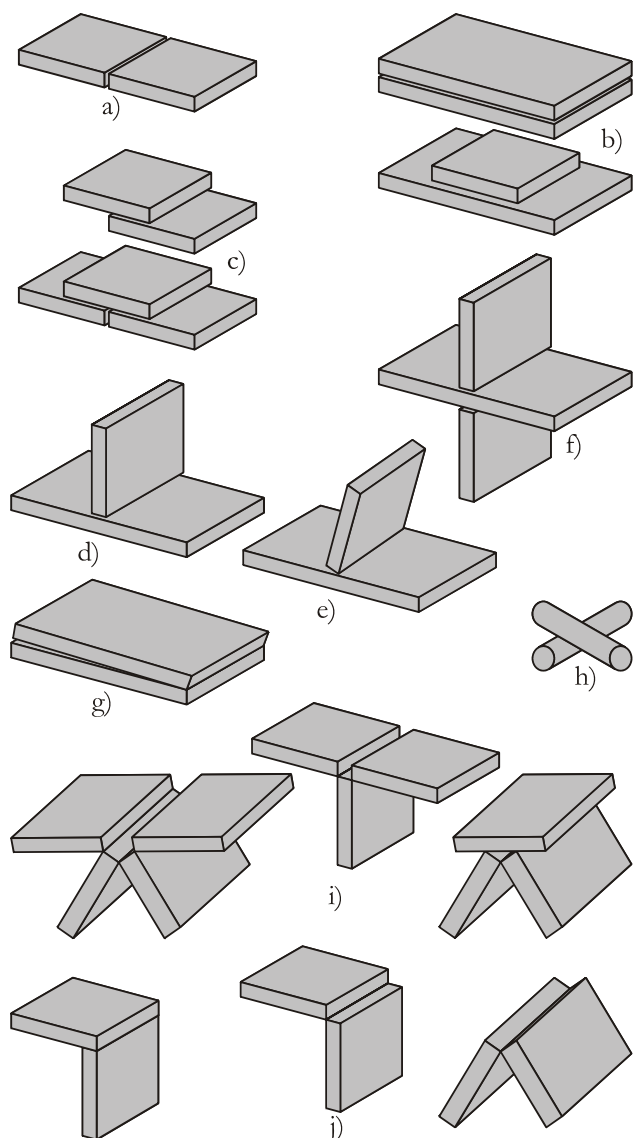
Pored naziva elektrolučni postupak zavarivanja pod praškom⁴¹ u upotrebi je naziv EPP postupak zavarivanja dobijen kao skraćenica punog naziva.

1.5 Terminologija u zavarivanju i položaji zavarivanja

Zavareni spoj je konstruktivna, nerazdvojiva celina dva tela koja je nastala zavarivanjem. U zavisnosti od međusobnog položaja tela koja se zavaruju, razlikuju se sučeoni (slika 1.10, a), paralelni (slika 1.10, b), preklopni (slika 1.10, c), T (slika 1.10, d i e), krstasti (slika 1.10, f), ivični (slika 1.10, g), ukršteni (slika 1.10, h), višestruki (slika 1.10, i), ivični (slika 1.10, j), itd. spojevi.

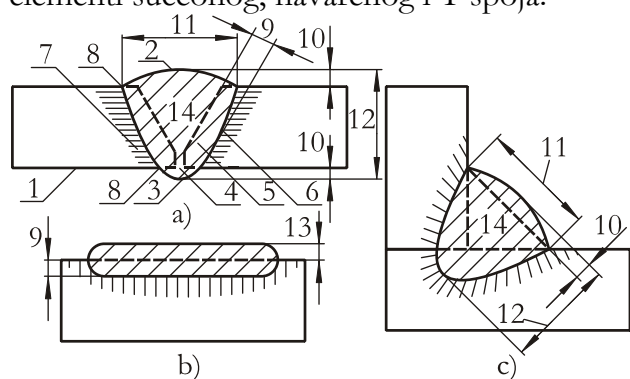
⁴⁰ Na engleskom jeziku je *Gas-shielded arc welding with non-consumable tungsten electrode*, a u Sjedinjenim Američkim Državama je *Gas tungsten arc welding*, na francuskom jeziku je *Soudage à l'arc avec électrode réfractaire sous protection gazeuse*, a na nemačkom jeziku je *Wolfram-Schutzgasschweißen* [51].

⁴¹ Na engleskom je to *Submerged arc welding*, na francuskom jeziku je *Soudage à l'arc sous flux (en poudre)* *Soudage à l'arc submergé*, BE, a na nemačkom jeziku je *Unterpulverschweißen* [51].



Slika 1.10 Tipovi završenih spojeva

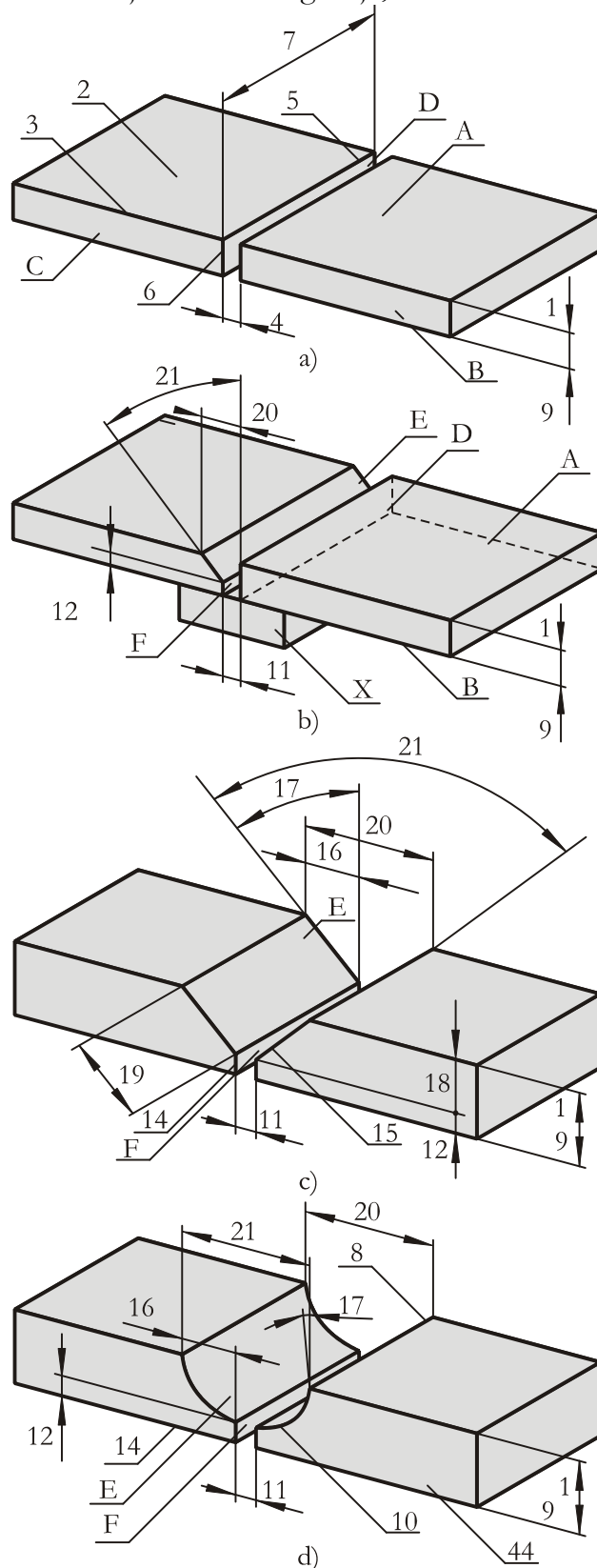
Na slici 1.11 prikazani su osnovni elementi sučeonog, navarenog i T spoja.



Slika 1.11 Osnovni elementi završenog spoja: a) sučeon spoj, b) navareni spoj, c) T spoj

Legenda uz sliku 1.11: 1 – osnovni metal, 2 – lice šava, 3 – naličje šava, 4 – koren šava, 5 – uvar, 6 – linija stapanja (granica uvara), 7 – zona uticaja toplote, 8 – ivica (ranica) šava, 9 – dubina uvara, 10 –

nadvišenje, 11 – širina šava, 12 – debljina šava, 13 – debljina navarenog sloja, 14 – metal šava.

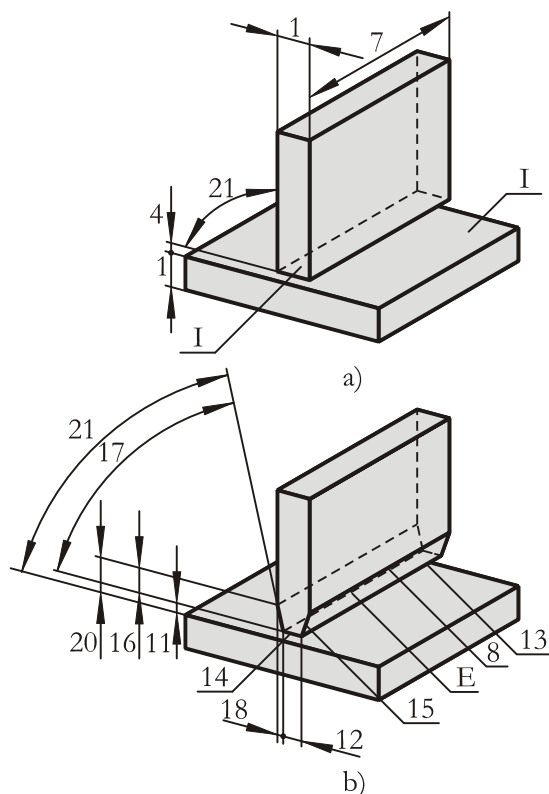


Slika 1.12 Detalji sučeonog spoja: a) bez pripreme žleba, b) Y/2 žleb, c) V žleb, d) U;

Legenda uz sliku 1.12: A – gornja površina radnog komada, B – donja površina

radnog komada, C – ivica ploče, D – površina spajanja (nepripremljena površina), E – površina spajanja (pripremljena površina), F – površina korena, X – podloška, 1 – debljina ploča, 2 – radni komad (osnovni metal), 3 – bočna ivica radnog komada, 4 – koreni zazor, 5 – bočna strana zazora, 6 – bočna strana površine spajanja, 7 – dužina spoja, 8 – longitudinalna ivica žleba, 9 – debljina spoja, 10 – koreni radijus, 11 – koreni zazor, 12 – debljina korene površine, 14 – bočna ivica korene površine, 15 – bočna ivica žleba, 16 – širina žleba, 17 – ugao žleba, 18 – dužina žleba, 19 – širina površine žleba, 20 – širina spoja, 21 – širina žleba uključujući ugao žleba, 44 – oslonac.

Neraskidivu konstruktivnu celinu dva metalna tela – spoj, čine osnovni materijal – OM (slika 1.11, pozicija 1) i metal šava – MŠ (slika 1.11, pozicija 14). Metal šava nastaje očvršćavanjem rastopljenog dela osnovnog materijala i dodatnog materijala – DM (ukoliko se koristi).



Slika 1.13 Detalji ugaonog T žleba: a) bez pripreme, b) obostrano zakošen;

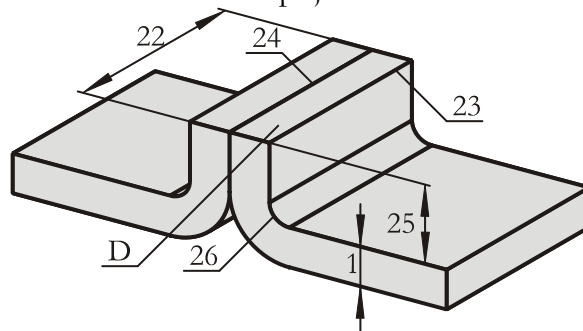
Legenda uz sliku 1.13: E – površina spajanja (pripremljena), I – površina spajanja (kod sučeonih spojeva), 1 – debljina ploče, 4 –

koreni zazor, 7 – dužina spoja, 8 – longitudinalna ivica korene površine, 11 – koreni zazor, 12 – dubina korene površine, 13 – longitudinalna ivica korene površine, 14 – bočna ivica korene površine, 15 – bočna ivica žleba, 16 – širina žleba, 17 – ugao zakošenja, 18 – dubina penetracije, 20 – širina spoja, 21 – širina spoja uključujući i zakošenje.

Deo osnovnog materijala, koji se topi tokom postupka zavarivanja i učestvuje u formiranju metala šava, zove se uvar (slika 1.11, pozicija 5) i odlikuje se dubinom uvara (slika 1.11, pozicija 9) i granicom uvara (slika 1.11, pozicija 6). Metal šava ili, skraćeno, šav, definisan je licem šava (slika 1.11, pozicija 2), naličjem šava (slika 1.11, pozicija 3) i granicom šava (slika 1.11, pozicija 8) a obuhvata koren šava (slika 1.11, pozicija 4). Šav definišu širina (slika 1.11, pozicija 11), visina (slika 1.11, pozicija 12) i nadvišenje šava (slika 1.11, pozicija 10). Kod navarenih spojeva razlikuje se i navarena visina šava (slika 1.11, pozicija 13).

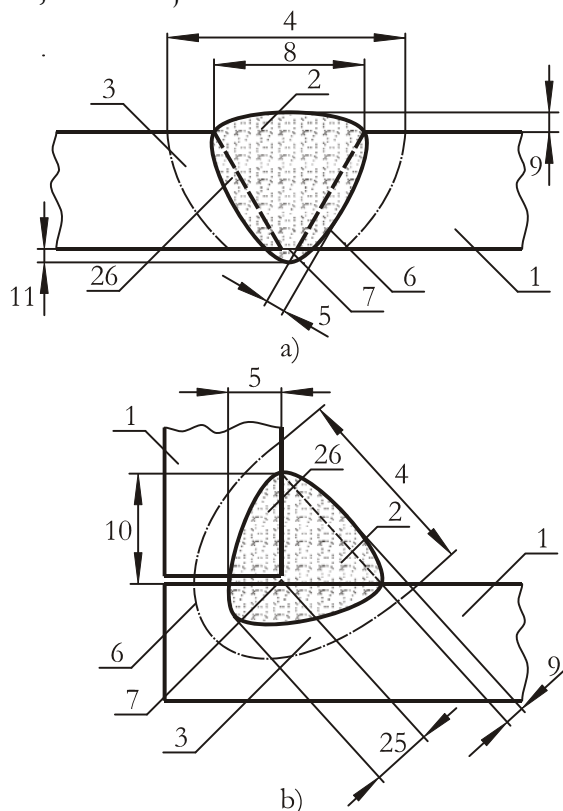
Zapremina u osnovnom materijalu (izvan zone metala šava) koja je pretrpela znatno temperaturno opterećenje, ali nije rastapana, naziva se zonom uticaja toplote – ZUT (slika 1.11, pozicija 7).

Da bi formiranje šava bilo uspešno izvedeno, neophodno je kontaktne površine po kojima se vrši zavarivanje pripremiti. Pripremom ivica formira se otvorena zapremina u osnovnom materijalu koja se naziva žleb. Žleb je u potpunosti definisan oblikom i dimenzijama koji se biraju na osnovu debljine osnovnog materijala, položaja zavarivanja, postupka zavarivanja itd. U zavisnosti od oblika žleba, razlikuju se I, X, Y, K, V, J, U, dvostruki U itd. šavovi. Na slikama 1.12 do 1.17 prikazani su osnovni elementi spojeva.



Slika 1.14 Detalji pripojnog spoja

Legenda uz sliku 1.14: D – površina spajanja (nepripremljena), 1 – debljina ploča, 22 – dužina podignute ivice, 23 – longitudinalna stranica podignute ivice, 24 – granica podignute ivice, 25 – visina podignute ivice, 26 – radijus.



Slika 1.15 Tipični primeri zavarjenih spojeva: a) sučeonni spoj sa V šavom, b) T spoj sa ugaonim šavom

Legenda uz sliku 1.15: 1 – osnovni metal, 2 – metal šava, 3 – zona uticaja toplote, 4 – zona zavarivanja, 5 – utop, 6 – linija spajanja, 7 – koren šava, 8 – širina šava, 9 – nadvišenje, 10 – visina noge šava, 11 – debljina prodora, 25 – prodor (provar) korena, 26 – zona stapanja.

Standard SRPS EN ISO 17659:2012: Zavarivanje – Višejezični termini za zavarene spojeve sa ilustracijama⁴² daje definiciju 21 pojma vezanog za zavarivanje ali i veliki broj ilustracija koje dodatno objašnjavaju navedene pojmove [53]. Znatno brojniju listu pojmova u zavarivanju daje standard SRPS EN 1792:2012: Zavarivanje – Višejezična lista termina za zavarivanje i srodne postupke⁴³ ali bez detaljnih objašnjenja navedenih pojmova [54]. Najnoviji međunarodni standardi koji

obrađuju termine i pojmove u zavarivanju su:

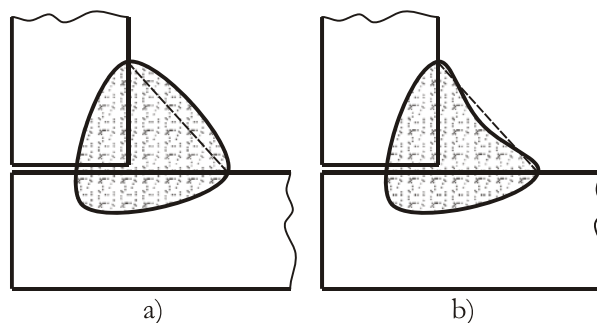
ISO/TR 25901-1:2016: Welding and Allied Processes – Vocabulary – Part 1: General Terms [55];

• ISO/DTR 25901-2: Welding and Allied Processes – Vocabulary – Part 2: Safety and Health⁴⁴;

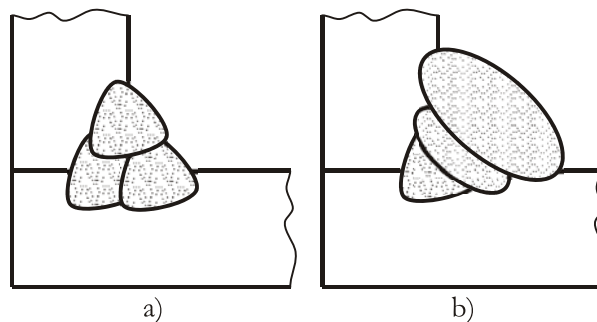
• ISO/TR 25901-3:2016: Welding and allied processes – Vocabulary – Part 3: Welding Processes [56];

• ISO/TR 25901-4:2016: Welding and Allied Processes – Vocabulary – Part 4: Arc Welding [57].

Standard SRPS EN ISO 6947:2012: Zavarivanje i srodni postupci – Položaji pri zavarivanju⁴⁵, definiše položaje zavarivanja kod sučeonih i T spojeva za ispitivanje i proizvodnju u svim oblicima proizvoda [58]. Položaj zavarivanja predstavlja prostorni položaj spoja, definisan u odnosu na horizontalnu ravan, i obeležava se kao PA, PB, PC, PD, PE, PF ili PG. Kod zavarenih spojeva u obliku cevi koriste se i dodatne oznake PJ, PH, J-L045 i H-L045.



Slika 1.16 Tipični primeri ugaonih zavarjenih spojeva: a) konveksni (ispupčeni) šav, b) konkavni (udubljeni) šav



Slika 1.17 Tipični primeri zavarjenih spojeva: a) višeprolazni T spoj sa ugaonim šavovima, b) višeslojni T spoj sa ugaonim šavovima

⁴² Identičan sa: EN ISO 17659:2004 CEN/TC 121.

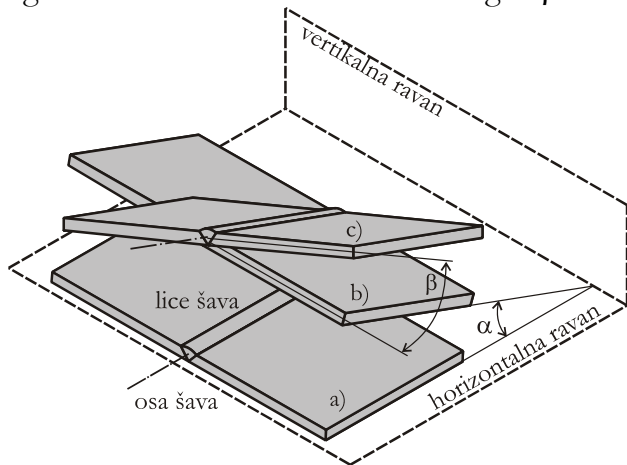
⁴³ Identičan sa: EN 1792:2003 CEN/TC 121.

⁴⁴ Standard je u pripremi.

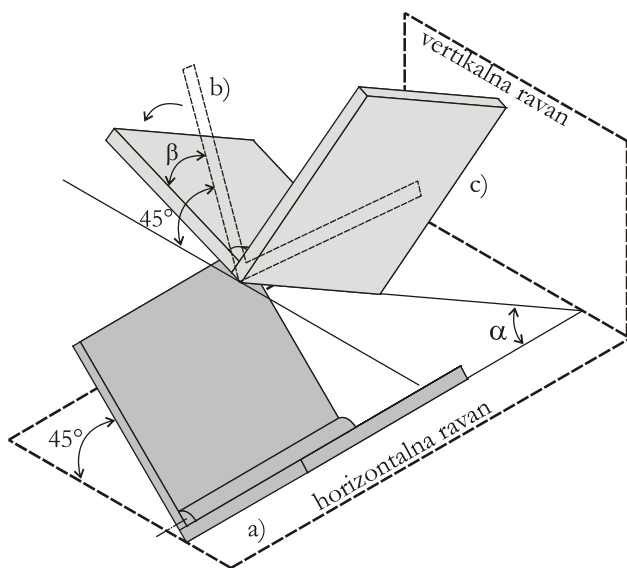
⁴⁵ Identičan sa: EN ISO 6947:2011 CEN/TC 121.

Zavareni šav se, kod pločastih delova, definiše sa dva prostorna ugla: preko ugla nagiba lica/naličja šava u odnosu na horizontalnu ravan (ugao α) i preko ugla rotacije srednje linije šava oko ose šava u odnosu na horizontalnu ravan (ugao β).

Na slici 1.18, u položaju a), prikazan je sučeonni šav koji se naziva osnovnim položajem za sučeono zavarivanje. U ovom slučaju, lice/naličje šava leži u horizontalnoj ravni ($\alpha=0^\circ$) a srednja linija zavarenih ploča (po debljini) je, takođe, vodoravna ($\beta=0^\circ$). Zavareni spoj na slici 1.18, u položaju b), je nagnut za ugao α u odnosu na horizontalu i nije zarotiran oko ose šava ($\beta=0^\circ$). Zavareni spoj na slici 1.18, u položaju c), je nagnut za ugao α i istovremeno zarotiran za ugao β .



Slika 1.18 Položaj sučeonog spoja u odnosu na horizontalnu ravan



Slika 1.19 Položaj ugaonog šava u odnosu na horizontalnu ravan

Kod ugaonih šavova, definisanje položaja zavarivanja se vrši preko uglova α i β , identično kao kod sučeonih.

Na slici 1.19, položaj a), dat je osnovni položaj za zavarivanje pločastih delova pod uglom. Delovi koji se zavaruju su međusobno upravni, naličje šava dodiruje horizontalnu ravan a ivice ploča leže pod uglom od 45° u odnosu na horizontalnu ravan. Ovakav položaj se naziva „koritasti”.

Na slici 1.19, položaj b) – nacrtan isprekidanom linijom, je ugaoni spoj koji je nagnut za ugao α u odnosu na horizontalnu ravan ali nije rotiran oko ose šava ($\beta=0^\circ$). Na slici 1.19, položaj c), je ugaoni spoj dve ploče nagnut za ugao α i zarotiran za ugao β .

Tabela 1.1 Definicija položaja sučeonog spoja [58]

Položaj zavarivanja	Oznaka	Ugao	
		α [°]	β [°]
Ravan	PA	$\pm 15^\circ$	$\pm 30^\circ$
Horizontalni (poprečni)	PC	$\pm 15^\circ$	$+60^\circ$ -10°
Nadglavni	PE	$\pm 80^\circ$	$\pm 80^\circ$
Vertikalni	PF, PG	$+75^\circ$ -10°	$\pm 100^\circ$ $\pm 180^\circ$

Tabela 1.2 Definicija položaja spojeva pod uglom [58]

Položaj zavarivanja	Oznaka	Ugao	
		α [°]	β [°]
Koritasti	PA	$\pm 15^\circ$	$\pm 30^\circ$
Horizontalno-vertikalni	PB	$\pm 15^\circ$	$+15^\circ$ -10°
Horizontalni (poprečni)	PC	$\pm 15^\circ$	$+35^\circ$ -10°
Horizontalno nadglavni	PD	$\pm 80^\circ$	$+35^\circ$ -10°
Nadglavni	PE	$\pm 80^\circ$	$+35^\circ$
Vertikalni	PF, PG	$+75^\circ$ -10°	$\pm 100^\circ$ $\pm 180^\circ$

Odgovarajućim izborom uglova α i β , u granicama $0^\circ \leq \alpha \leq 360^\circ$ i $0^\circ \leq \beta \leq 360^\circ$, definišu se mogući položaji zavarivanja pločastih delova. Tabela 1.1 prikazuje definiciju položaja sučeono zavarenih spojeva a tabela 1.2 prikazuje definiciju položaja zavarenih spojeva pod uglom, u funkciji

uglova nagiba i rotacije.

Cevi i profilisani delovi su specifični jer mogu da se zavaruju sa i bez rotiranja oko ose simetrije. Tabela 1.3 prikazuje sučeone spojeve cevi u različitim položajima.

Tabela 1.3 Položaj sučeonog spoja dve cevi [58]

Položaj zavarivanja	Detalji	Oznaka
Ravni	OH, CR	PA
Horizontalni (poprečni)	OV, CF	PC
Vertikalni (naviše)	OH, CF	PH
Vertikalni (naniže)	OH, CF	PJ
Vertikalni (naviše)	OU, CF	H-L045
Vertikalni (naniže)	OU, CF	J-L045

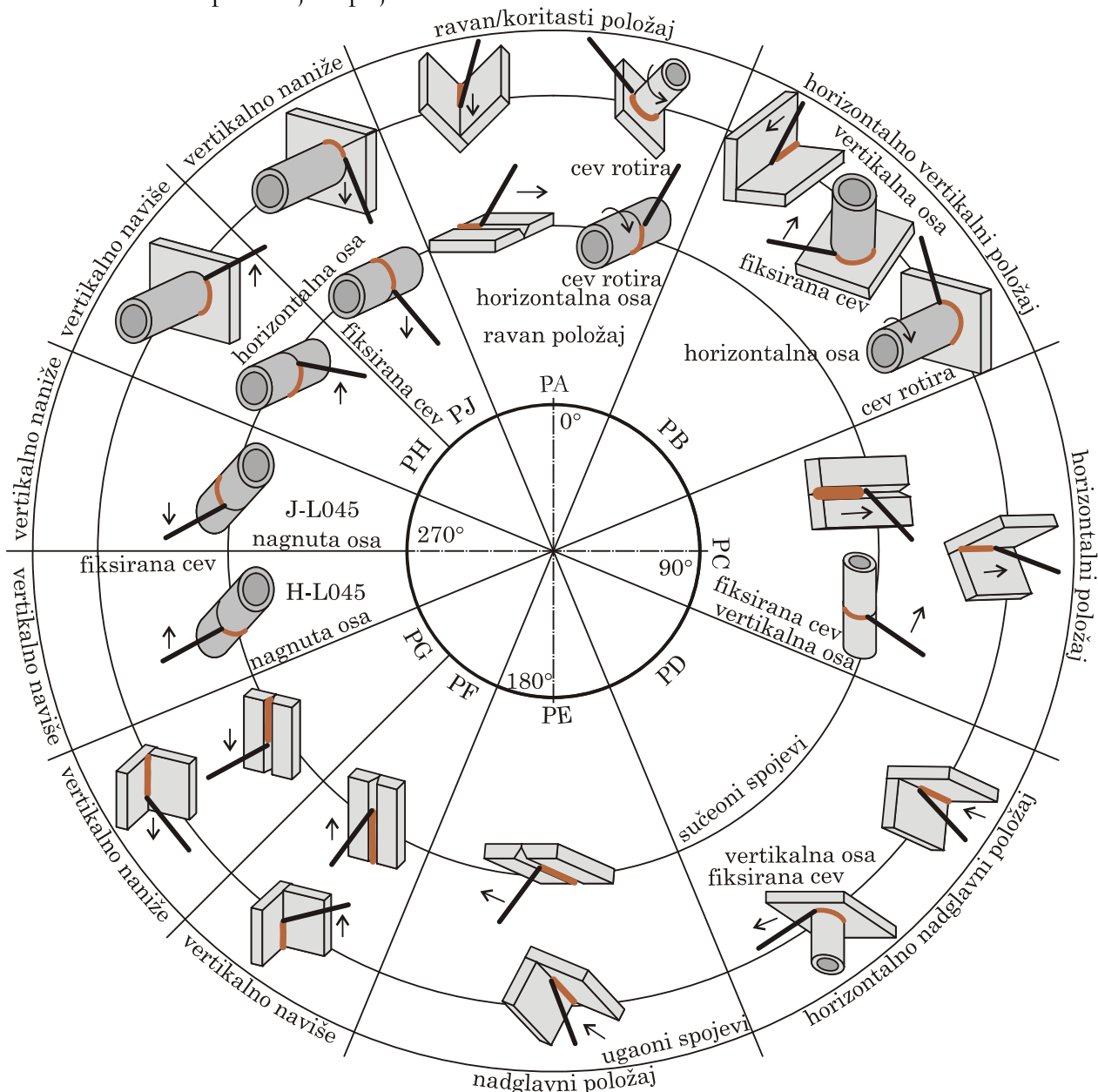
pločom (cev-na-ploču) u različitim položajima zavarivanja.

Tabela 1.4 Položaj ugaonog spoja cevi i ploče [58]

Položaj zavarivanja	Detalji	Oznaka
Koritasti	OU 45°, CR	PA
Horizontalno-vertikalni	OV, CF	PB
Horizontalni (poprečni)	OH, CR	PC
Horizontalno nadglavni	OV, CF	PD
Vertikalni (naviše)	OH, CF	PH
Vertikalni (naniže)	OH, CF	PJ

Legenda uz tabele 1.3 i 1.4: OH – osa horizontalna, OV – osa vertikalna, OU – osa pod uglom, CR – cev rotira, CF – cev fiksirana.

Tabela 1.4 prikazuje spojeve cevi sa



Slika 1.20 Osnovni položaji zavarivanja prema SRPS EN ISO 6947:2012

Na slici 1.20 prikazani su objedinjeni položaji zavarivanja i njihove oznake u zavisnosti od tipova spojeva i vrste priprema.

1.6 Prikazivanje zavarenih spojeva na tehničkim dokumentima

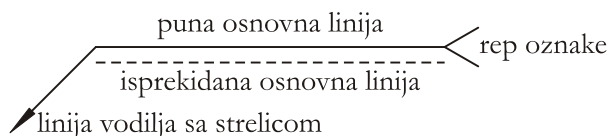
Tehnički crtež nekog sklopa mora da sadrži sve potrebne podatke za izradu zavarenih spojeva. Ti podaci moraju da opišu mesto, oblik i tip zavarenog spoja, geometrijske mere šava, tehnologiju i tehniku zavarivanja, pripremu žleba, oblik spoljne površine šava, kontinuitet šava ali moraju da prikažu sve ostale dodatne podatke o spoju.

Standard SRPS EN ISO 2553:2014: Zavarivanje i srodni postupci – Prikazivanje na crtežima pomoću simbola – Zavareni spojevi⁴⁶, definiše pravila i tehničke simbole koje treba primeniti pri prikazivanju zavarenih spojeva na crtežima [59].

Standardni simbol zavarenog spoja sastoji se od grafičke i (brojčane) numeričke oznake.

Osnovu grafičke oznake predstavljaju dve horizontalne linije – puna i isprekidana osnovna linija, kosa linija sa strelicom – linija vodilja i rep oznake na kraju horizontalne pune linije.

Na slici 1.21 prikazana je grafička oznaka zavarenog spoja prema ISO 2553.

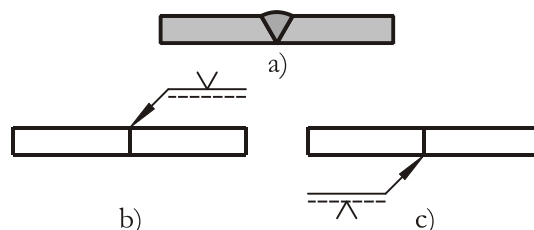


Slika 1.21 Grafička oznaka zavarenog spoja/mesta/šava [59]

Prema ISO sistemu, šav na strani obeleženoj linijom vodiljom (sa strelicom) se označava postavljanjem simbola za zavarivanje na punoj osnovnoj liniji. Šav na suprotnoj strani (ukoliko postoji) obeležava se simbolom na isprekidanoj osnovnoj liniji.

Isprekidana osnovna linija može da se nacrti i ispod i iznad pune osnovne linije ali simbol postavljen na punoj liniji uvek označava šav obeležen linijom vodiljom. Simbol na isprekidanoj liniji označava šav na suprotnoj strani od one koja je obeležena linijom vodiljom.

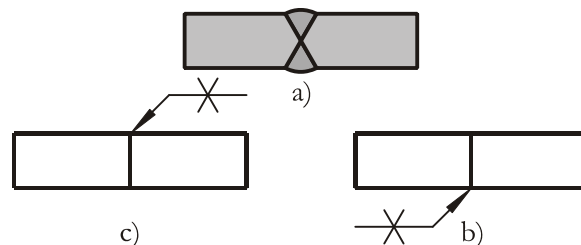
Na slici 1.22 prikazan je sučeoni V šav na pločama i prikazani su odgovarajući grafički simboli zavarivanja.



Slika 1.22 Simboličko označavanje sučeonog V šava: a) ilustracija, b) obeležavanje zavarenog šava preko lica šava, c) obeležavanje zavarenog šava preko naličja šava [59]

Preporučuje se da se puna osnovna linija uvek crta iznad isprekidane osnovne linije.

Ukoliko je spoj izrađen zavarivanjem sa obe strane, simbol zavarivanja se postavlja na obe strane pune osnovne linije a isprekidana osnovna linija se izostavlja (slika 1.23).



Slika 1.23 Simboličko označavanje sučeonog X šava: a) ilustracija, b) obeležavanje zavarenog šava preko lica šava, c) obeležavanje zavarenog šava preko naličja šava [59]

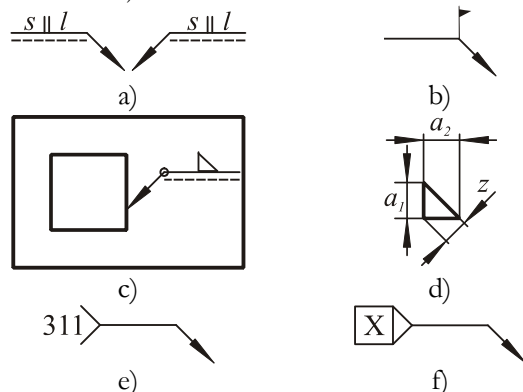
Grafičku oznaku upotpunjava osnovni simbol koji označava određeni tip šava. U tabeli 1.5 su prikazane osnovne oznake za većinu postojećih spojeva.

⁴⁶ Identičan sa: EN ISO 2553:2013 CEN/TC 121.

više dimenzija koje se pišu na sledeći način:

- Osnovne dimenzije vezane za poprečni presek šava se pišu na levoj strani simbola, odnosno, ispred simbola;
- Longitudinalne dimenzije šava se pišu na desnoj strani simbola, odnosno, iza simbola.

Na slici 1.24 prikazani su primeri numeričkih i slovnih oznaka koje se koriste za obeležavanje zavarenih šavova na crtežima.



Slika 1.24 Oznacavanje zavarenog šavova [59]:

a) dimenzije: s – dimenzija poprečnog preseka šava, l – longitudinalna dimenzija šava, b) položaj šava, c) oznacavanje perifernog šava, d) dimenzije poprečnog preseka šava, e) oznaka postupka zavarivanja, f) ostale informacije o zavarenom šavu

Na slici 1.24, a), dimenzija s predstavlja, visinu šava a_1 , širinu šava a_2 ili visinu poprečnog preseka z kod ugaonih šavova (slika 1.24, d). Dimenzija l predstavlja dužinu zavarenog šava ili, ako je složenog oblika, sadrži informacije o dužini prekida šava, broju ponavljanja i sl.

Na slici 1.24, b) prikazan je ivični šav a na slici 1.24, c) prikazan je periferni šav.

Postupak zavarivanja kojim je spoj na crtežu izrađen upisuje se u „repu” grafičkog simbola zavarivanja. U repu se upisuje samo brojna oznaka postupka zavarivanja koja se formira prema standardu ISO 4063 (koji je opisan u sledećem poglavlju). Na primer, na slici 1.24, e), oznaka 311 predstavlja gasni postupak zavarivanja (acetilenom) koji se prema standardu obeležava kao ISO 4063 — 311.

Ostale numeričke/slovne informacije o zavarenom šavu, unose se na kraju „repa” grafičke oznake. Na slici 1.24, f), prikazan je primer takve informacije. Oznaka „X” odnosi

se na:

- Postupak zavarivanja prema ISO 4063, ukoliko oznaka nije sama po sebi dovoljno jasna;
- Nivo prihvatanja (nivoi kvaliteta) zavarenog spoja (prema standardima ISO 5817⁴⁷ i ISO 10042⁴⁸) ili
- Dodatni materijal (prema ISO 544⁴⁹, ISO 2560⁵⁰, ISO 3581⁵¹ i sl⁵²).

Ostale informacije o zavarenom šavu unose se u tablicu sa podacima ili negde na crtežu u vidu napomene, informacije itd.

1.7 Klasifikacija i obeležavanje postupaka zavarivanja

Standard SRPS EN ISO 4063:2013: Zavarivanje i srodni postupci – Lista postupaka i njihovo označavanje⁵³, definiše nomenklaturu za zavarivanje i srodne postupke pri čemu se svaki postupak definiše jednoobrazno [65]. Svaki postupak ima

⁴⁷ Od 30.09.2015. važeći standard je SRPS EN ISO 5817:2015: Zavarivanje – Spojevi zavareni topljenjem na čeliku, niklu, titanu i njihovim legurama (isključujući zavarivanje snopom) – Nivoi kvaliteta nepravilnosti. Standard je identičan sa: ISO 5817:2014, ISO/TC 44/SC 10 [60].

⁴⁸ Od 28.01.2013. važeći standard je SRPS EN ISO 10042:2013: Zavarivanje – Elektrolučno zavarivanje aluminijuma i njegovih legura – Nivoi kvaliteta nepravilnosti. Standard je identičan sa: EN ISO 10042:2005/AC:2006, CEN/TC 121 [61].

⁴⁹ Od 28.01.2013. važeći standard je SRPS EN ISO 544:2013: Potrošni materijal za zavarivanje – Uslovi isporuke za dodatne materijale i praškove – Vrste proizvoda, mere, tolerancije i obeležavanja. Standard je identičan sa: EN ISO 544:2011, CEN/TC 121 [62].

⁵⁰ Od 30.09.2011. važeći standard je SRPS EN ISO 2560:2011: Potrošni materijali za zavarivanje – Obložene elektrode za ručno elektrolučno zavarivanje nelegiranih i finozrnih čelika – Klasifikacija. Standard je identičan sa: EN ISO 2560:2009, CEN/TC 121 [63].

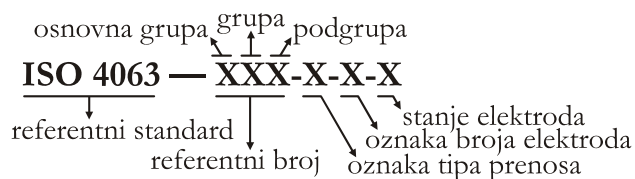
⁵¹ Od 21.06.2012. važeći standard je SRPS EN ISO 3581:2012: Potrošni materijali za zavarivanje – Obložene elektrode za ručno elektrolučno zavarivanje nerđajućih i vatrootpornih čelika – Klasifikacija. Standard je identičan sa: EN ISO 3581:2012, CEN/TC 121 [64].

⁵² Za više detalja, pogledati tabele u prilogu.

⁵³ Identičan sa: EN ISO 4063:2010, CEN/TC 121.

oznaku sačinjenju od referentnog standarda, referentnog broja i dodatne oznake.

Na slici 1.25 je prikazano kako se formira puna oznaka postupka zavarivanja prema referentnom standardu ISO 4063.



Slika 1.25 Formiranje oznake postupka zavarivanja prema ISO 4063

Referentni broj se sastoji od osnovne grupe, grupe i podgrupe koje definišu postupak zavarivanja.

Osnovna grupa postupaka se definiše brojevima od 1 do 5 i od 7 do 9, pri čemu je broj:

- 1: grupa elektrolučnih postupaka zavarivanja (ISO 4063 — 1),
- 2: grupa postupaka zavarivanja električnim otporom (ISO 4063 — 2),
- 3: grupa gasnih postupaka zavarivanja (ISO 4063 — 3),
- 4: grupa postupaka zavarivanja pritiskom (ISO 4063 — 4),
- 5: grupa postupaka zavarivanja snopom (ISO 4063 — 5)
- 6: grupa ostalih postupaka zavarivanja (ISO 4063 — 7),
- 7: grupa postupaka za sečenje i žlebljenje (ISO 4063 — 8) i
- 8: grupa postupaka za meko i tvrdo lemljenje (ISO 4063 — 9).

Grupa, ali i podgrupa, postupaka se definišu brojevima od 1 do 9, gde svaka cifra predstavlja detaljno obeležje postupka definisano cifrom iz osnovne grupe.

Dodatnu oznaku čine oznaka tipa prenosa metala, oznaka broja elektroda/žica i oznaka stanja elektroda. Položaj i redosled dodatnih oznaka nisu potpuno definisani.

Oznaka tipa prenosa metala⁵⁴ definiše se slovnom oznakom i to:

D – prenos metala u kratkom spoju,

G – globularni prenos metala,

S – prenos metala u mlazu i

P – pulsni prenos metala.

Na primer, MIG postupak zavarivanja, punom žicom u kratkom spoju obeležava se kao ISO 4063 — 131-D.

Oznaka broja elektroda/žica definiše koliko komada se koristi pri zavarivanju: 1, 2, 3 itd.

Oznaka stanja elektrode označava žicu u toplom stanju (H) ili u hladnom stanju (C).

Na primer, elektrolučni postupak zavarivanja pod praškom (EPP) sa dve hladne žice označava se kao ISO 4063 — 122-H-2.

Pri obeležavanju postupka zavarivanja potrebno je navesti punu, standardizovanu oznaku i ona treba da bude sledećeg oblika: naziv i broj referentnog standarda (u ovom slučaju: ISO 4063), zatim sledi duga crta — (dobija se istovremenim pritiskom na ALT i brojnu oznaku 0151 u Windows okruženju), koja je odvojena razmacima od teksta, i na kraju se dodaju referentni broj postupka zavarivanja i dodatna oznaka. Na primer, klasični postupak zavarivanja trenjem, koji ima referentni broj 42, bez podataka o načinu prenosa metala i elektrodama (jer nema prenosa metala niti elektroda za zavarivanje), obeležava se kao ISO 4063 — 42.

U praksi se često susreće skraćeni oblik obeležavanja postupaka zavarivanja: samo referentnim brojem, bez ispisivanja standarda samo uz dodatnu oznaku. Na primer, MAG postupak zavarivanja punom žicom se obeležava kao 135. Ovakav vid obeležavanja postupaka zavarivanja je veoma uobičajen, ali ga treba izbegavati zbog mogućih grešaka u tumačenju. Na primer, referentni broj postupka zavarivanja trenjem sa mešanjem (eng. *Friction Stir Welding*), prema važećem standardu iz 2010. godine, ima referentni broj 43, dok je u starijim standardima (važećim do 2010. godine), referentni broj 43 označavao postupak kovačkog zavarivanja koji se novim standardom tretira kao „zastareli” postupak i više nije standardizovan. Ukoliko je potrebno da se u dokumentu naglasi da je 43 ipak referentni broj zastarelog kovačkog zavarivanja, onda se u oznaci navodi godina

⁵⁴ O svakom od tipova prenosa metala kod postupaka zavarivanja gde su različiti tipovi prenosa (dodatnog) metala mogući, biće više reči u sledećim poglavljima.

izdavanja standarda i dodatna slovna oznaka, na primer: ISO 4063:2009 — 43 (kovačko zavarivanje).

Ponekad se za formiranje zavarenog spoja vrši kombinovanje dva ili više postupaka zavarivanja kako bi se ostvarile bolje karakteristike zavarenih spojeva. Kod takvih, hibridnih postupaka, oznaka je sastavljena od standarda, crtice sa razmacima, referentnih

brojeva postupaka i znaka + koji se umeće između referentnih brojeva. Na primer, hibridni postupak zavarivanja laserom sa čvrstim kristalom i zavarivanja trenjem sa mešanjem se obeležava kao ISO 4063 — 521+43.

Lista svih postupaka standardizovanih prema SRPS EN ISO 4063:2013 prikazana je u prilogu.

LITERATURA

- [1] United States Department of Labor, Bureau of Labor Statistics: Welders, Cutters, Solderers, and Brazers: Statistical Bulletin 2015; <https://www.bls.gov/ooh/production/welders-cutters-solderers-and-brazers.htm#tab-1>, (dokument pregledan 05.05.2016.);
- [2] Herodot: „Istorija, 1. i 2. deo”, Matica srpska, Beograd, ISBN 8636300304, 486 s, 1988;
- [3] Richard F. Burton: „The Book of the Sword”, Dover Publications, Inc., New York, USA, ISBN 0-486-25434-8, 1887;
- [4] Sarel Shalev: „Swords and Daggers in Late Bronze Age Canaan”, Franz Steiner Verlag, Stuttgart, Germany, ISBN 3-515-08198-4, 2004;
- [5] Cyril Aldred: „Jewels of the Pharaohs: Egyptian Jewelry of the Dynastic Period”, Ballantine Books, 129 s, ISBN 0345278194, 1978;
- [6] Peter N. Stearns: „The Industrial Revolution in World History”, Fourth Edition, Westview Press, ISBN: 9780813347295, 2012;
- [7] https://en.wikipedia.org/wiki/Carl_Wilhelm_Scheele (dokument pregledan 31.05.2016. godine);
- [8] https://en.wikipedia.org/wiki/Edmund_Davy (dokument pregledan 31.05.2016. godine);
- [9] Justin Russell: Edmund Davy, Journal of Chemical Education, 1953, 30 (6), p 302, DOI: 10.1021/ed030p302, Jun 1953;
- [10] Edmund Davy: Notice of a new gaseous bicarburet of hydrogen, Report of the Sixth Meeting of the British Association for the Advancement of Science, Bristol UK, pp. 62-63, August 836;
- [11] https://en.wikipedia.org/wiki/Marcellin_Berthelot (dokument pregledan 01.06.2016. godine);
- [12] https://en.wikipedia.org/wiki/Thomas_Willson (dokument pregledan 31.05.2016. godine);
- [13] Thomas Wilson: Process of and Apparatus for Making Gas, US Patent: US 542320 A, 1895;
- [14] https://en.wikipedia.org/wiki/Henry_Louis_Le_Ch%C3%A2telier (dokument pregledan 13.02.2017.);
- [15] https://en.wikipedia.org/wiki/Carl_von_Linde (dokument pregledan 31.05.2016. godine);
- [16] Carl von Linde: Memoirs: „From my life and about my work”, Springer Verlag, ISBN 3-486-23411-0, 1984;
- [17] John Lancaster: Handbook of Structural Welding: Processes, materials and methods used in the welding of major structures, pipelines and process plant, Abington Publishing, England, 1992;
- [18] Peterson, G. and Bournonville, E.M.: „Gaseous-fuel-burning welding-torch”, US Patent 935,684, <http://www.google.com/patents/US935684>, (dokument pregledan 31.05.2016. godine);
- [19] Ebbe Almqvist: „History of Industrial Gases”, Springer Science & Business Media, ISBN 0-306-47277-5, 2003;
- [20] <http://weldguru.com/welding-history/> (dokument pregledan 16.9.2016);
- [21] <https://www.britannica.com/technology/oxyacetylene-welding> (dokument pregledan 15.09.2016);
- [22] Jovanović Milorad, Adamović Dragan, Lazić Vukić, Ratković Nada: Gasno zavarivanje –

- priručnik, Mašinski fakultet Kragujevac, YU ISBN 86-80581-68-2, 2005;
- [23] https://en.wikipedia.org/wiki/Humphry_Davy (dokument pregledan 31.05.2016. godine);
- [24] John Davy: The Collected Works of Sir Humphry Davy. London: Smith, Elder, and Company. ISBN 0-217-88944-1, 1969;
- [25] https://ru.wikipedia.org/wiki/Петров,_Василий_Владимирович (dokument pregledan 31.05.2016. godine);
- [26] Шнейберг Я.А. Василий Владимирович Петров, 1761-1834. – М.: Наука, 224 с, 1985;
- [27] Miroslav Đurđanović: Neobjavljeni materijali, rukopisi i predavanja iz Tehnologije zavarivanja (radni materijal korišćen za potrebe nastave i obuke), Mašinski fakultet Niš, 1990-2010;
- [28] https://en.wikipedia.org/wiki/Auguste_de_Méritens (dokument pregledan 31.05.2016. godine);
- [29] Auguste de Meritens, Patent in France, No. 146,010, November 24, 1881;
- [30] https://ru.wikipedia.org/wiki/Бенардос,_Николай_Николаевич (dokument pregledan 31.05.2016. godine);
- [31] [https://pl.wikipedia.org/wiki/Stanisław_Olszewski_\(inżynier\)](https://pl.wikipedia.org/wiki/Stanisław_Olszewski_(inżynier)) (dokument pregledan 30.05.2016. godine);
- [32] Nikolaj Benardos, Stanislaw Olszewski, „Process of and apparatus for working metals by the direct application of the electric current” patent nr 363 320, Washington, United States Patent Office, 17 maj 1887;
- [33] https://ru.wikipedia.org/wiki/Славянов,_Николай_Гаврилович (dokument pregledan 30.05.2016. godine);
- [34] Григорьев С. В. Биографический словарь. Естествознание и техника в Карелии. Петрозаводск: Карелия, 1973, С. 208-269 с. 1000 экз;
- [35] https://en.wikipedia.org/wiki/Charles_L._Coffin (dokument pregledan 05.05.2016. godine);
- [36] <http://www.weldinghistory.org/whfolder/folder/wh1800.html> (dokument pregledan 08.12.2016. godine);
- [37] A. P. Strohmenger: „Electric Deposition of Metals by Fusion”, <http://www.google.com/patents/USRE13970>, (dokument pregledan 31.05.2016. godine);
- [38] https://en.wikipedia.org/wiki/Oscar_Kjellberg (dokument pregledan 31.05.2016. godine);
- [39] www.esab.com/history (dokument pregledan 31.05.2016. godine);
- [40] https://en.wikipedia.org/wiki/Irving_Langmuir (dokument pregledan 31.05.2016. godine);
- [41] https://en.wikipedia.org/wiki/Atomic_hydrogen_welding (pregledano: 31.05.2016. godine);
- [42] Russell Meredith: „Welding torch”, 1942, <http://www.google.com/patents/US2274631>, (dokument pregledan 31.05.2016. godine);
- [43] <https://www.battelle.org/about-us> (pregledano 02.02.2017. godine);
- [44] https://ru.wikipedia.org/wiki/Любавский,_Константин_Васильевич (pregledano: 31.5.2016.);
- [45] https://ru.wikipedia.org/wiki/Новожилов,_Николай_Михайлович (pregledano: 31.05.2016.);
- [46] http://dic.academic.ru/dic.nsf/enc_biography/23729/Дульчевский (pregledano: 31.05.2016.);
- [47] https://ru.wikipedia.org/wiki/Хренов,_Константин_Константинович (dokument pregledan 31.05.2016. godine);

- [48] <https://en.wikipedia.org/wiki/T-34> (dokument pregledan 31.05.2016. godine);
- [49] Miomir Vukićević: Autorizovana predavanja na kursovima za međunarodne inženjere i tehnologe zavarivanja, Mašinski fakultet Niš, 2007-2016;
- [50] Miomir Vukićević: Tehnologija spajanja materijala – Zavarivanje 1, ISBN 978-86-82631-73-6, Fakultet za mašinstvo i građevinarstvo u Kraljevu, 2014;
- [51] SRPS EN ISO 4063:2013 Zavarivanje i srodni postupci – Lista postupaka i njihovo označavanje, 28.01.2013;
- [52] <https://www.millerwelds.com/resources> (grafički prikazi su preuzeti i retuširani tokom 2016. godine);
- [53] SRPS EN ISO 17659:2012: Zavarivanje – Višejezični termini za zavarene spojeve sa ilustracijama, 21.06.2012;
- [54] SRPS EN 1792:2012: Zavarivanje – Višejezična lista termina za zavarivanje i srodne postupke, 23.05.2012;
- [55] ISO/TR 25901-1:2016: Welding and Allied Processes – Vocabulary – Part 1: General Terms, 03/2016;
- [56] ISO/TR 25901-3:2016: Welding and Allied Processes – Vocabulary – Part 3: Welding Processes, 03/2016;
- [57] ISO/TR 25901-4:2016: Welding and Allied Processes – Vocabulary – Part 4: Arc Welding, 03/2016;
- [58] SRPS EN ISO 6947:2012: Zavarivanje i srodni postupci – Položaji pri zavarivanju, 27.04.2012;
- [59] SRPS EN ISO 2553:2014: Zavarivanje i srodni postupci – Prikazivanje na crtežima pomoću simbola – Zavareni spojevi, 29.08.2014, (dokument pregledan 29.01.2017.);
- [60] SRPS EN ISO 5817:2015: Zavarivanje – Spojevi zavareni topljenjem na čeliku, niklu, titanu i njihovim legurama (isključujući zavarivanje snopom) – Nivoi kvaliteta nepravilnosti, 30.09.2015;
- [61] SRPS EN ISO 10042:2013: Zavarivanje – Elektrolučno zavarivanje aluminijuma i njegovih legura – Nivoi kvaliteta nepravilnosti, 28.01.2013;
- [62] SRPS EN ISO 544:2013: Potrošni materijal za zavarivanje – Uslovi isporuke za dodatne materijale i praškove – Vrste proizvoda, mere, tolerancije i obeležavanja, 28.01.2013;
- [63] SRPS EN ISO 2560:2011: Potrošni materijali za zavarivanje – Obložene elektrode za ručno elektrolučno zavarivanje nelegiranih i finozrnih čelika – Klasifikacija, 28.01.2013;
- [64] SRPS EN ISO 3581:2012: Potrošni materijali za zavarivanje – Obložene elektrode za ručno elektrolučno zavarivanje nerđajućih i vatrootpornih čelika – Klasifikacija, 21.06.2012;
- [65] SRPS EN ISO 4063:2013: Zavarivanje i srodni postupci – Lista postupaka i njihovo označavanje, 28.01.2013;
- [66] IAB-252r3-16: IIW Guideline for International Welding Engineers, Technologists, Specialists and Practitioners, Personnel with Qualification for Welding Coordination, Minimum Requirements for the Education, Examination and Qualification, February 2016;
- [67] SRPS EN ISO 14731:2011: Koordinacija u zavarivanju – Zadaci i odgovornosti, 30.09.2011;
- [68] Institut za standardizaciju Srbije: <http://www.iss.rs> (od 2015-);
- [69] International Institute of Welding: www.iiwelding.org (od 2015-);
- [70] The Welding Institute: <http://www.twi-global.com/technical-knowledge/job-knowledge/>, (od 2015-);
- [71] Autorizovana predavanja na kursovima za međunarodne inženjere i tehnologe zavarivanja, Mašinski fakultet Niš, 2007-2016;

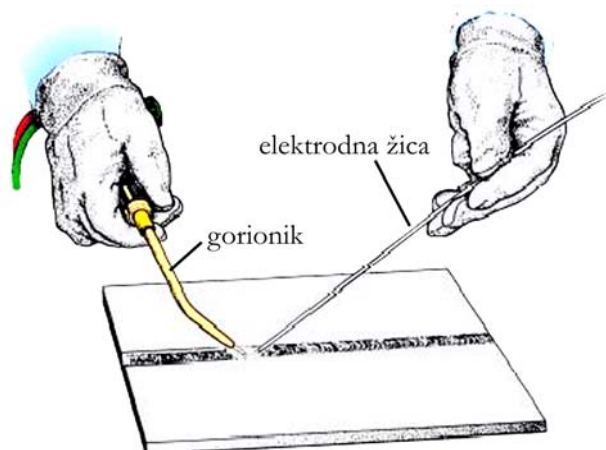
- [72] <http://welding.com>: Welding History (dokument pregledan 31.05.2016. godine);
- [73] <http://www.gowelding.org/articles/history-of-welding/>, The History of Welding (dokument pregledan 31.05.2016. godine).

2 ZAVARIVANJE GASNIM POSTUPKOM

Postupak zavarivanja sagorevanjem gorivog gasa je jedan od postupaka koji je nastao i razvio se tokom devetnaestog i dvadesetog veka, i to veoma brzo po otkriću efikasnih i ekonomski isplativih tehnologija dobijanja acetilena i kiseonika. Jednostavna upotreba, široka primenljivost postupka i niska cena su osnovne prednosti zavarivanja gasnim postupkom koje su nametnule njegovu primenu u industriji. Danas je gasni postupak zavarivanja druga ili treća tehnologija spajanja po zastupljenosti u industriji Sjedinjenih Američkih Država [1].

2.1 Osnovni principi postupka

Zavarivanje gasnim postupkom je tehnologija spajanja metala topljenjem gde je energija koja aktivira i vrši zavarivanje strogo toplotna. Toplota potrebna za zavarivanje osnovnog metala dobija se sagorevanjem mešavine gorivog gasa i vazduha ili mešavine gorivog gasa i čistog kiseonika u samoj zoni zavarivanja.



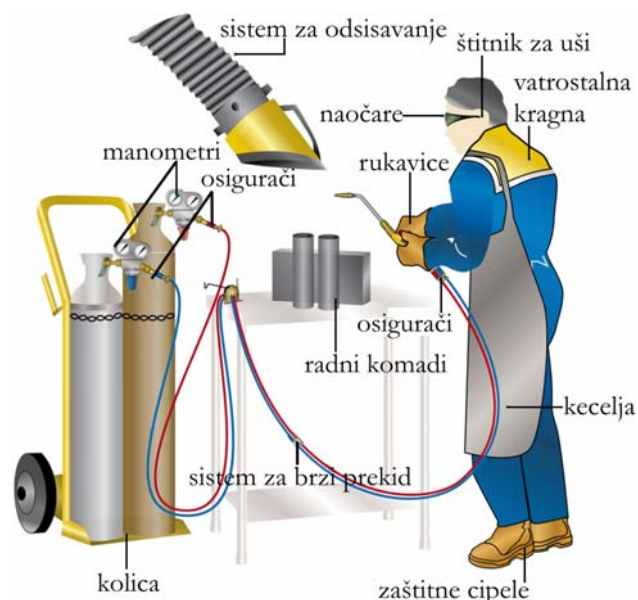
Slika 2.1 Osnovni princip gasnog postupka zavarivanja

Gasovi koji se koriste za zavarivanje su, najčešće, uskladišteni u odgovarajućim rezervoarima, odvojeni su jedan od drugog, a pomoću odgovarajućih vodova se dopremaju do mesta zavarivanja, mešaju u određenom zapreminskom odnosu i preko gorionika

dovode u zonu zavarivanja.

Radni komadi su prethodno pripremljeni – očišćeni su, pozicionirani i učvršćeni. Zavarivač, koji jednom rukom drži gorionik, drugom rukom, pomoću odgovarajućeg upaljača, pali mešavinu gasova. Posle toga, radnik odlaže upaljač i uzima elektrodnu žicu¹ i započinje zagrevanje osnovnog metala. Posle toga, zavarivač približava elektrodnu žicu plamenu, zagreva je i topi. Rastopljena žica se meša sa delimično rastopljenim osnovnim metalom i u zoni zavarivanja formira tečno kupatilo koje nakon očvršćavanja formira metal šava, odnosno, šav. Zavarivanje gasnim postupkom je moguće i bez dodatnog materijala. Tada se rastapa samo osnovni metal, rastopina se meša u tečnom kupatilu koje naknadnim očvršćavanjem formira zavareni šav.

Na slici 2.1 prikazan je osnovni princip gasnog postupka zavarivanja uz dodatak elektrodne žice dok je na slici 2.2 prikazano tipično radno mesto za zavarivanje.



Slika 2.2 Šematski prikaz opreme i radnog mesta za gasni postupak zavarivanja [2]

Zavarivanje gasnim postupkom se

¹ U praksi se, umesto izraza „elektrodna žica”, jednostavno kaže – žica ili štap.

najčešće primenjuje pri spajanju:

- niskougljeničnih i niskolegiranih čelika (ređe za legirane čelike),
- livenog gvožđa, čeličnog liva,
- obojenih metala (bakar, aluminijum i njihove legure, ali i kalaj, zlato, srebro, olovo itd.).

Gasnim postupkom zavaruju se: tanki limovi, cevi i profili.

Gasni postupak je relativno jednostavan za rukovanje te je i obuka zavarivača brza i jednostavna. Oprema za zavarivanje je jeftina, ne zahteva skupo održavanje a zbog svojih dimenzija, oprema je prenosiva i gotovo nezavisna od pozicije zavarivanja. Obučeni zavarivači relativno lako kontrolišu parametre zavarivanja i lako kontrolišu oblik i dimenzije šava, kao i unos toplote u zavareni spoj.

Veliki nedostatak gasnog postupka zavarivanja su mala količina oslobođene toplote i veliki toplotni (energetski) gubici te je postupak neefikasan. Kod materijala koji brzo odvođe toplotu (npr. austenitni čelici, bakar), zagrevanje zone zavarivanja je sporo i dugotrajno što može negativno da se odrazi na osobine materijala u zoni uticaja toplote [3-7].

2.2 Klasifikacija postupka

Gasni postupci zavarivanja su klasifikovani i standardizovani prema ISO 4063 [8] kao grupa 3 (ISO 4063 — 3), podgrupa 31 – postupci zavarivanja uz dodatak kiseonika (ISO 4063 — 31). Pojedinačni postupci zavarivanja su klasifikovani i standardizovani prema gorivom gasu koji se koristi. Tako je:

ISO 4063 — 311 – gasni postupak zavarivanja acetilenom,

ISO 4063 — 312 – gasni postupak zavarivanja propanom,

ISO 4063 — 313 – gasni postupak zavarivanja vodonikom.

Standardizovani postupci nabrojani su u prilogu.

Od svih gasnih postupaka zavarivanja, najviše je u upotrebi postupak ISO 4063 —

311 pa je ovo poglavlje najvećim delom posvećeno njemu.

2.3 Gorivi gasovi

Gorivi gasovi predstavljaju izvor energije neophodne za zavarivanje gasnim postupkom – hemijska energija gorivog gasa se tokom procesa sagorevanja transformiše u toplotu koja aktivira formiranje zavarenog šava. Kao gorivi gasovi koriste se ugljovodonici, vodonik, alkohol itd.

2.3.1 Osobine gorivih gasova

Da bi zavarivanje nekog metala bilo moguće, gorivi gasovi tokom sagorevanja moraju da ispune nekoliko zahteva [7]:

- temperatura sagorevanja mešavine gorivog gasa i kiseonika mora da bude viša od temperature topljenja osnovnog i dodatnog materijala,
- brzina sagorevanja gorivog gasa mora da bude maksimalno ostvariva,
- količina toplote oslobođena tokom sagorevanja mora da bude dovoljna da nadoknadi toplotne gubitke i zadovolji energetske uslove zavarivanja,
- hemijska reakcija gasova, produkata sagorevanja i metala šava, mora da bude minimalna.

Gasovi koji ispunjavaju navedene uslove su većina ugljovodonika i vodonik, ali ekonomski isplativi, efikasni i bezbedni za korišćenje u tehnologiji gasnog zavarivanja su sledeći gorivi gasovi [4-7]:

- Acetilen (C_2H_2)
- Propan, (C_3H_8),
- Butan, (C_4H_{10} , odnosno racionalna formula $CH_3CH_2CH_2CH_3$),
- Metan, (CH_4),
- Propilen, (C_3H_6 ili $CH_3C\equiv CH$),
- Metilacetilen-propadijen, (trgovački naziv MAPP),
- Vodonik, (H_2) i
- Mešavine različitih gasova itd.

Acetilen [9] je nezasićeni ugljovodonik

koji se, dobija dejstvom vode na kalcijum-karbid (CaC_2)². Acetilen je bezbojan, oštrog i neprijatnog mirisa (zbog prisustva fosforovih jedinjenja i arsena, miris podseća na beli luk i može biti toksičan), a ukus koji ostavlja u ustima je lepljiv i sladunjav. Uopšteno govoreći, acetilen nije otrovan i lakši je od vazduha, ograničeno se rastvara u vodi ali se veoma dobro rastvara u acetonu³. Na povišenom pritisku (već od 1,5 bar), acetilen je veoma eksplozivan ali se rastvaranjem u acetonu umanjuje njegova eksplozivnost. Stoga se acetilen čuva i transportuje u bocama pod pritiskom od 15 bara samo kad je rastvoren u acetonu. Acetilen nema tačku topljenja niti može da postoji u tečnom agregatnom stanju [4-7].

Propan [10] je ugljovodonik koji se dobija preradom prirodnog gasa i rafinacijom nafte. Prerada prirodnog gasa podrazumeva izdvajanje butana, propana i velike količine etana kako bi se sprečilo kondenzovanje ovih gasova u gasovodima. Krekovanjem petroleja u benzin ili lož-ulje dobija se određena količina propana.

Za razliku od prirodnog gasa, propan je teži od vazduha i zauzima prostor i šupljine u podu. Time značajno povećava rizik od eksplozije i paljevine. Propan nije rastvorljiv u vodi ali se rastvara u organskim rastvaračima. Bezbojan je i slabo je reaktivan na sobnoj temperaturi, ali sa porastom temperature postaje sklon paljenju i reagovanju sa hlorom i hlorovodonikom. Kako nije biološki aktivan, propan ima vrlo malu toksičnost, ali, predugo udisanje propana izaziva gušenje ili srčani udar kod čoveka. Propan se čuva u rezervoarima pod pritiskom u tečnom agregatnom stanju [5-7, 10].

Butan [11] je veoma zapaljiv, na sobnoj temperaturi slabo reaktivni gas bez boje koji je teži od vazduha. Dobija se iz zemnog gasa ili iz nafte. Slabo se rastvara u vodi ali se dobro rastvara u organskim rastvaračima. U mešavini sa propanom formira tečni naftni gas (TNG) koji se koristi kao pogonsko gorivo za

motorna vozila.

Sagorevanje butana je burno i oslobađa se velika količina toplotne energije a produkti sagorevanja su vodena para i ugljendioksid. Ukoliko je nedovoljna količina kiseonika, butan nepotpuno sagoreva u ugljenmonoksid (CO) i formira se čađ. Udisanje butana može izazvati gušenje, srčane tegobe a u najblažem obliku trovanja butanom izaziva halucinacije, iluzije praćene povraćanjem i malaksalošću [4-7].

Metan [12] je najjednostavniji zasićeni ugljovodonik i osnovna je komponenta zemnog gasa. U normalnim uslovima, metan je bezbojan gas, lakši je od vazduha, nema miris, nije toksičan ali je veoma zapaljiv i u smeši sa vazduhom postaje eksplozivan. Odgovoran je za brojne nesreće u rudarskim oknima. Zbog činjenice da ljudska čula ne registruju prisustvo metana, industrijskom metanu se radi bezbednosti dodaju hemijske supstance koje imaju miris. Metan se najviše koristi kao gorivi gas u industriji i domaćinstvima [4-7].

Propilen [13] je nezasićeni ugljovodonik koji je na atmosferskom pritisku u gasovitom stanju. Dobija se iz fosilnih goriva i zemnog gasa, ali je moguće dobijanje propilena iz vegetacije ili kao proizvod fermentacije. Nema boju ali ima karakterističan neprijatan miris i može da izaziva blaga akutna trovanja sistema za disanje. Ukoliko je koncentracija propilena u vazduhu viša od 23% moguća je pojava trovanja sa smrtnim ishodom. Propilen je lakši od vazduha a koristi se kao gorivi gas u industriji ali je češća upotreba kao sirovine za dobijanje plastičnih masa, različitih hemijskih jedinjenja, ali i za dobijanje acetona. Propilen se u današnje vreme koristi kao alternativa acetilenu pri zavarivanju gasnim postupkom [4-7].

Metilacetilen–propadijen gasovi (poznatiji kao MPS) su grupa gorivih gasova ili smeša gorivih gasova koji se koriste za gasni postupak zavarivanja ili postupak gasnog sečenja. Dobijaju se kao smeša propana i propadijena a može im se dodati i butan, vodonik i sl. Najpoznatiji predstavnik MPS gasa je MAPP gas (od engleskog izraza:

² Tehnički acetilen ima hemijsku čistoću od 99%.

³ Aceton je organski rastvarač sa formulom $(\text{CH}_3)_2\text{CO}$. Dobija se iz propilena.

methylacetylene-propadiene propane) [14]. MAPP je bezbojan, bilo da se nalazi u gasovitom, bilo da se nalazi u tečnom agregatnom stanju (pod pritiskom). Ostavlja sladak ukus u ustima, a miris podseća na miris acetilena ili miris ribe. Udisanje velike količine MAPP-a izaziva trovanje a kontakt tečnog MAPP-a sa očima može da dovede do konjunktivitisa ili trajnog slepila. Radnici u zavarivačkim pogonima mogu da budu izloženi maksimalnoj koncentraciji od 1800 mg/m³ MAPP-a tokom osmočasovnog radnog vremena. Pri koncentracijama preko 3000 mg/m³, što je približno 10% granice eksplozivnosti MAPP-a, smatra se da su uslovi rada nebezbedni [4-7].

Vodonik [15] je gorivi gas koji se danas ređe koristi za zavarivanje i sečenje gasnim postupkom zbog lošeg uticaja vodonika na pojavu prsina u zavarenom spoju. Dobija se elektrolizom vodenog rastvora kuhinjske soli. Vodonik je lakši od vazduha a pri sagorevanju oslobađa toplotu i formira vodenu paru uz prasak. Čisti vodonik izaziva smetnje u disanju, a zabeleženi su slučajevi trovanja vodonikom [4-7].

2.3.2 Hemijske reakcije sagorevanja

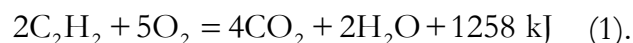
Sagorevanje je hemijski ili termohemijski proces oksidacije pri kome se vezivanje elemenata i kiseonika vrši burno. Burni proces oksidacije – sagorevanje, praćen je oslobađanjem energije u vidu toplote, pojavom jake svetlosti, pojavom buke ali je praćen i oslobađanjem čvrstih, tečnih i gasovitih produkata oksidacije⁴. Kiseonik je hemijski element koji ne gori ali sagorevanje/oksidacija nije moguća bez njega. U zavisnosti od količine kiseonika koja učestvuje u procesu sagorevanja, sagorevanje može biti potpuno ili nepotpuno [4-7].

Sagorevanje gorivih gasova, tokom gasnog postupka zavarivanja, se uvek događa u fazama koje su različite za svaki gorivi gas.

Sagorevanje acetilena

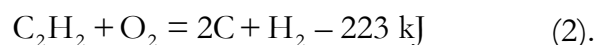
Kada acetilen potpuno sagori na

slobodnom vazduhu, proizvodi sagorevanja su ugljen dioksid, vodena para i oslobađa se toplota (1):

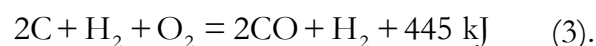


Sagorevanje acetilena u realnim uslovima se ne dešava spontano, niti se dešava trenutno, niti je potpuno.

U realnim uslovima sagorevanje acetilena započinje dovođenjem određene količine energije/toplote smeši acetilena i kiseonika, odnosno, započinje paljenjem smeše (2):

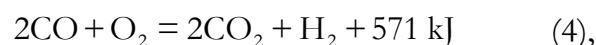


Acetilen se tokom paljenja razlaže na ugljenik i vodonik koji odmah reaguju sa raspoloživom količinom kiseonika (3):

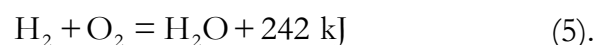


Ovaj deo postupka sagorevanja acetilena se naziva *primarnim sagorevanjem* [4-7] pri kom dolazi do nepotpunog sagorevanja ugljenika i formiranja nestabilnog ugljenmonoksida. Zbog velikog afiniteta ugljenmonoksida prema kiseoniku, vodonik ne uspeva da reaguje sa kiseonikom.

Oslobodena energija je dovoljna da inicira novo primarno sagorevanje acetilena ali i da pomaže dalje sagorevanje ugljenmonoksida (4):



odnosno, vodonika (5):



Sagorevanje ugljenmonoksida i vodonika predstavlja *sekundarnu fazu sagorevanja* acetilena [4-7].

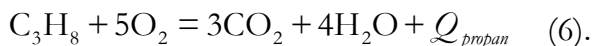
Krajnji proizvodi sagorevanja acetilena su stabilni ugljenmonoksid, vodena para i količina energije oslobodena tokom primarnog i sekundarnog sagorevanja. Energija oslobodena tokom sagorevanja acetilena ima vrednost koja je niža od proračunate vrednosti: deo energije se razmenjuje sa okolinom a deo energije se koristi za produženje procesa sagorevanja sve dok ima acetilena. Prema tome, stepen korisnog dejstva procesa sagorevanja je uvek manji od 100% i u realnim uslovima se kreće

⁴ Proizvod sagorevanja, koji uvek nastaje tokom procesa sagorevanja, je odgovarajući oksid.

od 20% do 80%.

Sagorevanje propana

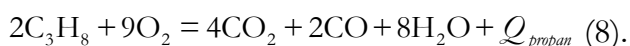
Kada propan potpuno sagori na slobodnom vazduhu, proizvodi sagorevanja su ugljendioksid, vodena para i oslobađa se toplota Q_{propan} (6):



Nepotpuno sagorevanje propana se dešava po jednačini (7):



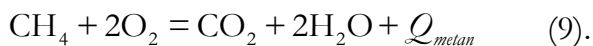
ili (8):



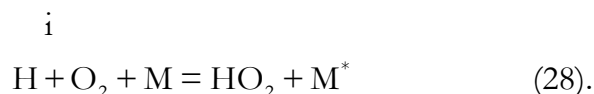
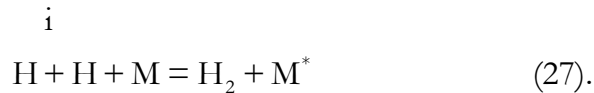
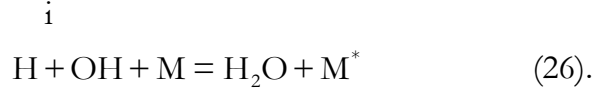
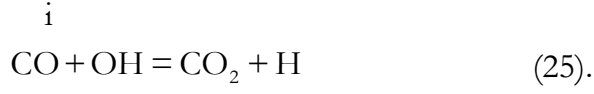
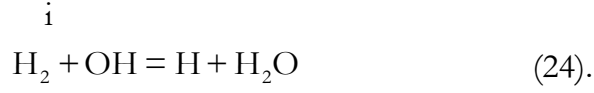
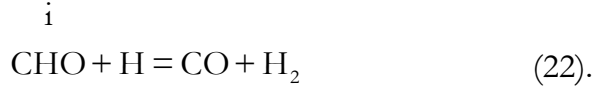
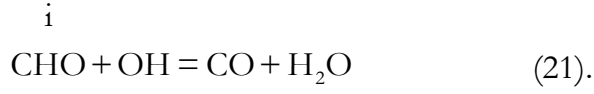
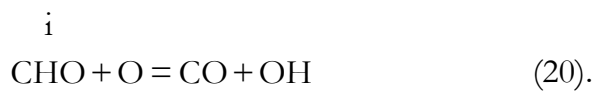
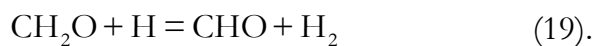
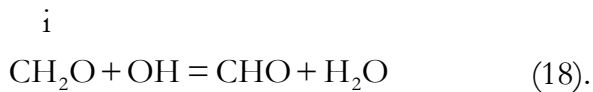
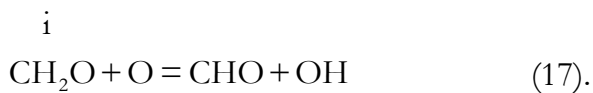
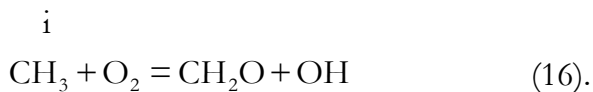
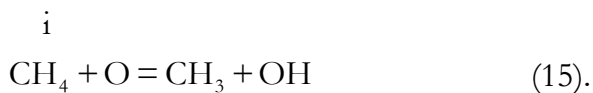
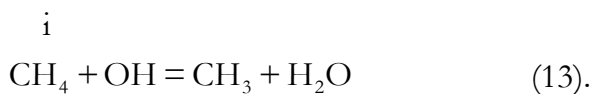
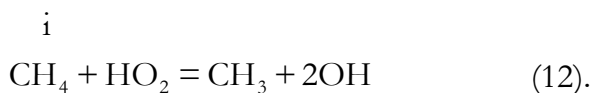
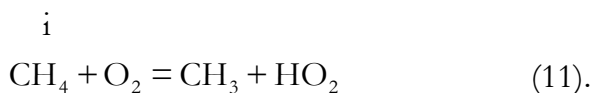
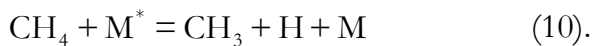
Sekundarno sagorevanje propana podrazumeva sagorevanje ugljenmonoksida prema stehiometrijskoj jednačini (4) [4-7].

Sagorevanje metana

Kada metan potpuno sagori na slobodnom vazduhu, proizvodi sagorevanja su ugljen dioksid, vodena para i oslobađa se toplota (9) [5, 7, 12]:

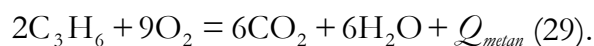


Međutim, sagorevanje metana se događa u više koraka (9-28):



Sagorevanje propilena

Kada propilen potpuno sagori na slobodnom vazduhu, proizvodi sagorevanja su (29):



odnosno, za nepotpuno sagorevanje (30):



Sagorevanje vodonika

Vodonik sagoreva po jednačini (5) i proizvodi sagorevanja su voda i određena količina toplote. Sagorevanje vodonika se događa uz prasak.

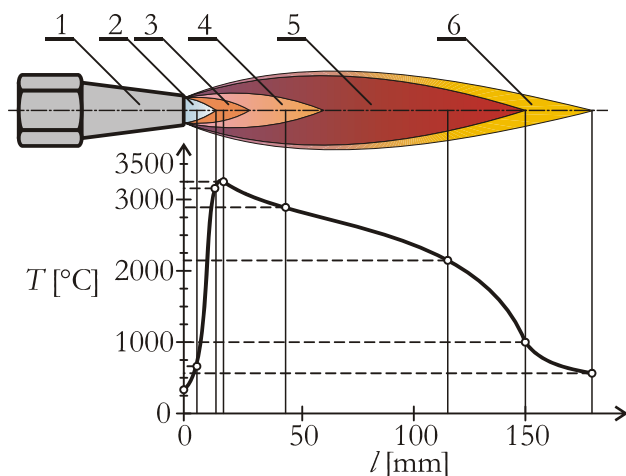
2.4 Plamen

Plamen predstavlja reakciju gasa pri sagorevanju – on je stvarni izvor energije aktivacije pri gasnom postupku zavarivanja i osobine plamena definišu brojne parametre zavarenog šava. Plamen nije uniforman po celoj zapremini koju zauzima već postoji

nekoliko zona unutar plamena koje se odlikuju različitim temperaturama, dimenzijama i osobinama. Navedene osobine plamena zavise od odnosa gorivog gasa i kiseonika pri sagorevanju pa je važno poznavati kakav plamen daje dobre osobine zavarenog spoja na pojedinim materijalima [4-7].

2.4.1 Zone plamena

Plamen čine četiri različite zone: jezgro plamena, zona zavarivanja, redukujuća zona plamena, omotač plamena i zona hladnih produkata sagorevanja koja nije deo plamena ali je neminovno prisutna. Na slici 2.3 prikazana je šema plamena sa zonama, rastojanjima i maksimalnim temperaturama u zonama.



Slika 2.3 Zone plamena: 1 – mlažnica, 2 – jezgro plamena, 3 – zona zavarivanja, 4 – redukujuća zona plamena, 5 – omotač plamena, 6 – zona produkata sagorevanja

Jezgro plamena je najsvetliji deo plamena, oblika je konusa i u njemu se odvija primarno sagorevanje. Dužina jezgra, pri dobro podešenoj smeši gasova, iznosi oko 5 mm. Na kraju jezgra temperatura plamena je bliska temperaturi od 3000°C [4-7].

Zona zavarivanja je deo plamena u kome se produžava proces primarnog sagorevanja acetilena uz delimični utrošak kiseonika iz atmosfere. Boja ove zone je plavičasta i razvija se temperatura od oko 3200°C. Gorionikom se plamen održava tako da u ovoj zoni, odnosno, na rastojanju od

3 mm do 5 mm od vrha jezgra plamena, bude pozicionirana površina tečnog kupatila [4-7].

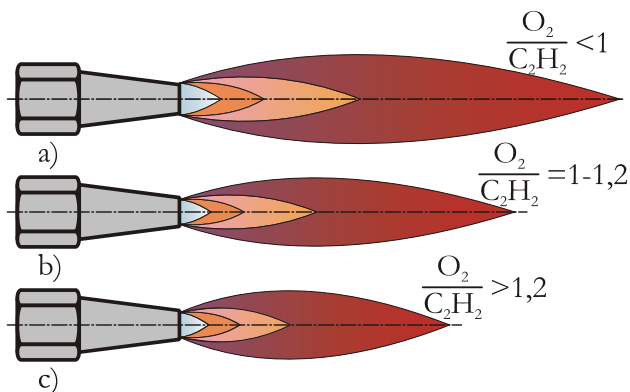
Redukujuća zona plamena je karakteristična po višku vodonika (koji je produkt sagorevanja) koji je nastao u toku primarnog sagorevanja. Ova zona je gotovo neodvojiva od zone zavarivanja jer je približno iste boje [4-7].

Omotač plamena čine konačni proizvodi sagorevanja. Boja ove zone se menja u zavisnosti od smeše gasova ali je načelno narandžasta. Na vrhu ove zone temperatura je ispod 1000°C [4-7].

Zona hladnih produkata sagorevanja je zona dima i čađi (ako je ima), temperature ispod 400°C i nije od interesa za zavarivanje [4-7].

2.4.2 Tipovi plamena

U zavisnosti od odnosa količine acetilena i kiseonika razlikuju se tri tipa plamena: redukujući, normalni (neutralni) i oksidišući plamen [4-7]. Na slici 2.4 prikazani su navedeni tipovi plamena.



Slika 2.4 Tipovi plamena: a – redukujući, b – normalni (neutralni), c – oksidišući

Redukujući plamen dobija se sagorevanjem smeše u kojoj je odnos kiseonika i acetilena manji od 1, odnosno, kada je sadržaj acetilena preko 20% (ali ne više od 30%) veći nego potrebni sadržaj kiseonika. Sagorevanjem acetilena u prisustvu manjka kiseonika, dobijaju se ugljenmonoksid, ugljendioksid, ali i čist ugljenik koji preko tečnog kupatila dolaze u metal šava. Zbog toga opada žilavost materijala šava, raste krtost i povećava se mogućnost pojave

poroznosti u šavovima. Redukujući plamen ostvaruje niže temperature zavarivanja nego ostali tipovi plamena [4-7].

Redukujući plamen se koristi za zavarivanje aluminijuma i njegovih legura, sivog liva, a najčešće se koristi za navarivanje različitih delova: strugarskih noževa i burgija, pohabanih alata i sl.

Normalni (neutralni) plamen se dobija kada je odnos kiseonika i acetilena od 1:1 do 1:1,3 (do 20% više acetilena). Pri ovakvom odnosu gasova gotovo da nema promene u strukturi osnovnog metala izazvane ugljenikom iz acetilena. Normalni plamen je najpogodniji za zavarivanje čelika, olova, bronz, bakra i cinka [4-7].

Tabela 2.1 Približni odnos gorivog gasa i kiseonika ili komprimovanog vazduha za pojedine gorive gasove [4-7]

Gas	Hemijska formula	Gorivi gas / ...	
		O ₂	Komprimovani vazduh
Acetilen ^a	C ₂ H ₂	1:1,3	1:6,2
Propan (TNG)	C ₃ H ₈	1:3,75	1:18
Butan	C ₄ H ₁₀	1:4,5	1:21,4
Prirodni gas, metan	CH ₄	1:1,6	1:7,6
Vodonik	H ₂	1:0,25	1:0,45
Etilen	C ₂ H ₄	1:2,6	1:12,4
Etan	C ₂ H ₆	1:3,0	1;14,3
MPS ⁵	C ₃ H ₄ /C ₃ H ₄	1:3,5	1:16,5
Ostali gasovi ili mešavine		Prema preporukama proizvođača.	
^a Većina gorionika za acetilen proizvode neutralni plamen sa odnosom 1:1,1.			

U tabeli 2.1 prikazani su informativni odnosi gorivog gasa i kiseonika⁶ prema SRPS EN ISO 5172:2012: Oprema za gasno zavarivanje – Gorionici za gasno zavarivanje, grejanje i rezanje – Specifikacije i ispitivanja⁷, za pojedine gasove koji se koriste pri gasnom

postupku zavarivanja [16].

Oksidišući plamen se odlikuje viškom kiseonika od preko 20% u odnosu na acetilen. Kiseonik je veoma aktivan i generalno ne pogoduje osobinama metala šava pri zavarivanju te je ovaj tip plamena potrebno izbegavati. Jedina primena ovog tipa plamena je kod mesinga (kiseonik sprečava isparavanje cinka koji je otrovan), manganskih čelika i pojedinih tipova bronz [4-7]. U zavisnosti od brzine isticanja smeše gasova razlikuju se meki, srednji i oštar (tvrđi) plamen.

Meki plamen ima izlaznu brzinu smeše manju od 100 m/s, nestabilan je i primenjuje se samo za zavarivanje visokolegiranih čelika, metala sa niskom temperaturom topljenja (Pb, Zn) i za lemljenje.

Srednji plamen ima izlaznu brzinu smeše 100 m/s do 120 m/s i najčešće se koristi kod gasnog postupka zavarivanja.

Oštar (tvrđi) plamen ima izlaznu brzinu smeše veću od 120 m/s i zbog velikog dinamičkog pritiska gasa dobija se uzburkan rastop tečnog metala te vrlo lako nastaju poroznosti u metalu šava. Njegova se primena uglavnom izbegava [4-7].

2.5 Efekti prenosa toplote

Kada je u pitanju generisanje i prenos toplote, gasni postupak zavarivanja ima nekoliko specifičnosti u odnosu na ostale postupke zavarivanja:

- količina toplote koja se dobija gasnim postupkom je manja nego količina toplote kod bilo kog elektrolučnog postupka,
- dobijena toplota je lošije koncentrisana nego toplota kod elektrolučnih postupaka,
- gasni postupak se teže primenjuje za zavarivanje metala koji brzo odvođaju toplotu.

Ukratko objašnjeno: toplota dobijena tokom zavarivanja gasnim postupkom je mala i brzo se „troši“ a to za posledicu ima potrebu za dužim zagrevanjem osnovnog materijala (u odnosu na elektrolučne postupke zavarivanja). To je samo ponekad prednost, a uglavnom je velika mana postupka.

⁵ Mešavine metilacetilen-propadijena.

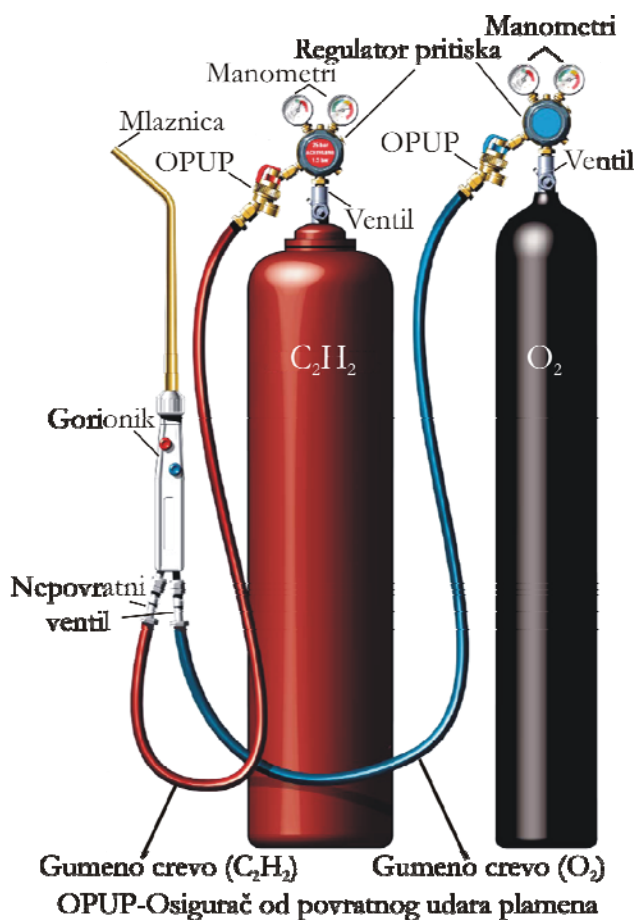
⁶ Za zavarivanje gasnim postupkom se povremeno koristi komprimovani vazduh.

⁷ Identičan sa: EN ISO 5172:2006 CEN/TC 121.

2.6 Osnovna oprema za zavarivanje

Osnovnu opremu za zavarivanje gasnim postupkom, posmatrano od izvora gasova do zone zavarivanja čine:

- izvori/rezervoari gorivih gasova – boce,
- ventili, regulatori, merači pritiska i protoka gasova,
- osigurači,
- creva za razvod gasova i
- gorionik.



Slika 2.5 Šematski prikaz opreme i radnog mesta za gasni postupak zavarivanja

Ostala oprema koja se koristi za zavarivanje (čekić, četka, naočare, cipele, rukavice itd.) svrstava se u ličnu opremu zavarivača. Svaki od delova opreme trpi značajna opterećenja (mehanička, fizička, hemijska itd.) i izrađen je od materijala koji ta opterećenja može da izdrži [17].

Na slici 2.5 prikazana je oprema za gasni postupak zavarivanja.

Termini koji se koriste za opis opreme za gasni postupak zavarivanja definisani su standardom SRPS EN 13622:2009: Oprema za gasno zavarivanje – Terminologija – Termini koji se odnose na opremu za gasno zavarivanje⁸ [18].

2.6.1 Boce za skladištenje tehničkih gasova

Za zavarivanje gasnim postupkom koriste se boce za gorivi gas (acetylen, propan, butan, MPP itd.)⁹ i boce za kiseonik, koje gasove skladište i čuvaju pod pritiskom višim od atmosferskog. Sve boce predviđene za gasove pod pritiskom se izrađuju od čelika povišene čvrstoće i to postupkom izvlačenja na hladno. Boce se proizvode i od aluminijuma ali su one predviđene samo za niže pritiske gasova.

Boce za acetylen se uvek izrađuju od čelika i nakon proizvodnje se svaka od njih ispituje na propusnost, proverava se masa, dimenzije itd [19]. Acetylen [20] se najčešće skladišti i čuva u bocama zapremine 40 l i jedna takva boca je prikazana na slici 2.6.

Ovakva boca se nakon proizvodnje puni poroznom masom, acetonom i, na kraju, acetylenom.

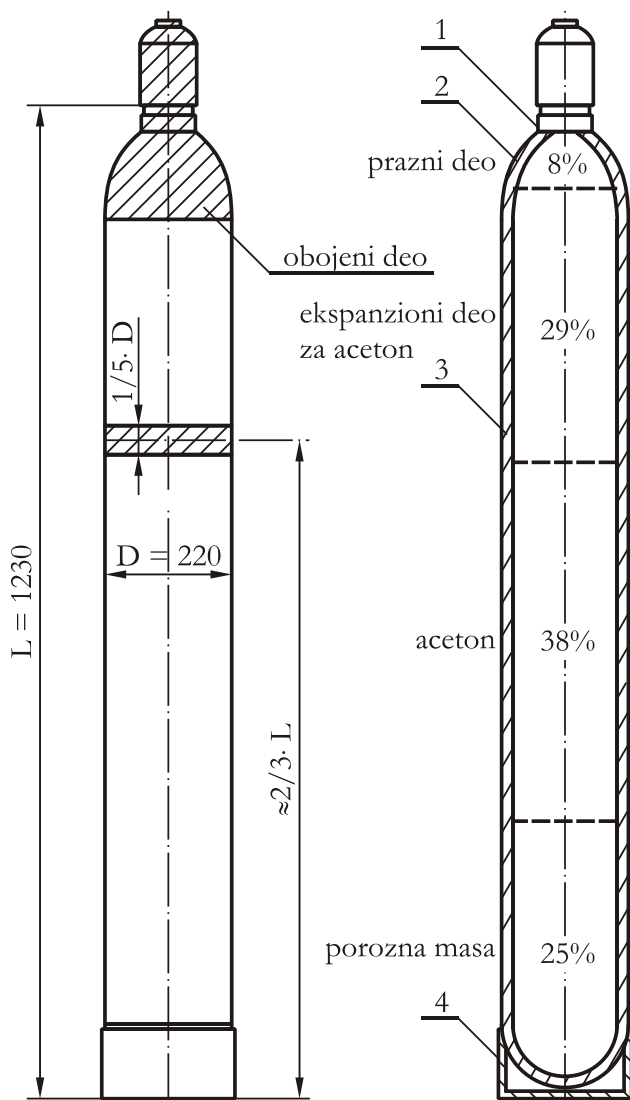
Poroznu masu čine drveni ugalj ili smeša drvenog uglja i infuzijske zemlje, azbestnog brašna, cink-oksida i lepka, koji se ubacuju u bocu iz bezbednosnih i tehnoloških razloga [4-7, 21]. Masa zauzima od 20% do 25% zapremine boce ali zbog svoje velike poroznosti, ona bocu ispunjava do 85% njene visine (poroznost mase je oko 84%). Potom se boca zatvara i dalje punjenje/pražnjenje se vrši preko ventila.

Nakon toga se u bocu uliva aceton koji ispunjava oko 38% zapremine boce, što je oko 16 l. Porozna masa upija aceton i raspoređuje ga uniformno po čitavoj zapremini boce. Njena osnovna namena je da zaštiti bocu od eksplozije ukoliko dođe do

⁸ Identičan sa: EN 13622:2002 CEN/TC 121.

⁹ Kada su u pitanju boce za gorive gasove, ovde će biti reči samo o boci za acetylen, pošto se acetylen najčešće koristi kod gasnih postupaka zavarivanja.

povratnog udara plamena, odnosno, ukoliko plamen dospe u bocu. Porozne mase koje se koriste su definisane standardom SRPS CEN/TR 14473:2015: Pokretne boce za gas – Porozni materijali za boce za acetilen¹⁰ [21].



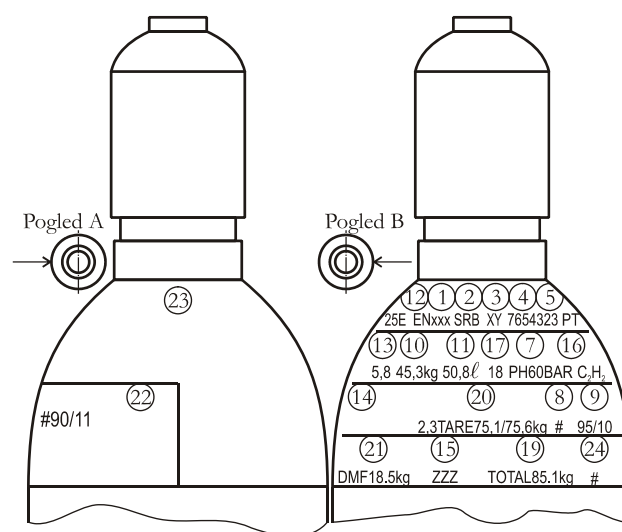
Slika 2.6 Šematski prikaz boce za acetilen zapremine 40 l: 1 – poklopac boce, 2 – vrat boce, 3 – telo boce, 4 – stopa boce

Na kraju se u bocu uliva acetilen koji se odmah rastvara u acetonu. Rastvaranjem acetilena u acetonu, skladišti se oko 6 m³ acetilena na pritisku od oko 15 bara i boca se puni do maksimalnih 92% zapremine prazne boce [4-7].

Punjenje boca acetilenom se vrši prema standardu SRPS EN ISO 11372:2012: Boce za gas – Boce za acetilen – Uslovi punjenja i

kontrola punjenja¹¹ u kontrolisanim uslovima [22] i jedino tako pripremljene boce bi trebalo da se koriste za zavarivanje gasnim postupkom.

Ovakvim skladištenjem u boci, sa relativno malom zapreminom, bezbedno se smešta velika količina acetilena koji je vrlo eksplozivan na povišenom pritisku i netolerantan na udare i vibracije. Rastvaranjem u acetonu sa poroznom masom, acetilen postaje upotrebljiv/bezbedan za gasni postupak zavarivanja, u radionici i na terenu.



Slika 2.7 Način i mesto obeležavanja na boci za acetilen: 1 – standard, 2 – zemlja porekla, 3 – žig proizvođača, 4 – serijski broj boce, 5 – standard za ispitivanje bez razaranja (ukoliko postoji), 6 – dodatna oznaka (ukoliko je potrebna), 7 – test pritisak za bocu, 8 – žig ispitivača, 9 – datum ispitivanja (u formatu: godina/mesec), 10 – masa prazne boce, 11 – zapremina vode koja može da se ulije u bocu, 12 – oznaka navoja na boci, 13 – minimalna (garantovana) debljina zida boce, 14 – oznaka legure (ako je poznata), 15 – oznaka porozne mase u boci, 16 – oznaka sadržaja boce, 17 – radni pritisak, 18 – dodatna oznaka (ako je potrebna), 19 – ukupna masa, 20 – TARA masa boce, 21 – oznaka rastvarača, 22 – žig i datum periodičnog ispitivanja boce, 23 – prostor za dodatne informacije, obaveštenja i sl, 24 – žig ispitivanja i certifikacije mase boce

Napunjena boca za acetilen mora da bude obeležena na vratu boce (slika 2.6, pozicija 2), npr. prema standardu SRPS EN 1089-1:2007: Pokretne boce za gas – Obeležavanje boca za gas – Deo 1:

¹⁰ Identičan sa: CEN/TR 14473:2014 CEN/TC 23.

¹¹ Identičan sa: EN ISO 11372:2011 CEN/TC 23.

Obeležavanje utiskivanjem¹². Oznaka na boci (slika 2.7) mora da oslikava stvarno stanje boce [23].

Boce se (prema standardu SRPS EN 1089-3:2001: Pokretne boce za gas – Obeležavanje boca (izuzimajući boce za TNG) – Deo 3: Kodovi boja¹³) obeležavaju i bojom koja definiše sadržaj boce i osobine gasova, odnosno, sadržaja u boci. Tako se, boca za acetilen, obeležava bordo¹⁴ bojom, odnosno, oksid-crvenom bojom ili bojom kestena [24].

Mogući su gubici acetona tokom upotrebe boce jer aceton vrlo brzo isparava na vazduhu. Posle pražnjenja, boca sa manjkom acetona postaje opasna ukoliko se u nju standardnim postupkom uliva acetilen. Stoga je neophodno poštovati sledeće uslove rada sa acetilenskom bocom:

- boca ne sme da bude u ležećem položaju već maksimalno nagnuta pod 45° u odnosu na horizontalni položaj pri upotrebi,
- potrošnja gorivog gasa ne sme da bude veća od 1000 l acetilena na sat (ukoliko jeste, koristi se više boca koje se međusobno spajaju na isti vod),
- ukoliko se potroši sav acetilen iz boce i manometar na boci pokazuje pritisak od 0 bara treba prekinuti upotrebu boce. Bezbednosti radi, prekid rada bi trebao da bude kada manometar pokaže nadpritisak od 0,5 bara pri temperaturi boce/okoline –5°C, 2 bara pri 20°C ili 3 bara pri 35°C;
- ukoliko temperatura boce za acetilen dostigne više od 35°C, neophodno je prekinuti dalji rad.

Održavanje i periodični pregled boca za acetilen mora da se sprovodi prema standardu SRPS EN ISO 10462:2015: Boce za gas – Boce za acetilen – Periodični pregled i održavanje¹⁵ [25].

Boce za kiseonik se izrađuju od čelika i

namenjene su skladištenju kiseonika [26, 27]. pod nad pritiskom od 150 bar. Kako kiseonik nije eksplozivan i reaktivan kao acetilen, moguće je njegovo bezbedno skladištenje, čuvanje, transportovanje ili korišćenje i pri ovako visokom pritisku. Nakon izrade, boca za kiseonik se ispituje.

U standardnu kiseoničnu bocu visine 1377 mm, spoljašnjeg prečnika Ø220 mm i debljine zida min. 6,3 mm može da se ulije 40 l kiseonika. Kada se u bocu ulije kiseonik pod pritiskom, u boci staje oko 6,4 nm³(normalni metar kubni¹⁶) kiseonika čistoće 99,9% [4-7].

Na vratu boce za kiseonik, slično kao kod boce za acetilen, mora da postoji tablica sa kodovima i detaljima o boci, masi boce, gasu u boci, radnom pritisku gasa u boci, žig i datum periodičnog ispitivanja, podaci o poreklu boce i sl [23].

Boca za kiseonik se najčešće obeležava belom¹⁷ bojom [24].

Sa bocama za kiseonik, bez obzira da li su pune ili prazne, mora se raditi odgovorno i sa oprezom:

- Boca ne sme da se udara, prevrće ili trese;
- Boca ne sme da se izlaže direktnoj sunčevoj svetlosti;
- Boca ne sme biti uprljana mastima ili drugim nečistoćama;
- Boca za kiseonik mora biti uspravna i učvršćena tokom korišćenja.

Boca se smatra praznom ukoliko je nadpritisak u njoj 0,5 bar i tada treba prestati sa upotrebom gasa iz boce kako bi se sprečilo prodiranje vazduha i vlage iz atmosfere u bocu. Boca se ponovo puni, proverava, obeležava i kao takva je ponovo pogodna za korišćenje. Radni vek boca za kiseonik je i do 50 godina, pri normalnim uslovima rada [4-7].

Iako naizgled prazna, boca za kiseonik

¹² Identičan sa: EN 1089-1:1996 CEN/TC 23.

¹³ Identičan sa: EN 1089-3:1997 CEN/TC 23 i EN 1089-3:1997/A1:1999 CEN/TC 23.

¹⁴ Eng. *maroon*, kompjuterska oznaka HEX=#800000, RGB=(128,0,0) odnosno HSV=(0°, 100%, 50%).

¹⁵ Identičan sa: EN ISO 10462:2013 CEN/TC 23.

¹⁶ Jedinica nm³ predstavlja „normalni metar kubni” odnosno, zapreminu 1 m³ gasa na atmosferskom pritisku i temperaturi od 20°C.

¹⁷ Boce za kiseonik su sredinom 20. veka obeležavane sivom bojom, a kako su ove boce dugovečne, nije nemoguće da se takve boce sretnu u upotrebi i sada.

može biti pod malim nad pritiskom pa je samim tim opasna. Najstrože je zabranjeno sečenje, bušenje, glodanje, termičko sečenje ili bilo kakav vid nestručne mašinske obrade na bocama¹⁸.

2.6.2 Ispusni ventili na bocama

Zadatak ispusnih ventila na bocama je punjenje boca tehničkim gasovima i sprečavanje nekontrolisanog pražnjenja boce. Ventili se montiraju na praznu bocu i nisu predviđeni da se skidaju sa boce (osim kada se prilikom kontrole utvrdi njihova neispravnost). Montažu ili demontažu ovih ventila moraju da rade kvalifikovani, stručni i za to ovlašćeni radnici.

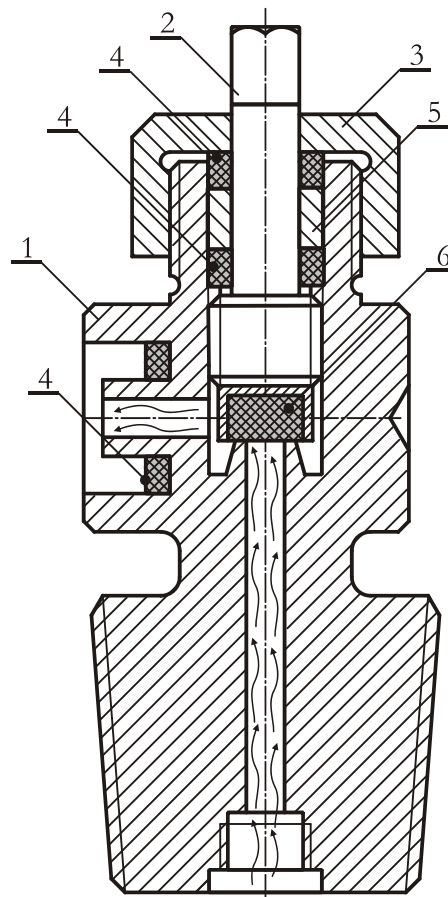
Ispusni ventili moraju uvek da budu zatvoreni osim kada se koristi tehnički gas iz boce.

Kako bi se izbegle namerne zloupotrebe ili slučajne greške pri montaži i upotrebi, ispusni ventili za acetilen i kiseonik imaju neke suštinske i tehničke razlike kako bi se sprečilo, na primer, slučajno otvaranje ventila, montaža ventila za acetilensku bocu na kiseoničnu bocu, povezivanje creva za kiseonik na acetilensku bocu i sl.

Ispusni ventil na boci za acetilen

Ovaj ventil ima masivno telo (slika 2.8), izrađeno od bronzе, sivog ili čeličnog liva, koje na donjem delu ima narezan levi konusni navoj čija namena je dvojaka. Prva je ostvarenje nepropusne rastavljive veze sa bocom za acetilen a druga je bezbednosna: levi konusni navoj je redak u tehničkoj primeni te je verovatnoća uvrtnja pogrešnog ventila u boci mala. Kroz sredinu tela je izrađen otvor za protok acetilena. U sredini tela nalazi se zatvarač, koji je sa gornje strane pritisnut osovinom ventila, sa „četvrtkom” za odvrtnje i zavrtnje. Odvrtanjem četvrtke, oslobađa se zatvarač, koji je od gume, i gas pod pritiskom ga podiže pa gas slobodno

struji u smeru prikazanom strelicama, ka boku ventila gde se nalazi izlazni priključak. Vratilo ventila je navrtkom pričvršćeno za telo ventila a zaptivanje je obezbeđeno zaptivkama i zaptivnim distancerom [4-7].



Slika 2.8 Ispusni ventil za acetilensku bocu: 1 – telo ventila, 2 – četvrtka za otvaranje i zatvaranje, 3 – navrtka, 4 – zaptivke, 5 – zaptivni distancer, 6 – zatvarač

Na izlazni priključak navrtkom sa levim navojem ili češće, primenom viljuškastog stezača sa zavrtnjem (uzengijom) povezuje redukcioni ventil za acetilen. Primenom uzengije se sprečava nesmotrena montaža reducira za kiseonik na ispusni ventil za acetilen i izbegavaju se mogući požari, eksplozije i sl.

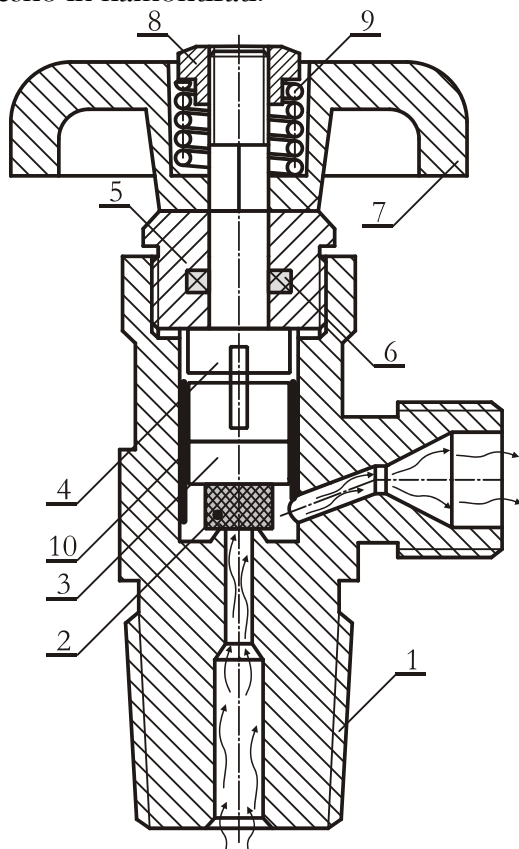
Na tržištu se susreću i drugačije konstrukcije ispusnih ventila za acetilen, npr. bez navrtke i mogućnosti demontaže vratila, sa manje ili više složenim telom, ali je princip rada isti kod svih ventila.

Ispusni ventil za kiseonik

Ispusni ventil za kiseoničnu bocu (slika 2.9) je oblikom sličan ispusnom ventilu

¹⁸ Tokom septembra 1994. godine, učenik srednje stručne škole u Lebanu je na času praktične nastave, u prisustvu nastavnika, sekao bocu za kiseonik na strugu. Boca je eksplodirala i učenik je na licu mesta poginuo, nastavnik je povređen, radionica je renovirana a strug je prodat kao „staro gvožđe”.

za acetilensku bocu ali je pojedinim detaljima napravljena razlika među njima te nije moguće jedan zameniti drugim niti je moguće pogrešno ih namontirati.



Slika 2.9 Ispusni ventil za kiseoničnu bocu: 1 – telo ventila, 2 – zatvarač, 3 – nosač zatvarača, 4 – vratilo ventila, 5 – velika navrtka, 6 – zaptivka, 7 – točkić za odvrtnje i zavrtnje ventila, 8 – navrtka točkića, 9 – opruga, 10 – zaptivka nosača

Telo ventila je sa narezanim desnim konusnim navojem i različitog je nazivnog prečnika od onoga na ventilu za acetilen. Otvaranje ventila se izvodi rotacionim kretanjem točkića, koje se preko vratila, prenosi na nosač zatvarača sa navojem koji podiže ili spušta zatvarač te kiseonik iz boce struji kroz ventil u smeru pokazanom strelicama.

Kao i ispusni ventil za acetilen, i ventil za kiseonik nije namenjen za regulaciju protoka i pritiska već samo za zatvaranje i otvaranje boce.

Redukcioni ventil pritiska kiseonika se priključuje na ispusni ventil boce za kiseonik preko desnog navoja – unutrašnjeg ili spoljašnjeg. U ovom slučaju nema primene uzengije.

Čistoća ispusnog ventila mora biti besprekorna zbog prisustva kiseonika koji pospešuje paljenje i sagorevanje. Na ventilu ne sme biti tragova masti, ulja, prašine, zapaljivih hemijskih supstanci, benzina ili alkohola. Propuštanjem kiseonika u mlazu, ove materije mogu vrlo lako da se zapale i izazovu požar, eksploziju, veliku materijalnu štetu i gubitke života. Ovakvo upozorenje nije naglašeno kada su boce i ventili za acetilen u pitanju ali, predostrožnosti radi – čitav sistem treba držati u čistom stanju.

Montažu i demontažu ispusnog ventila za kiseonik mora da vrši iskusno, ovlašćeno i obučeno lice.

2.6.3 Regulacioni ventili pritiska

Tehnički gasovi za zavarivanje su skladišteni u bocama pod pritiskom koji je znatno viši od pritiska koji je pogodan za zavarivanje. Ispusni ventili kontrolišu punjenje i pražnjenje boca, ali se na njima montiraju dodatni, redukcioni ventili, čiji je osnovni zadatak umanjeње, odnosno, redukcija, pritiska gasa bez obzira na količinu gasa u boci i brzinu potrošnje gasa. Regulacioni ventili pritiska se u žargonu nazivaju „reduktorima”.

Regulacioni ventili imaju na sebi ugrađene manometre, ponekad i protokometre, kako bi se kontrolisali pritisak i protok gasova kroz instalaciju.

Regulacioni ventili moraju da ispunjavaju zahteve standarda SRPS EN ISO 2503:2012: Oprema za gasno zavarivanje – Regulatori pritiska i regulatori pritiska sa uređajem za merenje protoka za boce za gas koje se koriste kod zavarivanja, rezanja i srodnih postupaka do 300 bar (30 MPa)¹⁹. Ovaj standard utvrđuje zahteve za jedno ili dvostepene regulatore pritiska bez uređaja za merenje protoka kod priključka boca za gasove do 300 bar, rastvoreni acetilen, tečni naftni gas (TNG), mešavine metilacetilen-propadijen (MPS) i ugljendioksid (CO₂) koji se koriste za zavarivanje, sečenje i srodne postupke [28]. Materijali koji se koriste za

¹⁹ Identičan sa: EN ISO 2503:2009 CEN/TC 121.

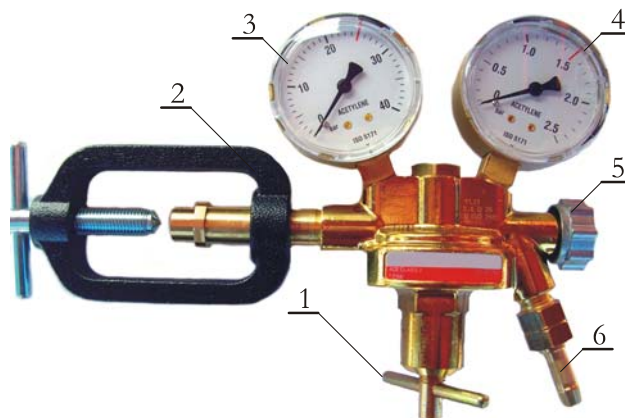
izradu delova redukcionih ventila, pored proizvodnih standarda, moraju da zadovolje posebne zahteve standarda SRPS EN ISO 9539:2012: Oprema za gasno zavarivanje – Materijali za opremu koja se koristi u gasnom zavarivanju, rezanju i srodnim postupcima²⁰. Na primer, maseni sadržaj bakra u legurama koje se koriste za ove ventile ne sme da bude veći od 70% inače tokom eksploatacije dolazi do formiranja eksplozivnih jedinjenja acetilena i bakra, a aluminijum i legure aluminijuma ne smeju da budu u kontaktu sa kiseonikom na pritisku višem od 30 bar zbog aktivnog razaranja površina delova od aluminijuma [29].

Svi manometri na reduktorima za aceten moraju da ispunjavaju zahteve standarda SRPS EN ISO 5171:2012: Oprema za gasno zavarivanje – Merači pritiska koji se koriste kod zavarivanja, rezanja i srodnih postupaka²¹. Ovaj standard definiše zahteve koje moraju da ispunjavaju merači/regulatori sa Burdonovom cevi, koji se koriste za sisteme zavarivanja, sečenja i srodnih postupaka koji rade na pritisku do 300 bara. Standard se odnosi i na rastvoreni aceten i gasove u tečnom stanju ali ne za merače na postrojenjima za proizvodnju acetilena [30].

Regulacioni ventil pritiska za aceten je sistem sačinjen od dva ventila, dva manometra, priključaka za gasove i manometara za kontrolu pritiska gasa u boci i pritiska gasa nakon redukcije (slika 2.10). Telo ventila je masivno i složenog je oblika. Na jednom kraju tela se, preko uzengije ili odgovarajućeg navoja, redukcion ventil vezuje za ispusni ventil na boci a na drugoj strani se na priključak izlaznog ventila (ispusni ventil na reduktoru) navlači crevo za aceten. Regulacija pritiska gasa se vrši preko regulacionog zavrtnja (ventila) a protok se reguliše i regulacionim zavrtnjem i ispusnim ventilom. Manometar bliži ispusnom ventilu pokazuje pritisak gasa u boci a drugi manometar prikazuje pritisak gasa nakon redukcije.

Manometri imaju obeležene podeoke

tako da se registruje pritisak gasa u svakom trenutku. Na manometrima su obeleženi minimum i maksimum pritiska gasa, odnosno, donja i gornja dozvoljena granica pritiska. Gornja granica predstavlja granicu bezbednog rada a donja granica predstavlja granicu bezbednog i mogućeg rada.



Slika 2.10 Redukcioni ventil za aceten: 1 – regulacioni zavrtnj, 2 – uzengija, 3 – manometar visokog pritiska, 4 – manometar niskog pritiska, 5 – izlazni ventil, 6 – priključak za razvodno crevo

Početak rada podrazumeva proveru statusa ispusnog ventila na boci pa onda proveru regulacionog ventila²². Nakon toga, radnik otvara ispusni ventil, pa redukcion i na kraju izlazni ventil na regulacionom ventilu pritiska. Okretanjem točkića na ventilima usaglašava se protok gasova koji se želi. Prekid rada podrazumeva zatvaranje ispusnog ventila i regulacionog ventila.

Regulacioni ventil za kiseonik je, tehnički gledano, istovetan regulacionom ventilu za aceten: sačinjen je od dva ventila, dva priključka za gasove i dva manometra za kontrolu pritiska gasa u boci i pritiska gasa nakon redukcije (slika 2.11). Za razliku od regulacionog ventila za aceten, regulacioni ventil za kiseonik može biti jednostepeni ili dvostepeni. Kod jednostepenih postoji samo jedna komora za redukciju pritiska gasa dok je kod dvostepenih prisutna još jedna komora za ublažavanje udarnog pritiska iz boce.

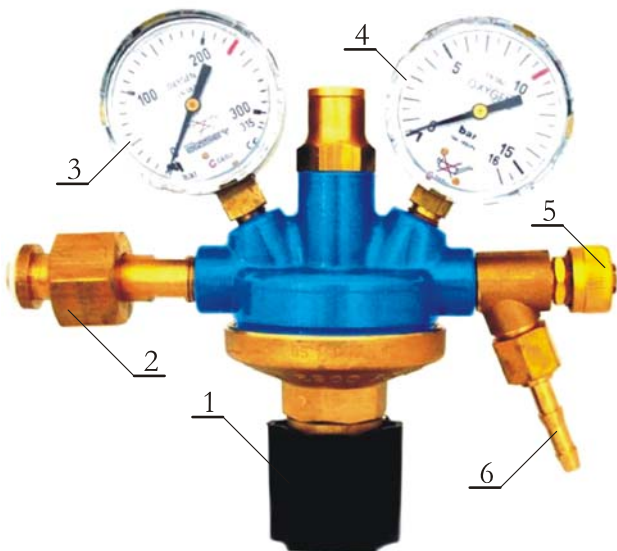
Zbog brzog protoka kiseonika kroz ventil, moguća je pojava zamrzavanja komore

²⁰ Identičan sa: EN ISO 9539:2010 CEN/TC 121.

²¹ Identičan sa: EN ISO 5171:2010 CEN/TC 121.

²² Ventili moraju biti zatvoreni, ali se proveru, svedeno, vrši. Svi ventili moraju da se zatvore po prekidu rada!

jednostepenog reduktora ili čak čitave instalacije. Dvostepeni reduktori su manje osetljivi na zamrzavanje, daju konstantan pritisak, efikasniji su i precizniji, ali je njihova cena glavni razlog slabije primene.



Slika 2.11 Redukcioni ventil za kiseonik: 1 – regulacioni zavrtnj, 2 – navrtka za vezivanje za ispusni ventil, 3 – manometar visokog pritiska, 4 – manometar niskog pritiska, 5 – izlazni ventil, 6 – priključak za razvodno crevo

2.6.4 Merači protoka gasova

Protok gasova kod gasnog postupka zavarivanja je važan za regulisanje tipa i veličine plamena. Međutim, protok se definiše finom regulacijom na ventilima i nije neophodno definisati protok gasova kao određenu količinu po satu, dužinskom metru i sl. Prema tome, uređaji za merenje protoka gasova – protokometri, pri zavarivanju gasnim postupkom zavarivanja nisu obavezni deo opreme. Merači protoka gasova su standardizovani [30, 31].

2.6.5 Osigurači

Osigurači predstavljaju posebne nepovratne ventile čija je namena sprečavanje povratnog udara plamena, odnosno, ulazak plamena u instalaciju za acetilen ili kiseonik, što može izazvati eksploziju.

Povratni udar plamena nastaje zbog

malog pritiska kiseonika pri paljenju plamena, zapušene mlaznice kroz koju ističe smeša gasova, pregrejane mlaznice, nezaptivenih veza pojedinih delova gorionika i sl.

Za sprečavanje povratnog plamena koriste se osigurači za sprečavanje udara plamena i osigurači koji sprečavaju povećanje pritiska u instalaciji koje može dovesti do udara plamena.



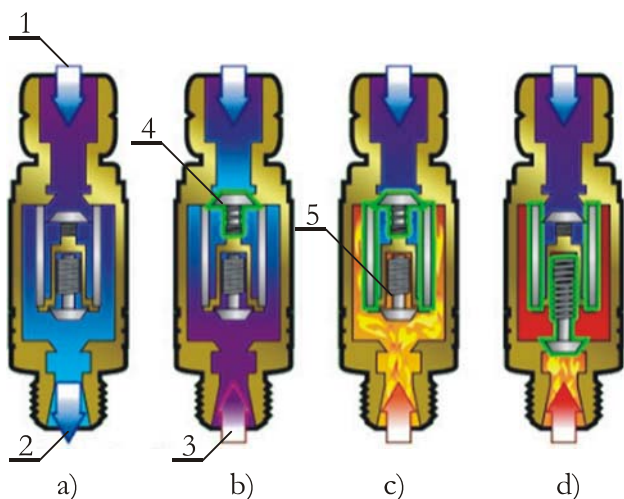
Slika 2.12 Suvi osigurač

Osigurači za sprečavanje udara plamena se u praksi nazivaju suvim osiguračima (slika 2.12). Njihove dimenzije, oblici i način ispitivanja definisani su standardom SRPS EN 730-1:2009: Oprema za gasno zavarivanje – Bezbednosni uređaji – Deo 1: Ugradni osigurači plamena (protiv povraćaja plamena)²³ [32].

Na slici 2.13 je prikazan princip rada jednog od najsavremenijih suvih osigurača za zaštitu od povratnog plamena u gasnoj

²³ Identičan sa: EN 730-1:2002 CEN/TC 121.

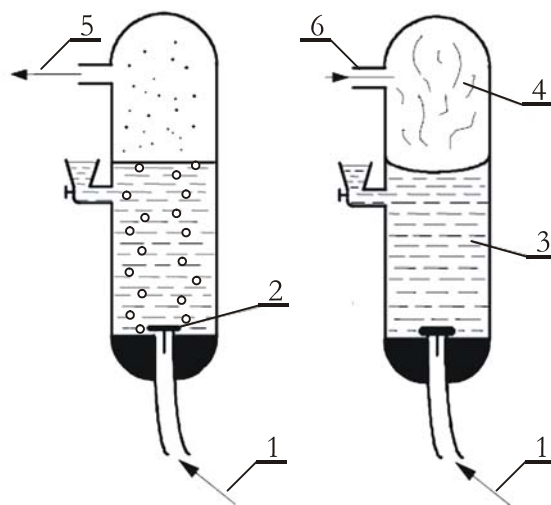
instalaciji. Kada je sistem u ravnoteži, gas slobodno struji kroz osigurač (slika 2.13, a, od pozicije 1 ka poziciji 2). Ukoliko se, iz bilo kog razloga, plamen vrati nazad u instalaciju (slika 2.13, b, pozicija 3) nepovratni ventil na kraju suvog osigurača (slika 2.13, c, pozicija 5) ne dozvoljava prolaz plamena dalje od nepovratnog ventila na početku osigurača (slika 2.13, b, pozicija 4). Plamen sagoreva gas i zagreva centralnu komoru ventila i oprugu nepovratnog ventila 5, koja se širi i zatvara ventil. Ventil ostaje zatvoren do uspostavljanja termičke ravnoteže – a termička ravnoteža se uspostavlja samo nakon gašenja plamena, hlađenja opruge ventila 5 i otvaranja ventila. Prema tome, ovakva konstrukcija suvog osigurača predstavlja mehaničko-termički zaštitni sistem.



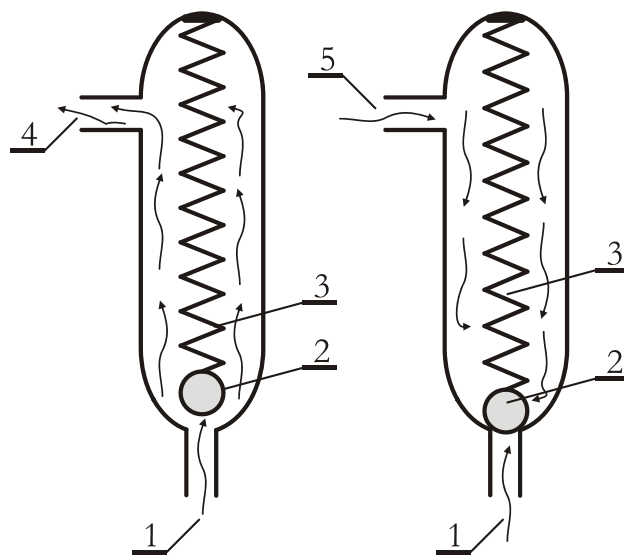
Slika 2.13 Princip rada suvog osigurača: 1 – smer ulaska gasa u osigurač, 2 – smer izlaska gasa iz osigurača, 3 – smer ulaska povratnog plamena, 4 – nepovratni ventil sa strane ulaska gasa, 5 – nepovratni ventil sa strane ulaska povratnog plamena [33]

Drugu grupu osigurača predstavljaju nepovratni ventili različitih konstrukcija čija je namena da reaguju na povećanje pritiska u instalaciji i dozvole izlazak gasa pod pritiskom iz instalacije pre nego dođe do ikakvog oštećenja instalacije. Ovi nepovratni ventili sprečavaju prodiranje plamena dublje u gasnu instalaciju, odnosno, u bocu za acetylen. Konstrukcije ovih ventila, njihove dimenzije i zahtevi ispitivanja su dati u standardu SRPS EN 730-2:2009: Oprema za gasno zavarivanje – Bezbednosni uređaji – Deo 2: Neugradni osigurači plamena (protiv povraćaja

plamena)²⁴. Ovi ventili se nazivaju vodeni osigurači, ventili sigurnosti sa oprugom i kuglicom, nepovratni ventili itd [34].



Slika 2.14 Vodeni osigurač: 1 – dotok acetilena, 2 – nepovratni ventil, 3 – voda, 4 – plamen u osiguraču, 5 – smer oticanja acetilena, 6 – smer povratnog plamena



Slika 2.15 Nepovratni osigurač sa kuglicom: 1 – dotok acetilena, 2 – kuglica, 3 – opruga, 4 – smer oticanja acetilena, 5 – smer povratnog plamena

Na slici 2.14 je prikazan princip funkcionisanja jednog klasičnog vodenog osigurača. Acetylen se dovodi u komoru osigurača preko nepovratnog ventila 1, prolazi kroz vodu 2 u osiguraču i otiče u ispusnu granu. Ukoliko se plamen vrati u osigurač, povećanje pritiska gasa povećava pritisak vode što zatvara nepovratni ventil 2 i acetylen više ne dotiče u osigurač. Dok ne dođe do

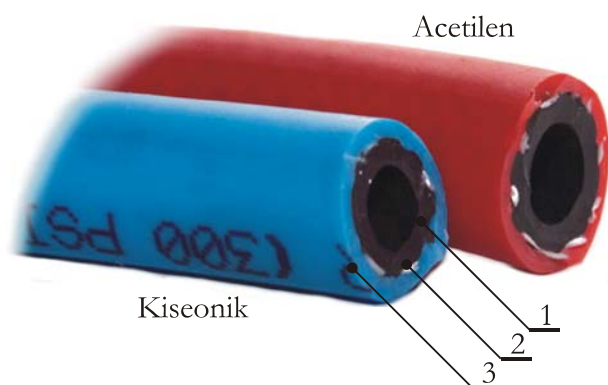
²⁴ Identičan sa: EN 730-2:2002 CEN/TC 121.

uspostavljanja ravnoteže pritiska u osiguraču, ventil ostaje zatvoren i aceten ne dotiče.

Ventil sa kuglicom i oprugom funkcioniše po istom principu kao vodeni ventil, samo je, suštinski gledano, voda zamenjena oprugom, a nepovratni ventil je kuglica (slika 2.15).

2.6.6 Creva za razvod gasova

Gorivi gasovi se od redukcionih ventila do zone zavarivanja vode gumenim crevima, ukoliko je u pitanju pojedinačni razvod gorivih gasova. Dovodna creva moraju da budu pokretna, savitljiva ali dovoljno snažna i otporna za uslove prljave i tople okoline u kojoj se koriste.



Slika 2.16 Creva za razvod gasova: 1 – unutrašnji sloj, 2 – srednji sloj, 3 – spoljašnji sloj

Creva za razvod gasova se nazivaju i gumenim crevima za gasove jer je osnovni materijal creva guma [35]. Gumena creva imaju tri sloja različitih karakteristika (slika 2.16):

- Unutrašnji sloj je od neoprenske gume koja je postojana na uticaj acetilena, acetona i kiseonika, i potpuno nepropusna za gasove i tečnosti;
- Srednji sloj od tkanine koji je otporan na udarce, ubode, pritisak, prašinu, varnice i sl;
- Spoljašnji sloj koji je izrađen od gume koja ima dobre protivhabajuće osobine, otpornost na udarce, električne varnice, vatru, vodu, ozon, hemijske rastvarače, ulja i masnoće, prljavštinu, sunčevu svetlost itd.

Gumena creva moraju da ispunjavaju zahteve propisane standardom SRPS EN ISO 3821:2012: Oprema za gasno zavarivanje –

Gumena creva koja se koriste za zavarivanje, rezanje i srodne postupke²⁵ [36]. Najvažniji zahtevi su:

- creva se koriste samo za zavarivanje, grejanje, lemljenje, sečenje i srodne postupke;
- koriste se na radnim temperaturama od -20°C do $+60^{\circ}\text{C}$;
- primenjuju se za radne pritiske do 20 bar (normalni režim rada, što uključuje i laki režim rada do 10 bar);
- creva su obeležena slovima, brojkama i bojom.

Tabela 2.1 Nominalni prečnici creva za gasni postupak sa tolerancijama [36]

Nominalni prečnik creva	Tolerancija prečnika	Koncentričnost
[mm]		
4	±0,40	1,00
4,8		
5		
6,3		
7,1		
8	±0,50	1,00
9,5		
10		
12,5	±0,60	1,25
16		
20		
25		
32	±1,00	1,5
40	±1,25	
50		

Unutrašnji sloj gume ne sme biti manji od 1,5 mm, spoljašnji sloj gume ne sme biti manji od 1 mm dok srednji sloj od tkanine može biti maksimalno 0,5 mm. Nominalni prečnik creva se odnosi na unutrašnji prečnik creva sa odgovarajućom tolerancijom i koncentričnošću u odnosu na spoljašnji prečnik (tabela 2.1) [36].

Na spoljašnjoj strani creva nalaze se brojeva i slovna oznaka creva (dimenzije, standard, pritisak itd.). Creva su dodatno obeležena bojama: kod gasnog postupka

²⁵ Identičan sa: EN ISO 3821:2010 CEN/TC 121.

zavarivanja acetilenom, crevo za kiseonik je uvek plavo a crevo za acetilen je crveno. U tabeli 2.2 prikazan je sistem obeležavanja gumenih creva bojama u zavisnosti od gasova koji se koriste.

Tabela 2.2 Sistem obeležavanja gumenih creva bojom u zavisnosti od gasa koji se koristi [36]

Gas	Boja
Acetilen, ostali gorivi gasovi ²⁶ (osim TNG, MAPP, prirodnog gasa, metana)	crvena
Kiseonik	plava
Komprimovani vazduh, azot, argon, CO ₂	crna
TNG, MAPP, prirodni gas, metan	narandžasta
Mešavina gorivih gasova	crvena-FLUX

Iako još uvek nije zakonom ili standardom regulisano, trebalo bi da se koriste samo creva koja imaju vidnu oznaku na spoljašnjoj strani i to na svakih 1000 mm dužine. Odštampana oznaka na crevu je još uvek dokaz kvaliteta proizvođača creva.



Slika 2.17 Priključci za gumeni creva

Odštampana oznaka na crevu je oblika:

ISO 3821 – A1 (A11) – A2 – A3 –A4,

gde je: A1 – maksimalni radni pritisak creva u MPa, A11 – maksimalni radni pritisak u bar, A2 – nominalni prečnik creva, A3 – oznaka

²⁶ Za upotrebu vodonika kao gorivog gasa, mora postojati potvrda proizvođača o mogućnosti primene.

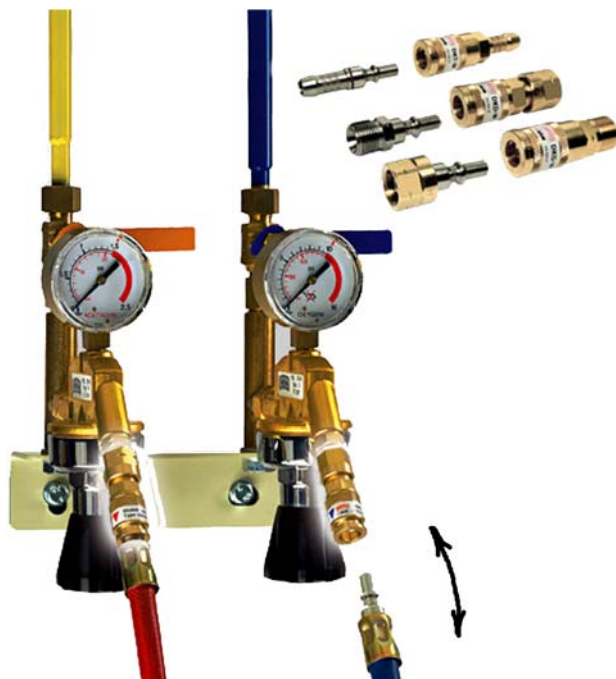
proizvođača, A4 – godina proizvodnje (poslednje dve cifre).

Primer oznake je:

ISO 3821 – 2 MPa (20 bar) – Ø10 – XYZ–16.

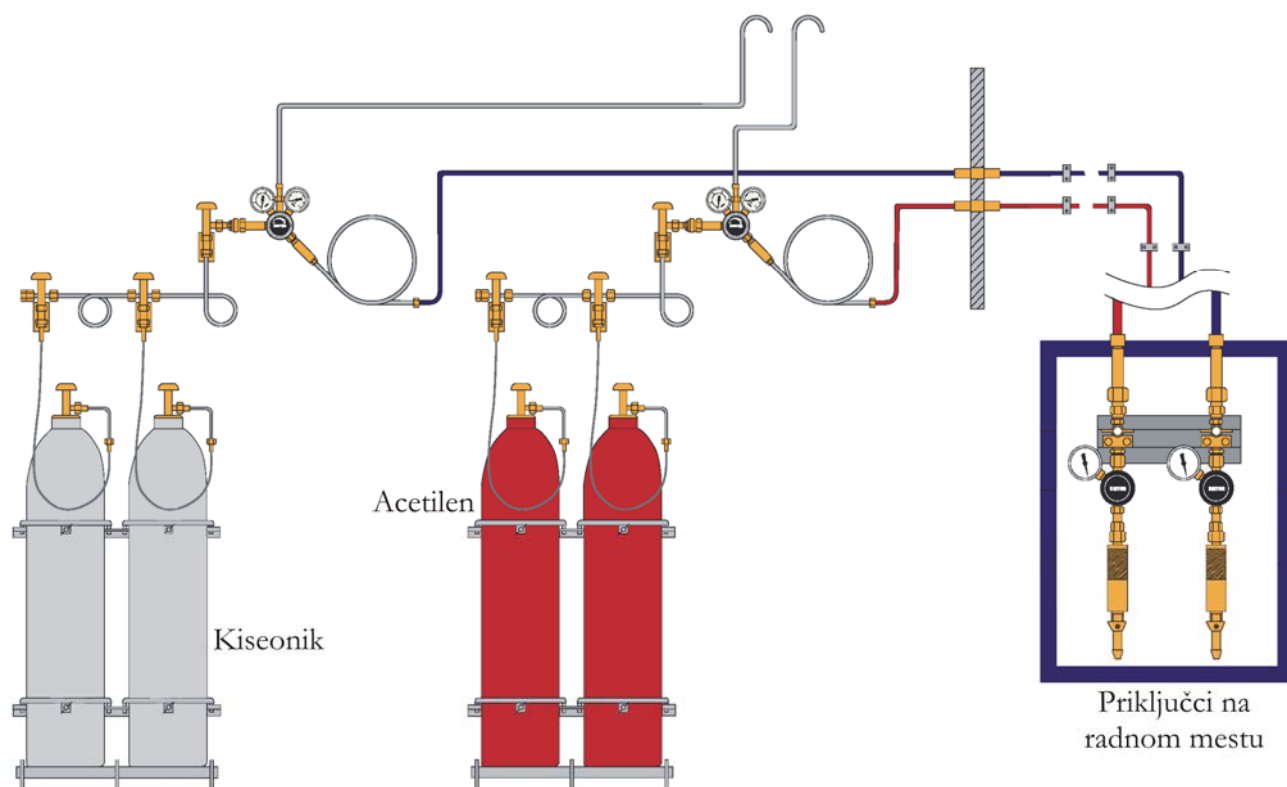
Gumena creva se isporučuju u dužinama 3 m do 50 m (ili čak do 150 m). Gumena creva za gasni postupak zavarivanja se ne nastavljaju!

Povezivanje gumenih creva sa ostalim komponentama u sistemu za gasni postupak zavarivanja se vrši priključcima i stezačima. Standard SRPS EN 560:2009: Oprema za gasno zavarivanje – Priključci creva za opremu za zavarivanje, rezanje i srodne postupke²⁷, definiše i dimenzioniše različite priključke za gumeni creva (slika 2.17) koji se koriste za gasni postupak zavarivanja [37]. Gumena creva su najosetljiviji deo sistema za zavarivanje gasnim postupkom po pitanju zaptivanja pa je neophodno sprovesti periodična ispitivanja zaptivenosti [38].

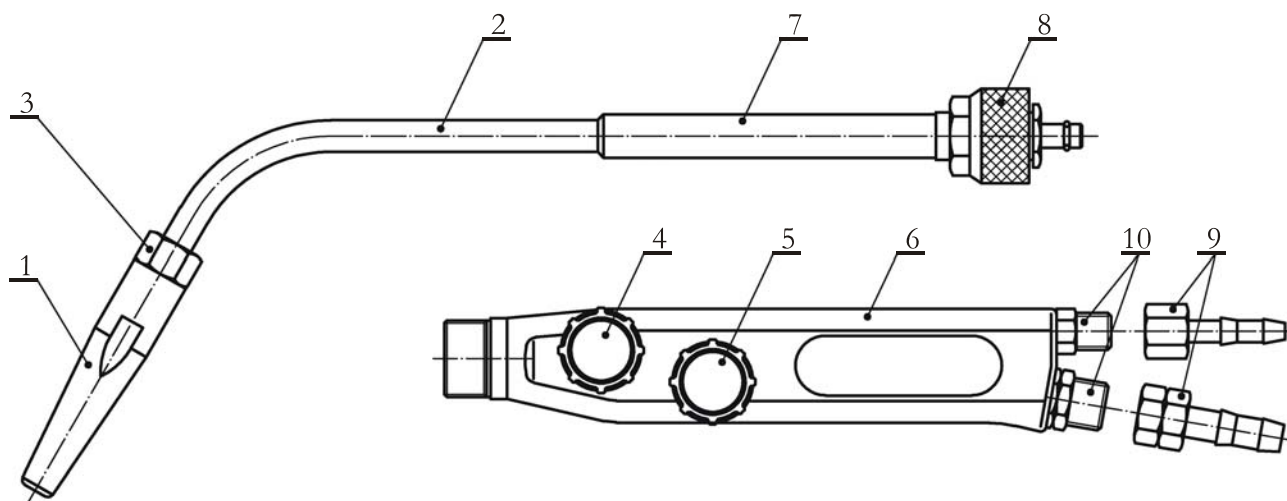


Slika 2.18 Brzorastavljivi priključci na gumenim crevima

²⁷ Identičan sa: EN 560:2005 CEN/TC 121.



Slika 2.19 Šematski prikaz centralizovanog razvoda gasova [42]



Slika 2.20 Tipičan gorionik za gasni postupak zavarivanja: 1 – mlaznica, 2 – vrat gorionika, 3 – adapter za mlaznicu, 4 – ventil za kiseonik, 5 – ventil za gorivi gas, 6 – telo gorionika, 7 – komora za mešanje gasova, 8 – spojnica, 9 – navrtka, 10 – priključak sa navojem

Posebna vrsta priključaka su brzorastavljivi priključci čija je namena funkcionalna i bezbednosna. Ovi priključci su tako konstruisani da jednostavnim izvlačenjem priključka, poseban ventil na drugoj strani priključka zatvara protok gasa i sprečava curenje gasa iz sistema.

Tipovi brzorastavljivih priključaka definisani su standardima SRPS EN 561:2009: Oprema za gasno zavarivanje – Brzorastavljivi

priključci sa zapornim ventilom za zavarivanje, rezanje i srodne postupke²⁸ [39] i ISO 7289:2010: Quick-action couplings with shut-off valves for welding, cutting and allied processes [40]. Osnovna pravila za povezivanje gumenih creva odgovarajućim priključcima definisana je standardom SRPS EN 1256:2012: Oprema za gasno zavarivanje

²⁸ Identičan sa: EN 561:2002 CEN/TC 121.

– Specifikacija za spajanje creva za zavarivanje, rezanje i srodne postupke²⁹ [41].

Na slici 2.18 prikazan je set takvih priključaka i prikaz jednog aktiviranog sistema brzog isključenja.

2.6.7 Centralizovani razvod gasova

U slučaju kada u radionici ili zavarivačkom pogonu zavarivanje vrši nekoliko radnika, često se izvodi centralizovana instalacija za razvod gasova. Gasovi se u instalaciju dovode na jednom mestu (iz jedne ili više boca) a potrošači – uređaji za gasni postupak zavarivanja se nalaze na više mesta u radionici/pogonu. U ovakvom slučaju je instalacija od bakarnih, čeličnih i plastičnih cevi. Između boca i radnog mesta se postavljaju razni ventili, osigurači, manometri itd. Na slici 2.19 prikazana je šema jednog centralizovanog razvoda gasova za zavarivanje.

Problem centralizovanog razvoda gasova je nejednak pritisak u različitim delovima sistema (koji su predviđeni da rade na istom pritisku). Zbog toga se u sistem ugrađuju regulatori pritiska koji moraju da ispunjavaju zahteve SRPS EN ISO 7291:2011: Oprema za gasno zavarivanje – Regulatori pritiska kod centralnog razvoda gasova za zavarivanje, rezanje i srodne postupke do 30 MPa (300 bar)³⁰[43].

2.6.8 Gorionici

Gorionik je uređaj kojim se formira, reguliše i provodi smeša gasova koja se koristi za zavarivanje gasnim postupkom i to je završni organ u sistemu transporta gorivog gasa i kiseonika. Tipičan gorionik za gasni postupak zavarivanja prikazan je na slici 2.20.

Gasovi se crevima dovode u telo gorionika 6 (crevo je povezano preko spojnice 8 i navrtke 9). Ventilima 4 i 5 se reguliše protok gasova kroz gorionik. Kako je gorionik dvodelni, spojnica 8 povezuje sastavne delove u jedinstvenu celinu. Gasovi se vode u mešačku kutiju 7 (komora za mešanje gasova),

gde se mešaju pa potom vode kroz vrat gorionika 2 do mlaznice 1. Mlaznica i vrat gorionika su povezani adapterom 3. Na izlazu iz mlaznice gori plamen.

Gorionici se prema pritisku gasa u mešačkoj kutiji [4-7] dele na:

- Niskopritisne gorionike (gorionici kod kojih je pritisak gorivog gasa, izmeren ispred mešačke kutije, niži od pritiska mešavine na izlazu iz mešačke kutije);
- Visokopritisne injektorske gorionike (gorionici kod kojih su pritisci gorivog gasa i kiseonika na ulazu u mešačku kutiju viši od pritiska mešavine na izlazu iz mešačke kutije);
- Gorionici sa istim pritiskom (gorionici kod kojih su pritisci gorivog gasa i kiseonika ispred mešačke kutije jednaki sa pritiskom mešavine na izlazu iz mešačke kutije).

Gorionici se mogu podeliti i prema mogućnosti podešavanja protoka gasa na:

- Gorionike bez mogućnosti podešavanja protoka gasa (jednobrzinski gorionici kod kojih se protok može podešavati u vrlo uskim granicama);
- Gorionike sa nekoliko mogućih protoka gasova (podešavanje protoka se vrši biranjem odgovarajuće mlaznice);
- Gorionike sa mogućnošću podešavanja protoka preko injektora (injektor menja svoj poprečni presek te tako reguliše koliko gasa ulazi u mešačku kutiju);
- Gorionike sa mogućnošću podešavanja protoka gasa regulisanjem pritiska gasova (ovakvi gorionici moraju imati fiksnu mešačku kutiju);
- Gorionike sa mogućnošću promene protoka gasa promenom vrata gorionika (u zavisnosti da li je u pitanju sečenje, zavarivanje ili lemljenje);
- Gorionike sa mogućnošću podešavanja protoka gasa podešavanjem ventila za gorivi gas i kiseonik.

Specifikacija gorionika, kao i zahtevi ispitivanja i održavanja dati su standardom SRPS EN ISO 5172:2012: Oprema za gasno zavarivanje – Gorionici za gasno zavarivanje,

²⁹ Identičan sa: EN 1256:2006 CEN/TC 121.

³⁰ Identičan sa: EN ISO 7291:2010 CEN/TC 121.

grejanje i rezanje – Specifikacije i ispitivanja³¹ [44]. Gorionici koji se koriste za zagrevanje gasnim postupkom definisani su standardom SRPS CEN/TR 13259:2014: Oprema za gasno zavarivanje – Industrijski ručni i mašinski gorionici za grejanje i lemljenje plamenom i srodne postupke³² [45].

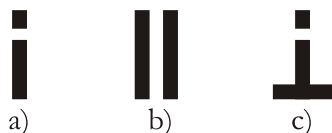
Gorionik mora da poseduje oznaku na telu koja je sledećeg oblika:

PUD – EN ISO 5172 – OSM – SG.

gde je PUD – proizvođač, uvoznik ili distributer, OSM – oznaka sistema mešanja, SG – simbol gasa za koji je gorionik namenjen.

Oznaka proizvođača, uvoznika ili distributera mora biti potpuna: mora biti jasno vidljivo kada i gde je gorionik proizveden, testiran i odobren za upotrebu.

Oznaka sistema mešanja se odnosi na mešačku kutiju. Na oznaci mora da bude vidljiv maksimalni radni pritisak gorionika u kPa. Mešačka kutija može imati i simboličku oznaku, prikazanu na slici 2.21.



Slika 2.21 Simbol mešačke kutije [44]: a) injektorska mešačka kutija bez povratnog ventila, b) mešačka kutija bez injektora, c) injektorska mešačka kutija sa nepovratnim ventilom

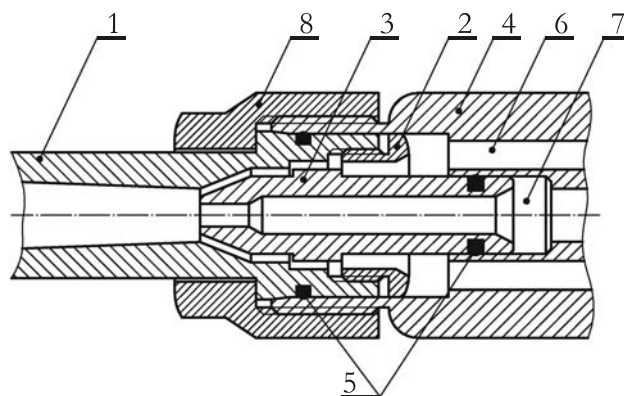
Tabela 2.3 Simboli gasova [44]

Naziv gasa	Simbol gasa
Kiseonik	O
Acetilen	A
Propan, butan ili TNG	P
Prirodni gas, metan	M
Vodonik	H
Etan	E
MPS (metilacetilen-propadijen mešavina) ili ostale mešavine	Y
Komprimovani vazduh	AIR
Više of jednog gasa	F

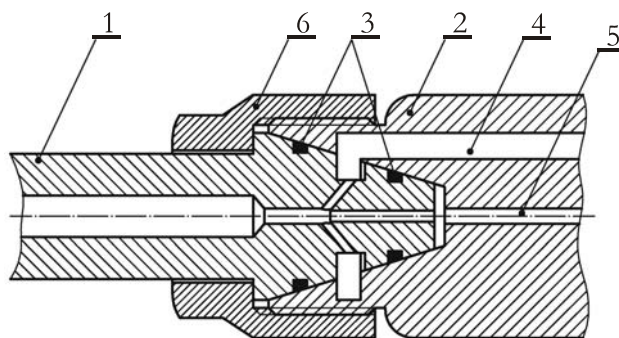
³¹ Identičan sa: EN ISO 5172:2006 CEN/TC 121.

³² Identičan sa: CEN/TR 13259:2013 CEN/TC 121.

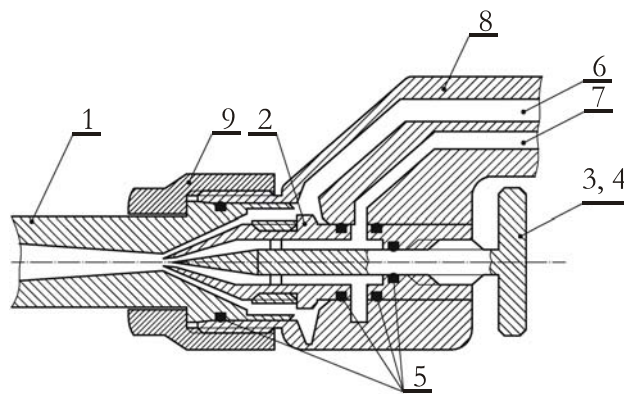
Simboli gasova, za koje je gorionik namenjen, su slovne oznake prema tabeli 2.3.



Slika 2.22 Injektorska mešačka kutija [39]: 1 – mešačka kutija, 2 – injektor, 3 – navrtka mlaznice, 4 – telo mešačke kutije, 5 – žaptivka, 6 – kanal za gorivi gas, 7 – kanal za kiseonik, 8 – navrtka



Slika 2.23 Mešačka kutija sa jednakim pritiskom [44]: 1 – mešačka kutija, 2 – telo mešačke kutije, 3 – žaptivke, 4 – kanal za gorivi gas, 5 – kanal za kiseonik, 6 – navrtka



Slika 2.24 Mešačka kutija sa podesivim injektorom [44]: 1 – mešačka kutija, 2 – injektor, 3 – ventil za kiseonik, 4 – iglica, 5 – žaptivke, 6 – kanal za gorivi gas, 7 – kanal za kiseonik, 8 – telo mešačke kutije, 9 – navrtka

Mešačke kutije formiraju mešavinu gasova od gorivog gasa i kiseonika, principom Venturijeve cevi koja usisava acetilen u mešačku kutiju ako postoji injektor, ili prostim mešanjem pod pritiskom ako mešačka kutija nije sa injektorom. Na slikama 2.22 do 2.24, date su neke od najčešćih konstrukcija mešačkih kutija.

Podsklop koji čine mlaznica, vrat gorionika i navrtka se naziva plamenikom (slika 2.20). Plamenici idu u kompletima sa opremom za zavarivanje i sečenje u različitim dimenzijama kako bi bilo moguće njima izvršiti zavarivanje različitih debljina. Standard SRPS K.M6.020:1987: Pribor za gasno zavarivanje i rezanje – Gorionici za ručno gasno zavarivanje, rezanje i srodne postupke³³ definiše kapacitet i dimenzije plamenika kao dva faktora izbora debljine lima koju plamenik može da zavari [46]. Kako oprema trpi različite vrste opterećenja pri radu, konstrukcija (malih) kompleta opreme (sa minimalno 9 gorionika) mora da zadovoljava sigurnosne i bezbednosne zahteve definisane standardom SRPS EN 1326:2012: Oprema za gasno zavarivanje – Mali kompleti za gasno tvrdo lemljenje i zavarivanje³⁴ [47].

Tabela 2.4 Tip plamenika, kapacitet plamenika i debljina lima koji se može zavariti [46, 47]

Oznaka plamenika	Kapacitet plamenika	Debljina lima
[-]	[l/m ³]	[mm]
0	35	0,2-0,5
1	75	0,5-1,0
2	150	1,0-2,0
3	300	2,0-4,0
4	500	4,0-6,0
5	750	6,0-9,0
6	1150	9,0-14,0
7	1700	14,0-20,0
8	2500	20,0-30,0

³³ Ovaj standard je od 20.12.2012. van upotrebe. Međutim, kako se veliki broj proizvođača gorionika u zemljama bivše Jugoslavije i dalje drži ovog standarda, ili njegovog JUS prethodnika, podaci iz njega se mogu još uvek koristiti kao relevantni.

³⁴ Identičan sa: EN 1326:1996 CEN/TC 121.

U tabeli 2.4, prikazan je kapacitet plamenika u l/m³, broj plamenika koji željeni kapacitet može da ostvari, kao i debljinu lima koju je moguće zavarivati izabranim plamenikom. Svaki ozbiljniji set gorionika bi trebao da ima ovih 9 plamenika, makar za zavarivanje.

Tabela 2.5 daje pregled donje toplotne moći pojedinih gorivih gasova i maksimalnog protoka definisanog standardom [46].

Tabela 2.5 Protok gorivih gasova [46]

Gas		Donja toplotna moć [kcal/m ³]	Simbol	Maksimalni protok gasa [l/h]
Acetilen	C ₂ H ₂	12700	A	2500
Propan	C ₃ H ₈	21200	P	1500
Butan	C ₄ H ₁₀	28000		1200
Prirodni gas	CH ₄	8120	M	4000
Metan				
Vodonik	H ₂	2450	H	13000
Etilen	C ₂ H ₄	13450	E	2200
Etan	C ₂ H ₆	14600		
MPS	C ₃ H ₄ / C ₃ H ₄	19580	Y	1600

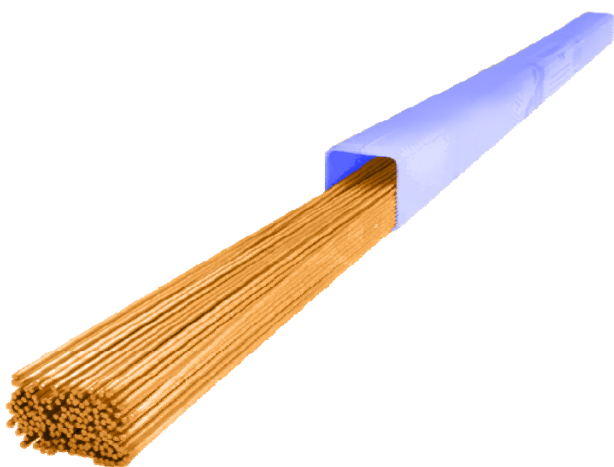
Donja toplotna moć je zadata za 15°C i 101,3 kPa. Ako je donja toplotna moć data za 0°C, treba je podeliti sa 1,055 i dobiće se vrednost za 15°C.

Operacioni incidenti koji se javljaju pri radu sa gorionicima su: povratno paljenje (u mlaznici), neprestano povratno paljenje (u mlaznici do mešačke kutije uz sagorevanje u mešačkoj kutiji), povratni plamen (po pravilu, plamen prodire do suvog osigurača ispred reduktora), povratni tok gasa (ukoliko je pritisak gasa u jednoj boci niži od pritiska gasa u drugoj boci, moguć je povratak gasa pod višim pritiskom u instalaciju gasa sa nižim pritiskom, bez pojave plamena) [4-7].

2.7 Dodatni materijal

Gasni postupak zavarivanja se izvodi sa i

bez dodatnog materijala (kada su u pitanju materijali male debljine, dodatni materijal ne mora da se koristi). Dodatni materijal za gasni postupak zavarivanja je u obliku žice ili šipke (slika 2.25).



Slika 2.25 Žica za zavarivanje gasnim postupkom

Izbor dodatnog materijala kojim se vrši zavarivanje uslovljen je hemijskim i mehaničkim osobinama osnovnog materijala: dodatni materijal se bira tako da bude sličnih osobina kao osnovni materijal. U opštem slučaju, dodatni materijal za zavarivanje se kupuje na osnovu preporuke proizvođača.

Elektrodne žice koje se koriste za zavarivanje nelegiranih čelika i čelika otpornih na puzanje gasnim postupkom su klasifikovane prema SRPS EN 12536:2008: Potrošni materijali za zavarivanje – Šipke za gasno zavarivanje nelegiranih i čelika otpornih na puzanje – Klasifikacija³⁵ [48].

Elektrodne žice koje se koriste za zavarivanje livenog gvožđa (sivog liva) gasnim postupkom su klasifikovane prema SRPS EN ISO 1071:2008: Potrošni materijali za zavarivanje – Obložene elektrode, žice, šipke i punjene žice za zavarivanje topljenjem sivog liva – Klasifikacija³⁶ [49].

Način i postupak klasifikacije elektroda iz ovih grupacija prikazan je u prilogu.

Elektrodne žice su prečnika $d = 0,6; 0,8; 1; 1,2; 1,4; 1,6; 2; 2,4; 2,5; 2,8; 3; 3,2; 4; 5$ ili 6^{37}

mm, dužine $l = 500-1000$ mm (uglavnom 1000 mm) i najčešće se pakuju po 25 kg u kartonskim kutijama.

2.8 Topitelji

Topitelji su sredstva u obliku praha ili pasta i neophodni su za zavarivanje livenog gvožđa, bakra, mesinga, bronzi, aluminijuma i nerđajućih čelika i drugih legura [4-7].

Tokom zavarivanja, odnosno, prilikom topljenja metala, mogu se obrazovati teško topivi oksidi koji ometaju dalje zavarivanje i stapanje dodatnog i osnovnog materijala. Takođe, može se inicirati nastanak šupljina u metalu šava. Da bi se ove pojave sprečile ili makar ublažile, osnovnom i dodatnom metalu se pre zavarivanja, dodaju takozvani topitelji. To su hemijska sredstva, u obliku praška ili pasta i oni su neophodni za zavarivanje livenog gvožđa, bakra, mesinga, bronz, aluminijuma, nerđajućih čelika i sl [4-7].

Osim što sprečavaju nastajanje teško topivih oksida, topitelji razgrađuju postojeće okside i prevode ih u lakotopivu trosku koja isplivava na površinu metala šava i lako se odstranjuje.

Topitelji predstavljaju i poseban vid zaštitne „atmosfera” oko metala šava koji sprečava oksidaciju metala.

Prema hemijskom sastavu, topitelji se dele na kisele i bazne. Kiseli topitelji su, uglavnom, hemijska jedinjenja na bazi bora: borna kiselina (H_3BO_3) ili natrijumborhidrat, poznatiji kao boraks ($Na_2B_4O_7 \cdot 10H_2O$) [52].

Boraks lako razgrađuje okside metala stvarajući soli borne kiseline-borate: ($CuOB_2O_3$, $ZnOB_2O_3$, $MnOB_2O_3$). Boraks se najviše upotrebljava pri zavarivanju bakra i njegovih legura, kao i za tvrdo lemljenje. Pri zavarivanju bakra, teškoće stvaraju oksidi CuO i Cu_2O i zavarive su samo one vrste

consumables – Technical delivery conditions for welding filler metals – Type of product, dimensions, tolerances and marking [50]. Važeći standard je: SRPS EN ISO 544:2013: Potrošni materijal za zavarivanje – Uslovi isporuke za dodatne materijale i praškove – Vrste proizvoda, mere, tolerancije i obeležavanja [51].

³⁵ Identičan sa: EN 12536:2000 CEN/TC 121.

³⁶ Identičan sa: EN ISO 1071:2003 CEN/TC 121.

³⁷ Proizvođači dodatnih materijala iz Evrope, dimenzije žica za zavarivanje definišu prema povučenom standardu EN 759:1997: Welding

bakra sa niskim sadržajem Cu_2O [4-7].

Bazni topitelji su natrijumkarbonat (Na_2CO_3) i potaša (K_2CO_3). Koriste se za zavarivanje sivog liva.

Topitelji se na osnovni i dodatni materijal nanose kao paste ili, ako su praškasti, u smeši sa vodom. Zavarivač premazuje zonu zavarivanja pre početka (ne više od 4 h pre početka) a dodatni materijal umače u topitelj po ustaljenom planu zavarivanja ili prema sopstvenom osećaju [4-7].

Topitelji koji se koriste pri gasnom postupku zavarivanja nisu standardizovani.

2.9 Tehnologija zavarivanja

Tehnologija zavarivanja gasnim postupkom obuhvata sve aktivnosti koje treba sprovesti kako bi se uspešno izvršilo spajanje dva tela u monolitnu celinu. Aktivnosti koje treba sprovesti mogu se podeliti na:

- pripremne aktivnosti, odnosno, aktivnosti koje treba sprovesti pre početka zavarivanja,
- tekuće aktivnosti, odnosno, aktivnosti u toku zavarivanja i
- završne aktivnosti, odnosno, aktivnosti koje treba sprovesti nakon završenog zavarivanja.

Pripremne aktivnosti pre zavarivanja treba da pripreme realizaciju zavarivanja: vrši se projektovanje tehnologije zavarivanja, definiše se postupak zavarivanja, određuju se parametri zavarivanja, biraju dodatni i potrošni materijali, priprema se osnovni metal – vrši se čišćenje, ispravljanje, stezanje, izrađuje se žleb itd.

Tekuće aktivnosti u toku zavarivanja obuhvataju realizaciju samog zavarivanja: upoznavanje radnika sa aktivnostima koje treba realizovati i tehničkom dokumentacijom, proveru gasne instalacije, otvaranje ventila, paljenje plamena, podešavanje plamena, zavarivanje ranije definisanom tehnikom, međuprolazno čišćenje i ispravljanje (ako je potrebno), kontrola tokom zavarivanja, bezbedno gašenje plamena, obezbeđenje instalacije i uređaja za

zavarivanje, odlaganje opreme i, po potrebi, vrši se održavanje propisanih termičkih/toplotnih režima osnovnog, dodatnog i potrošnih materijala.

Završne aktivnosti obuhvataju sve aktivnosti kojima se zavareni spoj dovodi u završno stanje: kontrola, čišćenje, brušenje, površinska zaštita, ispravljanje/uklanjanje deformacija, termička obrada, demontaža i uklanjanje zavarenih delova sa radnog mesta (ukoliko je to potrebno i moguće) itd.

Međutim, pod pojmom „tehnologija zavarivanja” na nivou radnog mesta (radionice i terena) podrazumevaju se aktivnosti kojima se definiše i realizuje zavarivanje određenih delova [53].

2.9.1 Priprema materijala za zavarivanje

Priprema materijala za zavarivanje obuhvata sledeće aktivnosti:

- Čišćenje ivica i površina delova koje se zavaruju (uklanjanje boja, korozije, oksida, masti, prljavštine i sl.);
- Priprema žleba za zavarivanje (ako je potrebno);
- Pažljivo postavljanje delova u položaj za zavarivanje i učvršćivanje kako bi se sprečilo pomeranje tokom zavarivanja,
- Izrada pripoja („heftanje”) na odgovarajućim mestima, prema utvrđenom planu realizacije;
- Po potrebi, predgrevanje materijala radi poboljšanja zavarivosti, sprečavanja nastanka krtih faza u ZUT-u.

Čišćenje ivica i površina

Čišćenje ivica i površina koje treba da se zavaruju je jedna od aktivnosti koju gotovo svi zavarivači pokušavaju da izbegnu. Međutim, ova aktivnost je obavezna i uvek mora da se sprovede. Naime, sve prljavštine na površinama koje se zavaruju (masnoće, boje, lakovi, korozija itd.) su potencijalni izvori nečistoća koje mogu da prodru u tečno kupatilo i ostanu zarobljene kao uključci. Masnoće, boje i lakovi koji sagorevaju pri zavarivanju mogu formirati kancerogena isparenja i mogu uticati na zdravlje ljudi.

Priprema žlebova

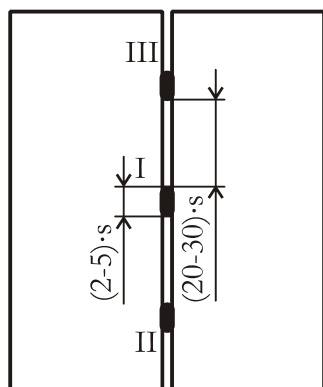
Priprema žlebova je obavezna aktivnost koja mora da se sprovede pri realizaciji tehnologije zavarivanja. Standard SRPS EN ISO 9692-1:2014: Zavarivanje i srodni postupci – Tipovi pripreme spoja – Deo 1: Ručno elektrolučno zavarivanje topivom elektrodom, elektrolučno zavarivanje topivom elektrodom u zaštitnom gasu, gasno zavarivanje, TIG zavarivanje i zavarivanje čelika snopom³⁸ daje preporuke za pripremu žlebova za zavarivanje gasnim postupkom [54]. U prilogu su dati detalji vezani za pripremu žleba za gasni postupak zavarivanja.

Pozicioniranje delova

Pozicioniranje delova podrazumeva postavljanje delova u položaj za zavarivanje, njihovo učvršćivanje (fiksiranje, stezanje) i zadržavanje željenog položaja delova do kraja zavarivanja. U ovu svrhu koriste se različiti alati i pribori: pozicioneri, stege, hvataljke, stezači, stezne šape, ugaonici, ali i mašine sa magnetnim pločama, valjcima, laserski pozicioneri, robotizovani manipulatori itd [55].

Izrada pripojnih šavova

Pripajanje je postupak spajanja ivica materijala samo na pojedinim mestima, pre početka samog zavarivanja. Svrha pripajanja je fiksiranje delova koji se zavaruju jedan u odnosu na drugi kako bi se sprečilo (ili makar umanjilo) njihovo pomeranje tokom zavarivanja.



Slika 2.26 Pripojni spoj, s - debljina limova koji se zavaruju, I, II, III - redosled izvođenja pripoja

Pripajanje, po pravilu, počinje od

sredine spoja koji treba izraditi pa se izvodi naizmenično sa jedne i sa druge strane. Pripojni šavovi bi trebalo da budu $2s$ do $5s$ a izvode se na rastojanju od $20s$ do $30s$ koji se zavaruje (slika 2.26). Ovakvim pristupom zavarivanja se ostvaruje ravnomerno rastojanje između ivica zavarenih limova pa je i šav homogenijeg sastava [4-7].

Pripojni šavovi moraju da budu istog kvaliteta kao puni šav i oni se ne izvode kod limova veće debljine ili kod cevastih delova gde poprečne dilatacije ne utiču na postupak zavarivanja.

Predgrevanje materijala

Predgrevanje materijala je termički postupak koji se primenjuje na osnovnom materijalu sa ciljem da se poboljša zavarivost [56]. Odluku o predgrevanju materijala ne donosi zavarivač – zavarivač samo mora da sprovede postupak predgrevanja po utvrđenoj proceduri. Određivanje režima predgrevanja je različito za različite materijale, položaje i opšte uslove zavarivanja pa se o predgrevanju materijala ne može govoriti uopšteno. Dovoljno je napomenuti: predgrevanje osnovnog materijala je deo tehnologije zavarivanja.

2.9.2 Rad sa opremom za zavarivanje

Pre početka zavarivanja, zavarivač je dužan da ustanovi stanje opreme sa kojom treba da radi (kontrola opreme) pa tek onda može da nastavi sa radom. Neke od osnovnih aktivnosti u radu su:

- provera stanja gasne instalacije (integritet, funkcionalnost, zaprljanost itd.);
- otvaranje ventila;
- paljenje i podešavanje plamena;
- bezbedno zavarivanje;
- prekidanje zavarivanja i gašenje plamena;
- zatvaranje ventila i obezbeđenje gasne instalacije.

Provera stanja gasne instalacije

Pre početka rada, zavarivač mora da utvrdi da li je gasna instalacija funkcionalna i bezbedna za rad. Tipičan vizuelni pregled obuhvata utvrđivanje stanja ventila i gumenih creva, stabilnost i položaj boca za gasove,

³⁸ Identičan sa: EN ISO 9692-1:2013 CEN/TC 121.

proveru pritiska gasova u bocama, proveru čistoće gorionika (plamenika) i sl. Ukoliko postoji bilo kakva nedoumica oko funkcionalnosti i bezbednosti, zavarivanje se ne sme započinjati.

Otvaranje ventila se vrši sledećim redosledom:

- otvaranje ispusnog ventila za kiseonik,
- otvaranje ispusnog ventila za acetilen,
- otvaranje redukcionog ventila za kiseonik uz podešavanje pritiska,
- otvaranje redukcionog ventila za acetilen uz podešavanje pritiska,
- otvaranje ventila za kiseonik na gorioniku (počinje isticanje kiseonika iz gorionika),
- otvaranje ventila za acetilen na gorioniku (iz gorionika ističe mešavina acetilena i kiseonika).

Važno je napomenuti da se **uvek** prvo otvaraju ventili za kiseonik pa tek onda ventili za gorivi gas.

Paljenje i podešavanje plamena

Posle otvaranja ventila, mešavina acetilena i kiseonika se pali elektronskim upaljačima, ekonomizatorom ili fitiljem. Paljenje šibicom ili običnim upaljačima nije dopušteno jer je moguće prenošenje plamena na kožu ili odeću čoveka (inicijalni plamen je nekontrolisan). Dodatni problem je što čovek na pojavu plamena reaguje po uslovnom refleksu (što je opet, nekontrolisano) pa su moguće različite posledice.

Podešavanje plamena se vrši sa ciljem da se na najbolji način izvrši zavarivanje, ali se, u svakom slučaju, prvobitno podešavanje plamena vrši na ventilu za acetilen – na gorioniku. Tako se podešava protok acetilena. Potom se podešava ventil za kiseonik, i tako naizmenično dok se ne uspostave željeni tip i dimenzije plamena.

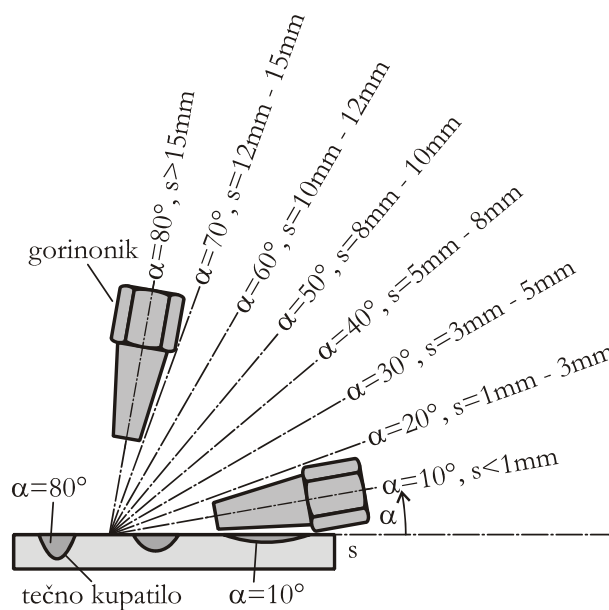
2.9.3 Zavarivanje

Zavarivanje gasnim postupkom se obavlja uz nekoliko ograničenja/preporuka:

- Jezgro plamena ne sme da se uroni u tečno kupatilo već mora da se drži na konstantnom rastojanju od 3 mm do 5 mm

daleko od površine tečnog kupatila [4-7];

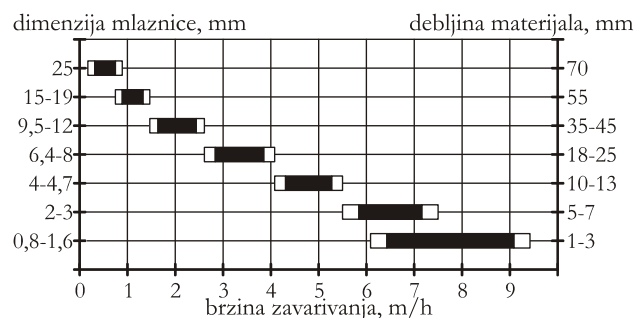
- Plamen mora uvek da prekriva vrh dodatnog materijala i celu površinu tečnog kupatila;
- Gorionik se vodi paralelno ivicama žleba, bez poprečnih pomeranja izvan granica žleba. Stepenn iskorišćenja energije je najveći kada se gorionik drži upravo na lice šava i tada je dubina uvarivanja najveća.



Slika 2.27 Ugao nagiba gorionika za različite debljine materijala s i širina/dubina tečnog kupatila u zavisnosti od ugla nagiba α [4-7]

Sa naginjanjem gorionika, opada stepenn iskorišćenja energije, opada dubina uvarivanja ali se širi površina tečnog kupatila (slika 2.27).

Na slici 2.28 su prikazani nagibi gorionika za različite debljine čelika kod kojih se postižu najpovoljnije mehaničke osobine spoja.

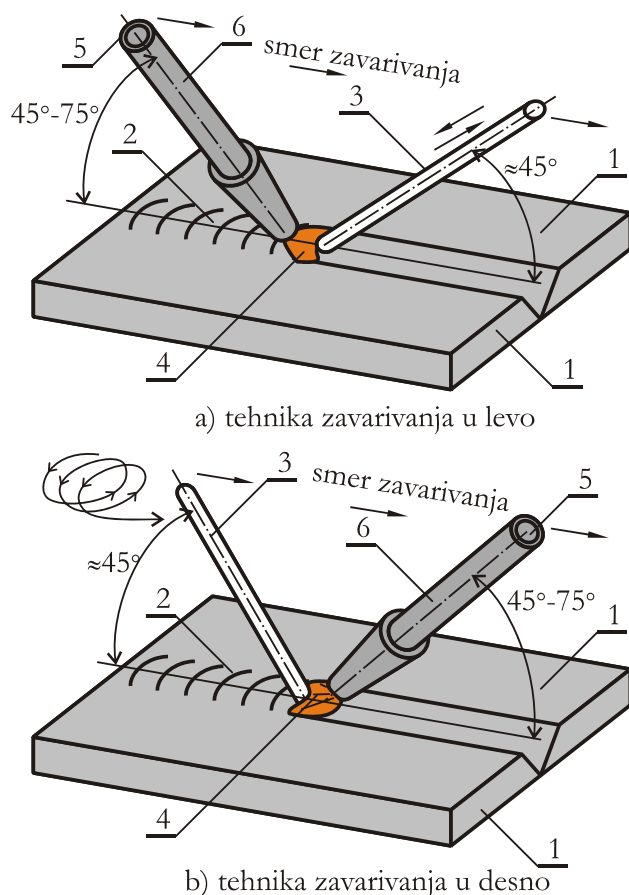


Slika 2.28 Zavisnost brzine zavarivanja, dimenzija mlaznice i debljine materijala [57]

2.9.4 Tehnika zavarivanja

U zavisnosti od namene i dimenzija radnih komada, razlikuje se nekoliko tehnika zavarivanja [4-7]:

- tehnika zavarivanja u levo (ili tehnika zavarivanja u napred),
- tehnika zavarivanja u desno (ili tehnika zavarivanja u nazad),
- tehnika zavarivanja naviše, jednostrano ili dvostrano,
- tehnika zavarivanja nad glavom, i
- tehnika zavarivanja cevi, sa rotacijom cevi i sa fiksiranom cevi.



Slika 2.29 Gasni postupak zavarivanja, a) tehnika zavarivanja u levo, b) tehnika zavarivanja u desno³⁹: 1 – radni komadi, 2 – šav, 3 – žica, 4 – plamen, 5 – dovod gasa, 6 – gorionik

Tehnike zavarivanja u levo ili desno se koriste za izradu sučeonih spojeva i one se **ne razlikuju** po tome da li se zavarivanje vrši

u levo ili desno, gledano u odnosu na zavarivača i na koju stranu odlazi dok zavaruje. Tehnika zavarivanja levo/desno definiše se time koji deo opreme za zavarivanje ide prvi a koji ga prati tokom zavarivanja.

Tehnika zavarivanja u levo (ili tehnika zavarivanja u napred, prikazana na slici 2.29, a, izvodi se tako što, gledano u smeru zavarivanja, prvo ide žica – dodatni materijal, pa onda sledi gorionik. Može se reći da gorionik prati dodatni materijal.

Ovo je najstarija i najkorišćenija tehnika zavarivanja čelika gasnim postupkom. Uspešna je za sve debljine osnovnog materijala ali najbolje osobine zavarenih spojeva dobijaju se pri zavarivanju debljina od 2 mm do 5 mm. Zavarivanje ovom tehnikom je moguće izvesti i bez dodatnog materijala [4-7].

Plamen topi ivice osnovnog metala i žicu, obrazujući rupu u donjem delu osnovnog materijala. Rupa se održava pravolinijskim kretanjem gorionika bez poprečnog kretanja – nihanja.

Dodatni materijal se u toku zavarivanja vodi skokovitim kretanjem, tj. podiže se (za kratko vreme) nešto iznad površine zavarivanog metala, pomera napred i spušta. Po formiranju rupe žica se približava zavarivačkom kupatilu, a kapljice tečnog metala slivaju se sa kraja šava u kupatilo. Plamen neprekidno mora da prekriva metal šava.

Prednost tehnike zavarivanja u levo jesu velika proizvodnost i male deformacije zavarenog spoja. Nedostaci se odnose na nešto slabija mehanička svojstva šava zbog brzog hlađenja nanešenog materijala – gorionik većinom zagreva osnovni materijal a samo neznatno zavareni šav. Zbog toga se površinski sloj šava brzo hladi, zakaljuje i otvrdnjava pa ne dozvoljava oslobađanje apsorbovanih gasova koji su inicijatori pojave prslina [4-7].

Tehnika zavarivanja u desno (ili tehnika zavarivanja u nazad, prikazana na slici 2.29, b) izvodi se tako što, gledano u smeru zavarivanja, prvo ide gorionik, pa onda sledi

³⁹ Na slici je prikazano zavarivanje koje većini ljudi izgleda „naopako”. To je zato što je na slici prikazano zavarivanje onako kako bi ga vršio levoruki čovek.

žica – dodatni materijal (žica) prati gorionik.

Tehnika se primenjuje za zavarivanje debljina većih od 5 mm (ili 6 mm) i to za odgovornije konstrukcije jer su osobine šava bolje nego kod šavova dobijenih tehnikom zavarivanja u levo. Zbog veće debljine delova koji se zavaruju, neophodna je priprema žleba kao i upotreba dodatnog materijala [4-7].

Plamen koji je usmeren ka formiranom šavu se ponaša kao termo-hemijski omotač i štiti tečno kupatilo od negativnog uticaja atmosfere i brzog hlađenja, te gasovi iz tečnog kupatila lakše izlaze na površinu jer nema zakaljivanja površine kupatila. Metal šava dobijen ovom tehnikom je manje krt nego kod šava dobijenog tehnikom u levo.

Dodatni materijal iza gorionika se vodi levo-desno u odnosu na liniju spajanja ili, ako je zavarivač vešt, kružnim pokretima oko zamišljene ose simetrije gorionika i žice, uz spuštanje i podizanje, radi održavanja rupe u tečnom kupatilu. Zbog ovako složenog kretanja dodatnog materijala, problem predstavljaju (manje iskusnim zavarivačima): održavanje ravnog lica šava i održavanje konstantne brzine zavarivanja.

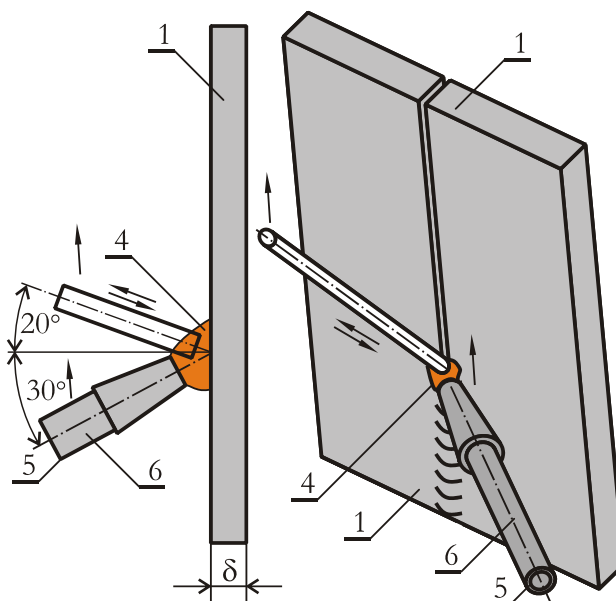
Tehnika zavarivanja u desno ima neke prednosti u odnosu na tehniku zavarivanja u levo [4-7]:

- manja je potrošnja dodatnog materijala,
- spojevi se relativno brže formiraju,
- manje su deformacije i krivljenja,
- plamen vrši žarenje zavarenog spoja te samim tim poboljšava njegove osobine,
- kako je preglednost zone zavarivanja bolja, zavarivaču bi trebalo da je lakše da radi i
- manji je rizik od oksidacije spoja jer plamen prekriva tečno kupatilo i delimično zavareni spoj.

Tehnika vertikalnog zavarivanja se naziva i tehnikom zavarivanja naviše zbog činjenice da su delovi koji se zavaruju vertikalni a gorionik i dodatni materijal se vode vertikalno naviše uz liniju spajanja delova (slika 2.30).

Tehnika zavarivanja naviše podrazumeva da se prvo vodi dodatni materijal a gorionik ga prati, te sa tog aspekta, tehnika zavarivanja naviše podseća na tehniku

zavarivanja u levo. Zavarivanje se može vršiti jednostrano (za debljine metala manje ili jednake 5 mm, sa ili bez dodatnog materijala, bez pripreme žleba) ili dvostrano (ako su u pitanju debljine materijala veće od 5 mm, obavezno sa dodatnim materijalom i pripremom X-žleba za debljine od 10 mm do 12 mm). Dvostrano zavarivanje se vrši ili simultano sa dva zavarivača ili sa jednim zavarivačem – prvo sa jedne pa zatim sa druge strane [4-7].



Slika 2.30 Gasni postupak zavarivanja, tehnika zavarivanja naviše: 1 – radni komadi, 2 – šav, 3 – žica, 4 – plamen, 5 – dovod gasa, 6 – gorionik

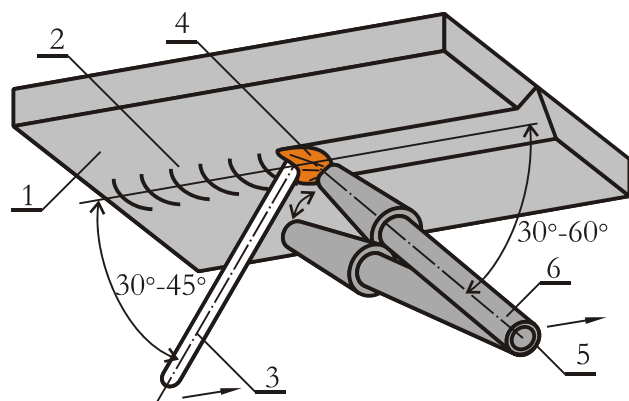
Zavarivanje naviše je moguće i u varijanti da napred ide gorionik a dodatni materijal da ga sledi. Međutim, u ovom slučaju se metal šava brzo hladi te je formiranje i održavanje tečnog kupatila veoma komplikovano⁴⁰, a još je komplikovanije ostvarivanje ujednačenih osobina zavarenog spoja po celoj dužini linije spajanja.

Žica i gorionik se za manje debljine radnih komada vode vertikalno naviše bez bočnog njihanja. Žica se lagano približava i udaljava od zone zavarivanja kako bi se tečno kupatilo stabilno formiralo i održavalo tokom zavarivanja. Kada su u pitanju X-žlebovi, žica se drži pod uglom od približno 45° u odnosu

⁴⁰ Zavarivači koji ovom tehnikom uspešno zavaruju delove su veoma poštovani među svojim kolegama kao vrlo kvalitetni „majstori” svog zanata.

na vertikalu i vodi se naviše uz blago bočno njihanje od ivice žleba do druge ivice žleba.

Tehnika zavarivanja nad glavom ili tehnika nadglavnog zavarivanja je najkompliciranija tehnika koja se zahteva od zavarivača gasnim postupkom. Radni komadi su horizontalni, ali se zavarivač nalazi ispod zone zavarivanja i radnih komada (slika 2.31).

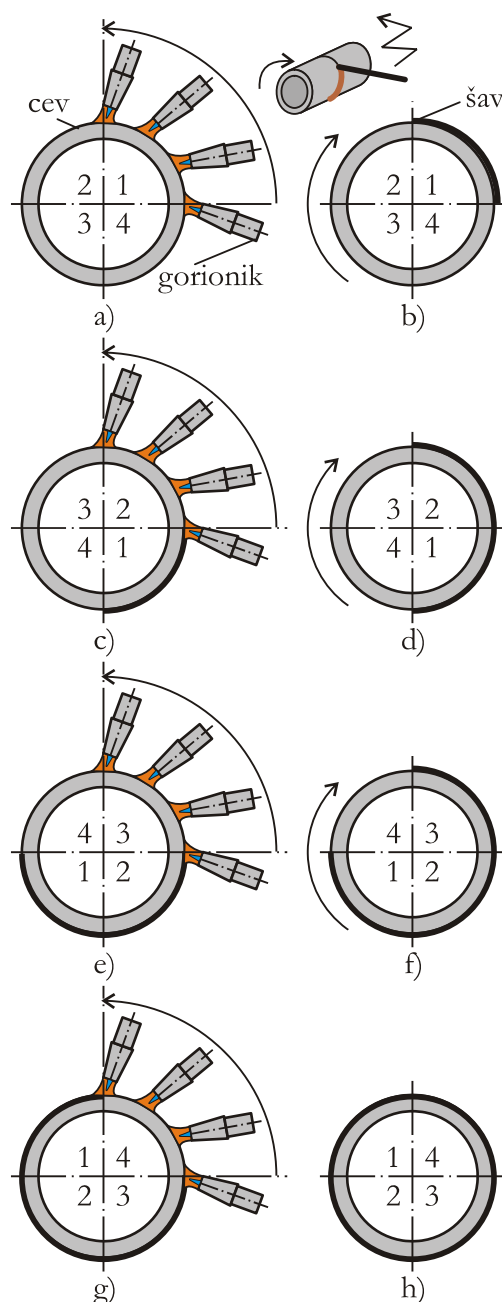


Slika 2.31 Gasni postupak zavarivanja, tehnika zavarivanja nad glavom: 1 – radni komadi, 2 – šav, 3 – žica, 4 – plamen, 5 – dovod gasa, 6 – gorionik

Najčešće se vodi prvo gorionik a žica za zavarivanje sledi. Gorionikom se zagreva osnovni materijal, i zajedno sa žicom, topi i formira tečno kupatilo od rastopljenog metala. Ovaj proces mora da se izvodi vrlo pažljivo: tečno kupatilo ne sme da postane preveliko jer tada sila gravitacije nadvladava silu pritiska plamena i silu adhezije tečnog kupatila (koje drže rastopljeni metal uz osnovni metal i sprečavaju kapanje metala šava). Zavarivač mora strogo da vodi računa i ne dozvoli pregrevanje materijala u zoni zavarivanja [4-7].

Najjednostavnija i najefikasnija tehnika zaštite od pregrevanja je njihanje gorionika duž linije spajanja – tako se sprečava predugo zagrevanje jedne tačke na spoju i daje se vremena tečnom kupatilu da se ohladi, postane viskoznije i zadrži u zoni zavarivanja. Intenzitet i amplitudu njihanja mora da proceni zavarivač shodno situaciji. To zahteva da zavarivač ima dobar pregled zone zavarivanja, dobru koordinaciju pokreta i iskustvo u radu iznad „glave“⁴¹.

Tehnika zavarivanja cevi predstavlja poseban slučaj zavarivanja radnih komada koji se može podeliti na **tehniku zavarivanja cevi koja rotira** i **tehniku zavarivanja fiksirane cevi**.



Slika 2.32 Gasni postupak zavarivanja, tehnika zavarivanja cevi koja rotira oko svoje ose

Tehnika zavarivanja cevi koja rotira oko svoje ose se primenjuje pri zavarivanju cevi uvek kada je to moguće. Zahvaljujući rotaciji, zavarivanje se vrši uvek u povoljnijem položaju nego kad je u pitanju fiksirana cev i

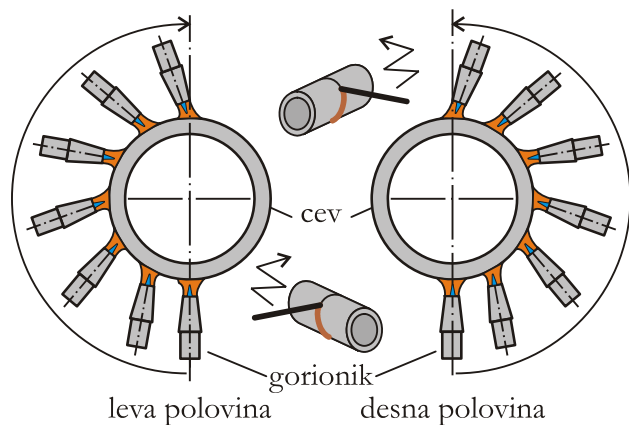
⁴¹ Iskustvena procena je da manje od 20% kvalifikovanih zavarivača može ispravno da izvrši

zavarivanje nad glavom gasnim postupkom zavarivanja.

kada zavarivač mora da se postavlja ispod cevi – u nadglavni položaj.

Zavarivanje cevi koja rotira se najčešće radi sa žicom koja ide prva a gorionik je prati. Postupak počinje iz horizontale, odnosno, iz tačke na cevi koja bi, posmatrano u poprečnom preseku cevi, predstavljala „3 sata” na časovniku. Zavarivanje se vrši „uz cev” do najviše tačke na cevi, odnosno, dok se ne zavari prva četvrtina obima cevi (slika 2.32, a). Potom se prekida zavarivanje i cev rotira za 90° tako da završetak šava dođe u položaj „3 sata” (slika 2.32, b). Zatim se, kao na početku, vrši zavarivanje druge četvrtine obima cevi, opet do vrha cevi (slika 2.32, c). Nakon toga se prekida zavarivanje i cev opet zarotira za četvrtinu obima (90°), tako da treća četvrtina obima bude u položaju za zavarivanje (slika 2.32, d). Procedura se ponavlja sve dok se ne zavari pun obim cevi (slika 2.32, e, f, g, h).

Elektrodna žica se vodi uz cev uz njihanje levo-desno (cik-cak) od jedne strane žleba do druge strane, radi potpune ispune praznog prostora (žleba). Gorionik se vodi kontinualno uz obim cevi, uz održavanje nagiba ose gorionika u odnosu na tangentu cevi od 30° do 35° .



Slika 2.33 Gasni postupak zavarivanja, tehnika zavarivanja fiksirane cevi

Ovakvom tehnikom zavarivanja, samo mali deo cevi se zavaruje u vertikalnom položaju a pregrevanje cevi je svedeno na minimum. Priprema žleba zavisi od debljine i prečnika cevi koja se zavaruje.

Tehnika zavarivanja fiksirane cevi se primenjuje za zavarivanje kada je nemoguće ostvariti zaokretanje cevi radi

pojednostavljenja zavarivanja.

Zavarivanje fiksirane cevi se vrši po polovinama cevi (slika 2.33): prvo se zavari jedna polovina cevi (npr. leva), pa onda druga (desna). Zavarivanje se počinje od najniže tačke cevi, pri čemu je gorionik postavljen pod uglom od 90° u odnosu na tangentu cevi (koja je horizontalna) i onda se gorionik lagano penje „uz cev”, uz blago nagnjanje ose gorionika do maksimalnih 30° do 35° na samom vrhu cevi. Dodatni materijal se dovodi u zonu zavarivanja ispred gorionika i blago se njiše levo-desno (cik-cak) kako bi se ispunila cela širina žleba.

2.9.5 Parametri zavarivanja (preporuke)

Osnovni parametri zavarivanja gasnim postupkom se biraju u odnosu na osnovni metal i položaj u kome se vrši zavarivanje. Potrebno je izabrati odgovarajući prečnik žice, odgovarajuću mlaznicu na gorioniku, potrebno je usaglasiti protok gasova, parametre plamena, brzinu zavarivanja itd. Preporuke za pojedine materijale i položaje zavarivanja su prikazane u prilogu, ali je važno držati se preporuka proizvođača opreme, potrošnih i dodatnih materijala za zavarivanje uz korekcije, ukoliko su potrebne [4-7].

2.9.6 Prekidanje zavarivanja

Zavarivanje se prekida gašenjem plamena. Ispravan način gašenja plamena je – zavrtanjem ventila za acetilen na gorioniku ili, ukoliko je prisutan ekonomizator: odlaganjem gorionika na polugu što dovodi do trenutnog prestanka protoka gasova [4-7]. Nakon zatvaranja acetilenskog ventila, kiseonik protiče kroz instalaciju i „ispira” je. Tako se sprečava nekontrolisano gorenje plamena ili uvlačenje plamena u gasnu instalaciju. Nakon toga se zatvaraju kiseonični ventili.

Kada se prekida zavarivanje na duže od 60 min, uvek moraju da se ispuste gasovi iz gorionika, creva i reduktora. Da bi se ovo uradilo, neophodno je prvo zatvoriti ventile na gorioniku, pa potom ispusne ventile na bocama. Zatim se otvaraju oba ventila na

gorioniku i ispuštaju gasovi iz instalacije. Za sve vreme su reduktori otvoreni. Nakon ispuštanja gasa, zatvaraju se ventili i to redom: ventili na gorioniku, reduktoru i ispusni ventili.

2.9.7 Obezbeđenje gasne instalacije

Po prekidu zavarivanja, neophodno je zavrnuti redukcijske ventile za acilen i kiseonik, i na kraju ispusne ventile na obe boce. Gorionik, se demontira i odlaže, gumena creva motaju i odlažu a ukoliko su boce na pokretnim kolicima, potrebno je osigurati ih od nekontrolisanog pomeranja.

2.10 Opseg primene postupka, tipični problemi i nesavršenosti

Gasni postupak zavarivanja se koristi za zavarivanje ugljeničnih čelika, livenog gvožđa i obojenih metala. Primena na nerđajućim čelicima je minimalna [4-7].

2.10.1 Zavarivanje niskougljeničnih čelika sa maksimalno 0,22% C

Niskougljenični čelici sa maksimalno 0,22% C se relativno lako zavaruju gasnim postupkom zavarivanja. Ne postoje nikakve specifičnosti postupka zavarivanja: potrebno je pripremiti ivice osnovnog materijala, očistiti površine, odabrati odgovarajući dodatni materijal, odgovarajuću tehniku zavarivanja i podesiti ventile na gorioniku tako da se formira neutralni plamen. Za zavarivanje se najčešće koristi „pobakarena” žica (primer hemijskog sastava žice: 0,1% C, 0,3-0,6% Mn a sadržaj $P+S \leq 0,03\%$), kako bi se smanjila korozija, a preporučuje se da prečnik žice približno bude jednaka polovini debljine osnovnog materijala uvećana za 1 mm [4-7].

2.10.2 Zavarivanje ugljeničnih čelika sa 0,22-0,35% C

Čelici iz ove grupe se često koriste za odgovorne konstrukcije ali spadaju u teško

zavarive metale/legure te je neophodno sprovesti različite aktivnosti pre, tokom i posle zavarivanja kako bi se ostvario kvalitetan zavareni spoj. Na primer, za debljine preko 25 mm je neophodno vršiti „meko” predgrevanje do temperature od 200°C; tu temperaturu je potrebno održavati tokom zavarivanja a nakon zavarivanja je neophodno izvesti žarenje radi uklanjanja zaostalih napona. Zavarivanje je moguće vršiti žicama koje imaju maksimalno 0,1% C, 0,8-1,2% Mn, 0,1-0,3% Si, P i $S \leq 0,03\%$ i 0,02-0,05% Al [4-7].

2.10.3 Zavarivanje ugljeničnih čelika sa 0,35-0,60% C

Zavarivanje ovih čelika je tehnološki komplikovano (kada su u pitanju čelici sa 0,60% C, čelici se smatraju tehnološki nezavarivim). Neophodno je strogo poštovanje nekoliko tehnoloških zahteva: minimalna temperatura okoline od 15°C, predgrevanje delova na 200°C-300°C, brzo izvođenje zavarivanja i sporo hlađenje materijala nakon zavarivanja. Nakon zavarivanja, neophodno je izvršiti normalizaciono žarenje sa ciljem smanjenja tvrdoće materijala u zoni uticaja toplote (ZUT) i uklanjanja zaostalih napona. Za zavarivanje se koristi žica sa maksimalno 0,12% C, 1,6%-2,0% Mn, maksimalno 0,08% Si, $P+S \leq 0,03\%$ i 0,02%-0,05% Al, uz primenu normalnog plamena. Primenom redukujućeg plamena se poboljšava zavarivost ali se javlja veća sklonost ka pojavi prslina [4-7].

Sa ovom grupom čelika treba uvek oprezno raditi: pogrešno izvedeno zavarivanje može drastično pogoršati osobine osnovnog materijala te je neophodan iskusan zavarivač i striktno poštovanje propisane tehnologije zavarivanja.

2.10.4 Zavarivanje niskolegiranih čelika

Kada se pominju niskolegirani čelici koji se zavaruju gasnim postupkom, prevashodno se misli na kotlovske čelike, odnosno, Mo, Cr-

Mo, Cr-Mo-V čelike. Oni spadaju u srednje i teško zavarive čelike i zavaruju se normalnim plamenom, na temperaturama okoline višim od 15°C.

U teško zavarive čelike spadaju čelične cevi klase 13CrMo4-5 i 10CrMo9-10 prema standardu SRPS EN 10028-2:2010⁴² [58]. Pre zavarivanja potrebno je predgrevanje čelika 13CrMo4-5 za debljine iznad 6 mm do temperature od 150°C, a 10CrMo9-10 za sve debljine do temperature oko 200-250°C. Posle zavarivanja preporučuje se normalizaciono žarenje na temperaturi od približno 920°C.

2.10.5 Zavarivanje visokolegiranih čelika otpornih na koroziju

Čelici otporni na hemijsku koroziju (vatrootporni) i elektrohemijsku koroziju (nerđajući) spadaju u visokolegirane čelike i stoga su veoma skupi. Razlikuju se četiri grupe ovih čelika koji su srednje ili teško zavarivi gasnim postupkom:

- Austenitni (0,02-0,15% C, 15-25% Cr),
- Feritni (Cr>16%, C<0,2%),
- Martenzitni (12-17% Cr, 0,15-1% C) i
- Taložno ojačani čelici (Cr-Ni čelici).

Austenitni čelici mogu da se zavaruju gasnim postupkom zavarivanja ali nije moguće garantovati ponovljivost osobina zavarenog spoja niti je moguće ostvariti kvalitet kao pri postupcima zavarivanja električnim lukom. Neophodno je skrenuti pažnju da austenitni čelici brzo odvede toplotu, i da su skloni pojavi međukristalnih toplih prslina u metalu šava, izdvajanju karbida hroma po granicama zrna koji povećava tvrdoću metala šava. Takođe je neophodno ukloniti teškotopivi hrom oksid (Cr₂₃O₃) sa površine tečnog kupatila inače je zavarivanje nemoguće. Osobine zavarenog spoja se mogu popraviti brzim hlađenjem delova posle zavarivanja i izbegavanjem naknadnog zagrevanja zavarene konstrukcije u temperaturnom intervalu od 650-850°C.

Feritni, martenzitni i taložno ojačani čelici imaju lošiju zavarivost od austenitnih

čelika i njih je gotovo nemoguće zavarivati gasnim postupkom zavarivanja. Moguće je zavarivati delove debljine do 4 mm sa predgrevanjem i zavarivanjem u jednom prolazu, koristeći normalni ili blago redukujući plamen, uz obaveznu primenu žarenja i normalizacije nakon zavarivanja radi uklanjanja zaostalih napona i deformacija. Kako TIG postupak zavarivanja daje mnogo bolje osobine zavarenih spojeva kod navedenih čelika, treba izbegavati zavarivanje ovih čelika gasnim postupkom [4-7].

2.10.6 Zavarivanje čeličnog liva

Čelični liv sa sadržajem C<0,25% se zavaruje gasnim postupkom podjednako uspešno kao i niskougljenični čelici. Kada je u pitanju čelični liv sa C>0,25%, zavarivanje je znatno teže te je neophodno predgrevanje osnovnog materijala do približno 300°C a nakon zavarivanja je neophodno vršiti normalizaciono ili opuštajuće žarenje zavarenog spoja.

Legirani čelični liv se teže zavaruje gasnim postupkom zavarivanja jer je neophodno predgrevati osnovni materijal i neophodno je održavati temperaturu tokom čitavog trajanja postupka zavarivanja (zavarivanje na toplo). Takođe je neophodno sporo hladiti zavareni spoj kako bi se izbegla pojava prslina. Ako je moguće, legirani čelični liv treba zavarivati TIG ili MIG postupcima zavarivanja a ne gasnim postupkom zavarivanja [4-7].

Tehnika zavarivanja i regulacija plamena je istovetna kao kod čelika sa istim procentualnim udelom ugljenika a žice za zavarivanje se biraju prema hemijskom sastavu osnovnog materijala.

2.10.7 Zavarivanje livenog železa

S obzirom na visok sadržaj ugljenika i silicijuma (3-4% C, 2,5-3,8% Si), livena železa spadaju u teško zavarive legure. Najveći problem pri zavarivanju je rast zrna grafita pri dejstvu povišene temperature, baze, kiseline ili soli.

Zavarivanje livenog železa se izvodi na

⁴² Identičan sa: EN 10028-2:2009 ECISS/TC 107.

hladno, sa predgrevanjem ili na toplo.

Zavarivanje na hladno izvodi se na delovima koji se slobodno mogu širiti i skupljati, što znači da naknadna termička obrada nije potrebna. Zavarivanje livenog železa sa predgrevanjem izvodi se u slučajevima kad postoji opasnost od pojave dodatnih prslina zbog širenja ili skupljanja materijala, ili kad predmet s obzirom na svoje dimenzije ne može biti zavaren drugom metodom. Pre zavarivanja livenog železa na toplo, delovi se čiste, ivice obaraju, pripajaju i zatim ceo predmet ili deo predmeta, zavisno od njegovih dimenzija, zagreva do temperature 700°C-800°C (boja trule višnje). Dodatni materijal je u obliku livenih šipki, a topitelj u vidu praha. Zbog velike viskoznosti rastopljenog materijala neophodan je položen položaj, a zavarivanje mora da bude brzo, bez naknadnih prolaza. Zagrevanje se obavlja u montažnoj peći od šamotnih cigli koja se loži ćumom i prekrivena je zaštitnim pločama. Posle zavarivanja, livene delove treba sporo hladiti, u vrućem pepelu ili vrelom pesku. To sprečava pucanje metala i omogućuje da šav dobije strukturu sivog livenog železa koja je meka i lako mašinski obradiva [4-7].

2.10.8 Zavarivanje bakra

Bakar spada u teško zavarive metale s obzirom na veliku termičku provodnost i višu temperaturu topljenja oksida bakra nego samog bakra (bakar se topi na 1083°C, a CuO na 1336°C). Priprema limova ili bakarnih cevi za zavarivanje obavlja se isto kao i za čelik dok bakarne delove debljine preko 4 mm treba pre zavarivanja predgrejati do temperature od 600°C. Plamen mora biti neutralan, a toplotna moć maksimalna. Dodatni materijal je takođe Cu sa dodatkom 0,5%-1% Ag, što utiče na obrazovanje šava sitnozrne strukture koja ima bolja svojstva otpornosti od bakra. Kao topitelj upotrebljava se boraks ili borna kiselina. Boraks se rastvara u vodi i njime se premazuju ivice zavarivanog metala i vrh dodatnog materijala. Zavarivanje bakra izvodi se u horizontalnom ili u nagnutom položaju. Najbolji rezultati pri zavarivanju bakra postižu se dvostranim

zavarivanjem naviše [4-7].

2.10.9 Zavarivanje mesinga

Mesing je legura bakra (do 65% Cu) i cinka (do 35% Zn). Mesing sa sadržajem do 35% Zn po pravilu se dobro zavaruje gasnim postupkom, a iznad ove granice teže. Za zavarivanje mesinga bira se gorionik kao za zavarivanje čelika a plamen se reguliše sa viškom kiseonika od 20%-30% u odnosu na neutralan plamen. Oksidišući plamen obrazuje oksidnu skramu na površini šava i na taj način sprečava isparavanje cinka, koji inače lako isparava u toku zavarivanja iz tečnog kupatila. Za zavarivanje mesinga uzimaju se mesingane žice koje sadrže znatnu količinu Zn kao i dodatne sastojke (Si, Ni i Sn). Kao topitelj koristi se prašak na bazi boraksa koji se rastvara u vodi do konzistencije guste paste kojom se premazuju ivice zavarivanog materijala sa strane lica i korena žleba. Ivce limova treba očistiti čeličnom četkom. Delove debljine preko 5 mm je bolje zavarivati posle predgrevanja do temperature 250°C-300°C. Zavarivanje treba izvoditi u položenom položaju ili odozdo naviše – jednostrano ili obostrano. Po zavarivanju šavovi se mogu iskivati na toplo pri temperaturi oko 500°C. Mesingani odlivci zavaruju se na toplo pri 400°C-500°C, a zatim hlade na vazduhu pri temperaturi okoline od 15°C. Šavove na mesinganim odlivcima nije preporučljivo iskivati.

2.10.10 Zavarivanje bronz

Obična bronza je legura bakra i kalaja. Specijalne bronz

kao topitelj, a za aluminijumske bronzе se uzima poseban topitelj. Priprema ivica za zavarivanje kao i tehnika zavarivanja ista je kao i za čelik. Livena bronza zavaruje se na toplo pri temperaturi oko 600°C u uslovima bliskim zavarivanju livenog gvožđa na toplo [4-7].

2.10.11 Zavarivanje aluminijuma

Aluminijum spada u metale teško zavarive gasnim plamenom, iz razloga velike termičke provodnosti i obrazovanja teško topivog oksida aluminijuma ($T_{Al}=660^{\circ}\text{C}$, $T_{Al_2O_3}\approx 2050^{\circ}\text{C}$). Za zavarivanje aluminijuma uzima se plamenik za jedan broj manji nego za zavarivanje čelika. Plamen se reguliše sa viškom acetilena 20%-30%. Višak acetilena utiče na sniženje temperature plamena i sprečava obrazovanje oksida. Uz dodatni materijal ide i specijalan topitelj koji se rastvara u vodi do stanja paste velike gustine. Priprema žlebova je kao i za čelik. Preporučuje se da se limovi deblji od 4 mm predgreju na 300°C-400°C, i postave na bakarne ili grafitne podmetače u cilju boljeg provarivanja. Zavaruje se ulevo ili na gore. Tehnika u desno se ne koristi zbog pregrevanja i lakog pucanja šava. Takođe ne dolazi u obzir dvoslojno niti višeslojno zavarivanje. Zato se limovi deblji od 10 mm zavaruju u levo sa povratnim korakom. Najpre se izvodi kratak odsečak (15 mm do 20 mm) u korenu žleba, a zatim se gorionik vraća i zavaruje se drugi odsečak [4-7].

2.10.12 Zavarivanje cinka

Cink spada u teško zavarive metale, s obzirom na brzu oksidaciju, nisku temperaturu isparavanja i veliku termičku dilataciju. Za zavarivanje cinka može da se primeni acetilenski plamen, vodonično-kiseonični plamen ili acetilensko-vazdušni plamen. Protok gorivog gasa treba da iznosi od 30 l/h do 80 l/h po 1 mm debljine zavarivanog materijala. Kao dodatni materijali uzimaju se cinkane žice ili trake cinkanog lima, ne deblje od zavarivanog materijala. Topitelj za cink je mešavina cinkhlorida i nišadora

(kamen za lemljenje) koja se meša sa malim udelom vode. Legure cinka, npr. Zn-Al su veoma teško zavarive ili potpuno nezavarive [4-7].

2.10.13 Zavarivanje olova

Olovo se može zavariti acetilensko-kiseoničnim, vodonično-kiseoničnim i vodonično-vazdušnim plamenom. Uzimaju se gorionici malog protoka u granicama od 15 l/h do 25 l/h po 1 mm debljine lima. Plamen mora biti neutralan ili sa malim viškom gorivog gasa. Kao dodatni materijal koristi se žica ili livena šipka, eventualno odsečak iz olovne ploče. Ivice treba dobro očistiti. Moguće je raditi višeslojne šavove, s tim što se prvi sloj izvodi bez dodatnog materijala. Za sledeće slojeve dodatni materijal se dodaje prekidno ili kontinualno [4-7].

2.10.14 Zavarivanje magnezijuma

Pri zavarivanju magnezijuma i njegovih legura treba prethodno ukloniti oksidnu skramu (mehanički ili hemijski) a u toku procesa štititi rastop od kiseonika, azota i vodene pare. Iz tih razloga koristi se topitelj na bazi soli hlora ili fluora. Plamen treba da bude neutralan, a tehnika zavarivanja – ulevo za debljine materijala manje od 5 mm, odnosno, udesno za debljine veće od 5 mm, uz primenu predgrevanja (temperatura predgrevanja 300°C-350°C) za delove deblje od 5 mm [4-7].

2.10.15 Zavarivanje kalaja

Zavarivanje čistog kalaja izvodi se veoma lako, istovetno i sa istim pripremama kao za olovo.

2.10.16 Zavarivanje srebra

Zavarivanje srebra može se izvesti bez upotrebe topitelja, ali uz primenu dodatnog gorionika sa gasom. Znatno bolji rezultati ostvaruju se kada se primeni topitelj (dve trećine boraks i jedna trećina borna kiselina) [4-7].

2.10.17 Zavarivanje zlata

Gasno zavarivanje zlata izvodi se bez teškoća. Pri zavarivanju tanjih preseka primenjuju se gorionici sa vrlo malim

protokom – oko 100 l/h acetilena po 1 mm debljine [4-7].

LITERATURA

- [1] United States Department of Labor, Bureau of Labor Statistics: Welders, Cutters, Solderers, and Brazers: Statistical Bulletin 2015; <https://www.bls.gov/ooh/production/welders-cutters-solderers-and-brazers.htm#tab-1>, (dokument pregledan 05.05.2016.);
- [2] <https://www.millerwelds.com/resources> (grafički prikazi su preuzeti i retuširani tokom 2016. godine);
- [3] <https://www.millerwelds.com/equipment/oxy-fuel>, Miler: Oxy-fuel Welding, (dokument pregledan 05.05.2016. godine);
- [4] Milorad Jovanović, Dragan Adamović, Vukić Lazić, Nada Ratković: Gasno zavarivanje – priručnik, YU ISBN 86-80581-68-2, Mašinski fakultet Kragujevac, Srbija, 2005;
- [5] Miomir Vukićević, Zoran Petrović, Sava Đurić, Mišo Bjelić: Zavarivanje gasnim postupkom, ISBN 978-8686283-02-03, Mašinski fakultet Kraljevo, Srbija, 2007;
- [6] Miomir Vukićević: Tehnologija spajanja materijala – Zavarivanje 1, ISBN 978-86-82631-73-6, Fakultet za mašinstvo i građevinarstvo u Kraljevu, 2014;
- [7] Miomir Vukićević, Uređaji i pribori u zavarivanju, ISBN 978-86-82631-60-6, Mašinski fakultet Kraljevo, 2012;
- [8] SRPS EN ISO 4063:2013 Zavarivanje i srodni postupci – Lista postupaka i njihovo označavanje, 28.01.2013;
- [9] <https://sr.wikipedia.org/wiki/%D0%90%D1%86%D0%B5%D1%82%D0%B8%D0%B%D0%B5%D0%BD> (dokument pregledan 01.01.2017. godine);
- [10] <https://sr.wikipedia.org/wiki/%D0%9F%D1%80%D0%BE%D0%BF%D0%B0%D0%BD> (dokument pregledan 01.02.2017. godine);
- [11] [https://sr.wikipedia.org/wiki/%D0%91%D1%83%D1%82%D0%B0%D0%BD_\(%D1%98%D0%B5%D0%B4%D0%B8%D1%9A%D0%B5%D1%9A%D0%B5\)](https://sr.wikipedia.org/wiki/%D0%91%D1%83%D1%82%D0%B0%D0%BD_(%D1%98%D0%B5%D0%B4%D0%B8%D1%9A%D0%B5%D1%9A%D0%B5)) (dokument pregledan 01.02.2017. godine);
- [12] <https://sr.wikipedia.org/wiki/%D0%9C%D0%B5%D1%82%D0%B0%D0%BD> (dokument pregledan 01.02.2017. godine);
- [13] <https://en.wikipedia.org/wiki/Polypropylene> (dokument pregledan 01.02.2017. godine);
- [14] https://en.wikipedia.org/wiki/MAPP_gas (dokument pregledan 01.02.2017. godine);
- [15] <https://sr.wikipedia.org/wiki/%D0%92%D0%BE%D0%B4%D0%BE%D0%BD%D0%B8%D0%BA> (dokument pregledan 01.02.2017. godine);
- [16] SRPS EN ISO 5172:2012: Oprema za gasno zavarivanje – Gorionici za gasno zavarivanje, grejanje i rezanje – Specifikacije i ispitivanja, 31.01.2017;
- [17] SRPS EN ISO 9539:2012: Oprema za gasno zavarivanje - Materijali za opremu koja se koristi u gasnom zavarivanju, rezanju i srodnim postupcima, 21.06.2012;
- [18] SRPS EN 13622:2009: Oprema za gasno zavarivanje - Terminologija - Termini koji se odnose na opremu za gasno zavarivanje, 09.07.2009;
- [19] SRPS EN ISO 3807:2015: Boce za gas – Boce za acetilen – Osnovni zahtevi i ispitivanje tipa, 30.10.2015;
- [20] SRPS H.F1.020:1986: Gasovi – Acetilen – Tehnički uslovi, 17.12.1986., potvrđen: 2012;
- [21] SRPS CEN/TR 14473:2015: Pokretne boce za gas – Porožni materijali za boce za acetilen, 30.10.2015;
- [22] SRPS EN ISO 11372:2012: Boce za gas – Boce za acetilen – Uslovi punjenja i kontrola punjenja, 29.11.2012;
- [23] SRPS EN 1089-1:2007: Pokretne boce za gas – Obeležavanje boca za gas – Deo 1:

- Obeležavanje utiskivanjem, 23.02.2007;
- [24] SRPS EN 1089-3:2001: Pokretne boce za gas – Obeležavanje boca (izuzimajući boce za TNG) – Deo 3: Kodovi boja, 29.11.2012;
- [25] SRPS EN ISO 10462:2015: Boce za gas – Boce za acetilen – Periodični pregled i održavanje, 30.10.2015;
- [26] SRPS H.F1.010:1986: Gasovi – Kiseonik gasoviti – Tehnički uslovi, 17.12.1986, potvrđen;
- [27] SRPS H.F1.011:1986: Gasovi – Kiseonik tečni – Tehnički uslovi, 17.12.1986, potvrđen;
- [28] SRPS EN ISO 2503:2012: Oprema za gasno zavarivanje – Regulatori pritiska i regulatori pritiska sa uređajem za merenje protoka za boce za gas koje se koriste kod zavarivanja, rezanja i srodnih postupaka do 300 bar (30 MPa), 21.06.2012;
- [29] SRPS EN ISO 9539:2012: Oprema za gasno zavarivanje – Materijali za opremu koja se koristi u gasnom zavarivanju, rezanju i srodnim postupcima, 21.06.2012; SRPS EN ISO 9539:2012/A1:2014: Oprema za gasno zavarivanje – Materijali za opremu koja se koristi u gasnom zavarivanju, rezanju i srodnim postupcima – Izmena 1, 29.08.2014;
- [30] SRPS EN ISO 5171:2012: Oprema za gasno zavarivanje – Merači pritiska koji se koriste kod zavarivanja, rezanja i srodnih postupaka, 21.06.2012;
- [31] SRPS EN 13918:2009: Oprema za gasno zavarivanje – Integralni regulatori merača protoka na cilindrima kod zavarivanja, rezanja i srodnih postupaka – Klasifikacija, specifikacija i ispitivanja, 09.07.2009;
- [32] SRPS EN 730-1:2009: Oprema za gasno zavarivanje – Bezbednosni uređaji – Deo 1: Ugradni osigurači plamena (protiv povraćaja plamena), 30.11.2009;
- [33] <http://markopetrik.blogspot.rs/> (grafički prikaz preuzet 27.06.2016. i retuširan);
- [34] SRPS EN 730-2:2009: Oprema za gasno zavarivanje – Bezbednosni uređaji – Deo 2: Neugradni osigurači plamena (protiv povraćaja plamena), 30.11.2009;
- [35] SRPS EN ISO 14113:2014: Oprema za gasno zavarivanje – Gumena i plastična creva i sklopovi creva za upotrebu sa industrijskim gasovima do 450 bar (45 MPa), 29.08.2014;
- [36] SRPS EN ISO 3821:2012: Oprema za gasno zavarivanje – Gumena creva koja se koriste za zavarivanje, rezanje i srodne postupke, 21.06.2012;
- [37] SRPS EN 560:2009: Oprema za gasno zavarivanje – Priklučci creva za opremu za zavarivanje, rezanje i srodne postupke, 30.11.2009;
- [38] SRPS EN 29090:2009: Ispitivanje zaptivenosti opreme za gasno zavarivanje i srodne postupke, 30.11.2009;
- [39] SRPS EN 561:2009: Oprema za gasno zavarivanje – Brzorastavljivi priključci sa zapornim ventilom za zavarivanje, rezanje i srodne postupke, 30.11.2009;
- [40] ISO 7289:2010: Quick-action couplings with shut-off valves for welding, cutting and allied processes, 15.01.2010;
- [41] SRPS EN 1256:2012: Oprema za gasno zavarivanje – Specifikacija za spajanje creva za zavarivanje, rezanje i srodne postupke, 23.05.2012;
- [42] http://pdfengine4.webon.net/wsp/pdfenginephp/data/pdf/e75d75ba-f4fd-11e6-b895-ac162d8daef4_merged.pdf (grafički prikaz preuzet 02.02.2017. i retuširan);
- [43] SRPS EN ISO 7291:2011: Oprema za gasno zavarivanje – Regulatori pritiska kod centralnog razvoda gasova za zavarivanje, rezanje i srodne postupke do 30 MPa (300 bara), 28.11.2011;
- [44] SRPS EN ISO 5172:2012: Oprema za gasno zavarivanje – Gorionici za gasno zavarivanje, grejanje i rezanje – Specifikacije i ispitivanja, 21.06.2012;
- [45] SRPS CEN/TR 13259:2014: Oprema za gasno zavarivanje – Industrijski ručni i mašinski gorionici za grejanje i lemljenje plamenom i srodne postupke, 29.08.2014;
- [46] SRPS K.M6.020:1987: Pribor za gasno zavarivanje i rezanje – Gorionici za ručno gasno zavarivanje, rezanje i srodne postupke, standard je povučen 21.12.2012;

- [47] SRPS EN 1326:2012: Oprema za gasno zavarivanje – Mali kompleti za gasno tvrdo lemljenje i zavarivanje, 23.05.2012;
- [48] SRPS EN 12536:2008: Potrošni materijali za zavarivanje – Šipke za gasno zavarivanje nelegiranih i čelika otpornih na puzanje – Klasifikacija, 27.02.2008;
- [49] SRPS EN ISO 1071:2008: Potrošni materijali za zavarivanje – Obložene elektrode, žice, šipke i punjene žice za zavarivanje topljenjem sivog liva – Klasifikacija, 28.07.2008;
- [50] EN 759:1997: Welding consumables – Technical delivery conditions for welding filler metals – Type of product, dimensions, tolerances and marking;
- [51] SRPS EN ISO 544:2013: Potrošni materijal za zavarivanje - Uslovi isporuke za dodatne materijale i praškove – Vrste proizvoda, mere, tolerancije i obeležavanja, 28.01.2013.;
- [52] <https://en.wikipedia.org/wiki/Borax> (dokument je pregledan 17.02.2017.);
- [53] SRPS EN ISO 15607:2013: Specifikacija i kvalifikacija tehnologija zavarivanja metalnih materijala – Opšta pravila, 28.01.2013;
- [54] SRPS EN ISO 9692-1:2014: Zavarivanje i srodni postupci – Tipovi pripreme spoja – Deo 1: Ručno elektrolučno zavarivanje topivom elektrodom, elektrolučno zavarivanje topivom elektrodom u zaštitnom gasu, gasno zavarivanje, TIG zavarivanje i zavarivanje čelika snopom, 29.08.2014;
- [55] Miomir Vukićević: Uređaji i pribori u zavarivanju, predavanja i slajdovi, Fakultet za mašinstvo i građevinarstvo Kraljevo, 2013;
- [56] SRPS EN ISO 13916:2013: Zavarivanje – Uputstvo za merenje temperature predgrevanja, međuprolazne temperature i temperature održavanja predgrevanja, 28.01.2013;
- [57] <http://www.twi-global.com/technical-knowledge/> (dokument je pregledan 11.01.2017.);
- [58] SRPS EN 10028-2:2010: Pljosnati proizvodi od čelika za opremu pod pritiskom – Deo 2: Nelegirani i legirani čelici sa osobinama utvrđenim za povišene temperature, 26.04.2010;
- [59] SRPS EN 169:2008: Lična zaštita očiju - Filtri za zavarivanje i srodne tehnike - Zahtevi u pogledu koeficijenta transmisije i preporučena upotreba, 21.01.2008;
- [60] SRPS EN 170:2008: Lična zaštita očiju – Filtri za ultraljubičasto zračenje – Zahtevi u pogledu koeficijenta i preporučena upotreba, 27.02.2008;
- [61] SRPS EN 171:2008: Lična zaštita očiju – Filtri za infracrveno zračenje – Zahtevi u pogledu koeficijenta transmisije i preporučena upotreba, 27.02.2008;
- [62] SRPS EN 175:2008: Lična zaštita – Oprema za zaštitu očiju i lica tokom zavarivanja i srodnih postupaka, 21.01.2008;
- [63] SRPS EN 379:2011: Lična zaštita očiju - Automatski filtri za zavarivanje, 28.11.2011;
- [64] SRPS EN ISO 11611:2016: Zaštitna odeća koja se upotrebljava prilikom zavarivanja i srodnih procesa, 29.02.2016;
- [65] SRPS EN 12477:2007: Zaštitne rukavice za zavarivače, 25.07.2007;
- [66] SRPS EN ISO 10882-1:2012: Zdravlje i bezbednost pri zavarivanju i srodnim postupcima – Uzorkovanje čestica i gasova iz vazduha u zoni disanja operatera – Deo 1: Uzorkovanje čestica iz vazduha, 23.05.2012;
- [67] SRPS EN ISO 10882-2:2008: Zdravlje i bezbednost pri zavarivanju i srodnim postupcima – Uzorkovanje čestica i gasova iz vazduha u zoni disanja operatera – Deo 2: Uzorkovanje gasova, 09.09.2008;
- [68] SRPS EN ISO 14114:2015: Oprema za gasno zavarivanje – Sistemi za snabdevanje acetilenom za zavarivanje, rezanje i srodne postupke – Opšti zahtevi, 30.09.2015;
- [69] SRPS EN ISO 15615:2014: Oprema za gasno zavarivanje – Sistemi acetilenskih vodova za zavarivanje, rezanje i srodne postupke – Zahtevi za bezbednost uređaja pod visokim pritiskom, 29.08.2014.

3 ELEKTROTEHNIKA, PREGLED

Elektrotehnika je naučna disciplina, koja je usko povezana sa fizikom, a bavi se proučavanjem električnih pojava na telima, i na mikro i na makro nivou [1]. Manje opšta definicija elektrotehnike kaže da je to nauka o upotrebi električne energije¹ u praktične svrhe [2]. Elektrotehnika se, prema „intenzitetu” električne struje² deli na oblast jakih struja (preko 1 A) i oblast slabih struja (do 1 A) [1-3]. Jake struje obuhvataju dobijanje (proizvodnju), prenos i upotrebu električne struje za pogon različitih mašina i uređaja, za električno osvetljenje, grejanje itd. Slabe struje obuhvataju upotrebu električnih i radiotehničkih pojava za prenos simbola na daljinu (muzika, govor, slika, tekst itd.), upravljanje sistemima i sl [1-3].

Podela elektrotehnike novijeg datuma ne razdvaja objekte prema intenzitetu struje već prema primeni, te postoje: elektroenergetika, elektronika, elektroakustika, mreže, radio i telekomunikacije [4].

Ako se posmatra elektricitet kao osnova elektrotehnike, onda je elektrotehnika poznata još iz vremena antičke Grčke³, ali je brzi razvoj elektrotehnike počeo tek sa industrijskom revolucijom. Najznačajnija otkrića tokom 19. veka, koja su ubrzala razvoj elektrotehnike su: otkriće Voltinog električnog luka (1799-1800), otkriće galvanskih elemenata (1790-1805), razvoj generatora jednosmerne struje (1800-1810), otkriće električnog telegrafa (1837), razvoj hemijskog akumulatora, pronalazak telefona, pronalazak naizmjenične struje (1832), otkriće i primena trofazne struje (1890-1895) itd.

Zavarivanje ima koristi od gotovo svih

oblasti elektrotehnike, međutim, osnovu elektrolučnih postupaka zavarivanja čine elektroenergetika i elektronika, dok se mreže, radio i telekomunikacije samo marginalno koriste u tehnologiji zavarivanja.

3.1 Osnove elektriciteta i elektronike (definicija električne struje, napona i otpornosti)

Naelektrisanje (ili električni naboj) je osnovna osobina subatomske čestice (proton, elektron, neutron itd.) kojom se definišu elektromagnetne pojave, odnosno, interakcije ovih čestica sa elektromagnetnim poljem [2-4]. Naelektrisana materija stvara elektromagnetno polje, a uzajamno dejstvo među naelektrisanim česticama (ili dejstvo između naelektrisanja i elektromagnetnog polja) je uzrok nastajanja elektromagnetne sile, koja je jedna od četiri osnovne sile u prirodi⁴.

Prostor u kome se javlja dejstvo elektromagnetne sile (ili samo električne sile) oko naelektrisanja (naelektrisane čestice) se naziva električnim poljem. Taj prostor može biti definisan i odgovarajućim promenljivim magnetnim poljem. Elektromagnetizam je osnovni pojam kojim se opisuje kretanje naelektrisanja kroz električno ili magnetno polje [2-4].

Kada na naelektrisane čestice deluje električno polje, one se usmeravaju i kreću u smeru najmanjeg otpora. Ukoliko je takvo kretanje usmereno i traje tokom vremena, onda se ono naziva električnom strujom [2-4].

Sposobnost električnog polja da izvrši rad, u ovom slučaju – da pokrene čestice na usmereno kretanje, naziva se električnim potencijalom. Električni potencijal je svojstvo koje definiše svaku tačku u prostoru i njena

¹ Električna energija je oblik postojanja energije koja se, u zemaljskim uslovima, kontrolisano „dobija” dejstvom elektromagnetnog polja na naelektrisanje, koje se orijentiše i pokreće na određeni način.

² To je jačina električne struje.

³ Grčki filozof Tales iz Mileta je oko 600. godine p.n.e. opisao pojavu da čilibar protrljan vunom privlači druga tela [5].

⁴ Jaka i slaba sila (sile kvarkova), elektromagnetna sila i gravitaciona sila [2].

kvantitativna vrednost je jednaka količini potencijalne energije po jedinici naelektrisanja koje se nalazi u vremenski nepromenljivoj električnoj polju. Električni potencijal je skalarna veličina [2-4].

Prema tome, elektricitet je pojam koji se objašnjava pomoću naelektrisanja, električne struje, električnog polja, električnog potencijala i elektromagnetizma.

Elektronika je naučna disciplina koja se bavi proučavanjem i kontrolom kretanja elektrona kroz prazan prostor i poluprovodne materijale. Kao tehnička disciplina, elektronika je deo elektrotehnike koji se bavi razvojem i proizvodnjom elektronskih komponenti, sistema i uređaja [6].

Osnovne grane elektronike su računarstvo, automatika, telekomunikacije, mikroelektronika i energetska elektronika.

U tehnologiji zavarivanja se koriste različite elektronske komponente: upravljanje procesom zavarivanja je vrlo često automatizovano i električne komponente koje se koriste za zavarivanje često prenose velike snage. Moderni postupci elektrolučnog zavarivanja se gotovo u potpunosti oslanjaju na elektroniku.

3.1.1 Električna struja

U najopštijem slučaju, električna struja je bilo koje uređeno kretanje električnih opterećenja, bez obzira na uzroke i uslove ovog kretanja, bez obzira na vrstu i tip električnih opterećenja koja se kreću. U prirodi se električna struja formira u svim tipovima sredina (čvrsta, tečna, gasovita), pa čak i u vakuumu ukoliko postoje nosioci naelektrisanja i uzrok uređenja kretanja naelektrisanja [2-4].

Naelektrisanja koja obrazuju električnu struju su elektroni, pozitivni ili negativni joni. Međutim, u tehničkoj praksi se podrazumeva da je električna struja uređeno kretanje elektrona kroz čvrsto telo – metalni provodnik [7]. Pozitivni i negativni joni se, najčešće, javljaju u tečnim sredinama ili u gasovima (koji su uglavnom izolatori).

Veličina kojom se opisuje električna struja je jačina (intenzitet) električne struje. To

je skalarna veličina jednaka količniku količine elektriciteta u vremenskom intervalu i odgovarajućeg poprečnog preseka provodnika. Merna jedinica za jačinu električne struje je Amper (A) i predstavlja osnovnu veličinu u Međunarodnom sistemu jedinica⁵. Najčešće se označava slovom I ili, kod naizmenečne struje, i . Jačina električne struje je prvi izvod količine naelektrisanja (q) koja prođe kroz poprečni presek provodnika u vremenu (t):

$$i = \frac{dq}{dt} \quad (1).$$

Električna struja se, pored jačine, odlikuje i znakom/polaritetom te može biti pozitivno ili negativno polarisana.

Uspostavljanje električne struje kroz provodne sredine je uvek praćeno željenim i neželjenim efektima. Željeni efekti, samostalno ili u kombinaciji sa drugim fizičkim pojavama, čine osnovu za brojne i raznovrsne primene električne struje. Od pratećih efekata električne struje najznačajniji su: elektrotermički, elektrohemijski, elektromagnetni, svetlosni, fiziološki [7, 8].

3.2 Jednosmerna struja (JS), polaritet, naizmenečna struja (NS)

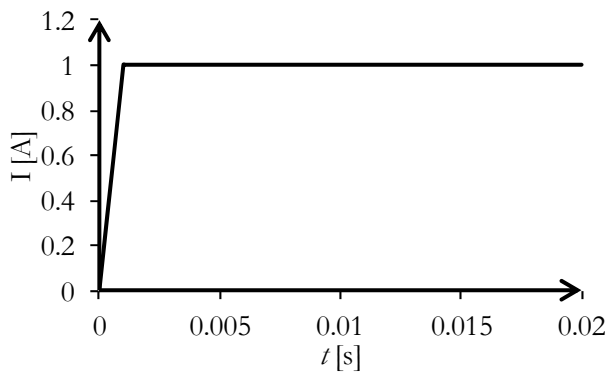
Pravac kretanja električne struje je definisan najkraćim rastojanjem između polova izvora naelektrisanja kojim električna struja može proći. Prema konvenciji, smer električne struje je definisan od negativnog pola („-“) ka pozitivnom polu („+“) izvora naelektrisanja i do promene mere električne struje dolazi ukoliko + i – pol međusobno menjaju mesta [8, 9].

Prema smeru kretanja naelektrisanja, električna struja može biti jednosmerna ili naizmenečna.

Osnovna osobina jednosmerne električne struje je nepromenljivost smera –

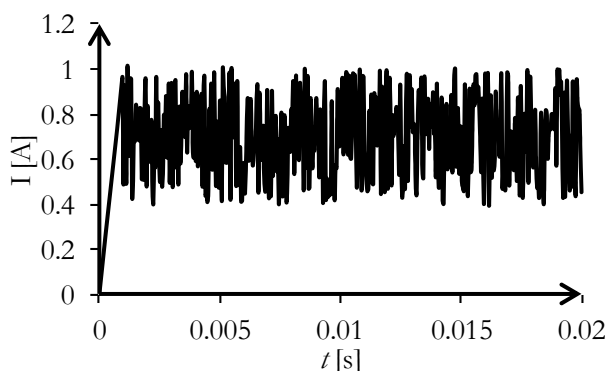
⁵ Osnovne jedinice prema SI su: dužina, masa, vreme, termodinamička temperatura, jačina električne struje, količina supstance i jačina svetlosti.

intenzitet struje može biti konstantan ili promenljiv (pa čak u nekim trenucima jednak nuli), ali se smer električne struje ne menja. To praktično znači da se naelektrisane čestice kreću uvek u istom smeru (od kontakta koji je – ka kontaktu koji je +), po istom zakonu kretanja.



Slika 3.1 Izgled jačine jednosmerne električne struje, konstantne vrednosti $I=1$ A u vremenskom domenu

Na slici 3.1 prikazan je oblik jednosmerne električne struje konstantnog intenziteta $I=1$ A. Po uspostavljanju električne struje, jačina električne struje relativno brzo, od početnih 0 A, dostiže 1 A i ostaje konstantna tokom vremena.

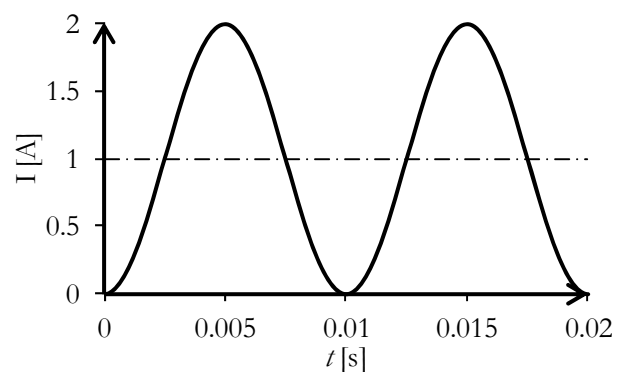


Slika 3.2 Izgled jačine jednosmerne električne struje, promenljive vrednosti

Jačina električne struje konstantnog intenziteta je praktično teško ostvariva. Na slici 3.2 je data realna kriva jačine jednosmerne električne struje u zavisnosti od vremena. I u ovom slučaju jačina električne struje raste od nulte vrednosti do neke projektovane maksimalne vrednosti $I_{max}=1$ A a nadalje njena vrednost varira tokom vremena i uglavnom ima vrednost nižu od I_{max} . U praksi se jednosmerna struja dobija

pomoću generatora jednosmerne struje koji isporučuju električnu struju, čiji intenzitet varira između nule i maksimalne/minimalne vrednosti I_{min}/I_{max} , po sinusnom ili kosinusnom zakonu [9].

Na slici 3.3 prikazan je karakterističan sinusni oblik jednosmerne struje koji se dobija pomoću generatora sa četkicama. Intenzitet električne struje varira oko srednje vrednosti ($I_m=1$ A), sa amplitudom $I_a=1$ A, pri čemu je minimalna vrednost $I_{min}=0$ A a maksimalna vrednost $I_{max}=2$ A. Iako se menja vrednost (intenzitet) jačine električne struje, smer se ne menja.

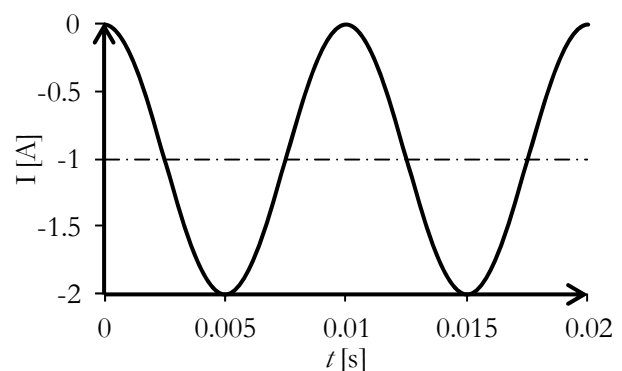


Slika 3.3 Izgled jačine jednosmerne električne struje sinusnog oblika sa pozitivnim predznakom

Jednačina za jačinu jednosmerne električne struje sinusnog oblika sa pozitivnim predznakom je (2):

$$I = +|I_{max} \cdot \sin(2\pi f + \varphi_0) + I_m| \quad (2).$$

gde je: f – učestanost oscilovanja [50 Hz], φ_0 – faza [0 rad], I_m – srednja vrednost jačine električne struje [1 A], pri čemu su brojne vrednosti uzete samo kao primer.



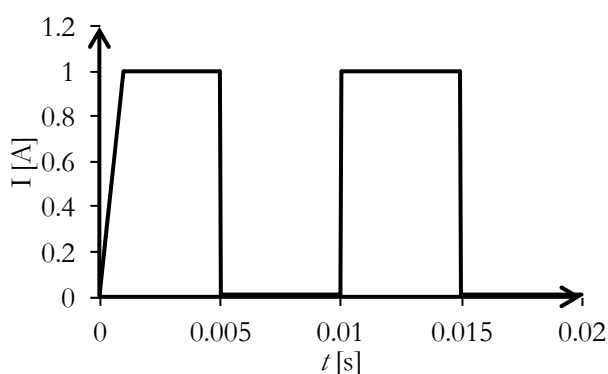
Slika 3.4 Izgled jačine jednosmerne električne struje sinusnog oblika sa negativnim predznakom

Ukoliko polovi generatora električne struje zamene mesta, dobija se istovetan oblik jačine jednosmerne električne struje ali sa negativnim predznakom (slika 3.4).

Jednačina za jačinu jednosmerne električne struje sinusnog oblika sa negativnim predznakom je:

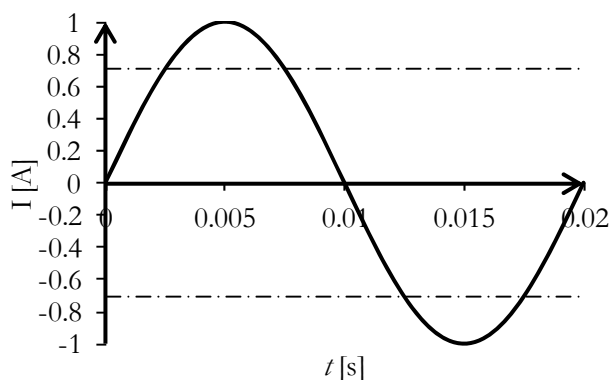
$$I = -|I_{\max} \cdot \sin(2\pi f + \varphi_0) + I_m| \quad (3).$$

Jednosmerna struja može imati i pulsni karakter – veličina jačine struje može, u intervalima, da ima maksimalnu ili minimalnu vrednost. Kao ilustracija, na slici 3.5, prikazana je jednosmerna električna struja pulsno oblika, sa pozitivnim predznakom.



Slika 3.5 Izgled jačine jednosmerne električne struje pulsno oblika sa pozitivnim predznakom

Naizmjenična struja se odlikuje naelektrisanjima koja menjaju svoj smer kretanja, odlikuju se promenljivošću parametara i najčešće se promene dešavaju po prostoperiodičnom sinusnom ili kosinusnom zakonu. Moguća je pojava da se promena naelektrisanja kod naizmjeničnih struja dešava po aperiodičnom zakonu.



Slika 3.6 Izgled jačine naizmjenične električne struje sinusnog oblika

Na slici 3.6 prikazan je izgled naizmjenične električne struje sinusnog oblika, pri učestanosti $f=50$ Hz, bez početne faze $\varphi_0=0$ rad, sa maksimalnom jačinom električne struje $I_{\max}=1$ A. Ako je učestanost $f=50$ Hz, jedna perioda oscilovanja (promena smera kretanja naelektrisanja) traje:

$$T = \frac{1}{f} = \frac{1}{50} = 0,02 \text{ s} \quad (4).$$

Jednačina za jačinu naizmjenične električne struje sinusnog oblika je (5):

$$I = I_{\max} \cdot \sin(2\pi f + \varphi_0) \quad (5).$$

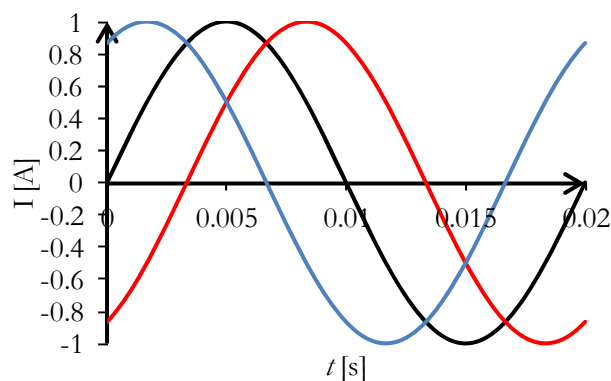
U slučaju naizmjenične električne struje, odnos maksimalne i efektivne vrednosti jačine električne struje je $\sqrt{2}$ [9]. Efektivna vrednost je grafički prikazana kao crta-tačka linija na slici 3.6 i ona može biti pozitivna i negativna:

$$I_{ef}^+ = \frac{I_{\max}}{\sqrt{2}} \approx 0,7071 \cdot I_{\max} \quad (6).$$

odnosno

$$I_{ef}^- = \frac{I_{\min}}{\sqrt{2}} = -\frac{I_{\max}}{\sqrt{2}} \approx -0,7071 \cdot I_{\max} \quad (7).$$

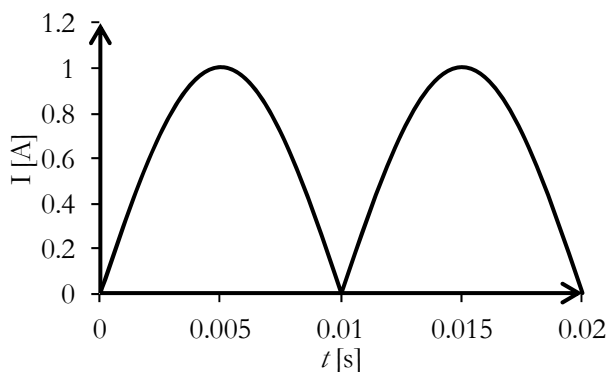
Naizmjenična struja može biti jednofazna ili višefazna (najčešće trofazna). U suštini se trofazni sistem može prikazati kao tri jednofazna kod kojih su struje fazno pomerene jedna u odnosu na drugu za 120° , odnosno, za trećinu periode. Na slici 3.7 je prikazan jedan trofazni sistem električne struje.



Slika 3.7 Izgled jačine trofazne naizmjenične električne struje sinusnog oblika

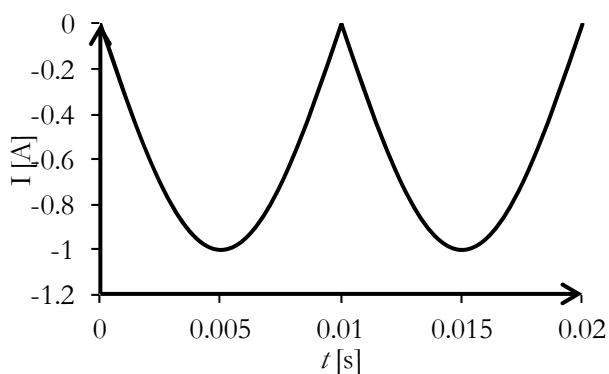
Odgovarajućim transformacijama, naizmjenična struja se može prevesti u

jednosmernu struju: potrebno je polutalase iz negativnog dela periode (sa slike 3.6) transformisati u pozitivan deo. Na slici 3.8, prikazan je primer takve transformacije.



Slika 3.8 Izgled jačine jednosmerne električne struje sinusnog oblika sa pozitivnim predznakom, dobijene transformacijom naizmjenične struje

Istom transformacijom, ali, iz pozitivne u negativnu zonu polutalasa, dobija se negativno polarisana jednosmerna struja (slika 3.9).



Slika 3.9 Izgled jačine jednosmerne električne struje sinusnog oblika sa negativnim predznakom, dobijene transformacijom naizmjenične struje

Ovako dobijena jednosmerna struja ima kvazi pulsni karakter – jačina električne struje varira od minimuma do maksimuma prema sinusnom zakonu oblika:

$$I = -|I_{\max} \cdot \sin(2\pi f + \varphi_0)| \quad (8).$$

a pri tom „puls” nema konstantnu vrednost jačine struje.

3.2.1 Električni napon

Električni napon predstavlja razliku električnih potencijala između dve tačke u prostoru i izražava se kao Volt [V] i najčešće

se označava slovom U kod jednosmerne struje ili u kod naizmjenične. Razlika električnih potencijala predstavlja osnovni uzrok kretanja naelektrisanja kroz provodnik [7-9].

Razlika u električnom potencijalu nastaje kada se jedna tačka u prostoru naelektriše negativno a druga tačka, na rastojanju dovoljno bliskom prvoj tački, se naelektriše pozitivno. Da bi prostor ostao u ravnotežnom stanju višak naelektrisanja iz tačke sa višim električnim potencijalom prelazi u tačku sa nižim električnim potencijalom⁶. Ovaj proces traje sve dok razlika potencijala postoji a kretanje naelektrisanja predstavlja električnu struju.

Električni napon kod jednosmerne struje može biti konstantan ili promenljiv, pri čemu promenljiv napon može da se pokorava prostoperiodičnom kosinusnom ili sinusnom zakonu promene a može da bude potpuno stohastičan.

3.2.2 Električni otpor

Razlika potencijala na krajevima provodnika pokreće naelektrisanja⁷ da se kreću kroz provodnik. Tokom kretanja, naelektrisanja nailaze na druga tela, koja su naelektrisana ili su neutralna, i sudaraju se sa njima. Tokom sudara dolazi do razmene naelektrisanja, dolazi do razaranja i uspostavljanja novih atomskih veza među česticama ali dolazi i do usporavanja naelektrisanih čestica. Smanjenje brzine kretanja naelektrisanja se manifestuje povišenjem temperature provodnika i padom napona u provodniku. Ovaj otpor proticanju električne struje kroz provodnik se naziva električni otpor i obeležava se slovom R (a jedinica je Om [Ω]). Električni otpor provodnika zavisi od:

- dužine provodnika: kako je električni otpor rezultat sudara između čestica

⁶ Ovaj proces je istovetan procesu u spojenim sudovima sa, npr. vodom: voda ističe iz suda sa višom potencijalnom energijom u sud sa nižom potencijalnom energijom sve do uspostavljanja stabilne hidrostaticke ravnoteže među sudovima.

⁷ Smatra se da se kroz provodnike od metala kreću samo elektroni.

provodnika i naelektrisanih čestica, statistički gledano, više sudara će se dogoditi u dužem provodniku – a više sudara znači više otpora. Električni otpor i dužina provodnika su direktno proporcionalni.

- poprečnog preseka provodnika: provodnik većeg poprečnog preseka, ima manju verovatnoću sudara čestica, obrnuto od dužine provodnika. Ista količina naelektrisanih čestica lakše prolazi kroz širi nego kroz uži provodnik: površina poprečnog preseka provodnika i električni otpor su obrnuto proporcionalni.

- prirode materijala: provodna sposobnost materijala je različita, ali nije uvek materijal sa najboljom provodnošću najpogodniji za izradu provodnika. Na primer, srebro je jedan od najboljih provodnika, ali se nikada ne koristi kao provodnik zbog visoke cene; bakar i aluminijum su jeftiniji materijali a relativno su dobri provodnici pa su pogodniji za upotrebu kod provodnika.

- ostalih osobina: električni otpor materijala zavisi od njegove kristalne strukture, homogenosti materijala ali i temperature samog provodnika [9].

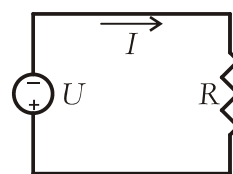
Električni otpor homogenog provodnika, konstantnog poprečnog preseka, pri konstantnoj temperaturi, računa se prema (9):

$$R = \rho \frac{l_p}{A} \quad (9).$$

gde je: l_p – dužina provodnika [m], A – površina poprečnog preseka provodnika [m²], ρ – specifična otpornost provodnika [Ωm].

3.3 Prosto električno kolo. Omov zakon

Prosto električno kolo čine izvor električne struje, provodnik električne struje i potrošač električne struje. Takvo kolo prikazano je na slici 3.10.



$$U = RI$$

$$I = \frac{U}{R} \quad (10).$$

Slika 3.10 Prosto zatvoreno električno kolo sa otpornikom

$$R = \frac{U}{I}$$

Kod ovakvog kola, izvor električne struje napona U kroz provodnik propušta električnu struju jačine I , koja se na potrošaču sa električnim otporom R pretvara u odgovarajući rad (toplotu).

Veza između napona, jačine električne struje i električne otpornosti, za slučaj da su provodnici homogeni, temperatura konstantna, izvor električne struje i potrošač stabilni u radu, definisana je Omovim zakonom, čiji su oblici dati jednačinama (10).

3.4 Kapacitet, kondenzator

Kapacitivnost je veličina koja pokazuje koju količinu elektriciteta, pri određenom naponu, jedno telo može da primi kada je napadnuto tim naelektrisanjem [7-9]. Kod usamljenog provodnika, kapacitet (C) se određuje kao količnik količine elektriciteta (q), kojom je opterećen provodnik, i potencijala (napona) provodnika (U):

$$C = \frac{q}{U} \quad (11).$$

Jedinica kojom se definiše električni kapacitet je Farad (F).

Kondenzatorom se naziva sistem od dva provodna tela, ili dve grupe međusobno povezanih provodnih tela, naelektrisanih jednakim količinama elektriciteta suprotnog znaka. Provodna tela koja čine kondenzator nazivaju se elektrode a između njih se nalazi materija koja je izolator.

3.5 Indukcija, induktori (kalemovi)

Zatvoreno strujno kolo, odnosno, provodnik, kroz koji protiče električna struja,

stvara magnetno polje u svojoj okolini, i poseduje sopstveni magnetni fluks (Φ). Sopstveni magnetni fluks je srazmeran električnoj struji koja protiče kroz električno kolo (i):

$$\Phi = L \cdot i \quad (12).$$

gde je L – induktivnost ili koeficijent samoindukcije. Jedinica induktivnosti je Henri (H).

Induktivnost može da se definiše kao sposobnost strujne konture da „stvori” magnetni fluks kada kroz električnu konturu protiče električna struja. Induktivnost zavisi od oblika električne konture i magnetne permeabilnosti sredine u kojoj se električna kontura nalazi i smatra se konstantnom za zadate topološke uslove.

Ukoliko kroz konturu prolazi vremenski promenljiva električna struja, fluks koji nastaje je promenljiv, te je samim tim, i magnetno polje koje nastaje, promenljivo. Prema Fardejevom zakonu⁸, dobija se elektromotorna sila samoindukcije (e):

$$e = -\frac{d\Phi}{dt} = -L \cdot \frac{di}{dt} \quad (13).$$

Prema Lencovom pravilu⁹, elektromotorna sila samoindukcije se svojim magnetnim poljem suprotstavlja uzroku njenog indukovanja, odnosno, suprotstavlja se promeni električne struje koja je izazvala njeno nastajanje. Samoindukcija predstavlja električnu inerciju (koja je analogna mehaničkoj inerciji) i suština je da smanjenje jačine struje u konturi dovodi do indukovanja elektromotorne sile samoindukcije koja teži da spreči smanjenje (važi i obrnuto).

Ukoliko postoje dve konture, na dovoljno bliskom rastojanju, proticanje promenljive električne struje kroz jednu ili obe konture dovodi do nastajanja promenljivog

magnetnog polja i fluksa koji se indukuje međusobnim dejstvom provodnika.

Ako kroz prvu konturu protiče promenljiva električna struja $i_1(t)$, sopstveni fluks koji ona indukuje je jednak:

$$\Phi_{11} = \Phi_1(i_1) \quad (14).$$

Deo magnetnog fluksa, indukovano zbog prve konture, prolazi kroz drugu konturu (kroz koju ne protiče električna struja) i jednak je:

$$\Phi_{21} = \Phi_2(i_1) \quad (15).$$

Ovakav fluks naziva se spoljašnjim fluksom.

Kako postojanje promenljivog magnetnog fluksa indukuje elektromotornu silu, u drugoj konturi se usled dejstva fluksa Φ_{21} od prve konture indukuje elektromotorna sila međusobne indukcije:

$$e_{21} = -\frac{d\Phi_{21}}{dt} = -L_{21} \cdot \frac{di_1}{dt} \quad (16).$$

gde je L_{21} – međusobna induktivnost uslovljena dejstvom konture 1 na konturu 2, odnosno, to je koeficijent međuindukcije.

U ovakvoj situaciji, postoji jedan deo fluksa, od prve konture, koji ne prolazi kroz drugu konturu i naziva se fluksom rasipanja [9].

Ako kroz prvu konturu protiče promenljiva električna struja $i_1(t)$ a kroz drugu konturu protiče promenljiva električna struja $i_2(t)$, sopstveni fluks prve konture Φ_1 je jednak sopstvenom fluksu Φ_{11} i fluksu koji je dobio od druge konture Φ_{12} :

$$\Phi_1 = \Phi_{11} + \Phi_{12} = \Phi_1(i_1) + \Phi_1(i_2) \quad (17).$$

Prema jednačinama 12-17, sledi:

$$\Phi_1 = L_1 i_1 + L_{12} i_2 \quad (18).$$

Analogno, fluks druge konture Φ_2 jednak je sopstvenom fluksu Φ_{22} i fluksu od prve konture Φ_{21} :

$$\Phi_2 = \Phi_{22} + \Phi_{21} = \Phi_2(i_2) + \Phi_2(i_1) \quad (19).$$

Prema jednačinama 12-19, sledi:

$$\Phi_2 = L_2 i_2 + L_{21} i_1 \quad (20).$$

Indukovana elektromotorna sila u prvoj konturi (e_1) je jednaka:

⁸ Faradejev zakon elektromagnetne indukcije daje odnos promene magnetnog fluksa kroz površinu ograničenu konturom i električnog polja duž te konture [9, 10].

⁹ Indukovana struja u zatvorenoj strujnoj konturi uvek teče u takvom smeru da se njeno magnetno polje suprotstavlja magnetnom polju koje tu struju indukuje [9, 11].

$$e_1 = -\frac{d\Phi_1}{dt} = -L_1 \cdot \frac{di_1}{dt} - L_{12} \cdot \frac{di_2}{dt} \quad (21).$$

odnosno, indukovana elektromotorna sila u drugoj konturi (e_2) je:

$$e_2 = -\frac{d\Phi_2}{dt} = -L_2 \cdot \frac{di_2}{dt} - L_{21} \cdot \frac{di_1}{dt} \quad (22).$$

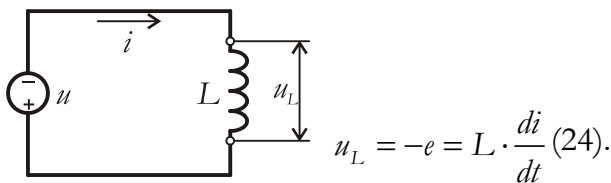
Za slučaj da sredina ima nepromenljive magnetne osobine, međusobna induktivnost je konstantna i jednaka:

$$L = L_{12} = L_{21} \quad (23).$$

Ovakva kola, nazivaju se induktivno spregnutim kolima.

Kalem je osnovni element električnih kola i namenjen je „sakupljanju” magnetne energije električnog kola, odnosno, služi kao svojevrsna prigušnica u električnom kolu. Kalem čine jezgro od mekog železa (ili bilo kog drugog feromagnetika) na kome je namotan provodnik u vidu spirale. Namotavanjem provodnika je dobijena struktura koja ima veći magnetni fluks nego sam provodnik koji nije namotan (ili samo jedan namotaj).

Kako je kalem suštinski uvek usmeren protiv elektromotorne sile strujne konture u kojoj se nalazi, strujno-naponska karakteristika kalema je oblika:



Slika 3.11 Prosto zatvoreno električno kolo sa kalemom

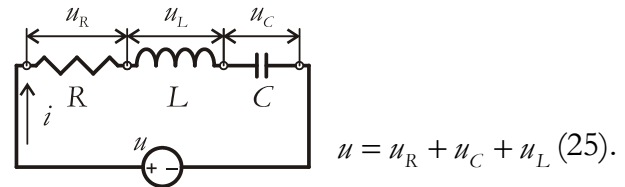
Prema jednačini 24 se donose dva najvažnija zaključka o kalemovima:

- 1) kalem se indukcijom napona suprotstavlja promeni električne struje koja protiče kroz njega i
- 2) ukoliko je električna struja koja protiče kroz kalem nepromenljiva, napon na kalemu je jednak nuli i otpornost kalema je jednaka nuli.

Kalem predstavlja vid regulacije napona u električnom kolu.

3.6 Prosto električno kolo sa otpornikom, kalemom i kondenzatorom – RLC kolo

Električno kolo koje se sastoji od izvora konstantnog napona, otpornika, kalema i kondenzatora, naziva se prostim električnim RLC kolom. Na slici 3.12 je prikazano takvo kolo.



Slika 3.12 Prosto električno RLC kolo

Bez obzira da li je kolo jednosmerne ili naizmenične struje, rešavanje ovakvog kola se svodi na uspostavljanje jednakosti napona izvora struje i napona na komponentama.

Kako su električna otpornost (R), induktivnost (L) i kapacitet (C), najčešće konstantni, jednačina 25 može da se transformiše u sledeći oblik:

$$u = Ri + L \frac{di}{dt} + \frac{q}{C}, \quad (26).$$

$$L = \text{const}, R = \text{const}, C = \text{const}$$

Kada je u pitanju jednosmerna struja, RLC kolo postaje RC kolo, u režimu kada je struja nepromenljiva, odnosno, kada važi:

$$i = I = \text{const},$$

$$u = U = \text{const},$$

$$q = Q = \text{const},$$

tada je:

$$U = RI + L \frac{dI}{dt} + \frac{Q}{C} \quad (28).$$

odnosno:

$$I = \frac{U}{R} - \frac{Q}{R \cdot C} \quad (29).$$

Za slučaj naizmenične struje, jednačina 25, nakon transformacije postaje:

$$L \frac{d^2 q}{dt^2} + R \frac{dq}{dt} + \frac{q}{C} = u \quad (30).$$

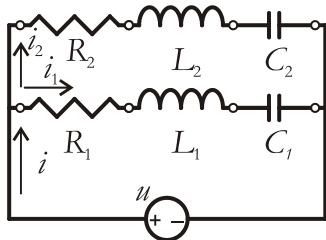
odnosno:

$$L \cdot \ddot{q} + R \cdot \dot{q} + \frac{1}{C} \cdot q = u \quad (31).$$

Jednačina 31 je diferencijalna nehomogena jednačina koja ima svoja opšta i partikularna rešenja za određene oblike napona u .

3.7 Složeno električno kolo

Složeno električno RLC kolo se sastoji od istih elemenata kao i prosto RLC kolo, ali je broj elemenata u kolu veći i veze među elementima su složenije. Na slici 3.13 prikazana je šema jednog složenog električnog RLC kola.



Slika 3.13 Složeno električno RLC kolo

$$u = u_{R_1} + u_{C_1} + u_{L_1} \quad (32).$$

$$u = Ri_1 + L \frac{di_1}{dt} + \frac{q}{C}$$

$$u = u_{R_2} + u_{C_2} + u_{L_2} \quad (33).$$

$$u = Ri_2 + L \frac{di_2}{dt} + \frac{q}{C}$$

$$i = i_1 + i_2 \quad (34).$$

Kod ovakvog kola, postavljaju se jednačine ravnoteže napona (32 i 33), kao i kod prostih kola, ali je neophodno postaviti i jednačine ravnoteže jačine električnih struja – prema Kirchofovlijevim pravilima¹⁰ (jednačina 34). Tako dobijeni sistem jednačina je složeniji za rešavanje nego sistem jednačina kod

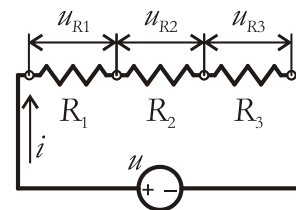
prostog električnog kola, ali nije nerešiv – i ovde su u pitanju algebarske i nehomogene parcijalne jednačine sa poznatim rešenjima za naizmenične struje, odnosno, samo algebarske jednačine za sisteme sa jednosmernim strujama.

3.7.1 Redno električno kolo

Redno električno kolo se sastoji od izvora i komponenti koje su međusobno vezane na red – jedna za drugom. Osnovne odlike redno vezanih komponenti su:

- 3) Kroz sve komponente protiče električna struja iste jačine,
- 4) Ukupni napon izvora struje jednak je sumi napona na svim komponentama u vezi.

Redna veza otpornika prikazana je na slici 3.14.



Slika 3.14 Redna veza otpornika

$$u = u_{R_1} + u_{R_2} + u_{R_3} \quad (35).$$

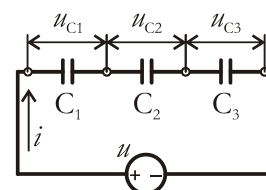
$$Ri = R_1i + R_2i + R_3i$$

$$R = R_1 + R_2 + R_3$$

$$R = \sum_{i=1}^{i=n} R_i \quad (36).$$

Objedinjena otpornost redno vezanih otpornika jednaka je sumi pojedinačnih otpornosti (jednačine 35 i 36).

Redna veza kondenzatora prikazana je na slici 3.15.



Slika 3.15 Redna veza kondenzatora

¹⁰ Kirchofovi zakoni (pravila) su dve jednačine koje opisuju odnos struje i napona u električnim kolima [9, 12].

$$u = u_{C_1} + u_{C_2} + u_{C_3}$$

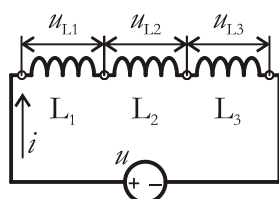
$$\frac{q}{C} = \frac{q}{C_1} + \frac{q}{C_2} + \frac{q}{C_3} \quad (37).$$

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3}$$

$$\frac{1}{C} = \sum_{i=1}^{i=n} \frac{1}{C_i} \quad (38).$$

Inverzna vrednost objedinjene kapacitivnosti redno vezanih kondenzatora jednaka je sumi inverznih vrednosti pojedinačnih kapacitivnosti (jednačine 37 i 38).

Redna veza kalemova prikazana je na slici 3.16



Slika 3.16 Redna veza kalemova

$$u = u_{L_1} + u_{L_2} + u_{L_3}$$

$$L \frac{di}{dt} = L_1 \frac{di}{dt} + L_2 \frac{di}{dt} + L_3 \frac{di}{dt} \quad (39).$$

$$L = L_1 + L_2 + L_3$$

$$L = \sum_{i=1}^{i=n} L_i \quad (40).$$

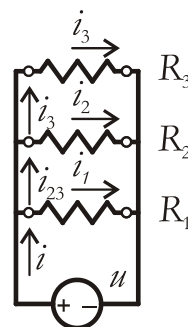
Objedinjena induktivnost redno vezanih kalemova jednaka je sumi pojedinačnih induktivnosti (jednačine 39 i 40).

3.7.2 Paralelno električno kolo

Paralelno električno kolo se sastoji od izvora i komponenti koje su međusobno vezane tako da su „plusevi” na istomvodu a „minusevi” na drugomvodu. Osnovne osobine paralelno vezanih komponenti su:

- 1) Kroz komponente protiče električna struja različite jačine,
- 2) Ukupni napon izvora struje jednak je naponu na svakoj komponenti.

Paralelna veza otpornika prikazana je na slici 3.17.



Slika 3.17 Paralelna veza otpornika

$$u = u_{R_1} = u_{R_2} = u_{R_3}$$

$$Ri = R_1 i_1 = R_2 i_2 = R_3 i_3$$

$$i = i_1 + i_2 + i_3$$

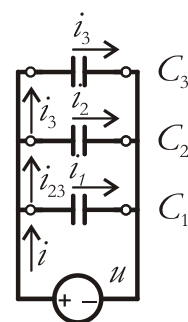
$$i = \frac{R}{R_1} i + \frac{R}{R_2} i + \frac{R}{R_3} i \quad (41).$$

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}$$

$$\frac{1}{R} = \sum_{i=1}^{i=n} \frac{1}{R_i} \quad (42).$$

Inverzna vrednost objedinjene otpornosti paralelno vezanih otpornika jednaka je sumi inverznih vrednosti pojedinačnih otpornosti (jednačine 41 i 42).

Paralelna veza kondenzatora prikazana je na slici 3.18.



Slika 3.18 Paralelna veza kondenzatora

$$u = u_{C_1} = u_{C_2} = u_{C_3}$$

$$\frac{q}{C} = \frac{q_1}{C_1} = \frac{q_2}{C_2} = \frac{q_3}{C_3}$$

$$\frac{1}{C} \frac{dq}{dt} = \frac{1}{C_1} \frac{dq_1}{dt} = \frac{1}{C_2} \frac{dq_2}{dt} = \frac{1}{C_3} \frac{dq_3}{dt}$$

$$\frac{i}{C} = \frac{i_1}{C_1} = \frac{i_2}{C_2} = \frac{i_3}{C_3} \quad (43).$$

$$i = i_1 + i_2 + i_3$$

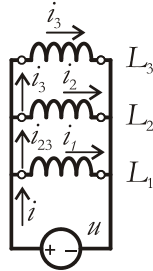
$$i = \frac{C_1}{C} i + \frac{C_2}{C} i + \frac{C_3}{C} i$$

$$C = C_1 + C_2 + C_3$$

$$C = \sum_{i=1}^{i=n} C_i \quad (44).$$

Objedinjena kapacitivnost paralelno vezanih kondenzatora jednaka je sumi pojedinačnih kapacitivnosti (jednačine 43 i 44).

Paralelna veza kalemova prikazana je na slici 3.19.



Slika 3.19 Paralelna veza kalemova

$$u = u_{C_1} = u_{C_2} = u_{C_3}$$

$$L \frac{di}{dt} = L_1 \frac{di_1}{dt} = L_2 \frac{di_2}{dt} = L_3 \frac{di_3}{dt}$$

$$i = i_1 + i_2 + i_3 \quad (45).$$

$$i = \frac{L}{L_1} i + \frac{L}{L_2} i + \frac{L}{L_3} i$$

$$\frac{1}{L} = \frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} + \frac{1}{L_3}$$

$$\frac{1}{L} = \sum_{i=1}^{i=n} \frac{1}{L_i} \quad (46).$$

Inverzna vrednost objedinjene induktivnosti paralelno vezanih kalemova jednaka je sumi inverznih vrednosti

pojedinačnih induktivnosti (jednačine 45 i 46).

3.8 Poluprovodničke komponente u elektronskim kolima

Osnovni zadatak poluprovodničkih komponenti je da:

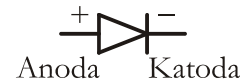
- 1) verno prenose projektovani električni signal, bez obzira na stepen korisnog dejstva, kod elektronskih sistema,
- 2) prenose energiju sa što većim stepenom korisnog dejstva, bez obzira na vernost projektovanog signala, kod energetskih sistema.

U energetici koja se koristi za zavarivanje se od poluprovodnika najviše koriste: diode, tiristori i tranzistori [9].

Poluprovodnička komponenta ne sme biti u isto vreme izložena i spoljašnjem naponu i spoljašnjoj struji – u tom slučaju zbog prevelikog zagrevanja trenutno dolazi do razaranja materijala komponente. U teoriji, poluprovodnici rade u režimu: imaju napon a nemaju struju ili obrnuto [9].

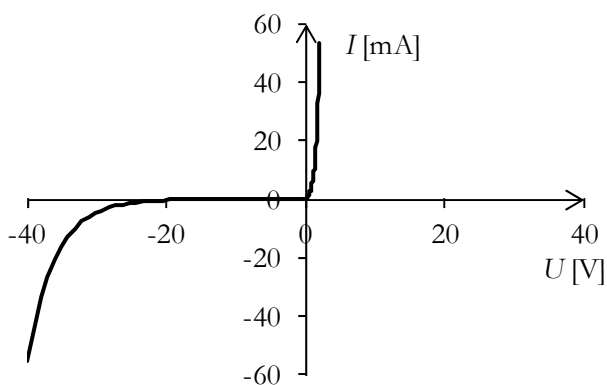
3.8.1 Dioda

Dioda je najjednostavnija elektronska komponenta koja se, u električnom kolu, ponaša kao „električni nepovratni ventil” koji propušta električnu struju samo u jednom smeru. Zbog toga dioda spada u poluprovodničke komponente. Dioda se najčešće koristi u elektronici malih struja kao komponente kojima se ne upravlja [9, 13s].

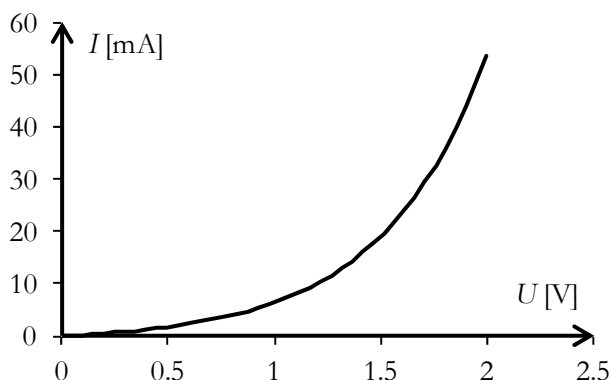


Slika 3.20 Šematski prikaz diode

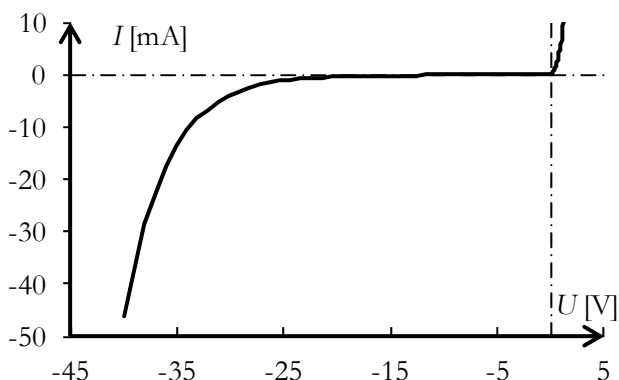
Dioda je dvokontaktna komponenta (anoda i katoda, slika 3.20) kod koje električna struja teče samo u smeru od anode ka katodi. Kao tipičan predstavnik PN komponenti, dioda predstavlja nelinearnu otpornost u električnom kolu, koja zavisi od polariteta i napona. Na slici 3.21 je prikazana tipična karakteristika diode.



Slika 3.21 Kompletna strujno-naponska karakteristika diode



Slika 3.22 Provodni deo strujno-naponske karakteristike diode



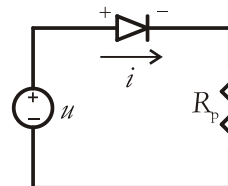
Slika 3.23 Neprovodni (zaporni) deo strujno-naponske karakteristike diode

Strujno-naponska karakteristika diode se sastoji od provodnog (slika 3.22) i neprovodnog (zapornog) (slika 3.23) dela. Kada je, prema slikama 3.21 do 3.23, jačina struje pozitivnog smera, dioda provodi struju, ali, je odnos jačine struje i napona veoma nelinearan¹¹.

¹¹ Kod pojedinih energetske diode se ovaj odnos tretira kao linearan.

Kada je jačina struje negativnog smera, dioda provodi struju slabog intenziteta (oko 10^{-15} A) sve do dostizanja praga napona diode – koji je 20-50 puta veći od radnog napona diode (pa je praktično neostvariv za dobro projektovano električno kolo).

Ako je dioda u prostom električnom kolu naizmenične struje (slika 3.24), i ona predstavlja nelinearni otpor R_p proticanju električne struje oblika jednačina 47, onda je:

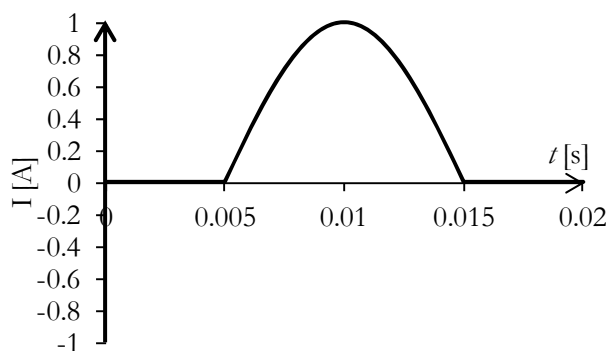


Slika 3.24 Prosto električno kolo sa diodom

$$u = R_p \cdot i, \quad i = \frac{u}{R_p} \quad (47).$$

$$i = \frac{i_{\max} \cos(2\pi f + \varphi_0)}{R_p}$$

Na slici 3.25 prikazan je oblik električne struje koja protiče kroz diodu.

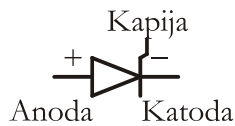


Slika 3.25 Izgled jačine električne struje kosinusnog oblika u prostom električnom kolu sa diodom

Ovakav oblik električne struje, naziva se polutalasnim oblikom.

3.8.2 Tiristor

Tiristor je četvoroslojna poluprovodnička PN (PNP ili NPN) komponenta koja ima tri kontakta (anodu, katodu i „kapiju”, slika 3.26) i upravljiva je, za razliku od diode.

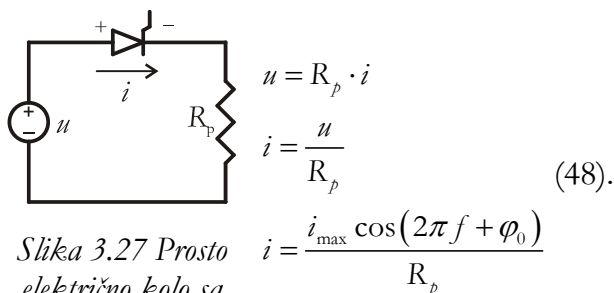


Slika 3.26 Šematski prikaz tiristora

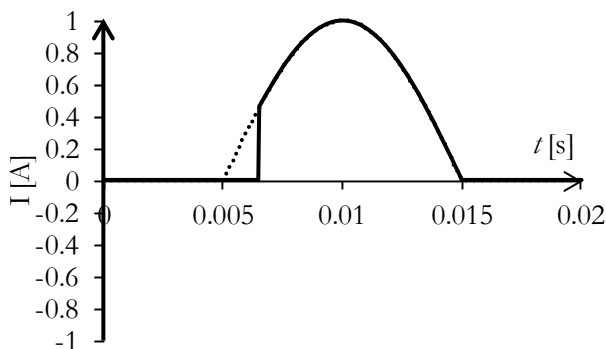
Na anodu i katodu su prikačeni kontakti električnog kola dok se na kapiju dovodi dodatni napon kojim se upravlja. Struja može da teče jedino u smeru od anode ka katodi i to jedino kada je ispunjen uslov da je i kapija pod naponom. Sa povećanjem jačine električne struje na kapiji, preskače se prag otpornosti tiristora i struja počinje da teče kroz tiristor.

Tiristor ima sličnu zapornu karakteristiku kao dioda dok je provodna karakteristika složenijeg oblika.

Na slici 3.27 je prikazano električno kolo sa tiristorom (otpornosti R_p) a na slici 3.28 oblik električne struje koja protiče kroz tiristor kada kroz kolo teče naizmenična struja kosinusnog oblika napona.



Slika 3.27 Prosto električno kolo sa tiristorom



Slika 3.28 Izgled jačine električne struje kosinusnog oblika u prostom električnom kolu sa tiristorom

Tiristori se koriste za razne prekidače, u radu sa motorima, kod elektrootpornog zavarivanja ali i za upravljanje izvorima struje za postupke zavarivanja pod praškom. Veliki tiristori mogu da izdrže struje od nekoliko stotina ampera.

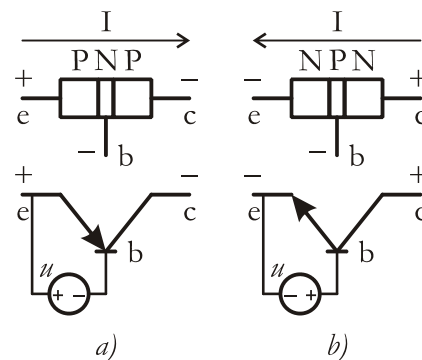
3.8.3 Tranzistor

Tranzistor je troslojna upravljiva poluprovodna elektronska komponenta PNP ili NPN tipa koja se koristi za pojačanje električnih signala, kao električna sklopka, za stabilizaciju napona, modulaciju signala i sl. Sastavni je deo većine elektronskih sistema, integralnih kola, računara i sl.

Prema načinu rada, tranzistori se dele na bipolarne tranzistore¹² kod kojih provodnost zavisi od količine negativnog naelektrisanja (količine elektrona u NPN ili broja šupljina u PNP tipu tranzistora) i na unipolarne tranzistore¹³ kod kojih provodnost zavisi samo od električnog naelektrisanja (od količine elektrona u N-kanalnom ili šupljinama u P-kanalnom tipu).

U praksi je uobičajeno da se pod imenom tranzistor podrazumeva bipolarni tranzistor (slika 3.29).

Bipolarni tranzistori su izrađeni tako što su na provodnik nanešene nečistoće (i postao je poluprovodnik), i tako nastaje struktura u kojoj se između dva područja istog tipa provodljivosti (P ili N) nalazi područje suprotnog tipa provodljivosti (N ili P). Tako nastaju dva tipa bipolarnih tranzistora: PNP (pozitivno-negativno-pozitivno) i NPN (negativno-pozitivno-negativno).



Slika 3.29 Bipolarni tranzistor: a) PNP, b) NPN

Bipolarni tranzistori imaju tri kontakta: bazu (b), emiter (e) i kolektor (c) na koje su spojeni krajevi električnog kola. Baza i emiter čine u normalnom aktivnom načinu rada propusno polarizovan PN spoj (kod NPN

¹² eng. *Bipolar Junction Transistor* – BJT.

¹³ eng. *Field Effect Transistor* – FET.

tranzistora), za razliku od kolektora i baze koji u normalnom aktivnom načinu rada čine nepropusno polarizovan PN spoj.

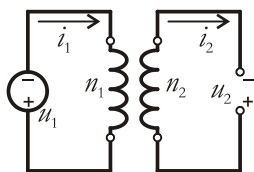
Princip rada tranzistora se zasniva na pokretanju manjinskih nosilaca naelektrisanja iz emitera u bazu i transportu do kolektora. Kako je napon na spoju baza-emiter manji od napona na spoju kolektor-baza, a i struja koja teče u bazu je manja od struje emitera i kolektora, znači da tranzistor omogućava upravljanje potrošnjom u električnom kolu veće snage pomoću električnog kola u kojem se troši manje snage. U zavisnosti od toga koja je elektroda za oba električna kola zajednička, tranzistor se može koristiti u tri različita spoja.

U spoju sa zajedničkom bazom ostvaruje se samo pojačanje napona, u spoju sa zajedničkim kolektorom samo pojačanje struje, u spoju sa zajedničkim emiterom pojačavaju se i napon i struja, pa je pojačanje snage najveće.

Bez obzira da li je PNP ili NPN tip tranzistora, oba obavljaju istu funkciju. Razlika je u polaritetima napona i struja koji kroz njih protiču. U PNP tipu tranzistora glavni nosioci električne struje su šupljine, a u NPN tipu tranzistora su to elektroni.

3.9 Transformator

Transformatori su elektronski uređaji koji naizmeničnu struju određenih osobina na ulazu transformišu u naizmeničnu struju drugih osobina na izlazu. Uređaj se sastoji od n_1 namotaja na ulazu (primaru) kroz koji protiče struja i_1 pod naponom u_1 . Usled indukcije, kroz n_2 namotaja na kraju transformatora (sekundaru) indukuje se električna struja jačine i_2 pod naponom u_2 (slika 3.30).



Slika 3.30 Idealni transformator

$$\frac{u_1}{u_2} = \frac{n_1}{n_2} = \frac{i_2}{i_1} \quad (49).$$

Količnik napona na ulazu i izlazu transformatora je proporcionalan količniku broja namotaja na primarnom i sekundarnom kalemu (jednačina 49). Da bi se održalo namagnetisanje jezgra kroz primarni namotaj, kroz njega mora da protiče struja, čak i kad sekundar nije aktivan, i pri tzv. praznom hodu.

Na primer, neka izvor struje propušta kroz primar električnu struju jačine:

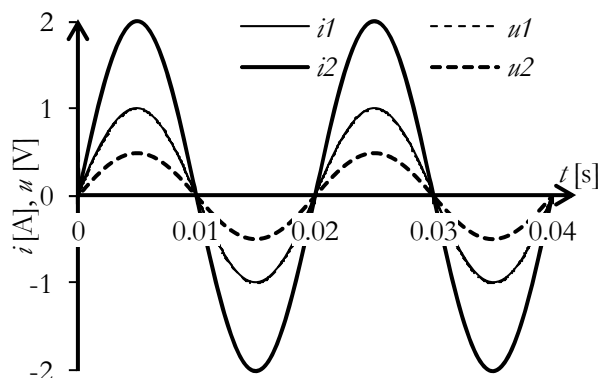
$$i = i_{\max} \cdot \sin(2\pi f + \varphi_0), \quad \varphi_0 = 0 \text{ rad} \quad (50).$$

pod naponom:

$$u = u_{\max} \cdot \sin(2\pi f + \varphi_0), \quad \varphi_0 = 0 \text{ rad} \quad (51).$$

Neka je broj navojaka primara je $n_1 = 10$, a broj namotaja sekundara $n_2 = 20$.

Na slici 3.31 su prikazani struje i naponi na primaru (indeks 1) i sekundaru (indeks 2) pre i nakon transformacije.



Slika 3.31 Prikaz električne struje i napona primaru i sekundaru transformatora

Transformatori mogu biti jednofazni i trofazni (odnosno, višefazni). Za elektrolučne postupke zavarivanja koristi se specijalna vrsta transformatora, koji praktično radi u kratkom spoju: napon sekundara je nizak, dok je jačina električne struje sekundara veoma velika.

3.10 Energetski pretvarači

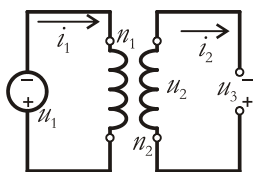
Energetski pretvarači električne energije su uređaji koji transformišu električnu energiju od izvora (predajnika, generatora) ka potrošaču (prijemniku). Pretvaranje energije je višeznačno pa se prema osnovnoj funkciji

koju vrše pretvarači dele na:

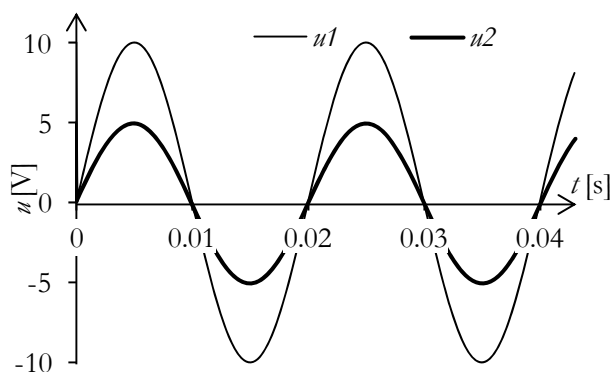
- NS/JS (eng. AC/DC) pretvarače (pretvarači koji naizmeničnu struju/napon pretvaraju u jednosmernu struju/napon) koji se nazivaju ispravljačima,
- JS/NS (eng. DC/AC) pretvarače (pretvarači koji jednosmernu struju/napon pretvaraju u naizmeničnu struju/napon) koji se nazivaju invertori,
- NS/NS (eng. AC/AC) pretvarače (pretvarači koji naizmeničnu struju/napon pretvaraju u naizmeničnu struju/napon drugog nivoa).

I naizmenična i jednosmerna struja se pretvaraju direktnim ili indirektnim postupcima, pri čemu se pretvaranje NS (AC) struje u JS (DC) struju naziva „ispravljanje” a pretvaranje JS struje u NS struju „invertorski rad”.

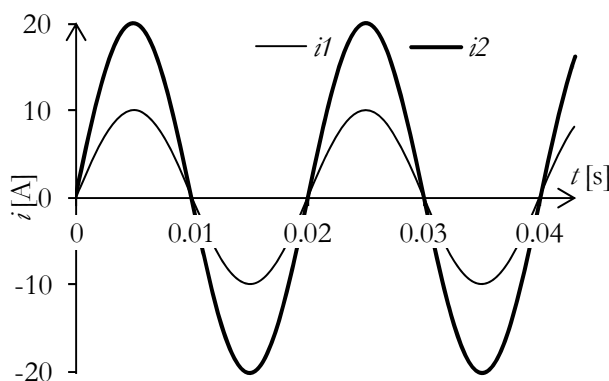
Ispravljači i invertori su sastavljeni od poluprovodničkih elemenata/komponenti koji su na određeni način spojeni. Na slikama 3.32 do 3.53 prikazani su neki od postojećih ispravljačkih kola, naponi i jačine struje koje se dobijaju ovim kolima/uređajima.



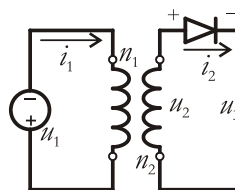
Slika 3.32 Idealni transformator



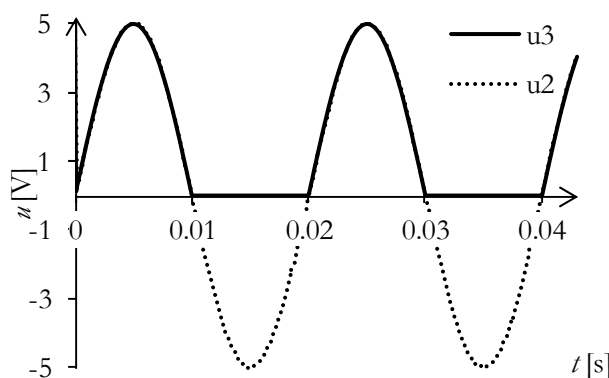
Slika 3.33 Napon idealnog transformatora



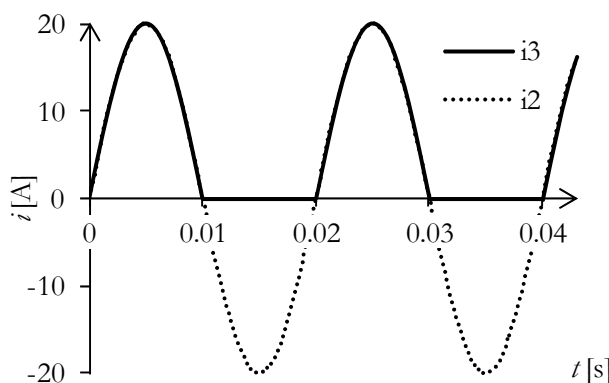
Slika 3.34 Jačina struje idealnog transformatora



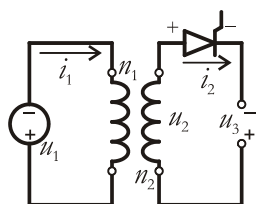
Slika 3.35 Idealni transformator sa diodom na sekundaru



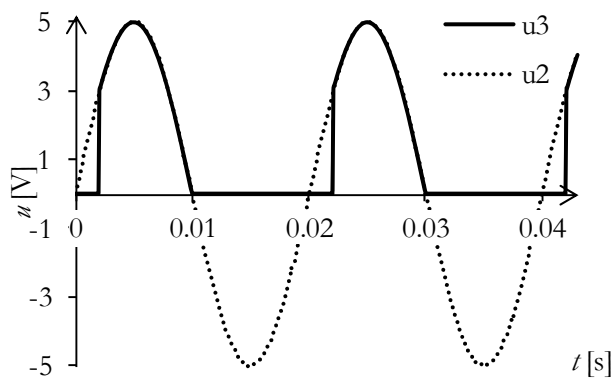
Slika 3.36 Napon idealnog transformatora sa diodom na sekundaru



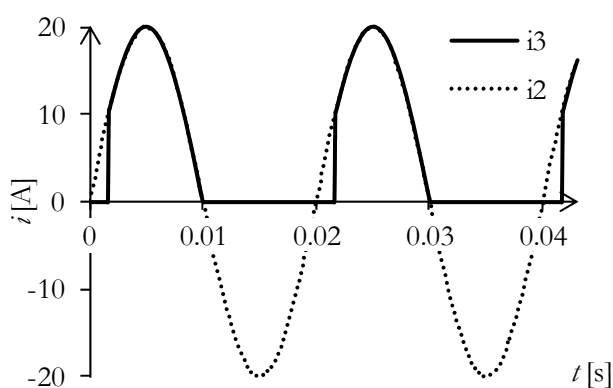
Slika 3.37 Jačina električne struje na idealnom transformatoru sa diodom na sekundaru



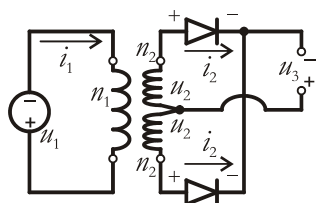
Slika 3.38 Idealni transformator sa tiristorom na sekundaru



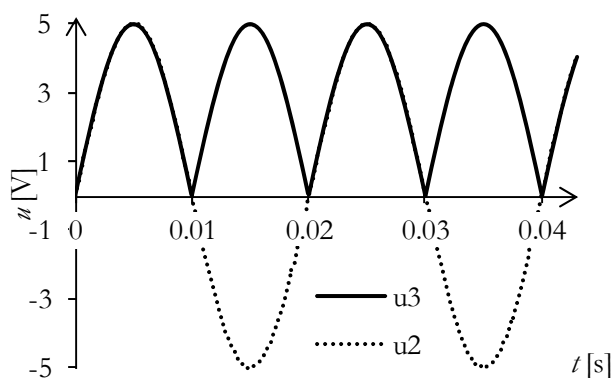
Slika 3.39 Napon idealnog transformatora sa tiristorom na sekundaru



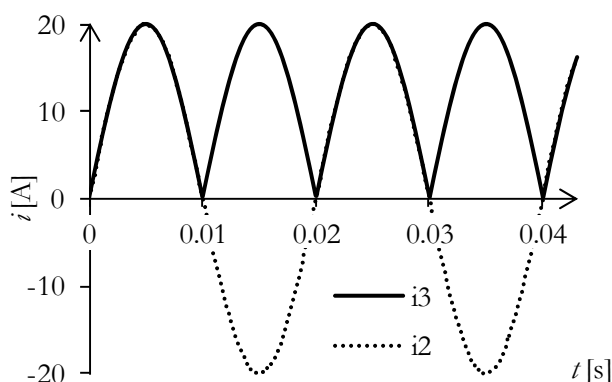
Slika 3.40 Jačina električne struje idealnog transformatora sa tiristorom na sekundaru



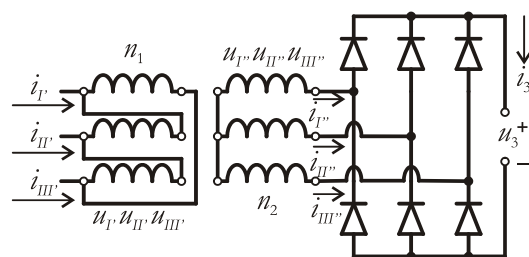
Slika 3.41 Idealni transformator sa dve diode na sekundaru i dvojnim kalemom na sekundaru



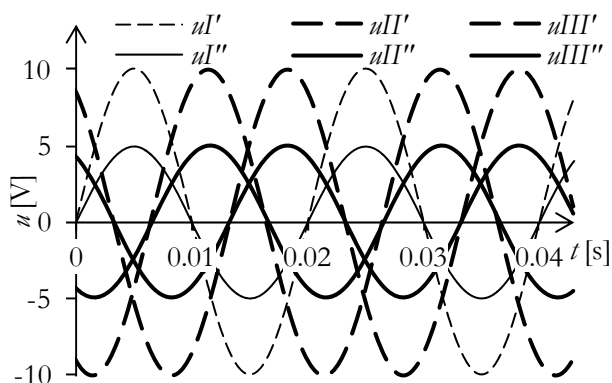
Slika 3.42 Napon idealnog transformatora sa dve diode i dva kalem na sekundaru



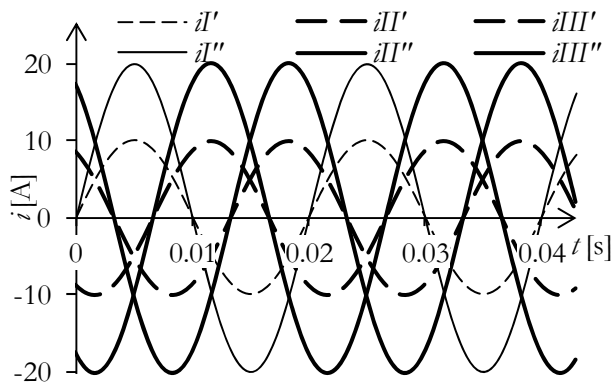
Slika 3.43 Jačina električne struje idealnog transformatora sa dve diode i dva kalem na sekundaru



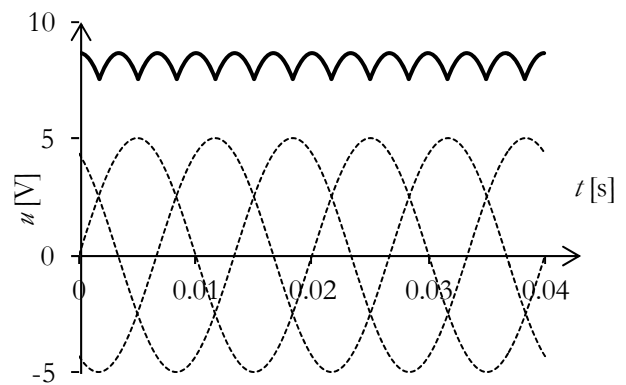
Slika 3.44 Trofazni idealni transformator sa diodama



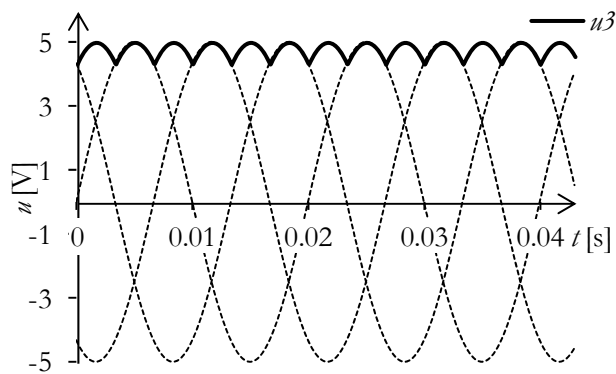
Slika 3.45 Naponi na fazama kod trofaznog idealnog transformatora sa diodama



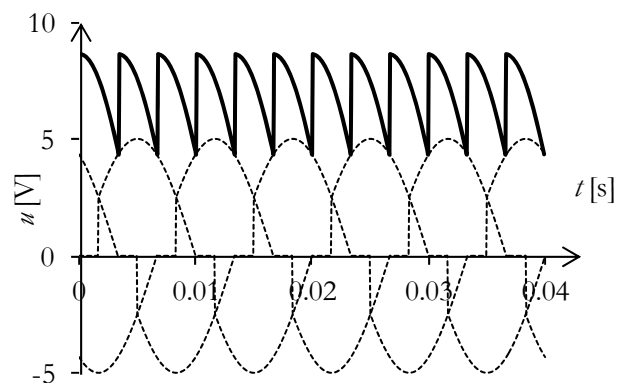
Slika 3.46 Jačine struje kod trofaznog idealnog transformatora sa diodama



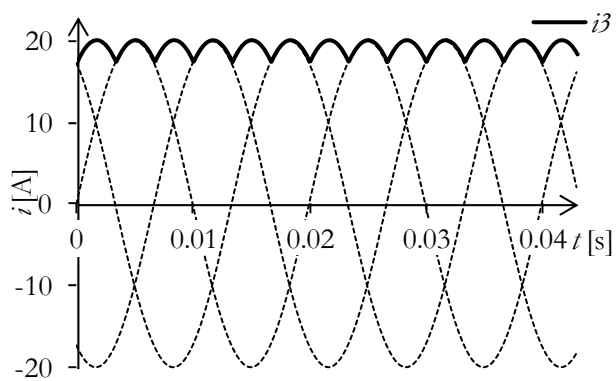
Slika 3.50 Napon kod trofaznog idealnog transformatora sa tiristorima (mosnog ispravljača) sa uglom ispravljanja od 0°



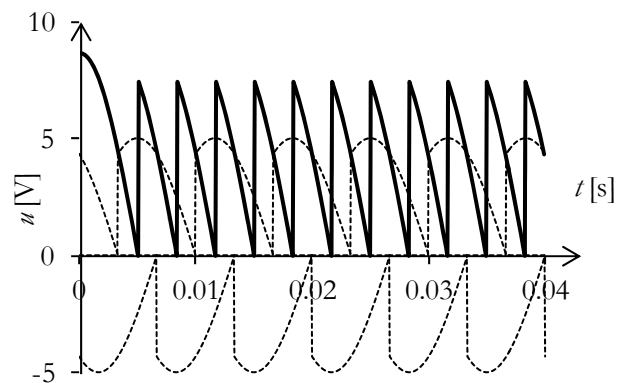
Slika 3.47 Ispravljeni napon kod trofaznog sekundara



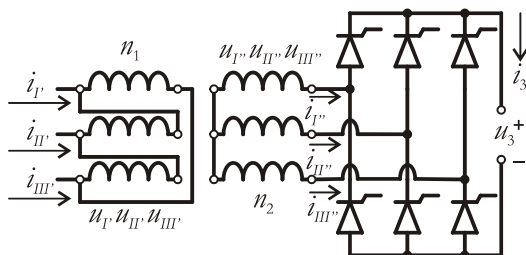
Slika 3.51 Napon kod trofaznog idealnog transformatora sa tiristorima (mosnog ispravljača) sa uglom ispravljanja od 30°



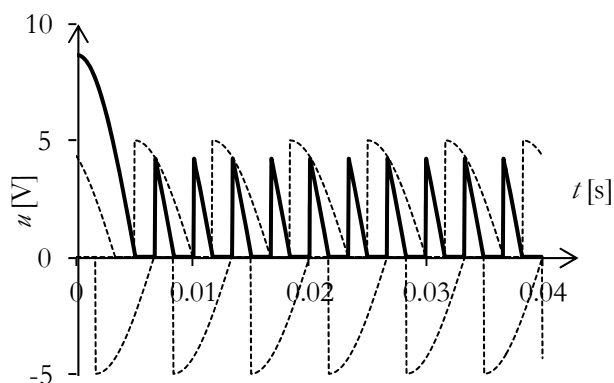
Slika 3.48 Ispravljena jačina struje kod trofaznog sekundara



Slika 3.52 Napon kod trofaznog idealnog transformatora sa tiristorima (mosnog ispravljača) sa uglom ispravljanja od 60°



Slika 3.49 Trofazni idealni transformator sa tiristorima (mosni ispravljač)



Slika 3.53 Napon kod trofaznog idealnog transformatora sa tiristorima (mosnog ispravljača) sa uglom ispravljanja od 90°

3.11 Opasnosti od električne struje. Zdravlje i bezbednost

Trenutno živimo u doba električne energije i elektronike te je gotovo nemoguće izbeći dodir čoveka sa bilo kakvim oblikom električne energije. Jedan dan u životu „savremenog čoveka” ne može da se zamisli bez električne struje [14].

Električna energija predstavlja svojevrsan izvor energije koji nam je lako dostupan ali nije bezopasan! Naprotiv, električna energija je veoma opasna, ukoliko se ne koristi na pravi način a rizik od neispravne upotrebe je čak i veći ako se u obzir uzme nonšalantnost sa kojom savremeni čovek koristi električnu energiju.

Tri osnovna pravila za izbegavanje rizika koje električna struja nosi bi trebalo da zna svaka osoba [14, 15]:

- Električni sistemi i uređaji moraju da budu projektovani i proizvedeni tako da u radnom režimu vrše po čoveka bezopasan rad;
- Električni sistemi i uređaji se moraju koristiti tako da sigurnost bude maksimalna. Periodična ispitivanja su jedna od garancija sigurnosti;
- Električne sisteme i uređaje treba popravljati samo kada su van upotrebe i van električne mreže (nisu pod naponom).

Suštinski posmatrano, osnovna opasnost od električne struje zavisi od protoka struje

koja se javlja kada čovek dođe u kontakt sa delovima pod naponom usled oštećenja ili kvara električne opreme ili strujnog kola. Omov zakon objašnjava odnos električne struje, napona i električne otpornosti: što je viši napon a manji električni otpor, veća je jačina električne struje.

Prema tome, opasnosti od električne struje definisani su električnim naponom i jačinom električne struje.

Granične vrednosti napona koje ne dovode do ozbiljnog povređivanja čoveka su 50 V za naizmeničnu struju i 120 V za jednosmernu struju. Za otežane uslove rada (zatvoreni prostori, na primer) granični naponi su 24 V za naizmeničnu struju i 60 V za jednosmernu struju¹⁴.

Napon je klasifikovan kao niski i visoki. Niskonaponske mreže provode električnu struju napona od 0 V do 1000 V dok su visokonaponske mreže sa naponima preko 1000 V [15].

Čovek je često u kontaktu sa „niskim” naponom dok u kontakt sa „visokim” naponom dolazi samo u specijalnim slučajevima. Verovatnoća povređivanja električnom strujom visokog napona je manja nego električnom strujom niskog napona (pri zavarivanju), ali – rizik uvek postoji.

Granična vrednost jačine struje koja je opasna po čoveka je 10 mA. Tabela 3.1 daje prikaz jačine električne struje i njen uticaj na ljudski organizam.

Opasnosti koje se javljaju pri korišćenju električne struje se mogu podeliti na primarne i sekundarne [14-17].

Primarne opasnosti za posledicu mogu imati povrede ljudskog tela izazvane direktnim dejstvom električne struje i to:

- 1) usled protoka električne struje kroz ljudsko telo,
- 2) usled kontakta sa vrućim i štetnim proizvodima gorenja električnog luka,
- 3) usled dejstva elektromagnetnog polja.

Protok struje kroz ljudsko telo može da ima štetan uticaj na unutrašnje organe i kožu a

¹⁴ Statistički gledano, najveću opasnost predstavlja električni napon od 220 V iako smrt može nastati već pri naponima neznatno većim od 50 V.

težina povrede zavisi od jačine struje, frekvencije, puta prolaska struje, vlažnosti vazduha, temperature vazduha i trajanja izlaganju struji.

Tabela 3.1 Uticaj jačine električne struje na ljudski organizam [16]

Jačina električne struje	Posledica
Do 1 mA	Ljudsko telo ne registruje.
1 mA do 8 mA	Oseća se strujni udar bez bola.
8 mA do 15 mA	Oseća se strujni udar uz bol.
15 mA do 20 mA	Bolni udar, grčenje mišića.
20 mA do 50 mA	Jako grčenje mišića, otežano disanje.
50 mA do 100 mA	Poremećaji unutrašnjih organa.
100 mA i više	Verovatna smrt.

Električni luk je pojava praćena visokom temperaturom, zaslepljujućom svetlošću, zvukom, isparenjima metala, legura i ostalih hemijskih jedinjenja. Svaka od ovih pojava može izazvati trenutna ili trajna oštećenja ljudskih organa. Električni luk je pojava izazvana „kratkim spojem”, koji je neželjeno radno stanje električnih uređaja – osim kod izvora struje za elektrolučne postupke zavarivanja [15].

Elektromagnetno polje nije štetno po čoveka ukoliko je izlaganje tom polju kratkotrajno. Međutim, uticaj elektro magnetnog polja je kumulativan i štetnost po ljudsko telo može da se uoči tek kasnije – nakon dostizanja praga zasićenosti ljudskog tela zračenjem.

Prilikom rada na električnoj opremi za zavarivanje neophodno je pridržavati se sledećih instrukcija [15]:

- Obavezno obučiti ljudstvo da se pridržava mera zaštite.
- Pročitati sva uputstva, natpise i priručnike za instaliranje pre upotrebe opreme, rada na opremi, ili održavanja opreme.

- Prilikom postavljanja ili održavanja opreme obavezno „razvezati” opremu sa mrežnog napona i osigurati da ne dođe do slučajnog uključivanja opreme. Rukovanje blizu priključka na mrežu (promena polarnosti, priključak otvorenog provodnika, popravka oštećenog provodnika) mora da obavi kvalifikovan i obučen električar.

- Opremu pravilno podesiti i uzemljiti. Što se tiče opreme za zavarivanje, najbolja sigurnosna mera je uzemljenje, kod koga su svi metalni delovi izloženi opasnosti (kod aparata za zavarivanje to je kućište) povezani provodnikom velikog preseka, kojim se „struja greške” odvodi u zemlju. Pored uzemljenja, zaštitna mera je i tzv. „nulovanje” i upotreba zaštitnog voda. Zaštitna izolacija uređaja za zavarivanje (izrada kućišta i drugih provodnih delova u slučaju greške, od elektro-neprovodnog materijala) je način osiguranja od električnog udara bez upotrebe zaštitnog voda. Ista funkcija se postiže zaštitnim odvajanjem, primenom transformatora za odvajanje, koji ima zadatak da stvori strujno kolo potpuno izolovano od mreže i zemlje.

- Izvori struje za zavarivanje ne smeju biti u skućenom nepreglednom prostoru gde ima električne provodljivosti.

- Ne dodirivati delove pod naponom!

- S vremena na vreme proveriti „ogoljenost” provodnika elektrine struje. Oni uvek moraju biti sa izolacijom. Ukoliko je došlo do oštećenja izolacije, obavezno zameniti provodnik.

- Ne upotrebljavati pohabane, poddimenzionisane, neodgovarajuće provodnike za pištolje ili gorionike za zavarivanje.

- Ne umotavati provodnik pod naponom na bilo koji deo tela.

- Ne dodirivati elektrodu pod naponom golim rukama.

- Nositi suve, neoštećene zaštitne rukavice (izolacione) koje su u dobrom stanju kao i zaštitnu odeću i obuće od materijala koji nije provodnik struje. Zakopčano i suvo odelo štiti od neposrednog kontakta sa strujom.

- Kada se zavaruje uz visoku opasnost od

struje, izolovati se od radnog komada i od zemlje suvim izolacionim prostirkama ili prekrivkama dovoljno velikim da spreče bilo kakav fizički kontakt sa komadom ili zemljom; nositi elektroizolacionu obuću u dobrom stanju.

- Držač elektrode mora biti izolovan. Ne kvasiti držač radi hlađenja, ne ostavljati ga na provodne površine ili na radnu površinu.
- Obavezno koristiti zaštitnu opremu za sprečavanje pada ukoliko se radi na visini.
- Kada se prekida rad, uređaj za kontakt elektrode i „nula” moraju biti na izolovanom

mestu.

- Isključiti svu opremu kada se ne koristi. Isključiti opremu sa mrežnog napona u slučaju da se oprema neće koristiti duže vreme ili ako se neko vreme ostavlja bez nadzora.
- Opremu za rad redovno održavati.
- Osobe koje nose pejsmejker, ili neki drugi elektronski uređaj bitan za životne funkcije, moraju se uputiti na konsultacije sa lekarom da bi se utvrdilo da li postoji povećana opasnost za njih ukoliko se nalaze u blizini električne opreme za zavarivanje.

LITERATURA

- [1] <https://sr.wikipedia.org/wiki/Електротехника> (dokument pregledan 15.02.2017);
- [2] Viktor Pinter: Osnove elektrotehnike, knjiga prva, Tehnička knjiga, ISBN 953-172-005-3, Zagreb, 1994;
- [3] John Henderson: Electrotechnics, ISBN 78-1246283655Nabu Press, 2011;
- [4] Alan Sheldrake: Handbook of Electrical Engineering, John Wiley and Sons, ISBN 0-471-49631-6, England, 2003;
- [5] Milan Božić: Pregled istorije i filozofije matematike, Beograd: Zavod za udžbenike i nastavna sredstva. ISBN 978-86-17-10124-2, 2002;
- [6] S. Tešić, D. Vasiljević: Osnovi elektronike, Građevinska knjiga, ISBN: 9788639505721, 2009;
- [7] Branko Dokić: Energetska elektronika – pretvarači i regulatori, Akademska Misao, ISBN: 86-7122-021-4, Beograd, 2007;
- [8] Jasna Radulović: Elektrotehnika sa elektronikom, ISBN 86-80581-89-5, Mašinski fakultet Kragujevac, Kragujevac, 2011;
- [9] Howard Cary, Scott Helzer: Modern Welding Technology, 6th Edition, ISBN 978-0131130296, Prentice-Hall, USA, 2003;
- [10] https://sr.wikipedia.org/wiki/Фарадејев_закон_електромагнетске_индуkcije (dokument je pregledan 12.02.2017);
- [11] https://sh.wikipedia.org/wiki/Lencov_zakon (dokument je pregledan 12.02.2017);
- [12] https://sr.wikipedia.org/wiki/Кирхофови_закони (dokument je pregledan 12.02.2017);
- [13] <https://en.wikipedia.org/wiki/Diode> (dokument je pregledan 12.02.2017);
- [14] Strategija bezbednosti i zdravlja na radu u Republici Srbiji za period od 2013. do 2017. godine, (dokument je pregledan 12.02.2017);
- [15] Pravilnik o opštim merama zaštite na radu od opasnog dejstva električne struje u objektima namenjenim za rad, radnim prostorijama na gradilištima, (dokument je pregledan 04.02.2017);
- [16] Miloš Ristić, Opasnosti i mere bezbednosti pri zavarivanju, predavanja, http://www.occush.vtsnis.edu.rs/aktivnost_5/kopex/4_opasnosti_mere_bezbednosti_na_radu_pri_zavarivanju.pdf (dokument je pregledan 12.02.2017);
- [17] Autorizovana predavanja na kursevima IWE na Mašinskom fakultetu Niš, 2008-2017.

4 ELEKTRIČNI LUK

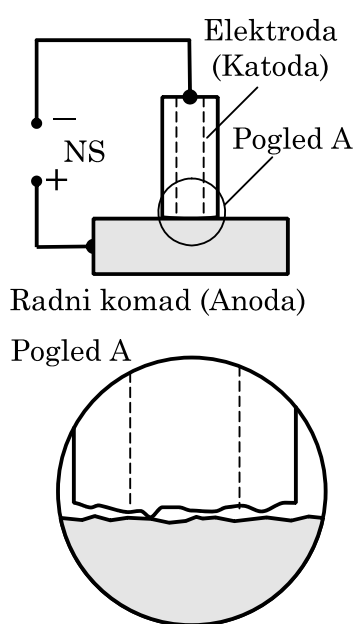
Električni luk predstavlja poseban vid električnog pražnjenja u gasu čije su osnovne osobine velika gustina struje, gasna jonizacija i termički procesi [1]. U prirodi električni luk predstavlja nestabilno stanje koje se relativno brzo po uspostavljanju stabilizuje i nestaje te takav prirodni električni luk nije upotrebljiv za tehničke potrebe. Za potrebe zavarivanja električni luk se uspostavlja i održava uz pomoć odgovarajućih električnih uređaja [2].

4.1 Fizika električnog luka

Da bi se razumeo električni luk, neophodno je poznavati uslove uspostavljanja električnog luka, princip jonizacije gasa, zone električnog luka itd.

4.1.1 Uspostavljanje električnog luka

Proces nastajanja, odnosno, uspostavljanja električnog luka biće objašnjen na primeru ručnog elektro-lučnog postupka zavarivanja obloženom elektrodom ISO 4096 — 111, poznatijeg kao REL postupak zavarivanja [3].



Slika 4.1 Realni kontakt elektrode i radnih komada pri uspostavljanju električnog luka

Kako su realne površine, i elektrode i radnih komada, grube – sa brojnim mikro i makro neravninama, inicijalni kontakt između elektrode i radnih komada se događa preko relativno malo tačaka, odnosno, po relativno maloj kontaktnoj površini [4]. Struja koja protiče preko ovakvog kontakta je „zgusnuta” a usled električne otpornosti na kontaktima dolazi do zagrevanja materijala anode i katode. Povišenje temperature na kontaktu je toliko drastično da dolazi do gotovo trenutnog topljenja materijala i na katodi i na anodi a deo rastopljenog materijala odmah isparava. Kako između katode i anode vlada jako električno polje, valentni elektroni iz isparenih atoma bivaju iščupani i povučeni ka anodi dok pozitivni joni kreću ka katodi. Sudari elektrona i anode, sudari pozitivnih jona i katode, kao i sudari neutralnih atoma gasa iz okoline sa pokrenutim jonima i elektronima, dodatno zagrevaju površine anode i katode što nastavlja topljenje i delimično isparavanje materijala te se ciklus nastavlja dalje [2, 4, 5]. Tako je uspostavljena „kontaktno-gasna” električna veza između katode i anode – pojavljuje se električni luk i električna struja gotovo nesmetano teče kroz „kolo”.

Kontrolisanim udaljavanjem katode (elektrode) od anode (radnih komada) na odgovarajuće rastojanje, prekida se fizički kontakt čvrstog materijala anode i katode ali se ne prekida protok električne struje. Električna struja teče kroz gas koji razdvaja anodu i katodu (u ovom slučaju je to vazduh), zagreva elektrodu i radne komade, topi ih a njihove rastopine se mešaju i deponuju na odgovarajućem mestu. Hlađenjem ove „mešavine metala” nastaje metal šava, odnosno, monolitni – zavareni spoj.

Uspostavljanje električnog luka praćeno je jonizacijom gasa koji okružuje anodu i katodu. Istovremeno, jonizacija gasa je jedan od uslova gorenja električnog luka. Uspešno zavarivanje električnim lukom predstavlja uspešno održavanje električnog luka [6].

Oprema za uspostavljanje električnog luka pri zavarivanju mora da bude bezopasna po ljude pri stacionarnim režimima rada dok u svim drugim slučajevima mora da dovede do trenutnog isključenja električnog napajanja. Standard SRPS EN 60974-3:2015: Oprema za elektrolučno zavarivanje – Deo 3: Uređaji za uspostavljanje i stabilizaciju luka¹ daje objašnjenja kako oprema koja uspostavlja električni luk mora bezbedno da funkcioniše [7].

4.1.2 Jonizacija gasa

Materijal u gasovitom agregatnom stanju je u opštem slučaju elektro-neutralan oblik materije i kao takav, gas nema značajnije električne ili magnetne osobine. Čestice gasa (atomi, molekuli, joni, elektroni itd.) ispunjavaju zapreminu dostupnog prostora i neprekidno se kreću, međusobno se sudaraju, menjaju svoje mikro-makro konfiguracije, ali su, posmatrani kao električna celina – u ravnoteži [1, 6]. Dovođenje energije gasu ima za posledicu povećanje srednje brzine kretanja čestica gasa koje počinju intenzivnije da se kreću, noseći sve više (kinetičke) energije. Sa povećanjem intenziteta i brzine kretanja počinju masovniji sudari čestica gasa. Njihovi sudari su, u početku, elastični (sudari čestica koji se javljaju u običnom gasu i pri tom ne dolazi do bilo kakvih procesa među česticama niti se javljaju trajne promene konfiguracije samih čestica) ali sa daljim povećanjem srednje energije čestica, sudari postaju neelastični. Neelastični sudari su praćeni promenama samih čestica koje se sudaraju i prelazom velike količine kinetičke energije sa jedne čestice na drugu [6].

Dominantan oblik neelastičnih sudara u gasu jeste jonizacija atoma gasa. Jonizacija je proces pri kome u sudaru dva atoma, ili elektrona/pozitivnog jona i atoma dolazi do otkidanja (izbijanja) elektrona iz valentne ljuske atoma te od elektro-neutralnog atoma nastaju jedan elektron i jedan pozitivan jon. Da bi do otkidanja elektrona došlo, neophodno je da makar jedan od objekata u

sudaru poseduje energiju koja je veća nego što je to energetska barijera atoma gasa. Ta energija se naziva energijom jonizacije posmatranog gasa – to je količina energije koju je potrebno dovesti u orbitu atoma kako bi bilo moguće da se je dan valentni elektron izmesti iz orbite u beskonačnost. Za najveći broj gasova energija aktivacije je bliska vrednosti od 10 eV^2 , što odgovara srednjoj energiji termičkog kretanja atoma gasa na temperaturi od $116045,05 \text{ K}$ (koja se često zaokružuje na 10^5 K), pa se zbog toga jonizacija usled neelastičnih sudara atoma naziva *termičkom jonizacijom* [6].

Termička jonizacija neutralnog, realnog gasa se dešava na temperaturama mnogo nižim od 10^5 K jer u gasu uvek postoji izvestan broj atoma, koji su, recimo, pod dejstvom pritiska, u gotovo pobuđenom stanju, te oni mogu lako da pokrenu proces jonizacije. Međutim, tada je stepen jonizacije gasa veoma mali te je neophodan novi uzrok nastanka neravnoteže među česticama [6].

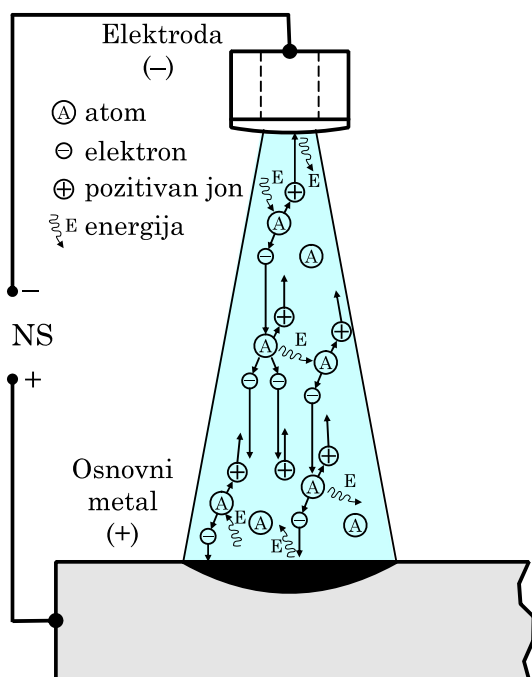
U postojećim uslovima na Zemlji je gotovo neizvodljivo formiranje stabilnog jonizovanog gasa posredstvom termičke jonizacije. Jonizovanje gasa se u zemaljskim uslovima izvodi iniciranjem sudara neutralnih atoma gasa sa slobodnim elektronima ili fotonima sa visokim nivoom energije. Nakon pokretanja procesa jonizacije, čestice se nadalje elastično ili neelastično sudaraju i ti sudari izazivaju prateće elementarne procese između čestica. Kod zavarivanja, uzrok ove pobude je jako električno polje između katode i anode koje privlači elektrone i pozitivne jone. Zbog toga je održavanje električnog luka moguće samo dok je električno polje prisutno i dovoljno jako da savlada prag jonizacije – potencijal jonizacije.

Dok traje proces termičke jonizacije javlja se i inverzna pojava – dejonizacija. Dominantni procesi dejonizacije su rekombinacija i difuzija (zahvat elektrona). Rekombinacija je neelastičan sudar elektrona i pozitivnog jona pri kome jon „zarobljava” elektron u svojoj valentnoj orbiti i pri tom

¹ Identičan sa: EN 60974-3:2014 CLC/TC 26A

² $1 \text{ eV} = 1.602 \cdot 10^{-19} \text{ J}$.

formira jedan neutralni atom. Atomi pojedinih gasova imaju izraženu tendenciju „hvatanja” elektrona te se tako ti atomi pretvaraju u negativan jon. Tokom zahvata prekomernog elektrona, atom se oslobađa viška energije koju je primio sa elektronom, što se odlikuje povišenjem temperature gasa ali i daljim aktiviranjem procesa među česticama u jonizovanom gasu [6].



Slika 4.2 Šematski prikaz procesa izazvanih neelastičnim sudarima tela

Na slici 4.2 je šematski prikaz procesa izazvanih neelastičnim sudarima tela koji dovode do jonizacije gasa i gorenja električnog luka pri zavarivanju.

Tokom zavarivanja (bez obzira na fizičke uslove koji vladaju u gasu i ukoliko nema promene električnog polja) vrlo brzo nakon uspostavljanja električnog luka, uspostavlja se stacionarno stanje – dinamička ravnoteža između termalne jonizacije i dejonizacije. U takvom stanju je broj pojava jonizacije jednak (ili blago veći) broju pojava rekombinacije te se koncentracija jonizovanih atoma suštinski ne menja tokom vremena i električni luk trajno gori.

4.1.3 Energija jonizacije/potencijal jonizacije

Energija jonizacije ili potencijal

jonizacije je količina energije koju treba dovesti atomu gasa³ da bi bilo moguće da se jedan elektron iz njegove orbite odvede na beskonačno veliko rastojanje od atoma [6].

Energija jonizacije opada sa povećanjem rednog broja grupe elementa a raste za elemente sa leva na desno u periodu Mendeljejevog sistema elemenata. Ovo je suprotno od trenda povećanja atoma: elektroni kod atoma sa manjim jezgrima se teže odvajaju od atoma nego kod atoma sa većim jezgrima [1, 6].

Energija jonizacije je najmanja za uklanjanje prvog elektrona iz atoma i naziva se prvom energijom jonizacije. Za uklanjanje drugog elektrona iz atoma (koji je sada pozitivan jon) potrebno je značajno više energije i ona se naziva drugom energijom jonizacije.

Tabela 4.1 Energije jonizacije pojedinih gasova [6]

Element	Energija jonizacije po redosledu elektrona [eV]						
	1	2	3	4	5	6	7
H	13,6						
He	24,6	54,4					
N	14,5	29,6	47,4	77,5	97,9	552,1	667,0
O	13,6	35,1	54,9	77,4	113,9	138,1	739,3
Ar	15,8	27,6	40,7	59,8	75,0	91,0	124,3

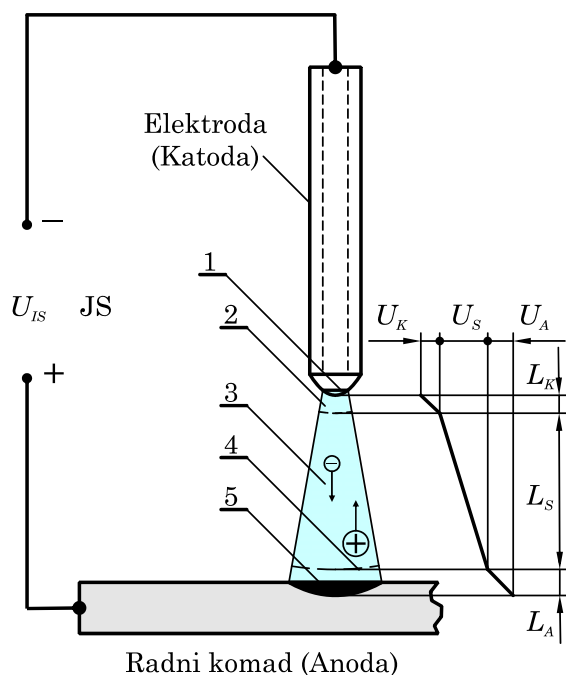
U tabeli 4.1 prikazane su energije jonizacije pojedinih gasova koji se nalaze u atmosferi zavarivanja.

Energija jonizacije je fizičko-hemijski parametar koji je najodgovorniji za uspostavljanje i održavanje električnog luka. Ona zavisi od temperature, pritiska, vlažnosti i čistoće gasa koji se jonizuje [1, 4, 6].

4.1.4 Osnovne zone električnog luka

Električni luk ima tri karakteristične zone koje se međusobno veoma razlikuju (slika 4.3): katodnu zonu, stablo električnog luka i anodnu zonu [1, 2, 4, 5].

³ Kod čvrstih tela i tečnosti energija jonizacije zavisi od uslova okoline i nije konstantna.



Slika 4.3 Zone električnog luka: 1) katodna mrlja, 2) katodna zona, 3) stablo električnog luka, 4) anodna zona, 5) anodna mrlja

Katodna zona (slika 4.3, pozicija 2) se nalazi uz negativni pol električnog luka (uz katodu) i odlikuje se ostrim padom napona po dužini zone (koja je približno jednaka $L_K \approx 1 \mu\text{m}$) [1]. Pad napona utiče na proces generisanja toplote u blizini katodne zone, pa se samim tim, padom napona određuje se brzina topljenja katode (koja je u ovom slučaju – elektroda). Katodnu zonu karakterišu jako električno polje, katodna mrlja, kao i temperatura od približno 3500°C . Katodna mrlja (slika 4.3, pozicija 1) je zatamnjeno područje na katodi odakle se emituje najveći broj elektrona ka unutrašnjosti električnog luka. Površina katodne mrlje je veličine 10^{-15} m^2 za REL postupak zavarivanja [1].

Stablo električnog luka (slika 4.3, pozicija 3) predstavlja zonu visoko jonizovanog gasa, odnosno, zonu plazmenog stanja materije kroz koju se kreće najveći broj naelektrisanih čestica [1, 4-6]. Ovo je zona slabijeg električnog polja u odnosu na katodnu zonu. Dužina stabla električnog luka predstavlja vidljivu dužinu električnog luka $L_{EL} \approx L_S$. Toplota koja nastaje u stablu električnog luka minimalno utiče na topljenje materijala katode i anode iako dostiže i

6000°C kod REL postupka [1].

Anodna zona (slika 4.3, pozicija 4) se nalazi u blizini anode i ona je šira od katodne zone (anodna zona je široka $L_A = 3 \mu\text{m} - 5 \mu\text{m}$). Kako se najveći broj elektrona iz električnog luka zaustavlja u anodnoj zoni, osnovne odlike zone su jako električno polje i oštar pad napona. I električno polje i pad napona u anodnoj zoni su nešto slabiji nego u katodnoj zoni). Mesto „ponora” elektrona u anodnoj zoni naziva se anodnom mrljom (slika 4.3, pozicija 5) i na tom mestu temperatura dostiže 4200°C . Ona je po površini veća od katodne mrlje (10^{-11} m^2 za REL postupak) i tamne je boje. Međutim, za razliku od katodne mrlje, anodna mrlja nije konstantnog oblika i lokacije. Usled udaraca atoma o anodu, na mestu anodne mrlje oslobađa se značajna količina energije koja se pretvara u toplotu kojom se topi materijal anode. Sa promenom agregatnog stanja dela materijala anode, anodna mrlja se seli na deo anode koji je u čvrstom agregatnom stanju [1, 2].

4.1.5 Raspodela napona duž električnog luka

Raspodela napona duž električnog luka zavisi od materijala katode i anode, gasa u kome se uspostavlja električni luk, napona i jačine struje izvora zavarivanja itd.

Elektroda, radni komadi i izvor električne struje, sa uspostavljanjem električnog luka predstavljaju prosto, zatvoreno električno kolo (slika 4.3) gde važi jednačina o očuvanju napona:

$$U_{IS} = U_K + U_S + U_A \quad (1).$$

gde su: U_{IS} – napon od izvora električne struje, U_K – pad napona u katodnoj zoni, U_S – pad napona u stablu električnog luka, U_A – pad napona u anodnoj zoni.

U tabeli 4.2 prikazane su vrednosti pada katodnog i anodnog napona za pojedine materijale anode i katode i za pojedine gasne sredine.

Tabela 4.2 Vrednosti katodnog i anodnog napona za pojedine materijale i gasne sredine [4]

Materijal	Jačina	Gas	Pad napona	Pad napona
-----------	--------	-----	------------	------------

katode	anode	električne struje I [A]		na katodi U_k [V]	na anodi U_a [V]
Fe	Fe	100-200	vazduh	12-17	6-9
Cu, Al	Cu, Al			12-14	10-11
Fe	Fe	200-250	vazduh	13-13,5	7-8
Cu, Al	Cu, Al			13,5-15	8,5-11
Fe	Fe	150-250	Ar	8,3-8,7	2,3-3,2
Fe	Fe	100-250	CO ₂	7,5-9	1,2-3,3

Ukoliko se zna koliki je napon izvora električne struje, znajući padove napona na katodi i anodi, lako se preko jednačine 1 određuje pad napona u stablu električnog luka.

4.1.6 Opšti kriterijum gorenja i stabilnosti električnog luka

Da bi električni luk nastao, neophodno je da je broj naelektrisanih čestica koje nastaju u prostoru između anode i katode ($n_{nastajanje}$) veći od broja naelektrisanih čestica koje nestaju ($n_{nestajanje}$) tokom perioda vremena [1, 2, 4]:

$$\frac{dn}{dt} = \frac{dn_{nastajanje}}{dt} - \frac{dn_{nestajanje}}{dt} > 0 \quad (2).$$

Stacionarno gorenje električnog luka obezbeđeno je kada je

$$\frac{dn}{dt} = 0 \quad (3)$$

dok se električni luk gasi ukoliko je:

$$\frac{dn}{dt} < 0 \quad (4).$$

Detaljnija objašnjenja stabilnosti, uslova gorenja i statičke karakteristike električnog luka pri zavarivanju odgovarajućim postupcima biće data u narednim poglavljima.

4.1.7 Regulacija električnog luka

Pri zavarivanju, električni luk mora da bude stabilan, odnosno, ukoliko je jačina struje konstantna, električni luk mora da bude konstantne dužine. Da bi se ostvarila konstantnost električnog luka, dodatni materijal mora da se dodaje u zonu zavarivanja/tečno kupatilo istom brzinom kojom električni luk topi elektrodu [1, 2].

Kod ručnih elektrolučnih postupaka

zavarivanja gde čovek dodaje elektrodnu žicu, regulaciju električnog luka vrši čovek, podešavanjem dužine luka po svom osećaju. Kod elektrolučnih postupaka gde se dovod dodatnog materijala vrši automatski, regulacija električnog luka može biti spoljašnja ili unutrašnja [5].

Spoljašnja regulacija podrazumeva da se dužina električnog luka podešava promenom napona električnog luka. Povećanje dužine električnog luka izaziva povećanje napona električnog luka, pa se povećava i brzina dovođenja dodatnog materijala. Smanjenjem dužine električnog luka, smanjuje se napon električnog luka, što dovodi do smanjenja brzine dovođenja dodatnog materijala. U oba slučaja, jačina struje trpi malu promenu što znači da izvor ima strm (opadajuću) strujno-naponsku karakteristiku [5]. Ovakav vid regulacije primenjuje se kod postupaka zavarivanja sa brzinama dovođenja materijala koje su manje od 4 m/min, što je slučaj kod EPP, REL) i često se naziva „naponskom regulacijom” [4].

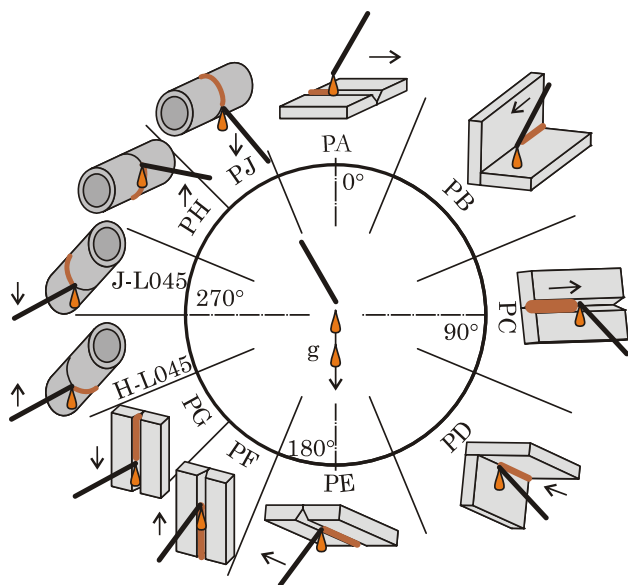
Kod unutrašnje regulacije električnog luka, napon električnog luka mora da bude konstantan u nekom rasponu promene jačine električne struje. Ukoliko dođe do povećanja dužine električnog luka, napon električnog luka počinje da raste a izvor električne struje davaće struju manje jačine čime će se umanjiti brzina topljenja dodatnog materijala. Konstantni dovod dodatnog materijala dovešće do stabilizacije dužine električnog luka [2]. Kod ovog tipa regulacije, mala promena električnog napona dovodi do velike promene jačine električne struje te se često naziva i „strujnom regulacijom”. Ovakav vid regulacije se susreće kod MIG/MAG postupaka zavarivanja za brzine zavarivanja veće od 2 m/min [4].

4.1.8 Sile u električnom luku

Posmatrano iz ugla zavarivanja, sve sile koje nastaju i dejstvuju u električnom luku imaju uticaj na parametre električnog luka i na transport rastopljenog materijala sa vrha elektrode na radne komade. Iako više sila dejstvuje na električni luk, njihov uticaj na

električni luk i prenos materijala nije uvek jednoznačan niti istovetan [2].

Gravitaciona sila je uvek prisutna ali ona nema značajan i direktan uticaj na sam električni luk dok je njen uticaj na prenos materijala značajan. Gravitacija uvek deluje u istom pravcu i smeru pa njen uticaj na prenos rastopljenog materijala sa vrha elektrode u zonu zavarivanja može biti i pozitivan i negativan. Na primer, pri zavarivanju u horizontalnom položaju (PA), sila gravitacije privlači kapljice rastopljenog materijala direktno u zonu zavarivanja dok pri zavarivanju u nadglavnom položaju (PE) gravitacija privlači rastopljeni materijal u smeru suprotnom od željenog smera deponovanja materijala (slika 4.4).

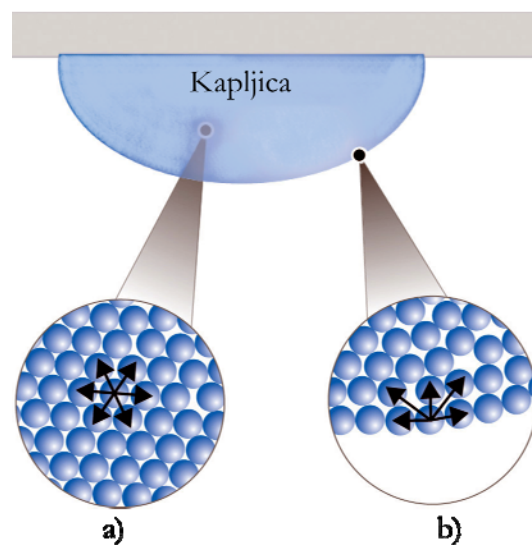


Slika 4.4 Uticaj gravitacione sile na prenos materijala pri zavarivanju u različitim položajima

Iako značajan, uticaj gravitacione sile na prenos materijala u električnom luku nije najveći – da nije tako, zavarivanje delova u nadglavnom položaju ne bi bilo moguće. Gravitaciona sila se određuje kao proizvod mase i ubrzanja zemljine teže.

Površinski napon⁴ je težnja materije u tečnom agregatnom stanju da zauzme najmanju moguću površinu na mestu kontakta sa vazduhom/atmosferom/gasom. Kako je sfera telo koje ima najmanji odnos površine i

zapremine, materijal u tečnom obliku pravi kapljicu – sferu (slika 4.5).



Slika 4.5 Površinski napon na kapljici: a) sile na atomima unutar kapljice, b) sile na atomima na obodu kapljice

Veze između atoma u kapljici su takve da suma međusobnih sila mora da bude jednaka nuli (sistem mora da bude u ravnoteži). Zbog toga atomi unutar kapljice formiraju zvezdasti sistem uravnoteženih sila (slika 4.5, a). Na obodu kapljice, poslednji red atoma nema u okolini atome sa kojima bi se uravnotežio već se formiraju jače poprečne veze među atomima u istom redu što izaziva zakrivljene površine kapljice sve do uspostavljanja ravnoteže među atomima. U ovom slučaju, međuatomske sile formiraju sistem u obliku poluzvezde (slika 4.5, b).

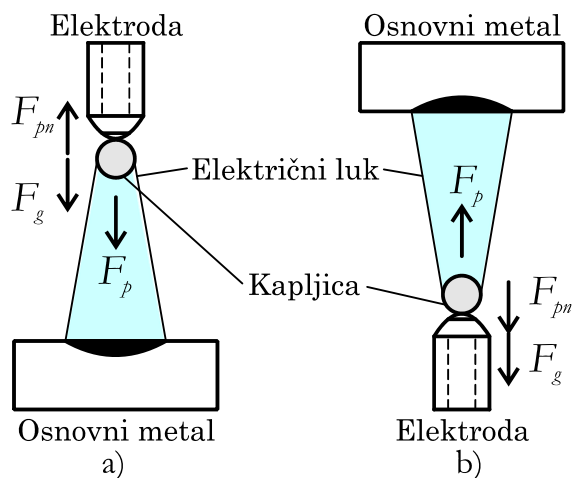
Površinski napon je najodgovorniji za formiranje kapljice tečnog metala i njeno odvajanje od ostalog metala.

Sila usled površinskog napona pokušava da zadrži kapljicu rastopljenog materijala uz nerastopljeni materijal i ona je ili suprotstavljena sili gravitacije ili sadejstvuje sa silom gravitacije. Na primer, pri zavarivanju u horizontalnom položaju, sila površinskog pritiska F_{pn} i sila gravitacije F_g deluju u suprotnim smerovima (slika 4.6, a).

Pri zavarivanju u nadglavnom položaju, sila gravitacije i sila od površinskog napona deluju u istom smeru (nepovoljno po zavarivanje). U ovom slučaju, sila od pritiska plazme, koja deluje od elektrode ka

⁴ Površinski napon ima jedinicu sile po dužini ili energije po površini (N/m ili J/m²).

osnovnom metalu, mora da savlada gravitaciju i silu od površinskog pritiska inače kapljica „pada” naniže i nema formiranja metala šava (slika 4.6, b).



Slika 4.6 Smer dejstva sile gravitacije, sile površinskog pritiska i sile pritiska plazme pri zavarivanju u a) horizontalnom položaju, b) nadglavnom položaju

Intenzitet sile usled površinskog napona zavisi od prečnika elektrode, veličine kapljice i od osobina rastopljenog materijala i nema uticaj na osobine električnog luka već ima uticaj samo na prenos materijala u električnom luku [2].

Sila usled dejstva pritiska plazme F_p je sila koja se javlja uvek u smeru od elektrode ka osnovnom metalu i ona uvek gura rastopljeni metal elektrode ka osnovnom metalu (slika 4.6). Do pojave ove sile dolazi usled usmerenog kretanja jonizovanog gasa u samom električnom luku („duvanje električnog luka”).

Sila koja nastaje usled kretanja naelektrisanih čestica u električnom luku predstavlja specifičan vid inercione sile koja ima uticaj i na električni luk ali i na prenos materijala u električnom luku. Intenzitet ove sile jednak je proizvodu mase naelektrisanih čestica i njihovog ubrzanja. Ova sila pomaže gorenje ili gašenje električnog luka zavisno od smera i intenziteta kretanja čestica, a u isto vreme, ova sila ili ubrzava ili usporava prenos materijala sa elektrode u tečno kupatilo.

Sila koja nastaje usled isparavanja atoma metala je specifičan vid termičke sile koja je uvek usmerena naviše, odnosno,

suprotno od gravitacione sile. U zavisnosti od položaja zavarivanja, ova sila pomaže ili otežava odvajanje rastopljene kapljice metala od elektrode.

Sila koja nastaje usled erupcije gasova u rastopljenom metalu je nekontrolisana, sa pravcem, smerom i intenzitetom koji nisu konstantni. Najčešće erupcije gasova nastaju pri hemijskim reakcijama kiseonika, vodonika, ugljenika i sl. Ova sila, u opštem slučaju, ne pomaže gorenje električnog luka niti pomaže prenos rastopljenog materijala. Zbog erupcije gasova, rastopljeni materijal se rasprskava u svim pravcima što nije dobro za nastajanje i kvalitet metala šava.

Protok električne struje kroz električni luk formira elektromagnetno polje oko i unutar električnog luka. Reakcija ovog polja i naelektrisanih čestica unutar njega dovodi do pojave **magnetne sile** koja pokušava da otkine deo elektrode (na granici rastopljenog i čvrstog metala). Ova sila umanjuje poprečni presek na prelazu elektrode i tečnog metala (kapljice) te tako pomaže odvajanje rastopljene kapljice od elektrode. U tehnologiji zavarivanja, umanjeње poprečnog preseka se naziva „pinč efekat”.

4.2 Generisanje toplote na katodi i anodi

Toplota koja se generiše na katodi i anodi je, u najvećoj meri, transformisana kinetička energija naelektrisanih čestica koje udaraju u anodu i katodu⁵. Oko 2/3 ukupne toplote generiše se na anodi dok se oko 1/3 ukupne toplote generiše na katodi [2]. Pozitivni joni su znatno sporiji od elektrona, a i masa im je višestruko veća nego masa elektrona. Kako je „brzinska” komponenta energije značajnija nego „masena” komponenta u energetske jednačini, količina energije oslobođena udarom elektrona je gotovo 2 puta veća nego energija udara

⁵ Anoda je pozitivno naelektrisana i u nju udaraju elektroni, a katoda je negativno naelektrisana i u nju udaraju pozitivni joni [1, 2, 4-6].

pozitivnih jona [1, 2].

Količina toplote koja se generiše na anodi i katodi definiše upotrebu tipa električne struje i polariteta. Na primer, pri zavarivanju netopivom elektrodom uz primenu jednosmerne struje, uglavnom je netopljiva elektroda katoda kako bi se smanjilo topljenje i sagorevanje same elektrode. Upotreba naizmenične struje, usled neprestane promene polariteta, dovodi do privida podjednagog generisanja toplote na radnim komadima i elektrodi, iako i tada važi princip 2:1 – odnos količine toplote generisane na anodi prema količini toplote generisanoj na katodi.

4.3 Polaritet i osobine električnog luka kod NS i JS električnog luka za osnovne elektrolučne postupke zavarivanja

Električni luk ima veliki uticaj na osobine zavarenog šava te se izboru odgovarajućeg električnog luka uvek daje posebna pažnja. Brojni su slučajevi da je neki materijal potpuno zavariv sa jednim karakteristikama električnog luka, dok se zavarivanjem električnim lukom sa drugim karakteristikama ne dobijaju nikakvi rezultati.

U opštem slučaju, zavisno od polariteta, razlikuje se tri tipa električnog luka:

- 1) Električni luk naizmenične struje (NS, ~, eng. AC)
- 2) Električni luk jednosmerne struje direktne polarnosti (JSDP, eng. DC–)
- 3) Električni luk jednosmerne struje indirektna (inverzne) polarnosti (JSIP, eng. DC+).

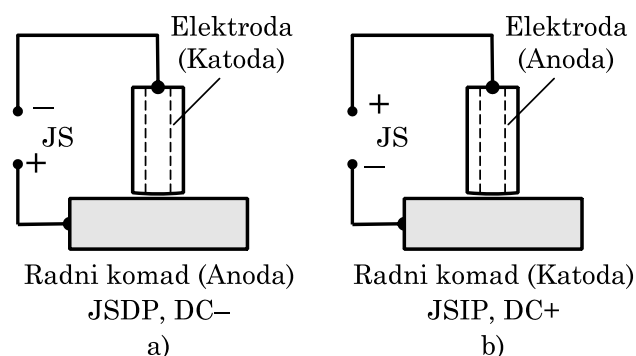
Električni luk naizmenične struje se uspostavlja između elektrode i radnih komada tako da se oba kraja električnog luka smenjuju po polaritetu (+ ili –) u skladu sa učestanošću električne struje te nije opravdano definisati elektrodu i radne komade kao stacionarnu katodu ili stacionarnu anodu. Pri korišćenju naizmenične struje za formiranje električnog luka, dolazi do gašenja i novog paljenja električnog luka prilikom svake promene

polariteta.

Primena jednosmerne električne struje zahteva da se jednoznačno definiše koja strana električnog luka je pozitivno naelektrisana a koja negativno. Zbog tog su moguća dva slučaja:

- elektroda je negativno naelektrisana (katoda) a radni komadi su pozitivno naelektrisani (anoda) i
- elektroda je pozitivno naelektrisana (anoda) a radni komadi su negativno naelektrisani (katoda)

Oba slučaja su prikazana na slici 4.7.



Slika 4.7 Jednosmerna struja a) direktne polarnosti, b) inverzne polarnosti

Tabela 4.3 Polaritet i karakteristike luka kod AC i DC struje za najkorišćenije postupke zavarivanja

Postupak zavarivanja prema ISO 4063 —...	Vrsta struje	Polaritet	Strujna karakteristika	Regulacija
111	NS/JS	NS JSIP JSDP	strma	spoljašnja
121			NS blagoopadajuća JS strma	spoljašnja, unutrašnja
131/135	JS	NS JSIP	ravna	unutrašnja
141	NS/JS	NS JSDP	strma, ravna	spoljašnja

Kada je elektroda negativno naelektrisana a radni komadi su pozitivno naelektrisani, uspostavlja se električni luk jednosmerne struje direktne polarnosti (JSDP ili DC– na eng.⁶). Kada je elektroda pozitivno naelektrisana a radni komadi su negativno naelektrisani, uspostavlja se električni luk jednosmerne struje indirektna polarnosti (JSIP

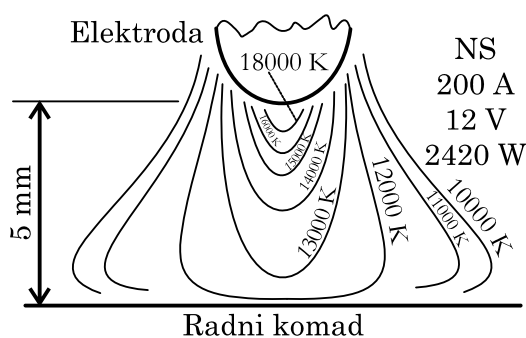
⁶ Eng. DC– Direct Current Negative.

ili DC+ na eng.7).

Svaki od navedenih tipova električne struje se koristi za zavarivanje kod pojedinih postupaka zavarivanja. U tabeli 4.3 prikazani su postupci zavarivanja, tipovi električne struje i polariteti koji se koriste, kao i način regulacije električnog napona.

4.4 Raspodela temperature u električnom luku i efekti

Povišena temperatura u električnom luku je posledica sudara čestica u električnom luku sa anodom i katodom, kao i posledica međusobnih sudara samih čestica. Temperature u električnom luku kod pojedinih postupaka dostižu red veličine 20000 K (slika 4.8).



Slika 4.8 Raspodela temperature pri zavarivanju REL postupkom naizmjeničnom strujom

Toplota dobijena u električnom luku se brzo odvodi iz zone zavarivanja: jedan deo toplote odlazi na elektrodu, drugi na osnovni metal a jedan deo u okolinu. Ova činjenica je osnovni uzrok topljenja osnovnog i dodatnog materijala.

Temperatura električnog luka kod REL postupka zavarivanja JS strujom dostiže mnogo nižu temperaturu od 20 000 K. U sredini električnog luka može biti 6000°C a u samoj zoni zavarivanja temperature dostižu 2500°C-5000°C [1, 2].

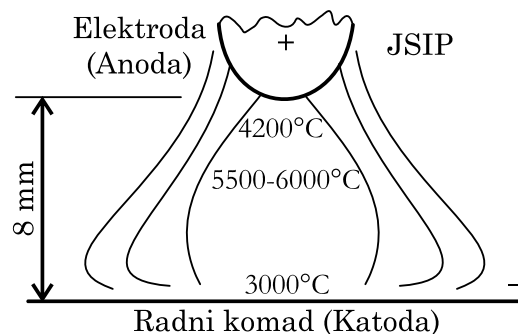
Na temperaturu i raspodelu temperature u električnom luku utiču:

- parametri zavarivanja i električnog luka (tip, jačina i polaritet električne struje, napon

električnog luka, prečnik elektrode),

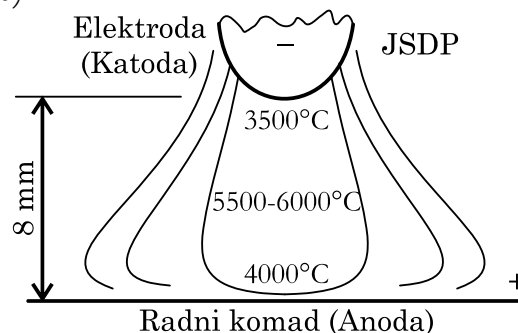
- parametri okoline (energija jonizacije gasova u kojima se uspostavlja električni luk, koeficijenti transporta toplote gasova, osnovnog i dodatnog materijala itd.)

Raspodela temperature zavarivanja zavisi od toga šta je katoda/anoda.



Slika 4.9 Raspodela temperature pri zavarivanju REL postupkom JSIP strujom

Temperatura je uvek nešto viša na anodi nego na katodi, bez obzira da li je JSIP (slika 4.9) ili JSDP polaritet električne struje (slika 4.10).



Slika 4.10 Raspodela temperature pri zavarivanju REL postupkom JSDP strujom

Jačina električne struje i napon imaju direktan uticaj na temperaturu električnog luka: povećanje ovih veličina povišava temperaturu električnog luka dok je smanjenje snižava.

Prečnik elektrode kojom se vrši zavarivanje ima obrnuti uticaj na temperaturu – ukoliko se zadrže jačina električne struje i napon konstantnim, povećanje prečnika elektrode dovodi do smanjenja gustine struje u električnom luku što za posledicu ima snižavanje temperature električnog luka.

Najveći nekontrolisani ili teško kontrolisani uticaj na temperaturu električnog luka imaju parametri gasova, odnosno,

⁷ Eng. DC+: direct current positive;

parametri okoline. Za razliku od parametara zavarivanja preko kojih čovek može direktno da utiče na temperaturu električnog luka, parametrima okoline se teško upravlja. Energija jonizacije gasa zavisi od hemijske i fizičke strukture gasa u kome se formira električni luk, vlažnosti itd. Bočno kretanje vazduha (vetar, promaja) utiče na stepen jonizacije gasa i samim tim snižava temperaturu električnog luka. Temperatura vazduha u okolini zone zavarivanja utiče na temperaturu elektrode i osnovnog metala, što utiče na električni luk i njegovu temperaturu⁸.

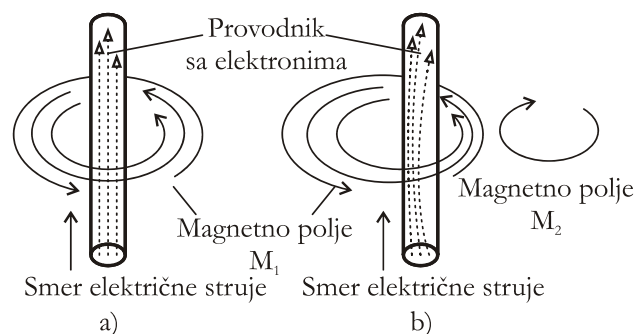
4.5 Uticaj magnetnih polja na električni luk

Magnetičnost, magnetizam, magnetna polja i pojava namagnetisanja su neizbežne pojave kod primene električne struje, te su samim tim, neizbežne pri zavarivanju električnom strujom. Uticaj magnetičnosti i magnetnih polja na postupak i rezultat zavarivanja su uglavnom negativni ili neutralni jer se pozitivni efekti uglavnom ne primećuju [1, 2].

Jedan od čestih uzroka pojave nesavršenosti (grešaka) kod zavarenih šavova od feromagnetnih materijala⁹ jeste pojava skretanja električnog luka usled magnetnog polja [1, 2].

Elektroni i joni u električnom luku se, u magnetno neopterećenoj sredini, kreću uniformno i pravolinijski – najkraćom putanjom od izvora ka ponoru. U prisustvu magnetnog polja, elektroni skreću sa pravolinijske putanje i kreću se po krivolinijskoj putanji u cilju uspostavljanja magnetne ravnoteže. To je osnovni uzrok

pojave skretanja električnog luka. Svi postupci zavarivanja koji koriste električni luk ili elektronski snop za spajanje materijala su podložni skretanju luka ili snopa usled dejstva magnetnih polja ali ne u istoj meri.



Slika 4.11 Magnetno polje oko provodnika

Na slici 4.11 je prikazan provodnik kroz koji protiče jednosmerna električna struja. Elektroni uniformno i najkraćom putanjom putuju kroz provodnik, a oko provodnika se formira stabilno magnetno polje M_1 . Ukoliko se provodniku približi telo koje nosi magnetno polje M_2 , dolazi do zakrivljenja putanja kretanja elektrona što dovodi do zgušnjavanja magnetnih linija i „zgušnjavanja” magnetnog polja M_1 ka opterećenju. Kako električni luk predstavlja svojevrsan vid provodne zone u gasu, pojava krivljenja putanje elektrona je prisutna i u električnom luku, ali, kako luk nije čvrsto telo (kao provodnik, koji ne može tako lako da se savije), električni luk se savija, odnosno, skreće u smeru suprotnom od smera spoljašnjeg opterećenja [1, 2].

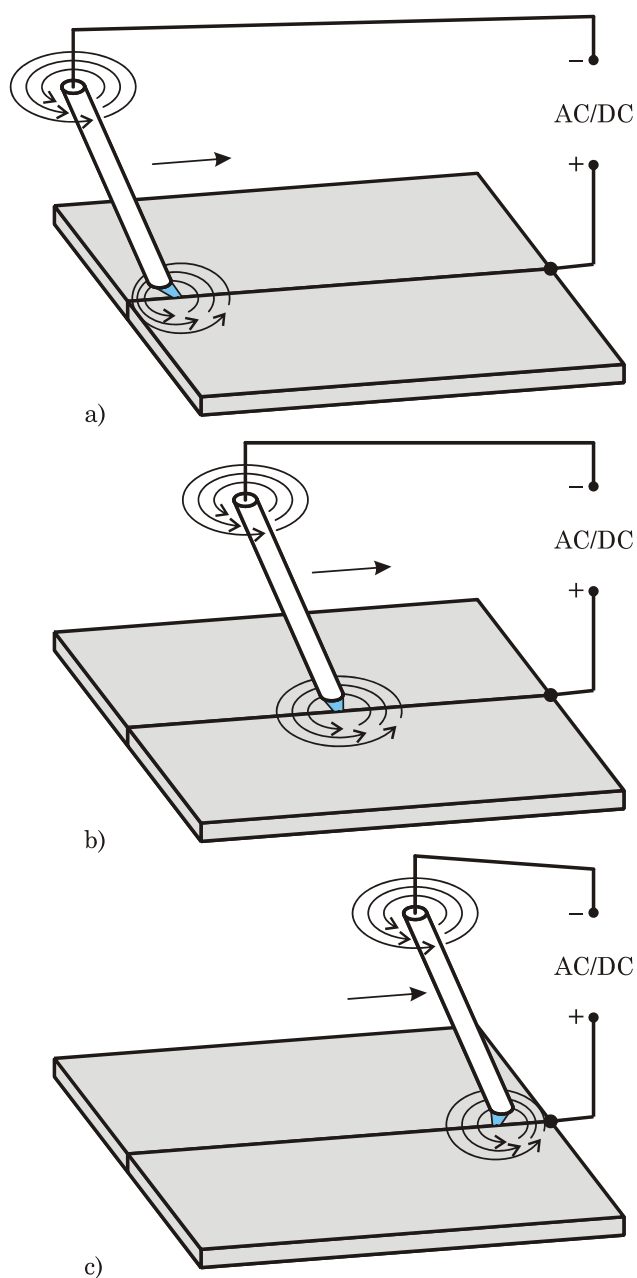
Magnetno opterećenje koje izaziva skretanje elektrona (električnog luka) može biti spoljašnje ili unutrašnje. Spoljašnje opterećenje izazivaju magnetna polja od električnih uređaja, stabilni magneti i sl. i njih je relativno jednostavno otkloniti iz zone zavarivanja. Unutrašnje magnetno opterećenje nastaje usled samoindukcije električnog luka, radnih komada i provodnika, feromagnetnih osobina materijala itd, i nije ga jednostavno ukloniti.

Zgušnjavanje magnetnog polja oko električnog luka je pojava koja ne mora uvek biti izazvana spoljašnjim magnetnim opterećenjima. Na primer, na početku i kraju

⁸ Zavarivanje se vrši ako temperatura vazduha nije niža od $+5^{\circ}\text{C}$. Ispod ove temperature se zavarivanje ne preporučuje a ukoliko mora da se izvede neophodno je predgrevanje materijala.

⁹ Materijali koji imaju izraženu magnetnu histerezisnu krivu usled dejstva spoljašnjeg namagnetisanja. Dejstvom spoljašnjeg magneta, feromagnetni materijali i sami postaju magneti. U feromagnetne materijale spadaju železo (gvožđe), kobalt, nikal, određene vrste nerđajućih čelika itd.

delova koji se zavaruju, dolazi do skretanja električnog luka u napred ili u nazad.

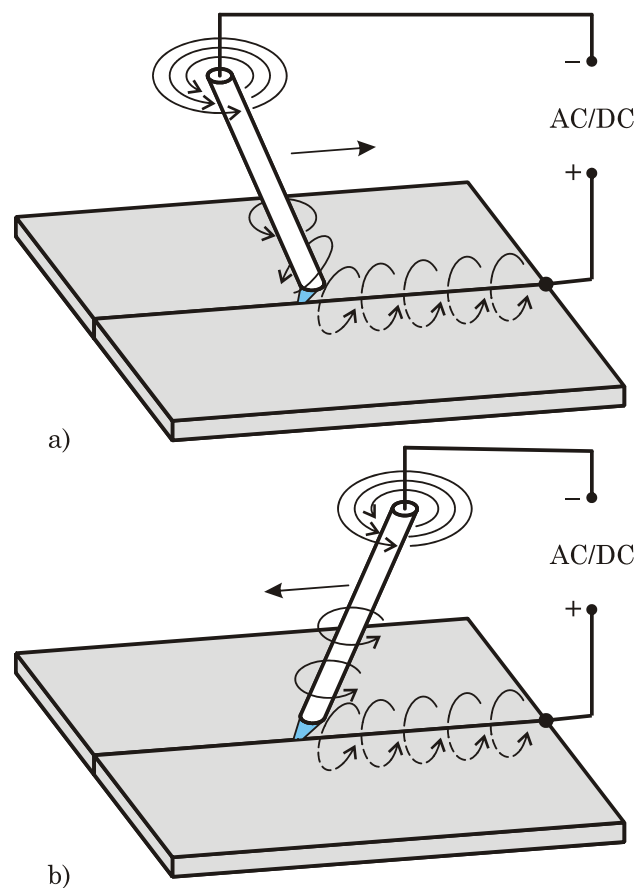


Slika 4.12 Magnetno polje oko elektrode i električnog luka na a) početku, b) sredini i c) na kraju

Magnetne linije koje se prostiru kroz materijal koji se zavaruje se prostiru po dubini materijala – na početku i na kraju delova nema materijala te se radi uspostavljanja ravnoteže, linije zgušnjavaju a luk skreće u suprotnom smeru.

Na slici 4.12 prikazano je skretanje električnog luka na početku, sredini i na kraju zavarivanja. Usled zgušnjavanja magnetnih linija na početku zavarivanja, električni luk skreće u smeru zavarivanja kako bi se

uspostavila dinamička ravnoteža. Na sredini zavarivanja se relativno stabilizuje magnetno polje i nema skretanja električnog luka. Pred kraj zavarivanja, magnetne linije se zgušnjavaju te luk skreće u nazad kako bi se uspostavila ravnoteža.



Slika 4.13 Magnetno polje oko elektrode i linije toka električne struje kroz radne komade pri zavarivanju a) ka izvoru struje, b) od izvora struje

Linija toka električne struje predstavlja dodatni izvor namagnetisanja koji dovodi do skretanja električnog luka. Bez obzira na činjenicu da li se smer toka električne struje poklapa sa smerom zavarivanja ili je suprotan (slika 4.13, a i b), električni luk skreće u smeru koji luk udaljava od izvora električne struje.

Pojedini postupci zavarivanja su osetljiviji na magnetno skretanje električnog luka od drugih. Na primer, TIG postupak zavarivanja je osetljiviji na skretanje luka od MAG, MIG ili REL postupaka zavarivanja zbog nižeg napona zavarivanja. Zatim, elektro-lučni postupak zavarivanja pod praškom (EPP) sa više žica je osetljiv na skretanje električnog luka zbog međusobnog

uticaja magnetnih polja.

U Tabeli 4.4 prikazan je uticaj gustine magnetnog fluksa, odnosno, jačine magnetne indukcije na pojedine postupke zavarivanja.

Tabela 4.4 Uticaj gustine magnetnog fluksa (magnetne indukcije) na pojedine postupke zavarivanja [2]

Postupak zavarivanja	Gustina magnetnog fluksa			
	0-10 G	10-20 G	20-40 G	>40 G
TIG	Normalno zavarivanje	Nestabilan luk	Magnetno skretanje luka	Značajno skretanje luka
REL	Normalno zavarivanje		Nestabilan luk	Magnetno skretanje luka
EPP	Normalno zavarivanje			Nestabilan luk

Primena JS struja za zavarivanje dovodi do uspostavljanja relativno stabilnih magnetnih polja oko i unutar radnih komada koji utiču na električni luk. Međutim, primena NS struja dovodi do pojave lokalnih vrtložnih struja u materijalu što dovodi do promenljivih i teško predvidivih magnetnih polja. Takva polja ipak, u sumi, imaju mali uticaj na električni luk.

Uopšteno posmatrano, električni luk

više skreće usled dejstva magnetnih polja ukoliko se elektroni kreću sporije nego obično, što je slučaj zavarivanja u hiperbaričnoj komori ili u atmosferi sa zaštitnim gasom na sniženoj temperaturi. Takođe, električni luk skreće prilikom zavarivanja nestabilnim lukom, prilikom zavarivanja slabijom strujom, usled magnetnog polja dolazi i prilikom lošeg pozicioniranja materijala, loših atmosferskih uslova (prilikom grmljavine, kada je vazduh veoma jonizovan), usled složenog oblika žleba itd [1, 2, 4-6].

Neke od osnovnih aktivnosti za umanjenje skretanja električnog luka usled magnetizma su:

- Razmagnetisanje radnih komada pre početka zavarivanja,
- Pravilan izbor mesta gde se dovodi električna struja,
- Pravilan izbor i priprema žleba za zavarivanje,
- Primena visokih struja (do granice tehnološke i bezbednosne prihvatljivosti),
- Primena NS struja.

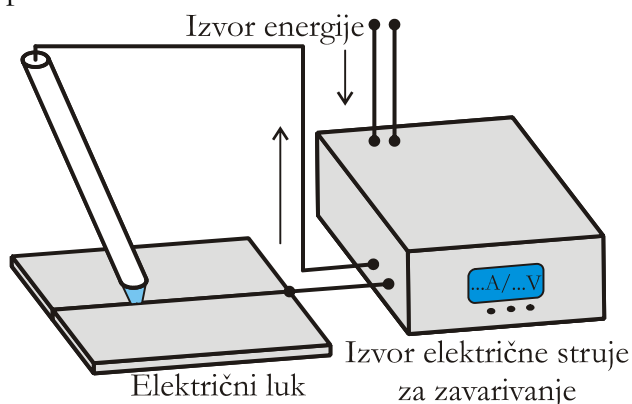
LITERATURA

- [1] Autorizovana predavanja na kursu za međunarodne inženjere zavarivanja IWE, Mašinski fakultet Niš, 2009-2017;
- [2] The James F. Lincoln Arc Welding: The Procedure Handbook of Arc Welding, 14th Edition, ASIN: B000FBCQ4M, 2015;
- [3] SRPS EN ISO 4063:2013 Zavarivanje i srodni postupci – Lista postupaka i njihovo označavanje, 28.01.2013;
- [4] Miomir Vukićević: Tehnologija spajanja materijala – Zavarivanje 1, ISBN 978-86-82631-73-6, Fakultet za mašinstvo i građevinarstvo u Kraljevu, 2014;
- [5] Milorad Jovanović, Dragan Adamović, Vukić Lazić, Nada Ratković: REL zavarivanje – priručnik, YU ISBN 86-80581-69-0, Mašinski fakultet Kragujevac, Srbija, 2005;
- [6] Božidar Milić: Osnove fizike gasne plazme, ISBN 86-395-0129-7, Građevinska knjiga, Beograd, 1989;
- [7] SRPS EN 60974-3:2015: Oprema za elektrolučno zavarivanje – Deo 3: Uređaji za uspostavljanje i stabilizaciju luka, 30.11.2009.

5 IZVORI ELEKTRIČNE STRUJE ZA ELEKTROLUČNE POSTUPKE ZAVARIVANJA

Izvori električne struje za elektrolučne postupke zavarivanja¹ predstavljaju električne uređaje kojima se radnom mestu za zavarivanje obezbeđuje neophodna količina energije kojom se vrši zavarivanje. Električna energija koju isporučuje izvor električne struje ima karakteristike koje su pogodne za zavarivanje [1, 2].

Izvor električne energije uglavnom nije samostalan po pitanju „proizvodnje” električne struje – on dobija energiju od nekog drugog izvora koju transformiše i isporučuje elektrodi u zoni zavarivanja kao električnu struju. Prema tome, izvor električne struje predstavlja vid posrednika između raspoložive energije i procesa zavarivanja [2]. Izvor električne struje, kao posrednik između energije i procesa zavarivanja, šematski je prikazan na slici 5.1.



Slika 5.1 Položaj izvora električne struje za zavarivanje u odnosu na električni luk i izvor energije

Od nastajanja elektrolučnih postupaka do današnjih dana, razvijen je veoma veliki broj izvora električne struje za zavarivanje [3].

Izvori struje za zavarivanje moraju da ispunjavaju zahteve propisane standardom SRPS EN 60974-1:2012: Oprema za elektrolučno zavarivanje – Deo 1: Izvori struje za zavarivanje² [4].

¹ U običnom govoru se izvor električne struje za zavarivanje naziva – aparat za zavarivanje.

² Identičan sa: EN 60974-1:2012 CLC/TC 26A.

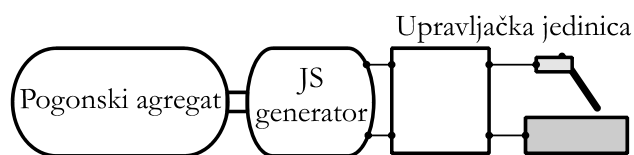
5.1 Klasifikacija izvora struje za elektrolučno zavarivanje

Osnovna podela izvora električne struje za elektrolučne postupke zavarivanja se vrši na osnovu tipa struje koju daju te postoje izvori jednosmerne i naizmenečne električne struje, ali postoje izvori koji daju i jedan i drugi tip struje, zavisno od potrebe [1-3].

U izvore jednosmerne električne struje spadaju električni generatori i električni ispravljači. U izvore naizmenečne struje spadaju transformatori i invertori, pri čemu invertori mogu proizvoditi i jednosmernu struju.

5.1.1 Električni generatori (Rotacioni pretvarači)

Električni generatori su najstarija vrsta izvora struje za zavarivanje sa komercijalnom primenom. Generator se sastoji od pogonskog agregata, generatora za proizvodnju jednosmerne struje i uređaja za regulaciju struje zavarivanja. Strukturna šema električnog generatora je prikazana na slici 5.2.



Slika 5.2 Strukturna šema električnog generatora [1, 2]

Pogonski agregat može da bude motor sa unutrašnjim sagorevanjem, elektromotor jednosmerne struje, asinhroni motor (naizmenečne) struje itd. Pri radu na terenu, najčešće se koristi motor sa unutrašnjim sagorevanjem zbog svoje mobilnosti. Izlazno vratilo pogonskog agregata je povezano sa vratilom generatora za proizvodnju jednosmerne struje gde se rotaciono kretanje

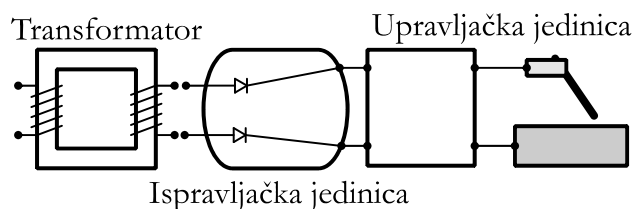
agregata pretvara u električnu energiju. Proizvedena jednosmerna električna struja se dovodi u uređaj za regulaciju struje i podešava na napon i jačinu struje pogodne za zavarivanje [1, 2, 5].

Električni generatori su vrlo jednostavni i pouzdani u radu, gotovo su neosetljivi na promene režima u radu (ukoliko je veza između agregata i generatora elastična, generator je neosetljiv na udare i preopterećenja do 10%), a zbog pokretljivosti pogonskog agregata su veoma prilagodljivi radu na terenu. Mane su im visoka cena održavanja, osetljivost na vremenske uslove (vlagu, temperaturu i sl.), nizak im je stepen korisnog dejstva i velika je buka koju stvaraju pri radu.

5.1.2 Električni ispravljači

Električni ispravljači za zavarivanje su uređaji koji ispravljaju naizmeničnu struju iz električne mreže u jednosmernu struju zavarivanja. Električni ispravljač se sastoji od transformatora, ispravljačke jedinice i uređaja za regulaciju struje zavarivanja. Naizmenična struja visokog napona (220 V ili 380 V) se u transformatoru pretvara u naizmeničnu struju nižeg napona (npr. 70 V) i kao takva se odvodi u ispravljačku jedinicu gde se, koristeći poluprovodničke komponente, pretvara u jednosmernu struju odgovarajućeg oblika. Uređaj za regulaciju struje zavarivanja na kraju podešava parametre dobijene struje za potrebe zavarivanja [1, 2, 5].

Na slici 5.3 prikazana je strukturna šema električnog ispravljača.



Slika 5.3 Strukturna šema električnog ispravljača [1, 2]

U funkcionalnom smislu, električni ispravljači mogu biti:

- Ispravljači za jednolučno zavarivanje (sa strmo-opadajućom i ravnom strujnom

karakteristikom),

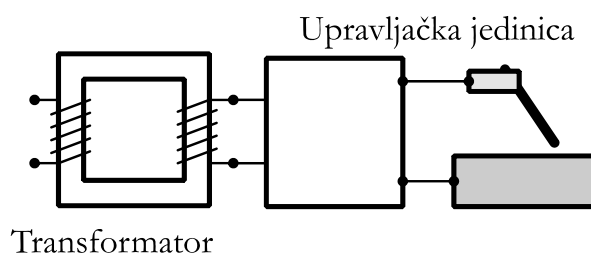
- Ispravljači za višelučno zavarivanje i
- Višenamenski ispravljači.

Ispravljači za jednolučno zavarivanje se najčešće koriste za snabdevanje električnom strujom jednog radnog mesta gde čovek zavaruje jednim električnim lukom. Ispravljači za višelučno zavarivanje mogu da snabdevaju više radnih mesta električnom strujom, ali na svakom radnom mestu se zavarivanje vrši samo sa jednim lukom. Višenamenski ispravljači imaju mogućnost snabdevanja više radnih mesta za zavarivanje kako sa jednim, tako i sa više električnih lukova [2].

Električni ispravljači su robusni i vrlo stabilni uređaji za snabdevanje radnog mesta za zavarivanje električnom strujom koji mogu da podnesu vrlo oštre režime rada, ali se odlikuju niskim stepenom korisnog dejstva, osetljivi su na pad napona i visoka im je cena održavanja.

5.1.3 Transformatori

Transformator je izvor struje za zavarivanje koji naizmeničnu struju visokog napona iz električne mreže transformiše u naizmeničnu struju niskog napona koja je pogodna za zavarivanje. Transformatorski izvor struje može da se sastoji samo od podesivog transformatora (koji može davati struje različitih parametara), ali može biti u kombinaciji sa upravljačkom jedinicom, kada se povećava broj ostvarivih kombinacija parametara struje zavarivanja. Strukturna šema transformatora, prikazan je na slici 5.4.



Slika 5.4 Strukturna šema transformatora sa upravljačkom jedinicom [2]

Regulisanje izlaznih parametara transformatora može da bude stepenasto, kontinualno ili kombinovano.

Transformator za zavarivanje je vrlo

robustan, daje stabilne parametre zavarivanja i nije preterano osetljiv na preopterećenje u radu. Poslednjih godina se transformatori sve ređe proizvode kao samostalni izvori struje za zavarivanje već u kombinaciji sa poluprovodničkim komponentama radi univerzalne primene. Transformatori imaju dobar stepen korisnog dejstva ali se odlikuju velikim dimenzijama što donekle otežava njihovu primenu u terenskim uslovima rada.

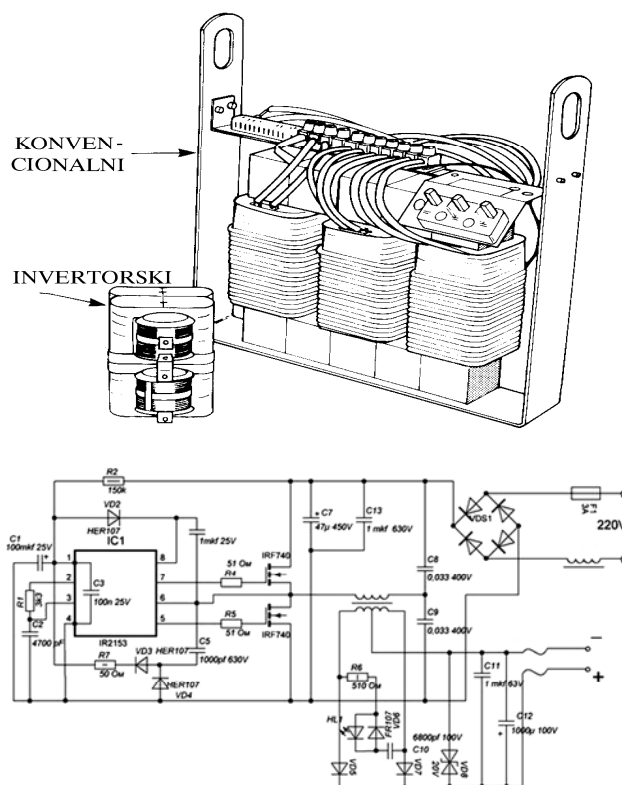
5.1.4 Invertori

Od sredine devedesetih godina dvadesetog veka započela je primena invertorskih uređaja kao izvora električne struje za zavarivanje. Osnovna razlika invertorskih izvora u odnosu na ostale izvore električne struje ogleda se u frekvenciji struje sa kojom rade: „klasični” uređaji rade na frekvencijama od 50-60 Hz dok invertorski rade na 20 000 Hz [1, 2, 5].

Invertori se sastoje od transformatora, ispravljača, poluprovodničkih komponenti a čitavim sklopom upravlja jedna ili više centralnih jedinica (računar u sklopu invertora). Takva elektronska struktura invertora omogućava da invertor transformiše naizmeničnu struju iz električne mreže u: naizmeničnu struju (pulsnog, kvadratnog, sinusoidalnog i sl. oblika, različitih osobina) ili u jednosmernu struju (konstantne ili promenljive jačine i napona, prekidnog ili kontinualnog režima itd.). U zavisnosti od složenosti arhitekture invertora, moguće je ostvariti različite opsege parametara zavarivanja, čime se širi opseg primene invertora na više različitih postupaka zavarivanja, različite debljine delova i položaje zavarivanja.

Invertori se odlikuju malim dimenzijama i masom, ali i visokom cenom. Održavanje invertora je vrlo pojednostavljeno – održavanje mora da vrši odgovarajući servis jer je električna struktura invertora veoma složena.

Na slici 5.5 prikazani su tipičan invertorski izvor električne struje za zavarivanje i njegova električna šema.



Slika 5.5 Ilustracija tipičnog invertora za zavarivanje (u poređenju sa konvencionalnim transformatorom) i njegova (strukturna) električna šema

Ovakav uređaj odlikuje se ograničenim brojem parametara zavarivanja koji mogu da se izaberu: tip električne struje i nekoliko različitih nivoa jačine struje. Strukturna (električna) šema kvalitetnijih invertora je znatno složenija, pa je samim tim i cena takvih uređaja viša.

5.2 Statičke karakteristike izvora struje i električnog luka

Svaki izvor električne struje za zavarivanje ima projektovani opseg radnih parametara. Osnovni zahtev je da izvor električne struje isporuči električnu struju kontrolisane jačine za propisani napon zavarivanja tokom projektovanog radnog ciklusa. Zavisnost napona i jačine struje koju isporučuje aparat za zavarivanje u stacionarnom stanju rada naziva se statičkom, strujnom karakteristikom ili strujno-naponskom karakteristikom izvora struje. Statička karakteristika izvora struje suštinski

predstavlja promenu napona u funkciji promene jačine struje zavarivanja i prikazuje se kao kriva na napon-jačina struje dijagramu ($U-I$) za svaki izvor struje za zavarivanje [1, 2, 5].

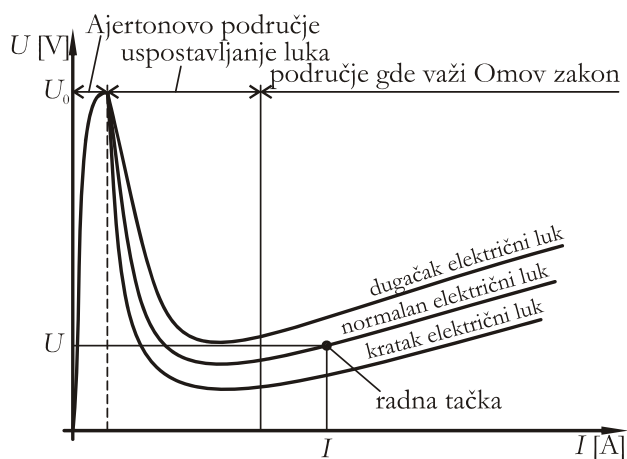
Sa druge strane, i električni luk ima svoju $U-I$ krivu i ona se naziva statičkom karakteristikom električnog luka a predstavlja zavisnost između napona i jačine struje zavarivanja pri stabilnom gorenju električnog luka u odgovarajućoj atmosferi [1, 2, 5].

U praksi se statička karakteristika izvora struje naziva spoljašnjom a statička karakteristika električnog luka unutrašnjom strujnom karakteristikom.

Stvarna statička karakteristika izvora struje određuje se merenjem [4].

Različiti postupci zavarivanja električnim lukom zahtevaju različite uslove zavarivanja i tako uslovljavaju izradu izvora struje za zavarivanje. Da bi se razumelo kako zahtevi postupka zavarivanja uslovljavaju izradu izvora struje za zavarivanje, neophodno je razumeti odnos osobina električnog luka i izvora električne struje.

Na slici 5.6 prikazane su statičke karakteristike električnih lukova različitih dužina. Napon U_0 predstavlja napon otvorenog kola (praznog hoda), odnosno, maksimalni napon koji izvor struje može da ostvari. Tada jačina struje koja teče kroz električni luk teži nuli. Kada je izvor struje „kratko spojen“, napon izvora struje je jednak nuli a kroz izvor protiče struja kratkog spoja I_0 .



Slika 5.6 Statička karakteristika električnog luka

Izvor električne struje može beskonačno dugo da radi pri naponu otvorenog kola ali samo kratko vreme bi smeo da radi u režimu kratkog spoja ukoliko nije specijalno konstruisan za takav režim rada.

Najveći napon u električnom luku jeste napon otvorenog kola izvora električne struje. Čim se uspostavi električni luk, napon električnog luka brzo pada jer gasovi u električnom luku postaju jonizovani, a samim tim, postaju provodni (Ajertonovo područje) [2]. Za to vreme se jačina električne struje povećava. Brzi pad napona se događa do trenutka kada zavisnost napona od jačine električne struje ne postane linearna, a samim tim bude ispunjen osnovni uslov Omovog zakona.

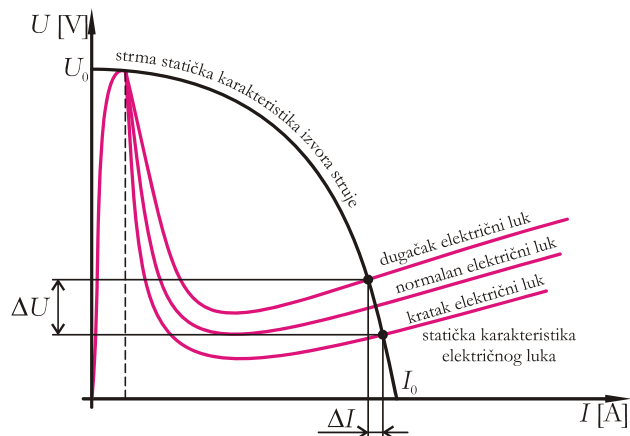
Važno je skrenuti pažnju da se sa promenom dužine električnog luka menjaju i napon i jačina električne struje: duži električni luk ima viši napon ali je prisutan pad jačine električne struje i obrnuto. Ova osobina električnog luka je važna za konstrukciju izvora struje za zavarivanje. Na primer, velika promena jačine električne struje je nepoželjna za REL i TIG postupke ali je veoma važna za MIG/MAG postupke.

Zbog toga se REL, TIG i EPP izvori struje proizvode sa strmom (opadajućom, strmoopadajućom) statičkom karakteristikom a MIG/MAG sa ravnom (konstantnom, položenom) statičkom karakteristikom. Kod većine novijih izvora struje moguća je izmena statičke karakteristike u skladu sa potrebama postupka zavarivanja.

Na slici 5.7 prikazana je statička karakteristika izvora struje opadajućeg karaktera (strma, strmoopadajuća ili sa konstantnom jačinom struje) koja se sreće kod REL i TIG izvora za zavarivanje. U crtane su statičke krive električnog luka za kratak, normalan i dugačak električni luk, takođe. Pri zavarivanju uređajem sa ovakvom karakteristikom, zavarivač ne može da održava dužinu električnog luka konstantnim³. Promena dužine električnog luka dovodi do male promene jačine električne struje i to: što

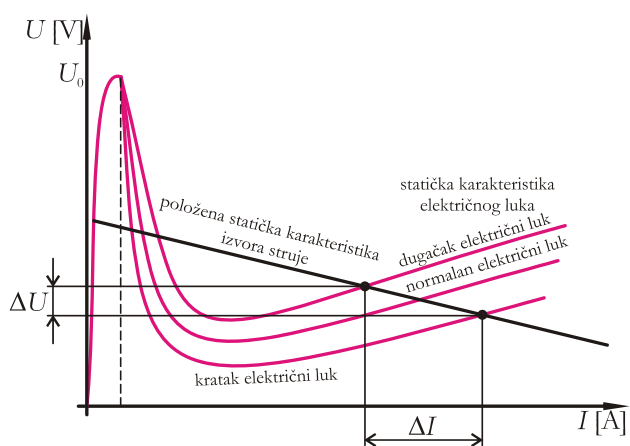
³ I REL i TIG postupak spadaju u grupu ručnih elektrolučnih postupaka zavarivanja.

je statička karakteristika strmija, to je promena jačine električne struje manja i proces zavarivanja je stabilniji. Najvažnije je da promena dužine električnog luka usled nekontrolisanog pomicanja ruke zavarivača nema preveliki uticaj na kvalitet šava [1, 2, 5].



Slika 5.7 strma statička karakteristika izvora električne struje (sa konstantnom jačinom struje)

Na slici 5.8 prikazana je položena (ravna, konstantna) statička karakteristika izvora struje koja je, kako je ranije napomenuto, veoma važna za MIG/MAG postupke zavarivanja. I ovde su prikazane statičke karakteristike dugačkog, normalnog i kratkog električnog luka u odnosu na statičku karakteristiku izvora struje.



Slika 5.8 Položena statička karakteristika izvora električne struje (sa konstantnim naponom)

Promena dužine električnog luka dovodi do manje promene napona električnog luka ali je promena jačine električne struje veća. Kod MIG/MAG izvora struje jačina električne struje se kontroliše brzinom dodavanja žice u zonu zavarivanja. Jačina struje zavarivanja

određuje kojom brzinom se topi žica i prenosi rastopljeni metal kroz električni luk u tečno kupatilo. Ako se električni luk produžava, opada jačina električne struje, opada i brzina topljenja žice, te opada i brzina dovodenja rastopljenog metala u tečno kupatilo. Pri padu jačine električne struje raste napon [1, 2, 5].

Ukoliko se električni luk skraćuje, dešava se obrnuti proces: napon opada ali raste jačina električne struje te se ubrzava proces topljenja žice, što dovodi do povećanja dužine električnog luka [1, 2, 5].

Skraćenje/produžavanje električnog luka i brže/sporije dodavanje žice kod MIG/MAG postupaka zavarivanja predstavljaju dva antagonistička procesa koji se uslovima procesa zavarivanja uravnotežavaju. Ovakvo ponašanje električnog luka naziva se samoregulacijom i uglavnom olakšava rad zavarivača [6].

5.3 Veza između statičke karakteristike izvora struje i postupka zavarivanja

Statička karakteristika izvora struje može biti:

- strma (strmoopadajuća, opadajuća),
- ravna (konstantna, linearna, položena) i
- rastuća.

Strma statička karakteristika izvora struje ima osobinu da promena dužine luka izaziva značajniju promenu napona nego jačine električne struje. Ova osobina izvora struje je povoljna za primenu kod „ručnih” postupaka zavarivanja kao što su REL i TIG, ali i kod EPP postupka zavarivanja žicama velike debljine (3 mm-5 mm) gde se događa brzo topljenje žice – skraćenje i produživanje električnog luka, te je neophodno zadržati jačinu električne struje u okviru projektovanih granica.

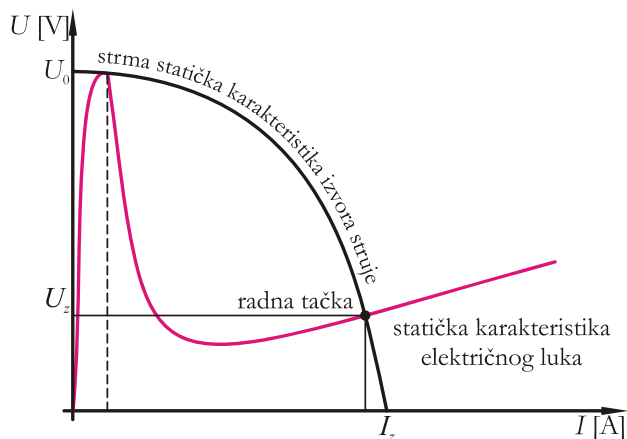
Ravna statička karakteristika izvora struje za zavarivanje ima osobinu da promena dužine električnog luka izaziva manju promenu napona ali značajniju promenu jačine električne struje. Ovakva osobina izvora električne struje je povoljna za

poluautomatske ili automatske postupke, gde se dodatni materijal dovodi mehanizovano. To je slučaj kod MIG/MAG postupaka zavarivanja ili kod EPP postupka zavarivanja sa žicama manje debljine (manje od 3 mm).

Rastuća statička karakteristika izvora struje je prisutna kod svih izvora struje, kao i kod svih postupaka zavarivanja, ali se ona javlja pri preopterećenju ili pojavi nestabilnog električnog luka. U zavisnosti od nagiba statičke karakteristike, moguća je značajna promena napona za minimalnu promenu jačine struje i obrnuto.

5.4 Radna tačka

Tokom zavarivanja stabilnim električnim lukom, ispunjeni su statički električni uslovi koje može izvor struje da obezbedi i statički električni uslovi električnog luka.



Slika 5.9 Radna tačka

Kako su statičke karakteristike izvora struje i električnog luka linije, uslov gorenja električnog luka ispunjen je samo za presek statičkih karakteristika (slika 5.9). Presek navedenih krivih naziva se radnom tačkom.

Radnu tačku definišu napon zavarivanja U_z i struja zavarivanja I_z .

5.5 Intermitencija izvora struje

Intermitencija izvora električne struje za zavarivanje (ε) predstavlja odnos vremena koje je izvor struje proveo u radu pod

opterećenjem i ukupnog vremena rada izvora struje [2, 7]:

$$\varepsilon = \frac{t_z}{t_c} \leq 1 \quad (1).$$

gde je t_z – vreme u radu pod opterećenjem (vreme zavarivanja), t_c – ukupno vreme u radu izvora (vreme ciklusa rada).

Vreme jednog ciklusa rada jednako je sumi vremena zavarivanja i vremena hlađenja t_b :

$$t_c = t_z + t_b \quad (2).$$

Podaci vezani za intermitenciju izvora struje se nalaze na pločici svakog izvora struje. Na slici 5.10 prikazana je pločica jednog tipičnog izvora električne struje sa osnovnim podacima.

THE LINCOLN ELECTRIC CO. CLEVELAND, OHIO U.S.A.		POWER WAVE™ C300	
CODE - SERIAL NO.	11479	U1080105273	
N° DE CODE - N° DE SERIE			
NO. CODIGO - NO. DE SERIE			
(1) 3~	IEC 60974-1	GB15579.1-2004	
5 A / 10 V - 300 A / 29 V			
U _z 80V	X	40%	60%
	I _z	300 A	260 A
U ₂		29 V	27 V
			25 V
U ₁	I ₁ MAX	I ₁ EFF	
	1	3	1
	208V	53A	30A
	220/230V	48A	28A
	380/400/415V	29A	16A
	460V	25A	14A
575V		20A	11A
			16A

Slika 5.10 Tablica izvora struje sa relevantnim podacima

Neka je vreme trajanja jednog ciklusa $t_z=10$ min.

Na osnovu tablice, pri intermitenciji od $\varepsilon=40\%$, struja zavarivanja biće $I_z=300$ A. Pri takvoj struji zavarivanja, maksimalno vreme zavarivanja je:

$$t_z = \varepsilon \cdot t_c = 40\% \cdot 10 = 4 \text{ min} \quad (3).$$

a potrebno vreme hlađenja je minimalno:

$$t_b = t_c - t_z = 10 - 4 = 6 \text{ min} \quad (4).$$

Po istom principu, pri intermitenciji od 60% i struji zavarivanja od 260 A, vreme zavarivanja biće 6 min a vreme hlađenja 4 min, dok pri zavarivanju strujama jednakim ili manjim 220 A intermitencija iznosi 100% te ne postoji potreba za hlađenjem izvora električne struje.

5.6 Poređenje osobina različitih izvora struje

U tabeli 5.1 prikazane su osobine različitih izvora struje za zavarivanje.

Tabela 5.1. Uporedne karakteristike izvora struje za zavarivanje [1]

	Pretvarač	Ispravljač	Transformator	Invertor
Uspostavljanje luka	vrlo lako	vrlo lako	lako do teško	lako
Skretanje luka	veliko	veliko	neznatno	znatno
Vrste elektroda	sve	sve	teško sa baznim	sve
Opterećenje mreže	ravnomerno	ravnomerno	neravnomerno	ravnomerno
Gubici praznog hoda	veliki	srednji	mali	mali
Stepen korisnosti	0,6	0,7-0,8	0,8-0,9	0,9-0,95
Održavanje	veliko	srednje	malo	malo
Cena	visoka	srednja	niska	niska
Masa	velika	velika	velika	mala

LITERATURA

- [1] Autorizovana predavanja na kursu za međunarodne inženjere zavarivanja IWE, Mašinski fakultet Niš, 2009-2017;
- [2] Miomir Vukićević: Tehnologija spajanja materijala – Zavarivanje 1, ISBN 978-86-82631-73-6, Fakultet za mašinstvo i građevinarstvo u Kraljevu, 2014;
- [3] https://en.wikipedia.org/wiki/Welding_power_supply (dokument pregledan 12.11.2016);
- [4] SRPS EN 60974-1:2012: Oprema za elektrolučno zavarivanje – Deo 1: Izvori struje za zavarivanje, 29.11.2012;
- [5] The James F. Lincoln Arc Welding: The Procedure Handbook of Arc Welding, 14th Edition, ASIN: B000FBCQ4M, 2015;
- [6] <http://www.twi-global.com/technical-knowledge/job-knowledge/power-source-characteristics-121/> (dokument pregleda 08.11.2016);
- [7] https://www.sfsb.hr/kth/zavar/tii/izv_str.html (dokument pregledan 08.11.2016).

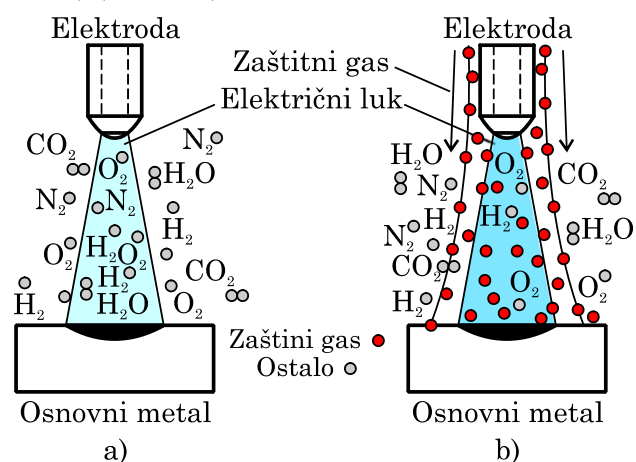
6 UVOD U ELEKTROLUČNO ZAVARIVANJE U ATMOSFERI ZAŠTITNOG GASA

Prilikom zavarivanja električnim lukom, dolazi do topljenja dela osnovnog metala i potpunog topljenja dodatnog materijala, a pri tom dolazi do sagorevanja pojedinih materija, isparavanja materijala, fizičkog mešanja materijala i hemijskih reakcija među elementima. Zavarivanje se, najčešće, dešava u Zemljinoj atmosferi, koja je smeša različitih gasova, mehaničkih nečistoća i vlage tako da je velika šansa da navedeni gasovi, njihova jedinjenja ili nečistoće dospeju u metal šava. Po pravilu, kiseonik, vodonik i vlaga iz atmosfere negativno utiču na sam proces zavarivanja, a samim tim, negativno utiču i na kvalitet zavarenog šava [1-3].

Jedan od najvažnijih zahteva pri zavarivanju je da se ne dozvoli prodor ovih elemenata u metal šava, a ako nije moguće da se prodor spreči – neophodno je da se umanjuje. Kao efikasan vid zaštite primenjuje se upotreba zaštitnih gasova.

apsorbuje gasove iz atmosfere i zarobljava ih u unutrašnjosti te se tako formiraju greške u metalu šava koje su inicijalna mesta za nastajanje prslina.

Po završenom zavarivanju, metal šava se hladi na vazduhu – po pravilu brže nego što je potrebno, tako da se površina metala šava zakaljuje i dobija se tvrda i krta struktura.



Slika 6.1 Zavarivanje električnim lukom: a) bez zaštitnog gasa, b) zavarivanje sa zaštitnim gasom

6.1 Fizički fenomen

Zavarivanje u Zemljinoj atmosferi se ne događa u sterilnoj sredini već u sredini koja obiluje „nečistoćama” (slika 6.1, a). Vlaga, vodonik, azot i kiseonik su četiri elementa/jedinjenja koji su nepovoljni za zavarivanje: vodonik utiče na pojavu prslina u metalu šava, kiseonik reaguje sa različitim elementima, azot umanjuje čvrstoću, a moguća je pojava jedinjenja koja su teškotopiva, krta ili problematična na bilo koji način. Prisustvo vlage u vazduhu umanjuje potencijal električnog luka – električna struja pomaže razgradnju vode na vodonik i kiseonik (postupak elektrolize) i električni luk gori sa smanjenim naponom. Takođe, vodonik i kiseonik odmah reaguju sa ostalim elementima iz okoline pri čemu formiraju različite okside i šljaku [1-3].

Tečno kupatilo ima osobinu da

Zaštitni gas se dovodi pod pritiskom u zonu zavarivanja i ukoliko se dovede u dovoljnoj količini, zaštitni gas privremeno potiskuje atmosferske gasove i vlagu iz zone zavarivanja (slika 6.1, b). Tada se formira lokalna atmosfera u zoni zavarivanja (koju dominantno čini zaštitni gas) i samo zavarivanje se vrši u kontrolisanoj atmosferi te se prostim uklanjanjem problematičnih elemenata i jedinjenja umanjuje potencijal nastajanja grešaka u zavarenom šavu [1-3].

Zaštitni gas u zoni zavarivanja utiče na električni luk – njegovo prisustvo u zoni zavarivanja može da pojača ili oslabi električno polje koje proizvodi električni luk. Prisustvo atoma zaštitnog gasa u električnom luku utiče na temperaturu električnog luka, a samim tim, utiče na dimenzije i oblik šava koji se dobija zavarivanjem.

Pravilnim izborom i primenom zaštitnog gasa, moguće je zavariti različite metale [4].

6.2 Zaštitni gasovi i njihov uticaj na osobine električnog luka

Zaštitni gasovi koji se koriste pri zavarivanju se mogu podeliti na inertne i aktivne gasove.

Inertni gas je jednokomponentni gas ili mešavina gasova i njegova osnovna osobina je da ne reaguje ili slabo reaguje sa drugim elementima ili jedinjenjima na svim temperaturama. Ovakvom osobinom odlikuju se plemeniti gasovi (slika 6.2): helijum (He), neon (Ne), argon (Ar), kripton (Kr), ksenon (Xe) i radon (Rn).

Grupa → 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18

↓ Perioda

1	2																18
1	2																2
3	4																10
11	12																18
19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54
55	56	*	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86
87	88	**	104	105	106	107	108	109	110	111	112	113	114	115	116	117	118
57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71			
89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103			

Slika 6.2 Položaj plemenitih gasova u Mendeljejevom periodnom sistemu elemenata [5]

Kao zaštitni gasovi za zavarivanje u industriji, koriste se jedino argon i helijum dok se ostali plemeniti gasovi ne primenjuju ili se ograničeno primenjuju¹.

Argon [6] je najčešće korišćeni zaštitni gas za zavarivanje nemagnetičnih materijala: pojedinih čelika, aluminijuma, titana i njihovih legura. Argon je jednoatomni, bezbojni, neotrovni gas, teži je od vazduha i ima nizak potencijal jonizacije što omogućuje lako uspostavljanje i održavanje stabilnog električnog luka, naročito pri naizmeničnoj struji zavarivanja. Ne stupa u hemijske reakcije sa metalima ni na vrlo visokim temperaturama. Iz zaštitne atmosfere argona

¹ Neon je veoma redak inertni gas i skup za industrijsku primenu. Kripton je produkt raspadanja plutona i uranijuma i vrlo je redak u atmosferi. Ksenon nije potpuno inertan i pod određenim uslovima može da gradi nestabilne hidrate koji su uzrok pojave prslina. Radon je radioaktivan i neprihvatljiv je za primenu u okolini ljudi.

oslobađa se velika količina toplote i svetlosti te je pri radu neophodna odgovarajuća zaštitna oprema za oči zavarivača [3].

Argon se dobija frakcionom destilacijom vazduha, pakuje se i skladišti u čeličnim bocama [7] pod pritiskom od 150 bar-200 bar na 15°C, zapremine 6 m³-8 m³, u koje se smešta oko 40 l, odnosno, oko 10 kg gasa [8, 9]. Kada pritisak u boci opadne na 1,5 bar-2 bar (minimalno dopušten 1 bar), boca se smatra praznom i mora se prekinuti rad. Čistoća argona je 99,99%.

Pri potrebi, nije dozvoljeno da pritisak opadne ispod minimalne vrednosti pritiska jer je tada moguć prodor, odnosno, usisavanje vazduha u boci.

Boca za argon označava se tamno zelenom bojom (smaragdno zelena, slika 6.3) i latiničnim slovom „H” [10]. Na tržištu se mogu naći i crvene i plave boce za argon, ali sve ređe.



Slika 6.3 Boca za argon Slika 6.4 Boca za helijum

Helijum [11] je jednoatomni, bezbojni gas. Nema ni miris ni ukus i lakši je od vazduha, zbog čega se povećava njegova potrošnja naročito pri zavarivanju u horizontalnom položaju. Helijum je bolji provodnik toplote od argona pa se zato koristi pri zavarivanju delova većeg preseka i velike toplotne provodnosti, a argon pri zavarivanju limova manje debljine, u svim položajima [1-3]. U SAD se helijum koristi u većoj meri

nego u Evropi jer se kod njih on eksploatiše iz prirodnih izvora (za razliku od Evrope gde se helijum dobija industrijskim procesima) pa je niže cene.

Helijum nastaje kao proizvod radioaktivnog raspadanja i nalazi se u mineralima koji istovremeno sadrže uran i torijum. Velike količine helijuma prisutne su u prirodnom gasu, naročito u onom koji je bogat azotom. Dobija se frakcionom kondenzacijom prirodnog gasa pri čemu se snižavanjem pritiska i temperature, sve komponente prirodnog gasa prevode u tečno stanje, dok helijum, čija je temperatura kondenzacije -269°C , ostaje u gasovitom. U manjim količinama, može da se dobije kao sporedni proizvod pri razlaganju vazduha na kiseonik i azot [3].

Helijum se isporučuje u gasovitom i tečnom agregatnom stanju, pri čemu se za zavarivanje koristi gasoviti helijum. On je komprimovan u bocama zapremine 6 m^3 , $7,5\text{ m}^3$ ili 10 m^3 . Čistoća helijuma je 99,99% [7].

Boca za helijum označava se braon bojom (maslinasto braon, slika 6.4) [10].

Za razliku od inertnih gasova, **aktivni gas** je jednokomponentni aktivni gas, mešavina aktivnih gasova ili mešavina aktivnih i inertnih gasova koji se primenjuju za zavarivanje. Osnovna osobina aktivnog zaštitnog gasa je da ne reaguje (ili slabo reaguje) sa drugim elementima ili jedinjenjima na temperaturama bliskim sobnoj temperaturi dok na povišenim temperaturama reaguje sa pojedinim elementima i jedinjenjima. Aktivni gasovi imaju oksidišući, redukujući ili gotovo neutralan uticaj na osnovni materijal [1-3].

Iako hemijski reaguju sa drugim elementima, ovi gasovi se koriste jer pomažu gorenje električnog luka, poboljšavaju zavarivost i livkost materijala ili grade jedinjenja koja plivaju na površini tečnog kupatila i tako štite metal šava. Ipak, sa primenom aktivnih zaštitnih gasova treba biti oprezan jer u nekontrolisanim ili pogrešnim koncentracijama mogu nastati i neželjena jedinjenja koja pogoršavaju kvalitet zavarenog spoja. Kao aktivni gasovi pri zavarivanju

koriste se ugljendioksid (CO_2), kiseonik (O_2), azot (N_2) i vodonik (H_2).

Ugljendioksid [12] je troatomni gas sastavljen od dva atoma kiseonika i jednog atoma ugljenika. Na sobnoj temperaturi ima osobine inertnog gasa, a reaktivan postaje usled dejstva plazme električnog luka i toplote (tek pri visokoj temperaturi). Reaktivnost ugljendioksida se ogleda u njegovom raspadu usled prisustva velike količine toplotne energije i hemijskim reakcijama komponenti raspada sa prisutnim elementima [1-4].

Molekuli ugljendioksida disociraju: izdvajaju se slobodni ugljenik (C), ugljenmonoksid (CO) i kiseonik (O_2). Najveći intenzitet disocijacije ugljendioksida u električnom luku događa se u zoni anode [2, 3]. U blizini katode je prisutan proces rekombinacije, odnosno, proces nastajanja CO_2 molekula, koji je praćen oslobađanjem velike količine toplote. Samim tim se i oslobođena toplota koncentriše u zoni odvijanja rekombinacije – u okolini katode.

Ukoliko je katoda vezana na negativan pol izvora jednosmerne struje (JSDP, DC-), toplota dobijena rekombinacijom pomaže prodor električnog luka u osnovni materijal, ali je odgovorna i za grub izgled lica šava, što je osnovna karakteristika i posledica primene ugljendioksida [3].

Slobodni kiseonik, dobijen disocijacijom CO_2 , stupa u hemijsku reakciju sa silicijumom, manganom, železom i drugim elementima koji se nalaze u tečnom kupatilu, pri tom formirajući SiO_2 , MnO_2 , FeO_2 i druge okside. Nastali oksidi plivaju po površini tečnog metala u kupatilu, da bi se, nakon procesa kristalizacije, rasporedili po površini šava ili se koncentrisali uz ivicu šava. Visoka koncentracija ugljendioksida (potencijalno i veća oksidacija), doprinosi povećanju količine šljake formirane na površini šava. Manja količina ugljendioksida (potencijalno manja oksidacija), nameće povećanje legura nastalih apsorpcijom silicijuma i mangana u metalu šava. Mala količina ugljendioksida u dvojnim ili trojnim gasnim mešavinama, uslovljava porast granice tečenja i zatezne čvrstoće šava [1-4].

Ugljendioksid nastaje kao produkt potpunog sagorevanja organskih materija. U normalnim uslovima je stabilan i nije otrovan (u koncentraciji ispod 2,5%) Nema boju i miris i prijatnog je kiselkastog ukusa. Čisti CO_2 je teži od vazduha, tako da u horizontalnom položaju zavarivanja potpuno onemogućuje pristup vazduhu. Ugljendioksid ne pomaže sagorevanje niti gori [12].

U radnim prostorima zavarivača dopuštena maksimalna koncentracija ugljendioksida je do 0,5%. Obavezna je primena kvalitetne ventilacije radnog prostora [13].

Čisti ugljendioksid namenjen zavarivanju zapreminski sadrži najmanje 99,7% CO_2 i najviše 0,1 g/m³ vlage. Ugljendioksid za zavarivanje ne sme da sadrži ugljenmonoksid, ulje, glicerol, sumpor-vodonik, amonijak i druge primese [14].



Slika 6.5 Boca za ugljendioksid



Slika 6.6 Boca za vodonik

U čeličnim bocama, CO_2 se čuva pod pritiskom od 7 MPa-10 MPa (70 bar-100 bar), a u izolovanim rezervoarima pod pritiskom od 2 MPa (20 bar). Čelične boce su zapremine 12 l-40 l, a za specijalne svrhe 4 l-12 l. Zbog bezbednosti, u boce ne sme da bude smešteno više od 1 kg tečnog gasa na svakih 1,34 l naznačene zapremine, što znači da bi u boci od 40 l bilo 30 kg tečnog gasa ili 15 nm³ gasa [3, 7, 14]. Uskladišteni ugljendioksid nalazi se u ravnotežnom stanju tečne i gasovite faze na

temperaturama nižim od kritične temperature od 31°C. Ukoliko temperatura naraste iznad kritične, bez obzira pod kojim pritiskom, ugljendioksid ne može da ostane u tečnom stanju i zato sudovi za njegovo skladištenje ne smeju da se izlažu direktnoj sunčevoj svetlosti i uopšte toplotnim izvorima kako temperatura ne bi premašila kritičnu vrednost. Stoga se boce skladište u zatvorenim prostorijama, na posebnim stalcima, sa ventilima koji su okrenuti na dole. Pre upotrebe neophodno je iz boce ispustiti malu količinu gasa kako bi kondenzovana i nataložena vlaga bila izbačena [3, 14].

Boca za ugljendioksid označava se sivom bojom (prašinasto siva, slika 6.5) [10].

Kiseonik u (nižoj) atmosferi je dvoatomni gas koji čini 20,8% atmosfere i dok u vidu jedinjenja čini 45% zemljine kore. Zbog toga je kiseonik najrasprostranjeniji element na Zemlji. Kiseonik je neophodan za život organizama na Zemlji, bezbojan je, nema boju i nema ukus [3, 14].

Prilikom zavarivanja kiseonik iz atmosfere stupa u hemijske reakcije sa elementima i jedinjenjima koji se nalaze u tečnom kupatilu gradeći okside. U malim količinama (1%-5%), kao komplement argonu, doprinosi poboljšanju stabilnosti električnog luka i tečljivosti metala u kupatilu. Upotrebom dezoksikatora, kao hemijskih komponenti elektrodne žice, anuliraju se efekti oksidacije [1-4].

Formirani oksidi plivaju po površini tečnog kupatila u obliku ostrva u količini koja je nešto manja nego kada se koristi CO_2 . O skladištenju, čuvanju i korišćenju kiseonika bilo je reči u poglavlju 2.

Vodonik [16], u svom stabilnom molekulu H_2 , je gas koji se na zemlji javlja u malim količinama dok je u najvećem procentu zastupljen kao gradilac vode. On je lakši od vazduha, nije otrovan, bezbojan je i bez ukusa je ali je zapaljiv i eksplozivan [1-4].

Vodonik se dobija elektrolizom vode, parcijalnom oksidacijom ugljovodonika itd. Vodonik se čuva u čeličnim bocama različitih zapremina pod pritiskom od 150 bar [7]. Takođe, vodonik se čuva u „sklopovima

metalnih hidrida” – rastvara se u hemijskim jedinjenjima i tako čuva u rezervoarima vozila koje kao pogon koriste vodonik [17].

Dodaje se argonu u malim količinama (1-5%), pri zavarivanju nerđajućih čelika i legura nikla. Njegova visoka toplotna provodnost poboljšava tečljivost rastopljenog metala, doprinosi poboljšanju kvašenja ivica žleba i omogućava primenu većih brzina zavarivanja. Boce za vodonik su sive ili crvene boje (slika 6.5.) [10].

Azot [19] u slobodnom obliku se javlja kao dvoatomni molekul (N_2). To je gas, bez mirisa, ali je zagušljiv. Azot nije otrovan i nije zapaljiv. Na sobnoj temperaturi je potpuno inertan. Dobija se rektifikacijom tečnog vazduha pri temperaturi nižoj od $-185^\circ C$. Najčešće se čuva u bocama različitih zapremina pod pritiskom od 150 bar [1, 4, 7, 19, 20].

Azot se dodaje argonu da poboljša gorenje električnog luka. Nikada se ne koristi samostalno kao zaštitni gas.



Slika 6.7 Boca za tehnički azot

Boce za azot su zelene (za medicinsku primenu, sa kiseonikom) ili sive boje (za industrijsku primenu, bez kiseonika, slika 6.7) [10].

6.3 Uporedne osobine najkorišćenijih zaštitnih gasova i mešavina

Argon:

- niža toplotna provodnost i napon jonizacije nego kod helijuma i uglendioksida,
- omogućuje lakše uspostavljanje električnog luka,
- obezbeđuje dobijanje šava male širine i dobre penetracije,
- pogodan za primenu pri prenosu metala u mlazu i pospešuje ga,
- pospešuje krupnokapljicasti prenos metala,
- predstavlja osnovnu komponentu u dvokomponentnim i višekomponentnim gasnim mešavinama,
- teži od vazduha.

Helijum:

- u SAD se koristi kao osnovni gas za TIG postupke zavarivanja,
- ima status najčešće dodavanog gasa u mešavinama gasova,
- koristi se pri zavarivanju nerđajućih čelika i aluminijuma,
- zbog visoke toplotne provodnosti dobijaju se šavovi velike širine i male penetracije,
- lakši od vazduha.

Mešavina Argon + Helijum

- Pogodna je za zavarivanje aluminijuma (debljina većih od 25 mm) i legura na bazi nikla,
- najčešće se primenjuje pri običnom ili impulsnom prenosu u mlazu,
- prisustvo helijuma utiče na povećanje tečljivosti rastopljenog metala,
- helijum omogućuje povećanje brzine zavarivanja,
- helijum doprinosi redukciji vodoničnih prslina u šavovima,
- argon, kao osnovna komponenta gasne mešavine, omogućuje odlične uslove za uspostavljanje električnog luka i pospešuje proces čišćenja površine aluminijuma.

Ugljendioksid:

- najviša temperatura zavarivanja, najdublja penetracija električnog luka,
- niska cena koštanja,
- oštar električni luk, veliko rasprskavanje,
- ne podržava prenos materijala u mlazu,
- mogućnost primene u terenskim uslovima,
- teži od vazduha.

6.4 Manipulacija i skladištenje gasova (pregled)

Svi zaštitni gasovi se, nakon proizvodnje i pripreme, skladište u čeličnim (ređe aluminijumovim) bocama različitih dimenzija i dopremaju do korisnika. Na bocama se nalaze ispusni ventili kojima se sprečava curenje gasova. Pre početka primene, na ispusne ventile se postavljaju manometri, creva, protokometri, mešačke kutije itd. Instalacija se povezuje sa sistemom koji kontroliše zavarivanje te se gasovi dalje vode do zone zavarivanja [1-4].

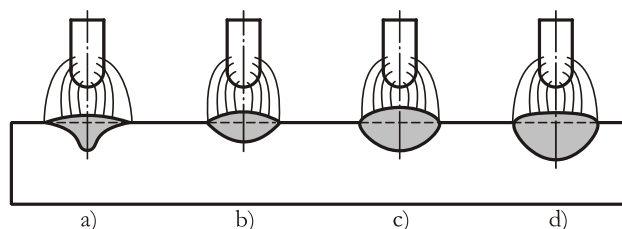
Bez obzira na vrstu gasa, neke od osnovnih napomena koje važe za sve gasove su:

- Sa bocama se mora raditi oprezno bez udaranja i prevrtanja.
- Boce se ne smeju izlagati povišenoj ili sniženoj temperaturi.
- Boce sa gasovima se, tokom eksploatacije, ne smeju bušiti, rezati, plastično deformisati itd.

6.5 Uticaj vrste zaštitnog gasa na morfologiju šava

Zaštitni gasovi, pored zaštite električnog luka, metala šava i zone zavarivanja, imaju i funkciju oblikovanja šava (slika 6.8) [1-4].

Zavarivanjem električnim lukom u atmosferi argona dobija se širok, dubok ali uzan šav (slika 6.8, a) dok zavarivanje u atmosferi helijuma daje zaobljeniji šav, veće dubine, širine i nadvišenja (slika 6.8, c).



Slika 6.8 Oblik i dimenzije šava u funkciji zaštitnog gasa: a) Ar, b) Ar+He, c) He, d) CO₂

Mešavina argona i helijuma daje šav dubine i širine koje su negde između čistog argona i helijuma (slika 6.8, b). Šav dobijen u atmosferi ugljendioksida je najmasivniji: velike širine, velike dubine sa nadvišenjem koje je blisko nadvišenju pri zavarivanju u atmosferi argona (slika 6.8, d).

6.6 Standardi za zaštitne gasove

Zaštitni gasovi koji se koriste pri zavarivanju su opisani i definisani u standardima

- SRPS EN ISO 14175:2009: Potrošni materijali za zavarivanje – Gasovi i gasne mešavine za zavarivanje topljenjem i srodne postupke² [21].
- SRPS EN 439:2001: Potrošni materijali za zavarivanje – Zaštitni gasovi za elektrolučno zavarivanje i rezanje³ [22].

Iako još uvek važeći, standard EN 439 se smatra zastarelim i više se primenjuje standard EN ISO 14175.

Osnovne napomene i detalji iz standarda EN ISO 14175 su dati u prilogu.

² Identičan sa: EN ISO 14175:2008 CEN/TC 121.

³ Identičan sa: EN 439:1994 CEN/TC 121.

LITERATURA

- [1] Autorizovana predavanja na kursu za međunarodne inženjere zavarivanja IWE, Mašinski fakultet Niš, 2009-2017;
- [2] Milorad Jovanović, Dragan Adamović, Vukić Lazić, Nada Ratković: CO₂ – priručnik, YU ISBN 86-80581-71-2, Mašinski fakultet Kragujevac, Srbija, 2005;
- [3] Miomir Vukićević: Tehnologija spajanja materijala – Zavarivanje 1, ISBN 978-86-82631-73-6, Fakultet za mašinstvo i građevinarstvo u Kraljevu, 2014;
- [4] The James F. Lincoln Arc Welding: The Procedure Handbook of Arc Welding, 14th Edition, ASIN: B000FBCQ4M, 2015;
- [5] https://sh.wikipedia.org/wiki/Periodni_sistem_elementata (grafički prikaz preuzet i retuširan 11.12.2016);
- [6] <https://en.wikipedia.org/wiki/Argon> (dokument pregledan 14.12.2016);
- [7] SRPS EN 1089-1:2007: Pokretne boce za gas – Obeležavanje boca za gas – Deo 1: Obeležavanje utiskivanjem, 23.02.2007;
- [8] SRPS H.F1.014:1986: Gasovi – Argon, gasoviti – Tehnički uslovi, 17.12.1986, potvrđen 2012;
- [9] SRPS H.F1.015:1986: Gasovi – Argon, tečni – Tehnički uslovi, 17.12.1986, potvrđen 2012;
- [10] SRPS EN 1089-3:2001: Pokretne boce za gas – Obeležavanje boca (izuzimajući boce za TNG) – Deo 3: Kodovi boja, 29.11.2012;
- [11] <https://en.wikipedia.org/wiki/Helium> (dokument pregledan 14.12.2016);
- [12] https://en.wikipedia.org/wiki/Carbon_dioxide (dokument pregledan 14.12.2016);
- [13] SRPS EN ISO 10882-2:2008: Zdravlje i bezbednost pri zavarivanju i srodnim postupcima – Uzorkovanje čestica i gasova iz vazduha u zoni disanja operatera – Deo 2: Uzorkovanje gasova, 09.09.2008;
- [14] SRPS H.F1.016:1986: Gasovi - Ugljen-dioksid gasoviti - Tehnički uslovi, 17.12.1986, potvrđen 2012;
- [15] <https://en.wikipedia.org/wiki/Oxygen> (dokument pregledan 14.12.2016);
- [16] <https://en.wikipedia.org/wiki/Hydrogen> (dokument pregledan 14.12.2016);
- [17] SRPS ISO 16111:2014: Prenosivi uređaji za skladištenje gasa – Vodonik apsorbovan u reverzibilnom metalnom hidridu, 31.07.2014;
- [18] <https://en.wikipedia.org/wiki/Nitrogen> (dokument pregledan 16.12.2016);
- [19] SRPS H.F1.012:1986: Gasovi – Azot, gasoviti – Tehnički uslovi, 17.12.1986, potvrđen 2012;
- [20] SRPS H.F1.013:1986: Gasovi – Azot, tečni – Tehnički uslovi, 17.12.1986, potvrđen 2012;
- [21] SRPS EN ISO 14175:2009: Potrošni materijali za zavarivanje – Gasovi i gasne mešavine za zavarivanje topljenjem i srodne postupke, 09.07.2009;
- [22] SRPS EN 439:2001: Potrošni materijali za zavarivanje – Zaštitni gasovi za elektrolučno zavarivanje i rezanje, 09.10.2001.

7 ELEKTROLUČNI POSTUPCI ZAVARIVANJA NETOPIVOM VOLFRAMOVOM ELEKTRODOM U ATMOSFERI ZAŠTITNOG GASA

Prvi elektrolučni postupak zavarivanja netopivom volframovom elektrodom u atmosferi zaštitnog gasa je nastao tokom prvih godina Drugog Svetskog Rata kao postupak kojim se spajaju tanki limovi avionskih konstrukcija [1]. Prilikom zavarivanja, zaštitni gas je bio helijum a netopiva elektroda od čistog volframa. Prvobitna primena postupka bila je samo za zavarivanje tankih limova od ugljeničnog čelika [2, 3]. Postupak se razvijao tokom vremena i nastale su različite podvarijante pa se, samim tim, proširio se opseg primene postupka. Danas se ovim postupcima spajaju različiti metali, različitih debljina, i to u raznim položajima. Netopiva elektroda i primena zaštitnog gasa su ostale osnovne karakteristika ovog postupka zavarivanja.

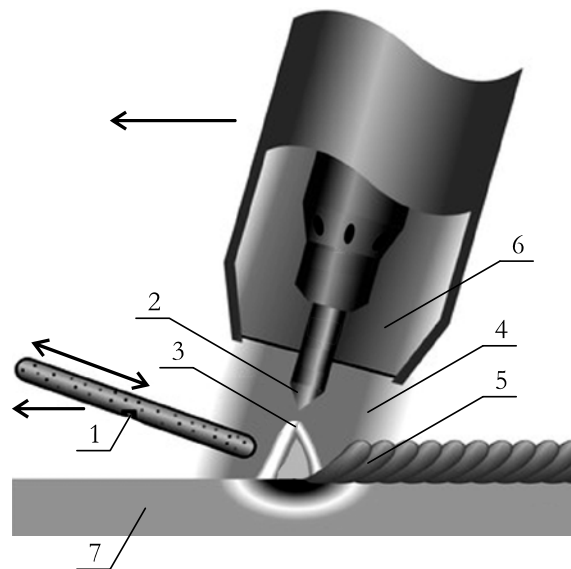
Iako spor, postupak zavarivanja netopivom volframovom elektrodom u atmosferi zaštitnog gasa je sinonim za kvalitet u tehnologiji zavarivanja – najodgovorniji zavareni spojevi se gotovo uvek izrađuju ovim postupkom [3].

7.1 Osnovni principi postupka

Po pravilu, postupci elektrolučnog zavarivanja netopivom volframovom elektrodom u atmosferi zaštitnog gasa su ručni postupci ali postoje i mehanizovana i robotizovana izvođenja [3].

Pri ručnom zavarivanju, zavarivač u jednoj ruci drži „pištolj” za zavarivanje u kome je na centralnom delu mlaznice postavljena netopiva volframova elektroda. Pomoću elektrode se uspostavlja i održava električni luk između netopive elektrode i radnih komada. Kroz mlaznicu, oko netopive elektrode, u zonu zavarivanja se uduvava zaštitni gas. Zaštitni gas opstrujava netopivu elektrodu, štiti je od negativnog uticaja gasova

iz atmosfere i produžava joj radni vek. Međutim, zaštitni gas prekriva i zonu zavarivanja i tečno kupatilo i štiti ih od atmosferskih gasova i vlage (slika 7.1).



Slika 7.1 Šematski prikaz elektrolučnog postupka zavarivanja netopivom volframovom elektrodom u atmosferi zaštitnog gasa: 1 – dodatni materijal, 2 – netopiva volframova elektroda, 3 – električni luk, 4 – atmosfera zaštitnog gasa, 5 – deponovani metal, 6 – keramička mlaznica, 7 – osnovni metal

Ukoliko se zavarivanje vrši sa dodatnim materijalom¹, zavarivač drugom rukom drži elektrodnu žicu (dodatni materijal koji koristi za zavarivanje). Električni luk, koji je uvek uspostavljen između netopive elektrode i osnovnog metala, delimično topi osnovni materijal u zoni zavarivanja te se formira tečno kupatilo ispunjeno rastopljenim metalom (slika 7.1). Kada zavarivač primakne žicu zoni zavarivanja, električni luk je zagreva i topi te se ona meša sa rastopinom osnovnog metala, koja očvršćavanjem formira metal

¹ Moguće je izvođenje zavarivanja bez dodatnog materijala – uspostavljanjem električnog luka dostiže se temperatura dovoljna za topljenje osnovnog materijala i njegovo slivanje u monolitni šav.

šava. Zavarivač prati obim topljenja dodatnog metala i primicanjem i odmicanjem žice uspostavlja deponovanje materijala u šav. Paralelno sa primicanjem i odmicanjem žice, zavarivač vodi pištolj i dodatni metal duž linije spajanja.

Postupci zavarivanja netopivom elektrodom u atmosferi zaštitnog gasa primenjuju se za zavarivanje gotovo svih vrsta čelika (nelegiranih, legiranih, sitnozrnih, visoke čvrstoće, nerđajućih, vatrostalnih, vatrootpornih, otpornih na puzanje itd), nikla, bakra, aluminijuma, livenih gvožđa, titanijuma itd. Moguće je zavarivanje i tankozidnih i debelozidnih cevi, kao i ploča svih debljina, u svim položajima zavarivanje. Zbog svojih osobina, primenjuju se za zavarivanje korenih prolaza pri višeprolaznim zavarivanjima.

7.2 Klasifikacija i podela postupka

Elektrolučni postupci zavarivanja netopivom volframovom elektrodom u atmosferi zaštitnog gasa su standardizovani i klasifikovani prema ISO 4063 [4] kao grupa 14 (ISO 4063 — 14) – elektrolučni postupci zavarivanja netopivom volframovom elektrodom. Na osnovu specifičnosti samih postupaka, oni su klasifikovani kao:

ISO 4063 — 141: TIG² postupak zavarivanja punom žicom,

ISO 4063 — 142: Autogeni TIG postupak zavarivanja;

ISO 4063 — 143: TIG postupak zavarivanja punjenom žicom,

ISO 4063 — 145: TIG postupak zavarivanja uz dodatak redukujućeg gasa,

ISO 4063 — 146: TIG postupak zavarivanja uz dodatak redukujućeg gasa punjenom žicom,

ISO 4063 — 147: Elektrolučni postupak zavarivanja netopivom volframovom elektrodom u atmosferi aktivnog gasa (TAG³ postupak).

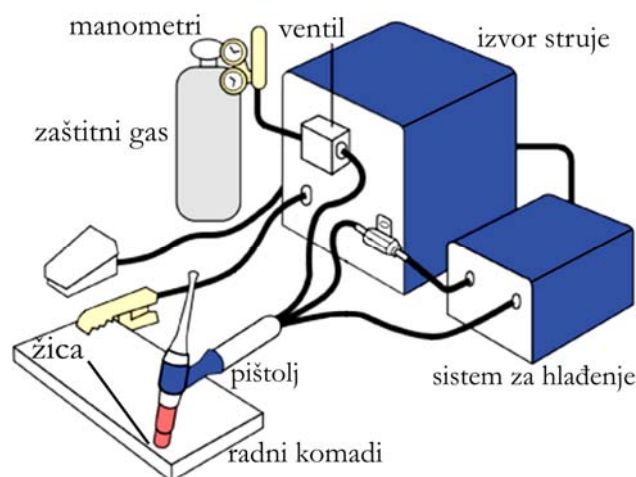
U praksi se najčešće koristi postupak

ISO 4063 — 141 i poznat je kao *TIG postupak* ili *argonsko zavarivanje* (jer je zaštitni gas inertni argon). Zbog toga je veći deo ovog poglavlja posvećen njemu.

Svi standardizovani postupci iz grupe ISO 4063 — 14 nabrojani su u prilogu.

7.3 Osnovna oprema za zavarivanje

Osnovnu opremu za zavarivanje TIG postupkom čine izvor električne struje, pištolj sa netopivom volframovom elektrodom, žica za zavarivanje, sistem za snabdevanje zone zavarivanja zaštitnim gasom, sistem za hlađenje pištolja, hvataljke, stezaljke, ventili, manometri, kontrolni panel i upravljačke konzole.



Slika 7.2 Šematski prikaz opreme i radnog mesta za elektrolučni postupak zavarivanja netopivom volframovom elektrodom u atmosferi zaštitnog gasa [5]

Šema ovakvog sistema za zavarivanje prikazana je na slici 7.2.

Moderni sistemi za zavarivanje imaju centralnu upravljačku jedinicu (procesor, računar), koja je sastavni deo izvora struje i ona sinhronizuje rad svih komponenti radi maksimalnog učinka sistema.

7.3.1 Izvori električne struje, karakteristike izvora električne struje

TIG postupci zavarivanja su veoma

² Eng. *Tungsten Inert Gas* – volfram inertni gas.

³ Eng. *Tungsten Active Gas* – volfram aktivni gas.

osetljivi na promenu jačine električne struje pa je neophodno da izvor električne struje ima karakteristiku koja ublažava promenu napona električnog luka usled promene njegove dužine. Zbog toga uređaji za zavarivanje TIG postupcima imaju strmu (opadajuću) karakteristiku [3, 6, 7].

Izvori električne struje za TIG postupke zavarivanja su izvori i jednosmerne i naizmenične struje, simetričnog ili nesimetričnog oblika, pulsnog, cikličnog ili ravnog karaktera. Ovakve zahteve ispunjavaju transformatori, tiristorski i tranzistorski uređaji – invertori [6].

Izvori struje za zavarivanje moraju da ispunjavaju zahteve propisane standardom SRPS EN 60974-1:2012: Oprema za elektrolučno zavarivanje – Deo 1: Izvori struje za zavarivanje⁴ [8].

7.3.2 Tipičan kontrolni panel izvora struje

Upravljanje izvorom struje je osnovni preduslov za upravljanje postupkom zavarivanja i komunikacija zavarivača i izvora struje se ostvaruje preko kontrolnog panela na uređaju.



Slika 7.3 Tipičan kontrolni panel izvora struje za TIG postupak zavarivanja [5]

Na slici 7.3 prikazan je tipičan kontrolni panel izvora struje za TIG postupak zavarivanja. Panel se sastoji od preklopnika za

jačinu električne struje, preklopnika za tip električne struje, preklopnika za način i vreme proticanja zaštitnog gasa, zatim, kontrolnim panelom se definiše oblik električne struje, sekvence električne struje, pulsevi po kojima se vrši zavarivanje, memorijski kanali itd. Većina kontrolnih panela ima displeje gde se prikazuju osnovni parametri zavarivanja: jačina struje, napon, protok gasa i slično.

7.3.3 Pištolj

Pištolj za TIG postupak zavarivanja predstavlja sklop više delova: elektrode, mlaznice, držača elektrode, rukohvata i kontakata za zaštitni gas, rashladnu tečnost i električni vod (slika 7.2). Upotrebom pištolja zavarivač direktno upravlja procesom zavarivanja.

Tipičan pištolj za TIG postupak zavarivanja, prikazan je na slici 7.4.



Slika 7.4 Pištolj za zavarivanje

Kroz rukohvat se dovode zaštitni gas, rashladna tečnost i električna struja do držača elektrode i mlaznice. Držać elektrode je odgovarajućim zavrtnjem pričvršćen za rukohvat a sa druge strane se nalazi mlaznica. Mlaznica treba da bude dovoljno široka da može da sprovede dovoljno zaštitnog gasa do zone zavarivanja.

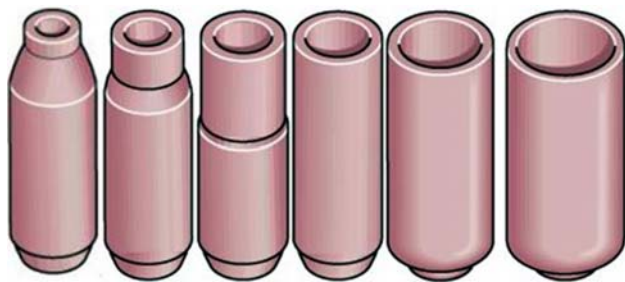
⁴ Identičan sa: EN 60974-1:2012 CLC/TC 26A.

Pištolj mora da bude što manje mase kako ne bi otežavao rad zavarivača; mora da bude dovoljno robustan da izdrži visoke temperature koje se javljaju tokom zavarivanja a pri tom mora da bude pogodan za rad u različitim položajima. Postoje posebna izvođenja pištolja za specifične zahteve: uski žleb, različita iskošenja itd [3]. Detaljni prikaz delova prikazan je na slici 7.40

Pištolji za zavarivanje moraju da ispunjavaju pojedine zahteve definisane standardom SRPS EN 60974-7:2014: Oprema za elektrolučno zavarivanje – Deo 7: Gorionici⁵ [9].

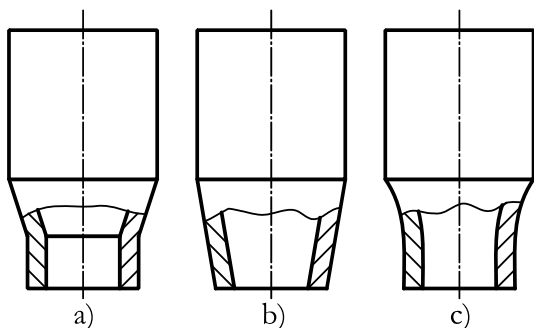
7.3.4 Mlaznice

Mlaznice koje se koriste za usmeravanje zaštitnog gasa pri TIG postupcima zavarivanja se izrađuju od keramike i razlikuju se po dimenzijama i oblicima. Na slici 7.5 prikazane su mlaznice različitih dimenzija i profila.



Slika 7.5 Različiti oblici i dimenzije keramičkih mlaznica za TIG postupke zavarivanja

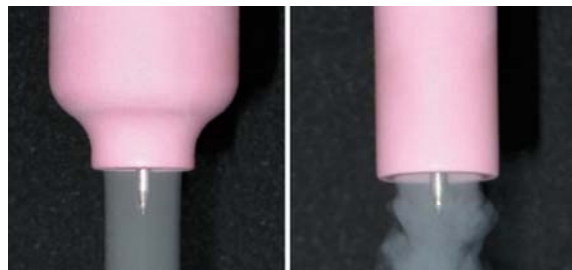
Oblik mlaznice može biti cilindričan, koničan ili profilisan (slika 7.6) [3].



Slika 7.6 Tipovi mlaznice: a) cilindrična b) konusna, c) profilisana

Profil mlaznice definiše oblik električnog

luka, protok i način strujanja gasa. Profilisane mlaznice ostvaruju laminarno strujanje zaštitnog gasa i stabilan električni luk i smatraju se najpovoljnijim za zavarivanje.



Slika 7.7 Strujanje gasa kroz profilisanu i cilindričnu mlaznicu [3]

U mlaznice se često ugrađuju gasna sočiva čiji zadaci su stabilizacija električnog luka oko volframove elektrode i koncentrisanje zaštitnog gasa (slika 7.7).

7.3.5 Sistem za hlađenje

Sistem za hlađenje čini rezervoar, pumpa, napojni vod, povratni vod, hladnjak i ventili (slika 7.2). Kao medijum za hlađenje, najčešće se koristi voda.

Osnovni zadatak ovog sistema je hlađenje pištolja za zavarivanje. Hladna voda iz rezervoara se kroz poliprovodnik (polikabl) dovodi do pištolja kroz koji cirkuliše i hladi ga. Zagrejana voda se povratnim vodom dovodi u hladnjak odakle se ohlađena ponovo vraća u rezervoar [3].

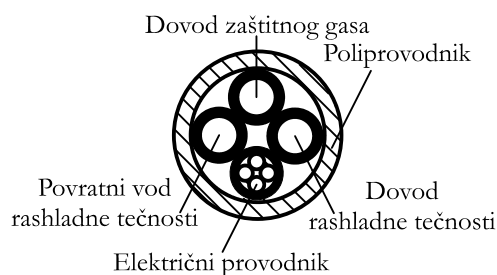
Sistem za hlađenje tečnostima i zahtevi od takvog sistema opisani su u standardu SRPS EN 60974-2:2015: Oprema za elektrolučno zavarivanje – Deo 2: Sistemi za hlađenje tečnošću⁶ [10].

7.3.6 Provodnici

Pištolj je provodnicima povezan sa izvorom struje, sistemom za hlađenje i rezervoarom ili instalacijom sa zaštitnim gasom. Svaki od navedenih sistema ima jedan ili više svojih provodnika/creva i svi oni su ubačeni u jedno zajedničko kruto plastično crevo koje se naziva poliprovodnik (polikabl, slika 7.8).

⁵ Identičan sa EN 60974-7:2013 CLC/TC 26A.

⁶ Identičan sa EN 60974-2:2013 CLC/TC 26A.



Slika 7.8 Poprečni presek poliprovodnika

Vodovi za zaštitni gas i rashladnu tečnost moraju da budu dovoljno kruti da prilikom savijanja poliprovodnika (koje je nezatno) ne bi došlo do sprečavanja protoka fluida. Električni provodnik mora da bude punog poprečnog preseka odgovarajućeg prečnika kako bi mogao da izdrži električna opterećenja koja izaziva električna struja koja protiče kroz njega pri zavarivanju.

Iz izvora električne struje izvodi se još jedan električni provodnik koji se povezuje za radni komad⁷. Ovaj provodnik se adapterom povezuje za izvor struje a najčešće kleštima se povezuje sa radnim komadom (slika 7.9).



Slika 7.9 Provodnik za električnu struju – „masa“

Bezbednosni zahtevi koji se odnose na spojke i konektore (adapte) na kablovima definisani su standardom SRPS EN 60974-12:2012: Oprema za elektrolučno zavarivanje – Deo 12: Spojne naprave za zavarivačke kablove⁸ [11].

7.4 Potrošni materijali

U potrošne materijale koji se koriste za zavarivanje postupkom ISO 4063 — 141, spadaju netopive elektrode, zaštitni gasovi i dodatni materijal (žica).

7.4.1 Netopive elektrode

Netopiva elektroda spada u potrošne materijale koji se sporo troše. Osnovne funkcije netopive elektrode kod TIG postupka zavarivanja su: provođenje električne struje, ali i uspostavljanje, usmeravanje, oblikovanje i održavanje električnog luka tokom zavarivanja. Pri tom, netopive elektrode moraju zaista da budu netopive i otporne na električno, hemijsko i mehaničko razaranje do kojih može doći tokom zavarivanja [2, 3, 6, 7].

Netopive elektrode se izrađuju od volframa uz dodatak torijuma, cirkonijuma, lantana, cezijuma i njihovih oksida. Ovi metali se dodaju volframu radi poboljšanja stabilnosti električnog luka, poboljšanja osobina elektrode za rad na visokim temperaturama ali i radi povećanja dubine uvarivanja. Tipične netopive volframove elektrode su prikazane na slici 7.10.



Slika 7.10 Netopive volframove elektrode

Netopive volframove elektrode su klasifikovane prema standardu SRPS EN ISO 6848:2008: Elektrolučno zavarivanje i rezanje – Netopive volframove elektrode – Klasifikacija⁹. One se proizvode sa prečnicima od $d_e=0,25\text{ mm}-10\text{ mm}$ i dužine do $l_e=600\text{ mm}$. Jačina struje i prečnik netopive elektrode su u sprezi – za zavarivanje većim jačinama struje, neophodno je da se odaberu elektrode većeg prečnika [12]. Preporučene vrednosti jačine struje i prečnika netopive elektrode prikazane su u prilogu.

Netopive elektrode se označavaju na osnovu hemijskog sastava, slovni-broječanim

⁷ Zavarivači ga nazivaju „masa“.

⁸ Identičan sa EN 60974-12:2011 CLC/TC 26A.

⁹ Identičan sa EN ISO 6848:2004 CEN/TC 121.

simbolom ali se označavaju i bojom (prilog).

7.4.2 Sistem za snabdevanje zaštitnim gasom. Zaštitni gasovi.

Sistem za snabdevanje zaštitnim gasom je sastavni deo izvora struje i kontrolisan je centralnom jedinicom izvora struje. Univerzalne komponente sistema, način skladištenja gasova i upotreba gasova detaljno su objašnjeni u poglavlju 2.

Osnovni zaštitni gas za zavarivanje postupcima iz grupe ISO 4063 — 14 je argon ali nije neuobičajena upotreba helijuma, njihove mešavine ali, ponekad, može da se upotrebi mešavina argona/helijuma sa redukujućim gasovima.

Pri zavarivanju najpoznatijim postupkom iz ove grupe – TIG postupkom (ISO 4063 — 141) koriste se inertni zaštitni gasovi: argon, helijum ili mešavina argona i helijuma. U Sjedinjenim Američkim Državama se više koristi helijum (ili mešavine sa većim procentom helijuma) zbog većih prirodnih rezervi helijuma, dok se u Evropi više koristi argon (i smeše sa višim procentom argona) jer je argon jeftiniji od helijuma¹⁰.



Slika 7.11 Žice za TIG postupak zavarivanja

Upotreba klasifikovanih i standardizovanih smeša gasova nije obavezna, ali se preporučuje upotreba smeša klasifikovanih standardima SRPS EN ISO

14175:2009 – Potrošni materijali za zavarivanje – Gasovi i gasne mešavine za zavarivanje topljenjem i srodne postupke¹¹ [13] ili (ređe) prema starijem standardu SRPS EN 439:2001 – Potrošni materijali za zavarivanje – Zaštitni gasovi za elektrolučno zavarivanje i rezanje¹² [14]. Za TIG postupak zavarivanja se najčešće koriste gasovi klasifikovani kao I1 (100% Ar), I2 (100% He) i I3 (Ar+He) (prilog).

Izbor zaštitnog gasa vrši se prema osnovnom materijalu (prilog).

7.4.3 Dodatni materijali

Dodatni materijali za zavarivanje postupcima ISO 4063 — 14 se u zavarivačkoj terminologiji nazivaju šipke ili žice za zavarivanje. One su prečnika $d_e=0,4$ mm–4 mm i dužine najčešće $l_e=1$ m (slika 7.11).

Izbor žice za zavarivanje vrši se prema osnovnom metalu pa su one tako i klasifikovane – prema materijalima koji se zavaruju:

SRPS EN ISO 636:2017: Potrošni materijali za zavarivanje – Šipke, žice i depoziti za TIG zavarivanje nelegiranih i finozrnih čelika – Klasifikacija¹³ [15];

SRPS EN ISO 16834:2013: Potrošni materijali za zavarivanje – Žičane elektrode, žice, šipke i depoziti za elektrolučno zavarivanje čelika povišene čvrstoće pod zaštitom gasa¹⁴ [16],

SRPS EN ISO 21952:2013: Potrošni materijali za zavarivanje – Žičane elektrode, žice, šipke i depoziti za elektrolučno zavarivanje pod zaštitom gasa čelika otpornih na puzanje – Klasifikacija¹⁵ [17],

SRPS EN ISO 14343:2011: Potrošni materijali za zavarivanje – Elektrodne žice, elektrodne trake, žice i šipke za elektrolučno zavarivanje nerđajućih i vatrootpornih čelika – Klasifikacija¹⁶ [18],

SRPS EN ISO 18274:2012: Potrošni

¹¹ Identičan sa: EN ISO 14175:2008 CEN/TC 121.

¹² Identičan sa: EN 439:1994 CEN/TC 121.

¹³ Identičan sa: ISO 636:2015 ISO/TC 44/SC 3.

¹⁴ Identičan sa: EN ISO 16834:2012 CEN/TC 121.

¹⁵ Identičan sa: EN ISO 21952:2012 CEN/TC 121.

¹⁶ Identičan sa: EN ISO 14343:2009 CEN/TC 121.

¹⁰ Zbog činjenice da je helijum lakši od vazduha i odlazi iz zone zavarivanja, potrošnja helijuma je 2 do 3 puta veća nego potrošnja argona.

materijali za zavarivanje – Pune žičane i pune trakaste elektrode, pune žice i pune šipke za zavarivanje topljenjem nikla i legura nikla - Klasifikacija¹⁷ [19];

SRPS EN ISO 24373:2012: Dodatni materijali za zavarivanje – Pune žice i šipke za zavarivanje topljenjem bakra i legura bakra – Klasifikacija¹⁸ [20];

SRPS EN ISO 18273:2017: Potrošni materijali za zavarivanje – Žičane elektrode, žice i šipke za zavarivanje aluminijuma i legura aluminijuma – Klasifikacija¹⁹ [21];

SRPS EN ISO 1071:2017: Potrošni materijali za zavarivanje – Obložene elektrode, žice, šipke i punjene žice za zavarivanje topljenjem sivog liva – Klasifikacija²⁰ [22];

SRPS EN ISO 24034:2012: Potrošni materijali za zavarivanje – Pune žičane elektrode, pune žice i pune šipke za zavarivanje topljenjem titanijuma i legura titanijuma – Klasifikacija²¹ [23];

Standardi kojima su klasifikovane i definisani principi obeležavanja elektroda, prikazani su u prilogu.

Žice za zavarivanje moraju da se isporuče korisniku tako da zadovoljavaju uslove definisane standardima SRPS EN ISO 544:2013: Potrošni materijal za zavarivanje – Uslovi isporuke za dodatne materijale i praškove – Vrste proizvoda, mere, tolerancije i obeležavanja²² [24] i SRPS EN ISO 14344:2012: Potrošni materijali za zavarivanje – Uputstva za nabavku dodatnih materijala i praškova²³ [25].

7.5 Tehnologija zavarivanja

Tehnologija zavarivanja postupcima iz grupe ISO 4063 — 14 obuhvata aktivnosti koje treba sprovesti kako bi se uspešno

izvršilo spajanje dva tela u monolitnu celinu. Aktivnosti koje treba sprovesti se mogu podeliti na:

- pripremne aktivnosti, odnosno, aktivnosti koje treba sprovesti pre početka zavarivanja,
- tekuće aktivnosti, odnosno, aktivnosti u toku zavarivanja i
- završne aktivnosti, odnosno, aktivnosti koje treba sprovesti nakon završenog zavarivanja.

Pripremne aktivnosti pre zavarivanja treba da pripreme realizaciju samog čina zavarivanja: vrši se projektovanje tehnologije zavarivanja, definiše se postupak zavarivanja, određuju se parametri zavarivanja, biraju se dodatni i potrošni materijali, priprema se osnovni metal – vrši se čišćenje, ispravljanje, stezanje, izrađuje se žleb itd.

Aktivnosti u toku zavarivanja obuhvataju realizaciju samog zavarivanja: radnik se upoznaje sa aktivnostima koje treba da realizuje, upoznaje se sa tehničkom dokumentacijom, proverava električnu i gasnu instalaciju, proverava ventile, podešava parametre zavarivanja; zatim se vrši zavarivanje odgovarajućom tehnikom, vrši se međuprolazno čišćenje i ispravljanje (ako je potrebno), kontrola tokom zavarivanja. Po završetku zavarivanja po potrebi, vrši se održavanje propisanih termičkih/toplotnih režima osnovnog, dodatnog i potrošnih materijala, zatim se vrši isključivanje/zatvaranje opreme, obezbeđenje instalacije i uređaja za zavarivanje, odlaganje opreme.

Završne aktivnosti obuhvataju sve aktivnosti kojima se zavareni spoj dovodi u realizovano stanje: kontrola, čišćenje, brušenje, površinska zaštita, ispravljanje (uklanjanje deformacija), termička obrada, demontaža i uklanjanje zavarenih delova sa radnog mesta (ukoliko je to potrebno i moguće).

Međutim, pod pojmom „tehnologija zavarivanja” na nivou radnog mesta (radionice i terena) podrazumevaju se aktivnosti kojima se definiše i realizuje zavarivanje određenih delova.

¹⁷ Identičan sa: EN ISO 18274:2010 CEN/TC 121.

¹⁸ Identičan sa: EN ISO 24373:2009 CEN/TC 121.

¹⁹ Identičan sa: EN ISO 18273:2015 CEN/TC 121.

²⁰ Identičan sa: EN ISO 1071:2015 CEN/TC 121.

²¹ Identičan sa: EN ISO 24034:2010 CEN/TC 121.

²² Identičan sa: EN ISO 544:2011 CEN/TC 121.

²³ Identičan sa: EN ISO 14344:2010 CEN/TC 121.

7.5.1 Priprema osnovnog materijala za zavarivanje

Priprema materijala za zavarivanje obuhvata sledeće aktivnosti:

- Čišćenje ivica i površina delova koji se zavaruju (uklanjanje boja, korozije, oksida, masti, prljavštine i sl);
- Priprema žleba za zavarivanje (ako je potrebno);
- Pažljivo postavljanje delova u položaj za zavarivanje i učvršćivanje kako bi se sprečilo pomeranje tokom zavarivanja,
- Izrada pripoja na odgovarajućim mestima, prema utvrđenom planu realizacije;
- Po potrebi, predgrevanje materijala radi poboljšanja zavarivosti, sprečavanja nastanka krtih faza u ZUT-u itd.

Čišćenje ivica i površina

Sve prljavštine (masnoće, boje, lakovi, korozija, ostaci mašinske obrade itd.) na površinama koje se zavaruju su potencijalni izvori uključaka koji mogu da prodru u tečno kupatilo i ostanu zarobljeni u metalu šava. Masnoće, boje i lakovi koji sagorevaju pri zavarivanju mogu formirati kancerogena isparenja i mogu uticati na zdravlje ljudi.

Poseban problem pri ISO 4063 — 14 postupcima zavarivanja predstavlja produktivnost – od radnika se očekuje visoka produktivnost a TIG postupak je, po samom konceptu, spor! Tako se radnik dovodi u situaciju da smatra da nema vremena za čišćenje delova te žuri da što pre uradi zavarivanje. Tada dolazi do pojave grešaka u šavu a onda mora da se radi reparacija upravo zavarenog šava – što košta i vremena i novca.

Priprema žlebova

Priprema žlebova je obavezna aktivnost koja mora da se sprovede pri realizaciji tehnologije zavarivanja.

Standard SRPS EN ISO 9692-1:2014: Zavarivanje i srodni postupci – Tipovi pripreme spoja – Deo 1: Ručno elektrolučno zavarivanje topivom elektrodom, elektrolučno zavarivanje topivom elektrodom u zaštitnom gasu, gasno zavarivanje, TIG zavarivanje i

zavarivanje čelika snopom²⁴, daje opšte preporuke za pripremu žlebova za zavarivanje TIG postupkom [26].

Standard SRPS EN ISO 9692-3:2008: Zavarivanje i srodni postupci – Preporuke za pripremu spoja – Deo 3: Elektrolučno zavarivanje u zaštiti inertnih gasova i elektrolučno zavarivanje sa volframovom elektrodom u zaštiti inertnog gasa aluminijuma i njegovih legura²⁵, daje opšte preporuke za pripremu žlebova na delovima od izrađenim od aluminijumovih legura [27].

U upotrebi su i stariji EN standardi koji su proistekli iz nemačkih DIN standarda. Oni ne propisuju, ne zahtevaju standardizaciju spojeva, niti sužavaju izbor mogućih rešenja pri izradi spojeva, već prikazuju primere realizovanih spojeva koji uspešno funkcionišu na tehničkim sistemima:

- SRPS EN 1708-1:2013: Zavarivanje – Osnovni detalji zavarenih čeličnih spojeva – Deo 1: Komponente pod pritiskom²⁶ [28],
- SRPS EN 1708-2:2008: Zavarivanje – Osnovni detalji zavarenih čeličnih spojeva - Deo 2: Komponente bez unutrašnjeg pritiska²⁷ [29] i
- SRPS EN 1708-3:2012: Zavarivanje – Osnovni detalji zavarenih čeličnih spojeva – Deo 3: Komponente pod pritiskom sa plakaturom, puferom i sa prevlakom (trakama)²⁸ [30].

U prilogu su dati detalji vezani za pripremu žleba za ISO 4063 — 14 postupke.

Pozicioniranje delova

Pozicioniranje delova podrazumeva postavljanje delova u položaj za zavarivanje, njihovo učvršćivanje (fiksiranje, stezanje) i zadržavanje željenog položaja delova do kraja zavarivanja. U ovu svrhu koriste se različiti alati i pribori: pozicioneri, stege, hvataljke, stezači, stezne šape, ugaonici, mašine sa magnetnim pločama, valjcima, laserski pozicioneri, manipulatori itd [31].

²⁴ Identičan sa: EN ISO 9692-1:2013 CEN/TC 121.

²⁵ Identičan sa: EN ISO 9692-3:2001 i EN ISO 9692-3:2001A1:2003 CEN/TC 121.

²⁶ Identičan sa: EN 1708-1:2010 CEN/TC 121.

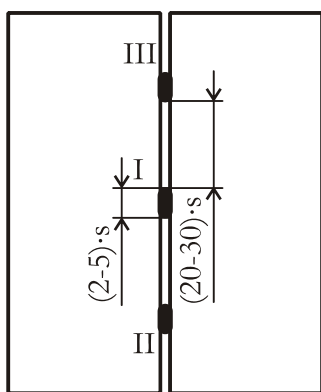
²⁷ Identičan sa: EN 1708-2:2000 CEN/TC 121.

²⁸ Identičan sa: EN 1708-3:2012 CEN/TC 121.

Izrada pripojnih šavova

Pripajanje je postupak spajanja ivica materijala samo na pojedinim mestima, pre početka samog zavarivanja. Svrha pripajanja je fiksiranje delova koji se zavaruju jedan u odnosu na drugi kako bi se umanjilo njihovo pomeranje tokom zavarivanja.

Pripajanje, po pravilu, počinje od sredine šava koji treba izraditi pa se izvodi naizmenično sa jedne i sa druge strane. Pripojni šavovi bi trebali da budu 2 do 5 puta debljina materijala a izvode se na rastojanju od 20 do 30 puta debljina materijala koji se zavaruje (slika 7.12). Ovakvim pristupom zavarivanja se ostvaruje ravnomerno rastojanje između ivica zavarenih limova pa je i šav homogenijeg sastava [2, 3, 6, 32, 33].



Slika 7.12 Pripojni šav, s - debljina limova koji se zavaruju, I, II, III – redosled izvođenja pripoja

Pripojni šavovi moraju da budu istog kvaliteta kao puni šav.

Pripojni šavovi se ne izvode kod limova veće debljine ili kod pojedinih cevastih delova gde poprečne dilatacije ne utiču na postupak zavarivanja.

Predgrevanje materijala

Predgrevanje materijala je termički postupak koji se primenjuje na osnovnom materijalu sa ciljem da se poboljša zavarivost. Odluku o predgrevanju materijala ne donosi zavarivač – zavarivač samo mora da sprovede postupak predgrevanja po utvrđenoj proceduri [34]. Određivanje režima predgrevanja je različito za različite materijale, položaje i opšte uslove zavarivanja pa se o predgrevanju materijala ne može govoriti uopšteno. Ipak, dovoljno je pomenuti: predgrevanje osnovnog materijala je deo

tehnologije zavarivanja

7.5.2 Priprema volframove (netopive) elektrode

Volframove elektrode se isporučuju u neobrađenom stanju – u obliku šipke, te je neophodno izvršiti pripremu (oštrjenje) vrha elektrode (slika 7.13) kako bi se ostvarili bolji efekti zavarivanja (slika 7.14).

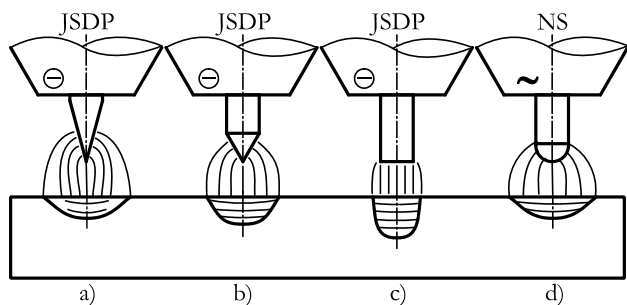
Vrh elektrode se oštiri u obliku:

- kupe ili zarubljene kupe, sa manjom ili većom kosinom,
- kalote, odnosno, sfere ili
- cilindra (ne oštiri se već se koristi u fabrički dobijenom obliku).



Slika 7.13 Vrh volframove elektrode, oblik i dimenzije traga koji ostavlja električni luk na osnovnom materijalu

Vrh elektrode se oštiri u obliku kupe (ili se ne oštiri) pri zavarivanju jednosmernom strujom. Kada je vrh kupe veoma šiljat (slika 7.14, a) dubina uvarivanja i širina šava nisu ekstremne ali je struja koncentrisana na usku zonu u sredini (teži tački) pa je manipulacija električnim lukom prilično jednostavna iako je električni luk u suštini veoma širok.



Slika 7.14 Vrh elektrode i uticaj na oblik i dubinu šava

Kada je vrh kupe manje oštar (slika 7.14, b), smanjuje se širina šava ali se povećava dubina uvarivanja, električni luk je manji i manje koncentrisan na sredinu šava. Kada je elektroda ravna, šav je najdublji i najuži, međutim, luk je uniformno raspoređen po čenoj površini elektrode i nema koncentrisanja energije u tački (slika 7.14, c).

Kada se zavarivanje vrši naizmjeničnom strujom, vrh elektrode se oštiri u obliku kalote (slika 7.14, d). Sferični vrh elektrode ne koncentriše struju pa je dubina uvarivanja manja nego pri zavarivanju jednosmernom strujom, ali je širina šava neznatno veća i rasipanje struje sa sferičnog vrha sprečava pregrevanje elektrode tokom poluperiode kada je elektroda pozitivno naelektrisana.

Naizmjenična struja sa sferično obrušenim vrhom elektrode daje oblik i dimenzije šava koje su uporedive sa dimenzijama šava koji je dobijen jednosmernom strujom sa oštrom obrušenim vrhom elektrode. Međutim, gustina struje je ravnomerno raspoređena kod sferičnog vrha dok je kod oštrog konusa koncentrisana u središnjoj tački. Pri zavarivanju pojedinih materijala je neophodno koncentrisati struju (npr. kod bakra) a kod nekih je neophodno rasipati je (npr. kod aluminijumovih legura serije 2xxx, [35]) kako bi zavarivanje uopšte bilo izvodljivo.

7.5.3 Rad sa opremom, priborom, dodatnim i potrošnim materijalima za zavarivanje

Oprema za zavarivanje TIG postupkom je robusna i otporna na različite mehaničke, termičke, hemijske i fizičke uticaje okoline.

Bez obzira na to, sa opremom za zavarivanje je neophodno postupati odgovorno i po uputstvima proizvođača, prema uputstvima na radnim listama ili prema primerima dobre prakse kada nema definisanih uputstava. Opremu i pribor za zavarivanje, kao i dodatne i potrošne materijale, je neophodno održavati u ispravnom stanju prevashodno radi sopstvene bezbednosti i bezbednosti ljudi u okolini ali i radi ostvarenja projektovane funkcije sistema za zavarivanje.

Pored ispravnog rada sa opremom i priborom, neophodno je poštovati i držati se ustaljenih aktivnosti pre, tokom i nakon zavarivanja kako bi se dostigao zahtevani kvalitet zavarenih spojeva uz minimalne troškove.

7.5.4 Zavarivanje

Zavarivanje postupcima ISO 4063 — 14, bez obzira na to da li su ručni, mehanizovani ili automatizovani, obavlja se uz nekoliko ograničenja/preporuka:

- Vrh elektrode ne sme da se uroni u tečno kupatilo već mora da se drži na konstantnom rastojanju od 3 mm do 5 mm (ili manje/više, ukoliko je tako propisano tehnologijom zavarivanja) od površine tečnog kupatila [3].
- Zona električnog luka mora uvek da prekriva celu površinu tečnog kupatila.
- Zaštitni gas mora da teče pre uspostavljanja električnog luka, tokom zavarivanja i nakon prekidanja električnog luka.
- Pištolj se vodi paralelno ivicama žleba, bez poprečnih pomeranja izvan granica žleba.
- Zavarivač mora da ima dobru koordinaciju pokreta kako bi mogao sinhronizovano da vodi pištolj sa elektrodom, održava električni luk i dodaje žicu u zonu zavarivanja.

7.5.5 Paljenje električnog luka: metode paljenja električnog luka i neophodna oprema

Električni luk između volframove elektrode i osnovnog materijala može da se

ustpostavi direktnim dodiranjem elektrode i radnih komada (ustpostavljanjem kratkog spoja) ili upotrebom odgovarajućih električnih uređaja koji aktiviraju električni luk.

Paljenje električnog luka dodiranjem volframove elektrode i osnovnog metala je rizičan metod paljenja električnog luka – usled velike gustine električne struje (velika količina struje protiče preko male kontaktne površine između vrha elektrode i osnovnog metala) volfranova elektroda se „zalepi“ za osnovni materijal što za posledicu ima mešanje volframa sa metalom šava i obaveznu pojavu nesavršenosti (greške) u zavarenom spoju [36].

Da bi se izbeglo lepljenje elektrode za osnovni metal, električni luk se uspostavlja pri strujama male jačine²⁹ i odmah po uspostavljanju se pojačava struja do potrebnog nivoa i započinje se zavarivanje. Ovako se uspostavlja električni luk kod izvora električne struje starije generacije [3].

Moderniji izvori struje za TIG postupke zavarivanja imaju ugrađene visokofrekventne (VF, na engleskom: *highfrequency* – HF) uređaje koji imaju funkciju da pokrenu električni luk bez direktnog kontakta elektrode i osnovnog metala. VF kratkotrajno (ne duže od nekoliko mikrosekundi) uspostavlja napon od nekoliko hiljada volti između elektrode i osnovnog metala, što omogućava da se uspostavi varnica i bez direktnog fizičkog kontakta. Atomi gasa oko elektrode se brzo jonizuju i uspostavlja se električni luk. Ukoliko se zavarivanje vrši jednosmernom strujom, VF se automatski isključuje. Ukoliko se zavarivanje vrši naizmeničnom strujom, VF nastavlja paljenje električnog luka sa svakom izmenom polariteta električne struje (50 puta u sekundi).

Kako VF formira veoma jako elektromagnetno polje, zavarivačko osoblje mora da bude svesno njegovog uticaja na ostale električne uređaje. Elektromagnetni talasi iz VF uređaja putuju kroz gasove ili čvrsta tela i izazivaju interferenciju talasa kod ostalih električnih uređaja. Tako, na primer, VF jednog TIG izvora struje, pod određenim uslovima može da isključi VF susednog izvora

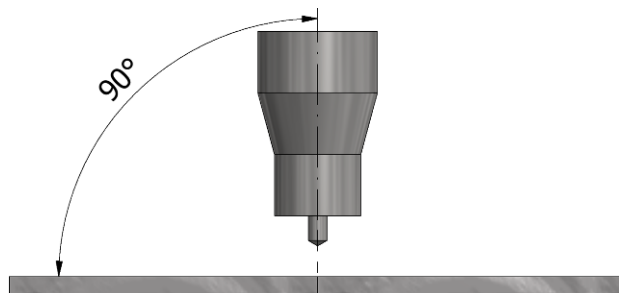
struje, može da ometa rad mobilnih telefona, računara, ali i da izazove pojavu slabih vrtložnih struja u osnovnom metalu koje mogu da pojačaju efekat magnetnog skretanja električnog luka [3].

Zahtevi bezbednog rada, zahtevi važne za zdravlje ljudi koji rade u blizini VF uređaja, zahtevi koji se odnose na održavanje VF uređaja, definiše standard SRPS EN 60974-3:2015: Oprema za elektrolučno zavarivanje – Deo 3: Uređaji za uspostavljanje i stabilizaciju luka³⁰ [37].

7.5.6 Tehnika zavarivanja

Pištolj sa elektrodom, počinje da udvava zaštitni gas kroz mlaznicu i približava se početnoj tački zavarivanja. Uspostavlja se električni luk između elektrode i radnih komada i započinje se zavarivanje. Za različite oblike i položaje zavarivanja, primenjuju se različite tehnike zavarivanja.

Kada je u pitanju postupak zavarivanja sučeonih spojeva ploča u horizontalnom položaju, mlaznica i elektroda se drže upravno na liniju spajanja i radne komade (slike 7.15 i 7.16).



Slika 7.15 Tehnika zavarivanja sučeonih spojeva kod ploča TIG postupkom – početak zavarivanja



Slika 7.16 Tehnika zavarivanja sučeonih spojeva kod ploča TIG postupkom – početak zavarivanja

²⁹ Na engleskom: *lift-arc*.

³⁰ Identičan sa: EN 60974-3:2014 CLC/TC 26A.

Po uspostavljanju stabilnog električnog luka, pištolj se nagnje za 15° do 20° po vertikali u smeru suprotnom od smeru zavarivanja i zadržava se u početnom položaju do stvaranja tečnog kupatila (slika 7.17).

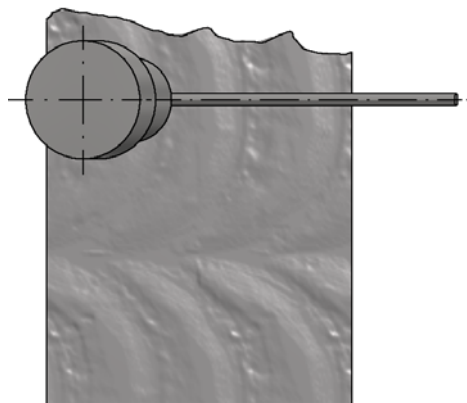


Slika 7.17 Tehnika zavarivanja sučeonih spojeva kod ploča TIG postupkom – nagnjanje elektrode

Nakon toga se u zonu zavarivanja uvodi dodatni materijal – žica za zavarivanje. Žica se drži pod uglom od 15° do 20° u odnosu na horizontalu (odnosno, 90° u odnosu na osu pištolja i elektrode) i pomera se napred-nazad kako bi je električni luk topio a rastopljeni materijal se deponovao kao metal šava (slike 7.18 do 7.20).



Slika 7.18 Tehnika zavarivanja sučeonih spojeva kod ploča TIG postupkom – nagib elektrode i dodatnog materijala tokom zavarivanja



Slika 7.19 Tehnika zavarivanja sučeonih spojeva kod ploča TIG postupkom – nagnjanje elektrode i žice (dodatnog materijala)



Slika 7.20 Tehnika zavarivanja sučeonih spojeva kod ploča TIG postupkom – nagnjanje elektrode i žice (dodatnog materijala), smer zavarivanja sa leva na desno



Slika 7.21 Tehnika zavarivanja sučeonih spojeva kod ploča TIG postupkom – primicanje i odmicanje elektrode uz ciklično pomeranje elektrode



Slika 7.22 Tehnika zavarivanja sučeonih spojeva kod ploča TIG postupkom – primicanje i odmicanje elektrodne žice uz ciklično pomeranje netopive elektrode

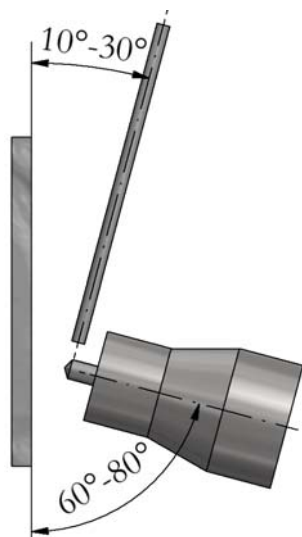


Slika 7.23 Tehnika zavarivanja sučeonih spojeva kod ploča TIG postupkom – primicanje i odmicanje elektrodne žice uz ciklično pomeranje netopive elektrode

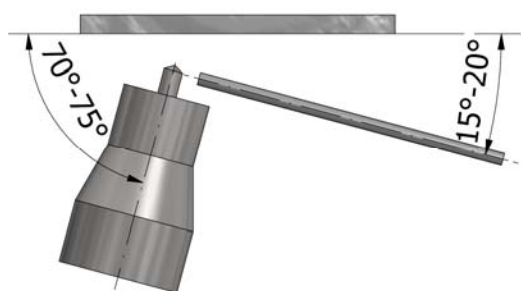
Kada je tečno kupatilo, sastavljeno od rastopljenog dela osnovnog metala i dodatnog metala, dovoljno veliko (lokalno je popunjen žleb), žica se povlači izvan zone zavarivanja a elektroda se pomera do prednje ivice tečnog kupatila (slika 7.21).

Ponavljanjem ciklusa do kraja linije spajanja, formira se neprekidni sučeonni šav (slike 7.22 do 7.23).

Tehnika zavarivanja sučeonih spojeva ploča u vertikalnom položaju se od tehnike zavarivanja sučeonih spojeva kod ploča u horizontalnom položaju razlikuje po nagibu elektrode i dodatnog materijala (slika 7.24) dok se parametri zavarivanja znatno razlikuju.



Slika 7.24 Tehnika zavarivanja sučeonih spojeva kod ploča TIG postupkom u vertikalnom položaju, smer zavarivanja: odozdo naviše

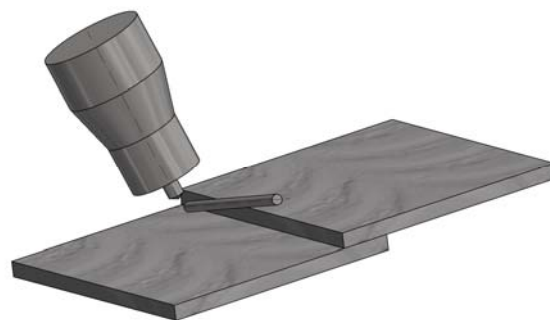


Slika 7.25 Tehnika zavarivanja sučeonih spojeva kod ploča TIG postupkom u nadglavnom položaju

Tehnika zavarivanja sučeonih spojeva kod ploča nad glavom se od tehnike zavarivanja sučeonih spojeva kod ploča u horizontalnom položaju ne razlikuje –

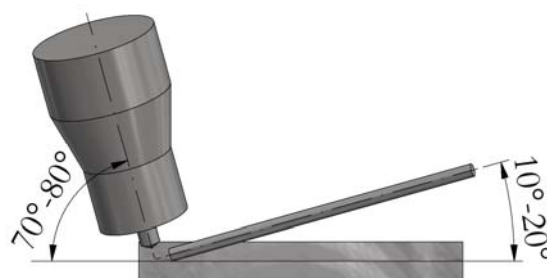
zavarivanje se vrši kao u ogledalu (slika 7.25) dok se parametri zavarivanja znatno razlikuju.

Tehnika zavarivanja preklopnih spojeva kod ploča se vrlo često primenjuje u praksi.

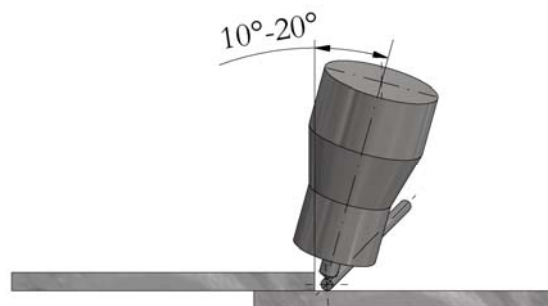


Slika 7.26 Tehnika zavarivanja preklopnih spojeva kod ploča TIG postupkom zavarivanja, smer zavarivanja: sa leva na desno

Ona se blago razlikuje od tehnike zavarivanja sučeonno postavljenih ploča: elektroda se postavlja upravno na liniju spajanja, nagnje u nazad za ugao 70°-80° ali se nagnje i 10°-20° u stranu – suprotno od nadvišene ploče (slike 7.26 do 7.28).



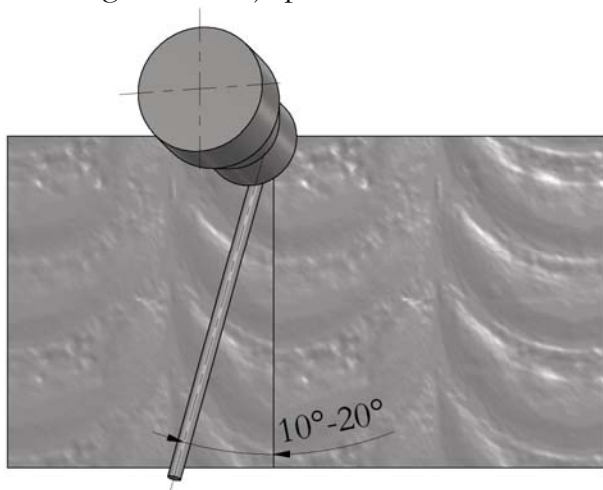
Slika 7.27 Tehnika zavarivanja preklopnih spojeva kod ploča TIG postupkom zavarivanja, smer zavarivanja: sa leva na desno



Slika 7.28 Tehnika zavarivanja preklopnih spojeva kod ploča TIG postupkom zavarivanja, smer zavarivanja: sa leva na desno

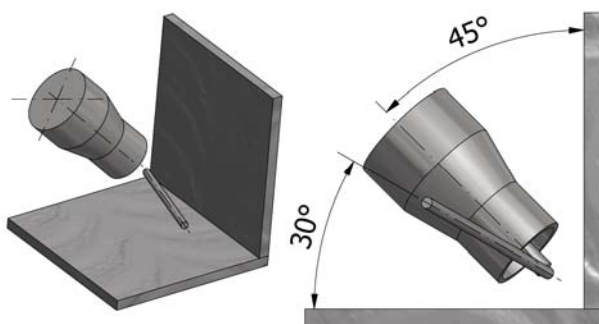
Dodatni materijal se nagine 10° - 20° u odnosu na horizontalu u smeru linije spajanja, ali se za istu vrednost ugla nagine u smeru suprotnom od nadvišene ploče (slika 7.29).

Elektroda i dodatni materijal se nagineju kako bi se ujednačilo topljenje gornje i donje ploče, ali i da bi se osiguralo ujednačeno pokrivanje čitave zone zavarivanja zaštitnim gasom. Ciklus zavarivanja je isti kao kod sućeonog zavarivanja ploča.



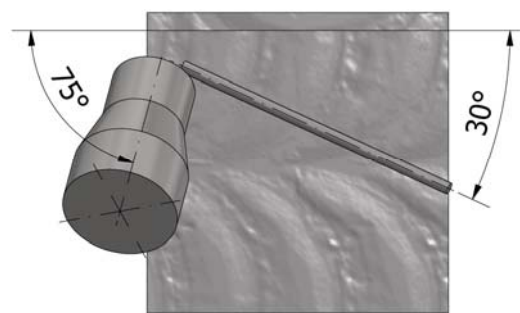
Slika 7.29 Tehnika zavarivanja preklopnih spojeva kod ploča TIG postupkom zavarivanja, smer zavarivanja: sa leva na desno (na slici: odozgo naniže)

Tehnika zavarivanja ploča koje su pod uglom (T-spoj) se neznatno razlikuje od tehnike zavarivanja sućeonog spoja kod ploča u horizontalnom položaju: zbog položaja ploča, neophodno je da se pištolj nagne u odnosu na ploče pod uglom od 45° (slika 7.30).



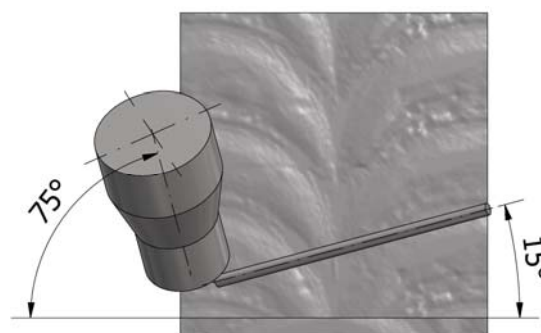
Slika 7.30 Tehnika zavarivanja ugaono postavljenih ploča TIG postupkom

Žica se drži pod uglom od 30° u odnosu na horizontalu, gledano sa boka (slika 7.30) i 15° u odnosu na horizontalu gledano sa lica.



Slika 7.31 Tehnika zavarivanja ugaono postavljenih ploča TIG postupkom

Pištoli se nagine 15° u nazad (po vertikali, odnosno, 75° prema horizontali) kako bi lakše sledio žicu (slike 7.31 i 7.32).



Slika 7.32 Tehnika zavarivanja ugaono postavljenih ploča TIG postupkom

7.5.7 Parametri zavarivanja

Osnovni parametri zavarivanja TIG postupkom se biraju u odnosu na osnovni metal i položaj u kome se vrši zavarivanje. Potrebno je da se izaberu odgovarajući prečnici volframove elektrode i elektrodne žice, zatim se bira odgovarajuća jačina električne struje i usaglašava se protok zaštitnog gasa sa odabranim parametrima zavarivanja i sa uslovima radnog mesta. Preporuke za pojedine materijale i položaje zavarivanja su prikazane u prilogu, ali je važno držati se preporuka proizvođača opreme, potrošnih i dodatnih materijala za zavarivanje uz korekcije, ukoliko su potrebne.

Izbor zaštitnog gasa

Uobičajeni zaštitni gas za TIG postupak zavarivanja je argon, a koristi se i helijum. Dodatak malog procenta helijuma u atmosferi argona povećava penetraciju električnog luka i viskoznost tečnog kupatila. Međutim,

mešavina argona i helijuma se može koristiti u bilo kom odnosu za zavarivanje bilo koje vrste materijala. Zaštitnoj atmosferi sa osnovnim gasom argonom ili helijumom se mogu dodati azot i vodonik radi dodatnog poboljšanja pojedinih osobina zavarenog spoja. U prilogu su prikazane smernice za izbor zaštitnih gasova pri zavarivanju.

7.5.8 Prekidanje zavarivanja

Prekidanje zavarivanja vrši se u dva koraka: prvo se iz zone zavarivanja izvlači žica za zavarivanje a potom se prekida električni luk. Električni luk se prekida isključenjem struje (ređe) ili prostim udaljenjem elektrode od osnovnog metala. Međutim, u oba slučaja je neophodno da se pištolj zadrži u zoni zavarivanja neko vreme kako bi zaštitni gas, koji ističe iz mlaznice pištolja, nastavio da prekriva tečno kupatilo koje se hladi i očvršćava. Tako se sprečava negativan uticaj gasova i vlage iz atmosfere na zavareni šav, usporava se hlađenje metala šava i sprečava nastanak prslina u zavarenom šavu.

Po završetku rada, pištolj se odlaže na odgovarajuće mesto i isključuje se izvor električne struje (kod većine izvora, sa isključenjem dovoda struje se zatvara i protok zaštitnog gasa).

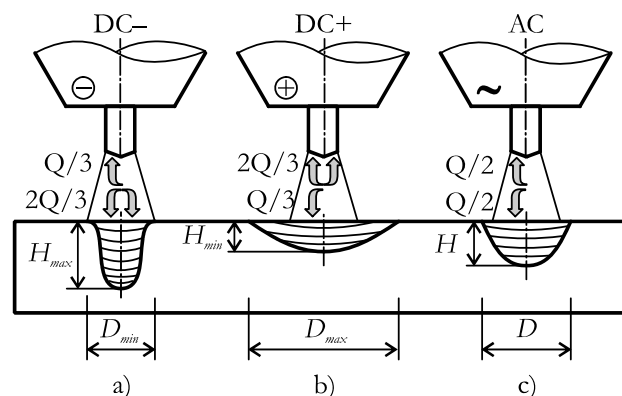
Posebna pažnja treba da se obrati na provodnike – po pravilu, oni su razvučeni po podu zavarivačke radionice i preko njih se prelazi bez prevelikog obzira. Provodnike uvek treba prikupiti i namotati.

7.5.9 Efekat tipa električne struje i polaritet: JSIP, JSDP, NS

Tip električne struje i polaritet struje su veoma važni za zavarivanje TIG postupcima. Neki materijali su izrazito zavarivi jednim tipom struje, određenog polariteta, dok su drugim tipovima struje ili strujom drugog polariteta potpuno nezavarivi. Tabela 7.1 prikazuje koje tipove struje i kog polariteta treba koristiti za pojedine materijale.

Upotreba različitih tipova struje i polariteta ima veliki uticaj na oblik šava i dubinu uvarivanja (slika 7.33).

Primena jednosmerne struje direktnog polariteta (JSDP) ostvaruje dubok i uzan šav i približno dve trećine generisane toplote (Q) odlazi na osnovni materijal (anodu) dok se jedna trećina toplote predaje elektrodi. Sa elektrode se emituju elektroni velike brzine koji udaraju u površinu osnovnog metala, ali je njihov mehanički uticaj na površinu metala mali pa ne postoji značajniji efekat površinskog čišćenja.



Slika 7.33 Oblik šava kod TIG postupaka zavarivanja zavisno od tipa struje: a) jednosmerna struja direktnog polariteta, b) jednosmerna struja indirektnog polariteta, c) naizmjenična struja

Tabela 7.1 Tipovi struje i polaritet koje treba koristiti za zavarivanje pojedinih materijala [3]

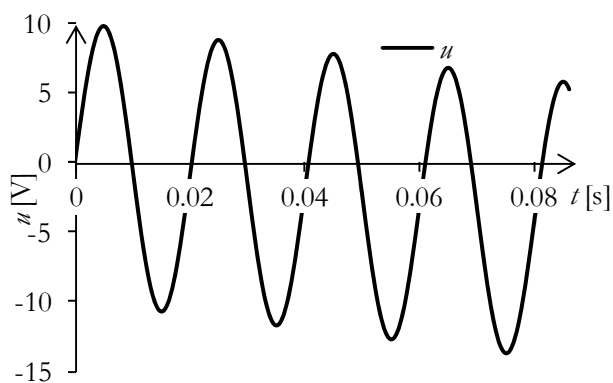
Materijal	Tip struje		
	JSDP	JSIP	AC
Aluminijum i legure debljine $\delta \leq 2,5$ mm	✓	✓	☑
Aluminijum i legure debljine $\delta > 2,5$ mm	✓	✗	☑
Mg i legure	✗	✓	☑
Nelegirani i nisko legirani čelici	☑	✗	✗
Nerđajući čelici	☑	✗	✗
Bakar	☑	✗	✗
Bronza	☑	✗	✓
Aluminijumova bronza	✓	✗	☑
Silikatna bronza	☑	✗	✗
Nikal i legure	☑	✗	✓
Titanijum i legure	☑	✗	✓
✗ – neprihvatljivo, ✓ – prihvatljivo, ☑ – najbolje			

To je osnovni razlog zašto se jednosmernom strujom direktnog polariteta zavaruju čelici, bakar, nikal i njihove legure

koji nemaju teško topive okside na površini.

Primena jednosmerne struje indirektnog polariteta (JSIP) ostvaruje širok ali plitak šav i približno jedna trećina generisane toplote se odvodi na elektrodu dok se jedna trećina generisane toplote predaje osnovnom metalu. U ovom slučaju, osnovni metal emituje elektrone koji udaraju u elektrodu (i zagrevaju je) dok joni iz elektrode i atmosfere udaraju u osnovni metal te je prisutno značajnije mehaničko razaranje površinskog sloja osnovnog metala. Površinski sloj pojedinih metala uglavnom čine teško topivi oksidi koji otežavaju zavarivanje pa je razaranje površinskog sloja usled udara masivnih jona povoljno sa aspekta zavarivanja. Ovakvo dejstvo jona na površinu osnovnog materijala naziva se jonsko čišćenje. Ipak, primena jednosmerne struje indirektnog polariteta je zanemarljiva, najviše zbog preteranog zagrevanja i habanja volframove elektrode.

Zavarivanje naizmeničnom strujom daje šav koji se, po dimenzijama, nalazi između minimuma i maksimuma koji se ostvaruju jednosmernom strujom a generisana toplota se gotovo podjednako raspodeljuje elektrodi i osnovnom metalu (približno polovima toplote elektrodi, a polovina osnovnom metalu). Zbog promene polariteta naizmenične struje tokom vremena, električni luk je nestabilan te je neophodna primena VF uređaja.

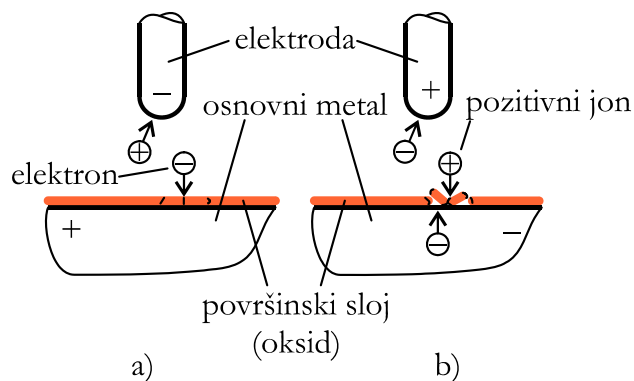


Slika 7.34 Karikirani prikaz iskrivljenja sinusoide napona naizmenične struje usled nejednake emisije elektrona iz volframove elektrode i osnovnog metala

Sa promenom polariteta menja se izvor emisije elektrona – jednu poluperiodu elektrone emituje elektroda a tokom druge poluperiode elektrone emituje osnovni metal.

Kako volfram i ostali metali ne emituju elektrone u istom obimu, dolazi do „iskrivljenja” sinusoide naizmenične struje – negativni deo sinusoide postaje veći u odnosu na pozitivni deo (slika 7.34).

Zbog „iskrivljenja sinusoide” napona/struje dolazi do pregrevanja izvora električne struje i same elektrode. Izvori električne struje novijeg datuma proizvodnje imaju ugrađene uređaje koji ispravljaju ovu nesimetričnost, umiruju proces zavarivanja i pojačavaju efekat čišćenja površine metala.



Slika 7.35 Efekat čišćenja površine metala

Efekat čišćenja površine metala predstavlja proces razbijanja površinskog sloja teškotopivih oksida na površini metala usled udarnog dejstva elektrona i jona. Elektroni i joni se kreću, unutar električnog luka, saglasno naelektrisanju elektrode, odnosno, osnovnog metala. Tokom negativne poluperiode električne struje (elektroda je negativno naelektrisana, slika 7.35, a), elektroni koji izleću iz elektrode (kao i negativno naelektrisani joni prisutni u zoni dejstva električnog luka) privučeni su pozitivno naelektrisanim osnovnim metalom; oni udaraju u njegovu površinu – sloj oksida, i delimično ga razbijaju. Istovremeno, elektroda privlači pozitivne jone (koji udaraju u nju i zagrevaju je). Tokom pozitivne poluperiode (elektroda je pozitivno naelektrisana, slika 7.35, b), elektroni izleću iz osnovnog metala i kreću se ka elektrodi. Istovremeno, negativno naelektrisani, osnovni metal privlači pozitivne jone iz električnog luka. U ovom slučaju, i elektroni koji izleću iz osnovnog metala, i pozitivni joni koji doleću do osnovnog metala, udaraju u oksidni sloj na površini osnovnog

metala i razbijaju ga.

Princip čišćenja površine metala, pri pozitivnom naelektrisanju elektrode, usled udarnog dejstva pozitivnih jona (i elektrona) na površinu osnovnog metala, naziva se „katodno čišćenje”. Zahvaljujući efektu čišćenja, naizmeničnom strujom se, relativno lako, zavaruju aluminijum, magnezijum, nerđajući čelici itd. – metali koji su skloni stvaranju „sloja” na površini.

7.5.10 Specifični zahtevi pri zavarivanju aluminijuma

Aluminijum je specifičan metal koji se vrlo često koristi u automobilske i avio-industriji gde, po pravilu, ima mnogo zavarivanja. Specifičnosti aluminijuma u odnosu na čelik su brojne (manja gustina, bolja otpornost na koroziju itd.), ali nisu sve preterano važne za zavarivanje aluminijuma.

Aluminijum u elementarnom obliku se vrlo retko primenjuje u industriji, pa se samim tim vrlo retko zavaruje. Međutim, legure aluminijuma se često koriste pa se redovno kaže „aluminijum” a misli se na „legura aluminijuma”. Sa aspekta zavarivosti, legure aluminijuma mogu biti lako zavarive (serije 1xxx, 3xxx, 4xxx, 5xxx i 6xxx), uslovno zavarive ili potpuno nezavarive (2xxx i 7xxx)³¹ [35].

Specifičnosti aluminijuma koje su važne za zavarivanje su veoma visoka toplotna provodnost, sklonost ka oksidaciji i stvaranju sloja oksida na površini „aluminijuma” [35].

Zbog velike toplotne provodnosti, na samom početku zavarivanja aluminijuma je neophodno dovesti veliku količinu energije kako bi se osnovni metal zagrejao. Nakon zagrevanja je neophodno da se umani unos energije u zavareni šav jer prethodno unešena energija predgreva nezavareni materijal. Samim tim je novounešena energija višak i vrlo lako može doći do pregrevanja – što nepovoljno utiče na zavareni šav [3].

Aluminijum i njegove legure su uvek prevučeni slojem oksida koji se ponaša kao

patina i sprečava razaranje metala³². Sve legure aluminijuma se tope na relativno niskim temperaturama (maksimalno 650°C) dok se tvrdi sloj oksida na površini legure topi na mnogo višim temperaturama (oko 1800°C ili čak i više). Dodatni problem predstavlja isparavanje aluminijuma na približno 1550°C što je, opet, niže od tačke topljenja oksida [3].

Oksidi aluminijuma imaju veću specifičnu masu od aluminijuma (ili njegove legure) tako da tonu u rastopljenom tečnom kupatilu te postoji velika verovatnoća njihovog ostanka u zavarenom spoju u vidu uključka.

Zbog navedenih specifičnosti aluminijuma neophodno je preduzeti neke mere predostrožnosti pre i tokom zavarivanja:

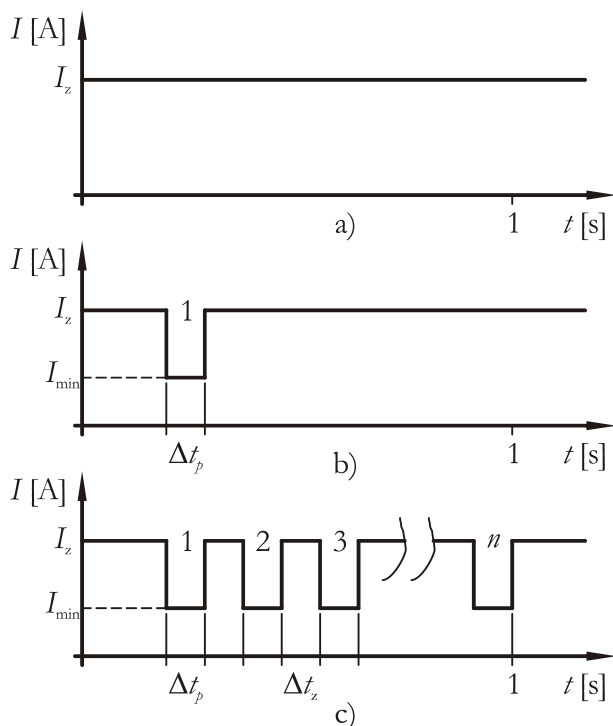
- površine radnih komada moraju da budu dobro očišćene od nečistoća i oksida neposredno pre zavarivanja (zbog brzog nastajanja oksida aluminijuma);
- zavarivanje aluminijuma vrši se naizmeničnom strujom zbog efekta čišćenja površinskog oksidnog sloja;
- zavarivanje se vrši elektrodama i žicama maksimalnog prečnika, sa maksimalno dopuštenim strujama, uz korigovanje (smanjenje) jačine električne struje tokom zavarivanja;
- strogo se vodi računa o izboru odgovarajućeg dodatnog materijala.

7.6 Zavarivanje impulsnom strujom (pulsna tehnika zavarivanja)

Pulsna tehnika kod TIG postupaka zavarivanja predstavlja modifikovani vid zavarivanja jednosmernom strujom (JSIP, slika 7.36, a, ili JSDP) gde se učestano menja jačina struje tokom zavarivanja. Promena jačine struje se izvodi ručno (kod uređaja sa kontrolnom pedalom – nogom) ili automatski (ukoliko izvor struje poseduje module za pulsnu tehniku).

³¹ Sve zavarive legure aluminijuma su zavarive TIG postupcima zavarivanja.

³² Sloj aluminijum oksida debljine 1 atoma nastaje za približno 1/30 sekundi [6].



Slika 7.36 Jednosmerna struja zavarivanja: a) neprekidna, b) sa jednim pulsom, c) sa n pulseva

Promena jačine struje tokom vremenskog perioda naziva se (im)puls te se zato i tehnika naziva (im)pulsnom tehnikom.

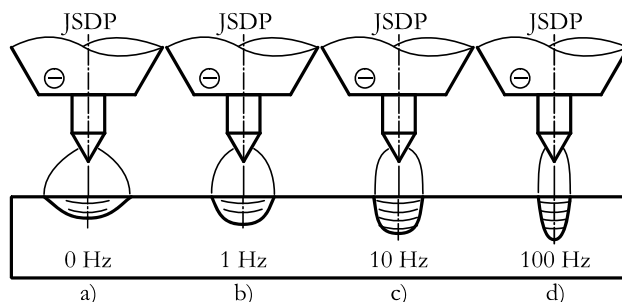
Pulsevi mogu da budu jednakog ili različitog trajanja (Δt_p , slika 7.36, b i c), mogu da se javljaju u jednakim ili nejednakim razmacima (Δt_z , slika 7.36, b i c), pri čemu jačina struje može i ne mora da dostigne istu ekstremnu vrednost tokom trajanja pulsa (I_{min} , slika 7.36, b i c).

Izvori struje novije proizvodnje imaju podešavanja za sve navedene parametre zavarivanja (trajanje pulsa, period između pulseva, učestanost pulsiranja, ekstremna vrednost jačine struje pri pulsiranju itd).

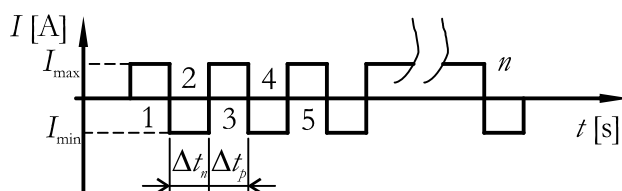
Osnovne prednosti pulsne tehnike zavarivanja su: bolje koncentrisanje energije u zoni električnog luka (uži električni luk) uz izbegavanje pregrevanja osnovnog metala (ali i elektrode), dobijanje užeg ali dubljeg šava, manja zona uticaja toplote i nešto veća brzina zavarivanja. Osnovni nedostatak je potreba za dobro obučenim zavarivačem koji može da isprati pulsiranje električnog luka (promena jačine svetlosti, dimenzija električnog luka i sl.) i pri tom uradi kvalitetan šav.

Na slici 7.37 prikazani su oblici i dimenzije šava dobijene primenom struje bez

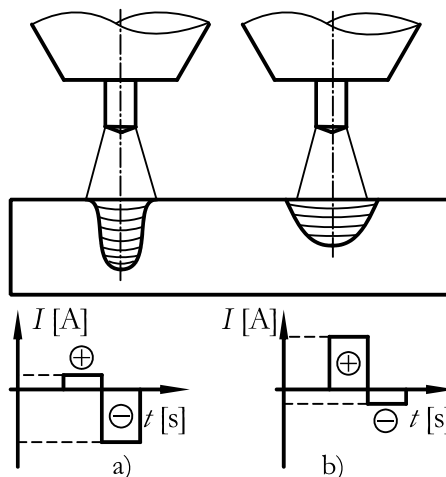
pulzacije (slika 7.37, a) i šavova dobijenih primenom pulsirajuće struje različitih učestanosti (slika 7.37, b, c, d). Osnovni zaključak je: primena pulsirajuće struje bolje koncentriše energiju u zoni zavarivanja.



Slika 7.37 Šematski prikaz dubine i širine šava dobijenog TIG postupkom zavarivanja jednosmernom strujom: a) bez pulzacije, b) sa 1 pulsom u sekundi, c) sa 10 pulseva u sekundi, d) sa 100 pulseva u sekundi



Slika 7.38 Pulsna naizmjenična struja



Slika 7.39 Uticaj kvazi naizmjeničnog pulsa na dimenzije šava: a) puls je dominantno negativan, b) puls je dominantno pozitivan

U praksi se, sve češće, primenjuju pulsirajuće naizmjenične struje, pogotovu pri zavarivanju teško zavarivih aluminijumovih legura. Izvor električne struje daje jedan puls jednosmerne struje direktnog polariteta, zatim isključuje napajanje, pa onda daje jedan puls jednosmerne struje indirektnog polariteta.

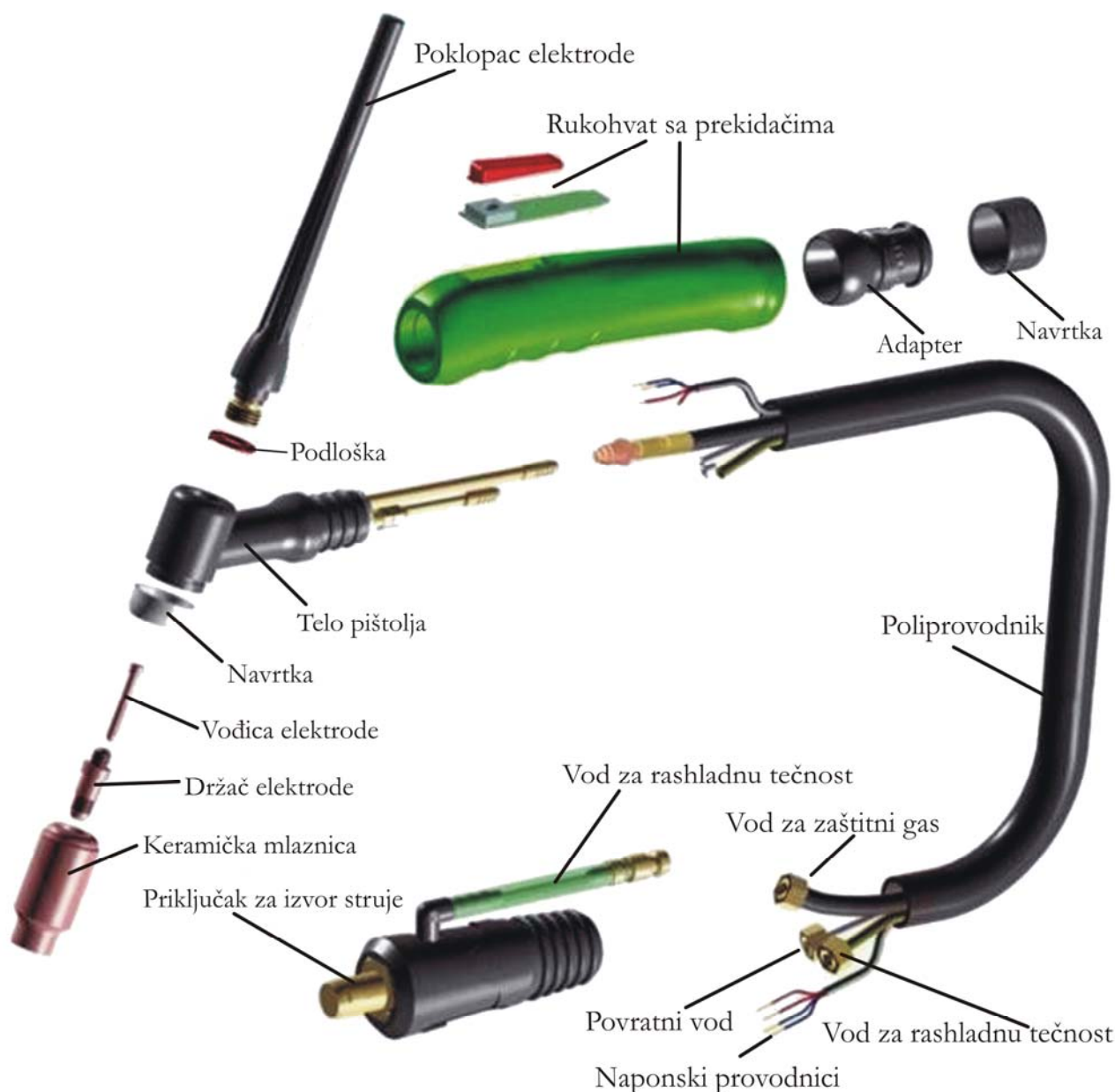
Nakon toga, izvor isključuje napajanje (gasi puls) i ponavlja ceo ciklus. Tako se formira naizmenična struja sačinjena od pulseva jednosmerne struje različitih polariteta (slika 7.38).

Jačina električne struje kod negativnog i pozitivnog pulsa ne mora da bude istog intenziteta – primenjuje se i nesimetrična pulsna struja (slika 7.39).

Ukoliko je negativni puls dominantniji po maksimalnom intenzitetu od pozitivnog

(slika 7.39, a), dobijeni šav je uži ali dublji nego kod šava dobijenog pulsom kod koga je pozitivan puls dominantan (slika 7.39, b).

Primenom nesimetrične pulsne tehnike dobija se efekat katodnog/jonskog čišćenja kao i kod naizmenične struje, ali je raspodela toplote na elektrodi i osnovnom metalu drugačija. Pulsna tehnika zahteva primenu izvora struje koji su opremljeni uređajima i elektronskim komponentama koje mogu da obezbede pulzaciju električnog luka.



Slika 7.40 Osnovni delovi pištolja za TIG postupak zavarivanja i poliprovodnik

LITERATURA

- [1] <http://weldguru.com/welding-history/> (dokument pregledan 16.9.2016);
- [2] The Welding Institute: <http://www.twi-global.com/technical-knowledge/job-knowledge/>, (od 2015-);
- [3] Autorizovana predavanja na kursevima za međunarodne inženjere i tehnologe zavarivanja, Mašinski fakultet Niš, 2007-2016;
- [4] SRPS EN ISO 4063:2013 Zavarivanje i srodni postupci – Lista postupaka i njihovo označavanje, 28.01.2013;
- [5] <https://www.millerwelds.com/resources> (grafički prikazi su preuzeti i retuširani tokom 2016. godine);
- [6] The James F. Lincoln Arc Welding: The Procedure Handbook of Arc Welding, 14th Edition, ASIN: B000FBCQ4M, 2015;
- [7] Miomir Vukićević: Tehnologija spajanja materijala – Zavarivanje 1, ISBN 978-86-82631-73-6, Fakultet za mašinstvo i građevinarstvo u Kraljevu, 2014;
- [8] SRPS EN 60974-1:2012: Oprema za elektrolučno zavarivanje – Deo 1: Izvori struje za zavarivanje, 29.11.2012;
- [9] SRPS EN 60974-7:2014: Oprema za elektrolučno zavarivanje – Deo 7: Gorionici, 30.05.2014;
- [10] SRPS EN 60974-2:2015: Oprema za elektrolučno zavarivanje – Deo 2: Sistemi za hlađenje tečnošću, 24.03.2015;
- [11] SRPS EN 60974-12:2012: Oprema za elektrolučno zavarivanje – Deo 12: Spojne naprave za zavarivačke kablove, 30.03.2012;
- [12] SRPS EN ISO 6848:2017: Elektrolučno zavarivanje i rezanje – Netopive volframove elektrode – Klasifikacija, 31.01.2017;
- [13] SRPS EN ISO 14175:2009: Potrošni materijali za zavarivanje – Gasovi i gasne mešavine za zavarivanje topljenjem i srodne postupke, 09.07.2009;
- [14] SRPS EN 439:2001: Potrošni materijali za zavarivanje – Zaštitni gasovi za elektrolučno zavarivanje i rezanje, 09.10.2001;
- [15] SRPS EN ISO 636:2017: Potrošni materijali za zavarivanje – Šipke, žice i depoziti za TIG zavarivanje nelegiranih i finozrnih čelika – Klasifikacija, 31.01.2017;
- [16] SRPS EN ISO 16834:2013: Potrošni materijali za zavarivanje – Žičane elektrode, žice, šipke i depoziti za elektrolučno zavarivanje čelika povišene čvrstoće pod zaštitom gasa, 29.11.2013;
- [17] SRPS EN ISO 21952:2013: Potrošni materijali za zavarivanje – Žičane elektrode, žice, šipke i depoziti za elektrolučno zavarivanje pod zaštitom gasa čelika otpornih na puzanje – Klasifikacija, 29.11.2013;
- [18] SRPS EN ISO 14343:2011: Potrošni materijali za zavarivanje – Elektrodne žice, elektrodne trake, žice i šipke za elektrolučno zavarivanje nerđajućih i vatrootpornih čelika – Klasifikacija, 30.09.2011;
- [19] SRPS EN ISO 18274:2012: Potrošni materijali za zavarivanje – Pune žičane i pune trakaste elektrode, pune žice i pune šipke za zavarivanje topljenjem nikla i legura nikla – Klasifikacija, 21.06.2012;
- [20] SRPS EN ISO 24373:2012: Dodatni materijali za zavarivanje – Pune žice i šipke za zavarivanje topljenjem bakra i legura bakra – Klasifikacija, 21.06.2012;
- [21] SRPS EN ISO 18273:2017: Potrošni materijali za zavarivanje – Žičane elektrode, žice i šipke za zavarivanje aluminijuma i legura aluminijuma – Klasifikacija, 31.01.2017;

- [22] SRPS EN ISO 1071:2017: Potrošni materijali za zavarivanje – Obložene elektrode, žice, šipke i punjene žice za zavarivanje topljenjem sivog liva – Klasifikacija, 31.01.2017;
- [23] SRPS EN ISO 24034:2012: Potrošni materijali za zavarivanje – Pune žičane elektrode, pune žice i pune šipke za zavarivanje topljenjem titana i legura titana – Klasifikacija, 21.06.2012;
- [24] SRPS EN ISO 544:2013: Potrošni materijal za zavarivanje – Uslovi isporuke za dodatne materijale i praškove – Vrste proizvoda, mere, tolerancije i obeležavanja, 28.01.2013;
- [25] SRPS EN ISO 14344:2012: Potrošni materijali za zavarivanje – Uputstva za nabavku dodatnih materijala i praškova, 23.05.2012;
- [26] SRPS EN ISO 9692-1:2014: Zavarivanje i srodni postupci – Tipovi pripreme spoja – Deo 1: Ručno elektrolučno zavarivanje topivom elektrodom, elektrolučno zavarivanje topivom elektrodom u zaštitnom gasu, gasno zavarivanje, TIG zavarivanje i zavarivanje čelika snopom, 29.08.2014;
- [27] Standard SRPS EN ISO 9692-3:2008: Zavarivanje i srodni postupci – Preporuke za pripremu spoja - Deo 3: Elektrolučno zavarivanje u zaštiti inertnih gasova i elektrolučno zavarivanje sa volframovom (tungstenovom) elektrodom u zaštiti inertnog gasa aluminijuma i njegovih legura, 27.02.2008;
- [28] SRPS EN 1708-1:2013: Zavarivanje – Osnovni detalji zavarenih čeličnih spojeva – Deo 1: Komponente pod pritiskom, 28.01.2013;
- [29] SRPS EN 1708-2:2008: Zavarivanje – Osnovni detalji zavarenih čeličnih spojeva - Deo 2: Komponente bez unutrašnjeg pritiska, 27.02.2008;
- [30] SRPS EN 1708-3:2012: Zavarivanje – Osnovni detalji zavarenih čeličnih spojeva – Deo 3: Komponente pod pritiskom sa plakaturom, puferom i sa prevlakom (trakama), 21.06.2012;
- [31] Miomir Vukićević, Uređaji i pribori u zavarivanju, ISBN 978-86-82631-60-6, Mašinski fakultet Kraljevo, 2012;
- [32] Milorad Jovanović, Dragan Adamović, Vukić Lazić: Priručnik za tehnologiju zavarivanja, YU ISSN 013-8523, Jugoslovensko društvo za tribologiju, Mašinski fakultet Kragujevac, 1995;
- [33] Avram Majstorović, Milorad Jovanović: Osnovi zavarivanja, lemljenja i lepljenja, ISBN 86-23-43076-X, Naučna knjiga, Beograd, 1991;
- [34] SRPS EN ISO 13916:2013: Zavarivanje – Uputstvo za merenje temperature predgrevanja, međuprolazne temperature i temperature održavanja predgrevanja, 28.01.2013;
- [35] Vencislav Grabulov: Autorizovana predavanja na kursovima za međunarodne inženjere i tehnologe zavarivanja, Mašinski fakultet Niš, 2007-2016;
- [36] SRPS EN ISO 6520-2:2014: Zavarivanje i srodni postupci – Klasifikacija geometrijskih nepravilnosti u metalnim materijalima – Deo 2: Zavarivanje pritiskom, 29.08.2014;
- [37] SRPS EN 60974-3:2015: Oprema za elektrolučno zavarivanje – Deo 3: Uređaji za uspostavljanje i stabilizaciju luka, 24.03.2015;
- [38] C. Hasse, W. Reitze: Elektrolučno zavarivanje – priručnik, Građevinska knjiga, Beograd, 1982;
- [39] SRPS EN 169:2008: Lična zaštita očiju - Filtri za zavarivanje i srodne tehnike - Zahtevi u pogledu koeficijenta transmisije i preporučena upotreba, 21.01.2008;
- [40] SRPS EN 170:2008: Lična zaštita očiju – Filtri za ultraljubičasto zračenje – Zahtevi u pogledu koeficijenta i preporučena upotreba, 27.02.2008;
- [41] SRPS EN 171:2008: Lična zaštita očiju – Filtri za infracrveno zračenje – Zahtevi u pogledu koeficijenta transmisije i preporučena upotreba, 27.02.2008;
- [42] SRPS EN 175:2008: Lična zaštita – Oprema za zaštitu očiju i lica tokom zavarivanja i srodnih postupaka, 21.01.2008;

- [43] SRPS EN 379:2011: Lična zaštita očiju – Automatski filtri za zavarivanje, 28.11.2011;
- [44] SRPS EN ISO 11611:2016: Zaštitna odeća koja se upotrebljava prilikom zavarivanja i srodnih procesa, 29.02.2016;
- [45] SRPS EN 12477:2007: Zaštitne rukavice za zavarivače, 25.07.2007;
- [46] SRPS EN ISO 10882-1:2012: Zdravlje i bezbednost pri zavarivanju i srodnim postupcima – Uzorkovanje čestica i gasova iz vazduha u zoni disanja operatera – Deo 1: Uzorkovanje čestica iz vazduha, 23.05.2012;
- [47] SRPS EN ISO 10882-2:2008: Zdravlje i bezbednost pri zavarivanju i srodnim postupcima – Uzorkovanje čestica i gasova iz vazduha u zoni disanja operatera – Deo 2: Uzorkovanje gasova, 09.09.2008;
- [48] SRPS EN ISO 14114:2015: Oprema za gasno zavarivanje – Sistemi za snabdevanje acetilenom za zavarivanje, rezanje i srodne postupke – Opšti zahtevi, 30.09.2015;
- [49] SRPS EN ISO 15615:2014: Oprema za gasno zavarivanje – Sistemi acetilenskih vodova za zavarivanje, rezanje i srodne postupke – Zahtevi za bezbednost uređaja pod visokim pritiskom, 29.08.2014.

8 ELEKTROLUČNI POSTUPCI ZAVARIVANJA TOPIVOM ELEKTRODNOM ŽICOM U ATMOSFERI ZAŠTITNOG GASA

Elektrolučni postupci zavarivanja topivom elektrodom u atmosferi zaštitnog gasa su trenutno najprimenljiviji postupci zavarivanja u industriji [1]. Njihova primenljivost na veliki broj materijala, mogućnost zavarivanja u različitim položajima i lokacijama, povoljan odnos cene i efekta realizacije daju veliku prednost ovoj grupi postupaka zavarivanja u odnosu na ostale postupke.

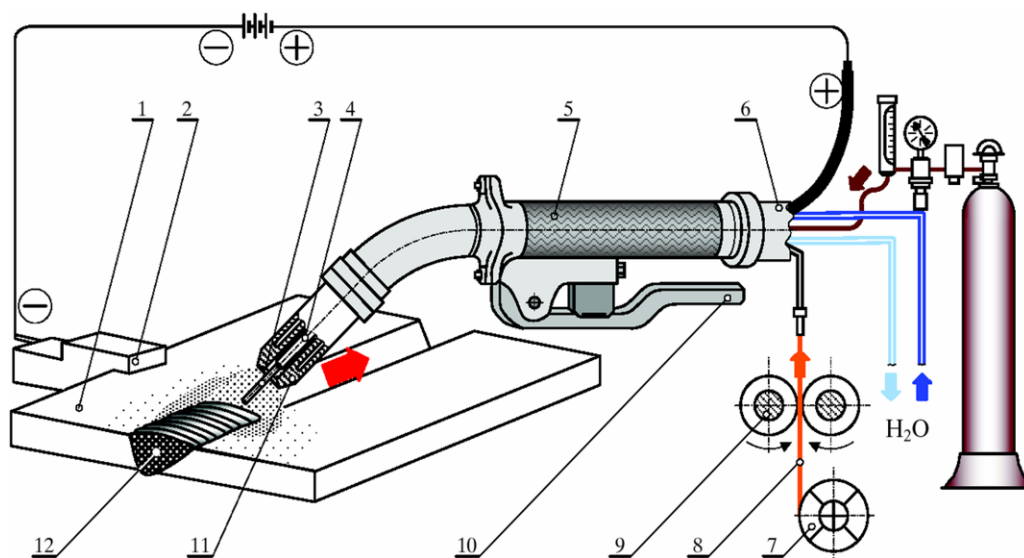
8.1 Osnovni principi postupka

Postupci zavarivanja iz ove grupe su prvobitno bili samo ručni, ali danas postoje izvođenja gde se zavarivanje vrši mehanizovano, automatizovano ili robotizovano [2]. Bez obzira na stepen automatizacije ovih postupaka, električni luk se uvek uspostavlja između topive elektrode i radnih komada (osnovnog metala). Elektroda istovremeno predstavlja dodatni materijal koji se neprekidno dovodi u zonu zavarivanja,

saglasno brzini topljenja i brzini kretanja (zavarivanja). Dodatno se, u zonu zavarivanja i oko zone zavarivanja, dovodi (zaštitni) gas, čiji je osnovni zadatak formiranje zaštitne atmosfere oko električnog luka, zone zavarivanja i metala šava, koja prvenstveno štiti metal šava od negativnog uticaja gasova i vlage iz atmosfere [3].

Pre samog zavarivanja, uključuje se izvor električne struje, podešavaju se parametri za zavarivanje i otvara se protok zaštitnog gasa. Aktiviranje procesa zavarivanja, odnosno, aktiviranje neprekidnog dotura elektrodne žice i zaštitnog gasa aktivira se pritiskanjem odgovarajućeg prekidača na pištolju za zavarivanje. Zavarivač uspostavlja električni luk između elektrodne žice i osnovnog metala te električni luk odmah počinje da topi dodatni materijal i deo osnovnog materijala u zoni zavarivanja. Električni luk se održava neprekidnim dovodenjem elektrodne žice u zonu zavarivanja i zadržavanjem pištolja na istom rastojanju u odnosu na osnovni metal.

Dovod elektrodne žice u zonu



Slika 8.1 Šema postupka zavarivanja topivom žicom u atmosferi zaštitnog gasa [4]: 1) osnovni materijal, 2) stezač, 3) slobodni kraj elektrodne žice, 4) kontaktna vodica, 5) izolovani držač, 6) poliprovodnik, 7) kalem sa elektrodom žicom, 8) elektrodna žica, 9) pogonski motor i sistem za dostavljanje žice („push” sistem), 10) ručica prekidača, 11) mlaznica, 12) zavareni šav

zavarivanja se ostvaruje automatski – pomoću elektromotora i sistema valjaka koji ispravljaju i guraju elektrodnu žicu ka zoni zavarivanja. Istovremeno sa dovodenjem dodatnog materijala, dovodi se i zaštitni gas.

Započinjanje, upravljanje i prekid procesa zavarivanja vrši se pomoću pištolja za zavarivanje koji na sebi ima posebnu mlaznicu kojom se usmeravaju električni luk i zaštitni gas prema osnovnom materijalu i zoni zavarivanja. Kako se tokom zavarivanja dostižu visoke temperature, pištolj se zagreva, te je neophodno da se hladi vodom kako bi ostao funkcionalan.

Dovod elektrodne žice, zaštitnog gasa i vode za hlađenje do pištolja za zavarivanje, kao i odvod tople vode od pištolja ka hladnjaku, vrši se pomoću posebnog provodnika koji objedinjava sve vodove za navedene komponente zavarivanja. Takav masivni kabel naziva se poliprovodnik. Na slici 8.1, prikazan je uobičajeni sistem za elektrolučno zavarivanje topivom elektrodom.

Ručno zavarivanje ovim postupcima vrši se jednom rukom – oprema za zavarivanje je koncipirana tako da se dodatni materijal i zaštitni gas dovode kroz jedan pištolj za zavarivanje tako da je čitav proces zavarivanja moguće vršiti jednom rukom. Prekid zavarivanja a samim tim, prekid dovodenja elektrodne žice, zaštitnog gasa i vode za hlađenje pištolja, događa se nakon otpuštanja prekidača na pištolju za zavarivanje.

Postupci zavarivanja topivom elektrodom u atmosferi zaštitnog gasa primenjuju se za zavarivanje velikog broja različitih materijala: većina čelika, aluminijum, magnezijum, bakar, nikal, titanijum itd [3, 4].

8.2 Podela i klasifikacija postupka

Svi elektrolučni postupci zavarivanja topivom elektrodom u atmosferi zaštitnog gasa se mogu podeliti na osnovu zaštitnog gasa ili na osnovu tipa elektrodne žice.

U zavisnosti od tipa zaštitnog gasa koji se koristi pri zavarivanju, ovi postupci se dele

na MIG¹ ili MAG² postupke zavarivanja. MIG postupci koriste inertni gas, ili smešu inertnih gasova, kao zaštitni gas dok MAG postupci, kao zaštitni gas, koriste aktivni gas ili smeše aktivnih i inertnih gasova [3].

Elektrolučni postupci zavarivanja topivom elektrodom u atmosferi zaštitnog gasa se, prema tipu elektrode, dele na postupke sa punom ili punjenom elektrodom/elektrodnom žicom³.

Elektrolučni postupci zavarivanja topivom elektrodom u atmosferi zaštitnog gasa su standardizovani i klasifikovani prema ISO 4063 kao grupa 13 (ISO 4063 — 13) [4]. Na osnovu specifičnosti samih postupaka, oni su klasifikovani kao⁴:

ISO 4063 — 131 – MIG postupak zavarivanja punom elektrodnom žicom,

*ISO 4063 — 132 – MIG postupak zavarivanja punjenom elektrodnom žicom,

*ISO 4063 — 133 – MIG postupak zavarivanja metalnim prahom punjenom elektrodnom žicom,

ISO 4063 — 135 – MAG postupak zavarivanja punom elektrodnom žicom,

*ISO 4063 — 136 – MAG postupak zavarivanja punjenom elektrodnom žicom,

*ISO 4063 — 138 – MAG postupak zavarivanja metalnim prahom punjenom elektrodnom žicom.

Kako su MIG/MAG veoma slični, ali imaju neke različitosti, u nastavku poglavlja biće reči o oba postupka, paralelno.

8.3 Osnovna oprema za zavarivanje

Osnovnu opremu za zavarivanje MIG/MAG postupcima čine izvor struje za zavarivanje, pištolj, poliprovodnik, sistem za dostavljanje elektrodne žice, sistem za čuvanje i dostavljanje zaštitnog gasa, sistem za

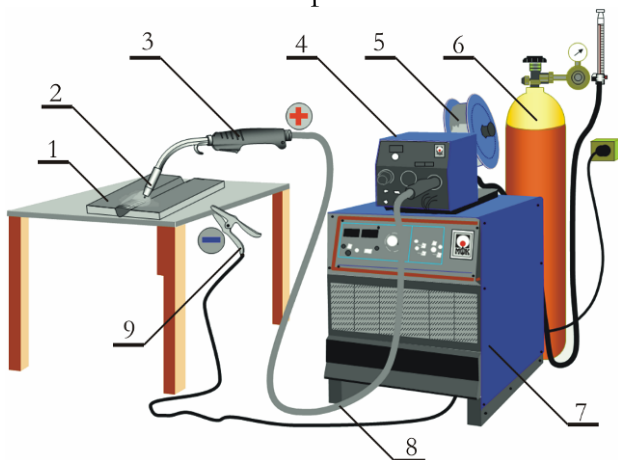
¹ MIG je skraćenica od eng. *Metal Inert Gas*.

² MAG je skraćenica od eng. *Metal Active Gas*.

³ U ovom poglavlju biće reči o postupcima zavarivanja punom elektrodnom žicom dok je poglavlje 9 posvećeno postupcima zavarivanja punjenom žicom.

⁴ Postupci obeleženi * se odnose na punjenu žicu.

hlađenje i upravljačka jedinica sa kontrolnim panelom. Na slici 8.2 prikazan je tipičan sistem za MIG/MAG zavarivanje sa osnovnim delovima i opremom.



Slika 8.2 MIG/MAG oprema [6], 1) osnovni metal, 2) pištolj, 3) rukohvat, 4) upravljačka jedinica, 5) kotur sa elektrodnom žicom, 6) boca sa zaštitnim gasom, 7) kućište izvora struje i hladnjaka, 8) poliprovodnik, 9) klešta sa provodnikom

Rashladni sistem se ne koristi ukoliko je uređaj za zavarivanje predviđen da radi sa malim jačinama struje, odnosno, za delove male debljine (manje od 5 mm) [2].

8.3.1 Izvor električne struje

Za zavarivanje MIG/MAG postupcima, uobičajeno je da se koristi jednosmerna struja invertne polarnosti (JSIP), odnosno, elektroda je povezana na + polu izvora struje dok je – pol izvora struje vezan za radne komade. Kod novijih izvora struje, sreće se i mogućnost primene naizmenične ili naizmenične pulsirajuće struje. Za navarivanje MIG/MAG postupcima, najviše se koristi jednosmerna struja direktne polarnosti (JSDP) [2, 3, 6, 7].

Najčešći uređaji za zavarivanje su invertori i ispravljači, pri čemu su dve najvažnije karakteristike uređaja intermitencija i statička karakteristika.

Izvori struje za zavarivanje moraju da ispunjavaju zahteve propisane standardom SRPS EN 60974-1:2012: Oprema za elektrolučno zavarivanje – Deo 1: Izvori struje za zavarivanje⁵ [8].

8.3.2 Karakteristike izvora električne struje

Izvori struje za MIG/MAG postupke zavarivanja moraju da imaju ravnu ili blagoopadajuću karakteristiku kako bi napon zavarivanja bio virtualno neosetljiv na promenu dužine električnog luka. Prema tome, kod MIG/MAG izvora struje za zavarivanje mora da bude ispunjen osnovni uslov samoregulacije: promena dužine luka rezultira promenom jačine električne struje kako napon zavarivanja ne bi previše varirao [2, 3, 7].

Napon praznog hoda kod MIG/MAG izvora je najčešće $U_0=60\text{ V}-80\text{ V}$, struja zavarivanja je $I_z=80\text{ A}-250\text{ A}$ a napon zavarivanja je $U_z=15\text{ V}-30\text{ V}$ ⁶.

8.3.3 Pištolj

Pištolj za zavarivanje je deo sistema za zavarivanje kojim zavarivač direktno upravlja procesom zavarivanja. Koristeći pištolj, zavarivač pokreće elektrodnu žicu, omogućava protok zaštitnog gasa i rashladne tečnosti, ali i uspostavlja i održava električni luk između elektrode i osnovnog metala. Pištolj se drži jednom rukom, međutim, često zavarivači jednom rukom drže pištolj a drugom rukom podupiru ruku sa pištoljem radi jednostavnijeg rada [2].



Slika 8.3 Pištolj sa pull sistemom

U zavisnosti od mehanizma za dovođenje elektrodne žice, razlikuju se pištolji koji povlače žicu (*pull system*), pištolji koji guraju žicu (*push system*) i pištolji koji i guraju i povlače žicu (*push and pull system*). Na slikama 8.3 i 8.4 prikazani su tipični pištolji za MIG/MAG postupke zavarivanja.

⁵ Identičan sa: EN 60974-1:2012 CLC/TC 26A.

⁶ Navedene vrednosti su orijentacione.



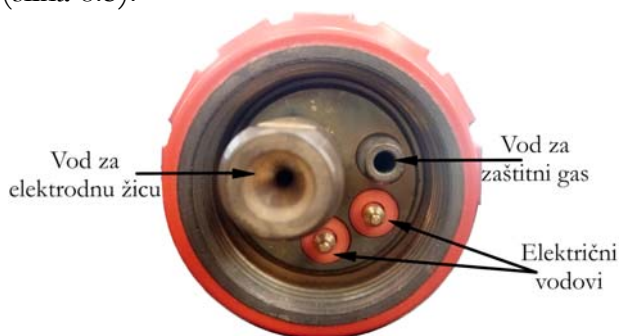
Slika 8.4 Pištolj sa push-pull sistemom

Pištolji za zavarivanje mogu biti hlađeni vodom, vazduhom ili mogu biti bez ikakvog sistema za hlađenje. Pištolji sa vodenim hlađenjem predviđeni su za duži rad, za rad sa većim jačinama struje i za uređaje sa velikom intermitencijom. Pištolji sa vazdušnim hlađenjem ili bez hlađenja, predviđeni su za „blage” režime rada: male debljine materijala, relativno male jačine električne struje i kratkotrajne režime rada.

Pištolji za zavarivanje moraju da ispunjavaju zahteve definisane standardom SRPS EN 60974-7:2014: Oprema za elektrolučno zavarivanje – Deo 7: Gorionici⁷ [9].

8.3.4 Poliprovodnik

Poliprovodnik je čvrsti plastični/gumeni provodnik koji obuhvata naponski vod, vod za zaštitni gas, vod za elektrodnu žicu, i ukoliko postoji potreba, dovod hladne vode i odvod tople vode. On sve navedene vodove objedinjava u funkcionalnu i krutu celinu (slika 8.5).



Slika 8.5 Poprečni presek poliprovodnika bez vodova za rashladnu tečnost

⁷ Identičan sa EN 60974-7:2013 CLC/TC 26A.

Električni vodovi koji idu kroz poliprovodnik su za dovod struje i upravljanje izvorom struje (pritiskivanjem prekidača na pištolju). Drugi pol izvora struje je povezan direktno na osnovni metal. Na slici 8.6 prikazan je poliprovodnik za MIG/MAG zavarivanje koji je namenjen za primenu kod pištolja koji nema sistem za hlađenje.



Slika 8.6 Poliprovodnik sa pištoljem za MIG/MAG postupke zavarivanja

Poliprovodnik je izrađen od plastike ili od plastike u kombinaciji sa negorivim platnom kako bi bio otporan na uticaje sredine. Poliprovodnici višeg kvaliteta imaju armaturu od metala koja dodatno povećava čvrstoću provodnika.

Spojke i konektori koji se koriste na provodnicima moraju da ispunjavaju bezbednosne zahteve koji su definisani standardom SRPS EN 60974-12:2012: Oprema za elektrolučno zavarivanje – Deo 12: Spojne naprave za zavarivačke kablove⁸ [10].

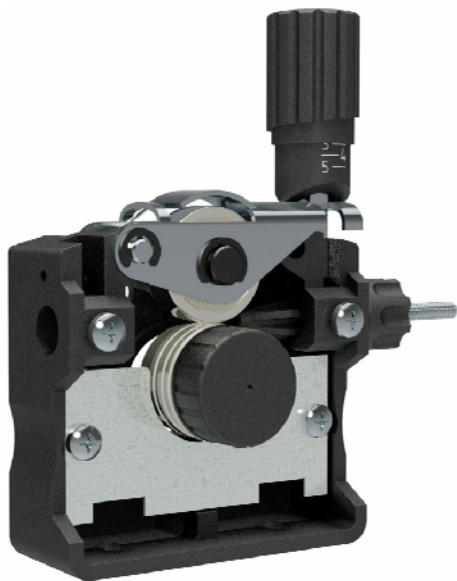
8.3.5 Mehanizam za dodavanje žice

Dodavanje žice se vrši neprekidno kod svih MIG/MAG postupaka: elektrodna žica se nalazi namotana na koturu i do zone zavarivanja se dovodi sistemom creva/cevi. Pokretanje žice vrši se odgovarajućim mehanizmom za dodavanje žice [2, 4, 7].

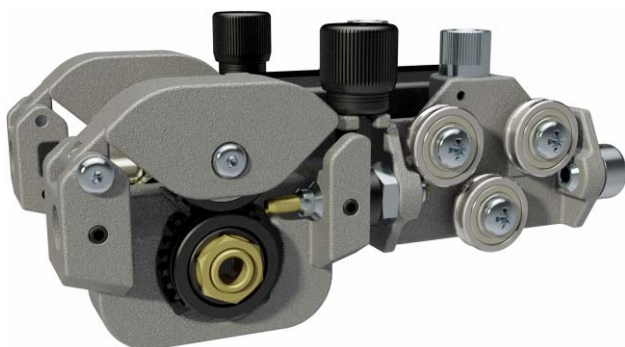
Mehanizam za dodavanje elektrodne žice je sastavljen od pogonskog sistema, regulatora brzine i sistema valjaka koji žicu

⁸ Identičan sa EN 60974-12:2011 CLC/TC 26A.

ispravljaju i guraju/vuku ka zoni zavarivanja. Postoji više različitih varijanti mehanizama za dodavanje žice: sa jednim ili više pogona, sa i bez dodatnih valjaka za ispravljanje žice (kod većih debljina žice) itd.



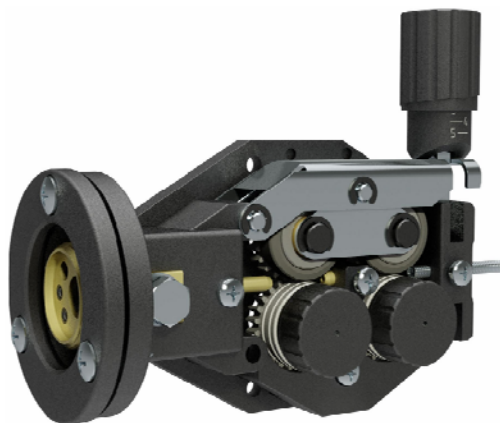
Slika 8.7 Mehanizam za dodavanje elektrodne žice sa jednim pogonom [11]



Slika 8.8 Mehanizam za dodavanje elektrodne žice sa jednim pogonom i dodatnim valjcima za ispravljanje [11]



Slika 8.9 Mehanizam za dodavanje elektrodne žice sa dva pogona i dodatnim valjcima za ispravljanje [11]



Slika 8.10 Mehanizam za dodavanje elektrodne žice sa dva pogona [11]

Izbor mehanizma za dodavanje žice zavisi od brzine zavarivanja i debljine elektrodne žice koja se koristi. Na slikama 8.7 do 8.10. prikazano je nekoliko različitih mehanizama za dodavanje žice.

Mehanizmi za dodavanje žice treba da ispunjavaju zahteve date standardom SRPS EN 60974-5:2014: Oprema za elektrolučno zavarivanje – Deo 5: Dodavači žice⁹ [12].

8.3.6 Sistem za dovod zaštitnog gasa

Sistem za dovod zaštitnog gasa je isti bez obzira da li je gas (ili mešavina gasova) koji se koristi aktivan ili inerten. Gas ili gasovi se skladište u odgovarajućim rezervoarima ili bocama, regulatorima pritiska, ventilima i manometrima (slika 8.11).



Slika 8.11 Sistem za dovod zaštitnog gasa

Instalacija za dovod gasova od rezervoara do zone zavarivanja detaljno je

⁹ Ovaj standard je identičan sa EN 60974-5:2013.

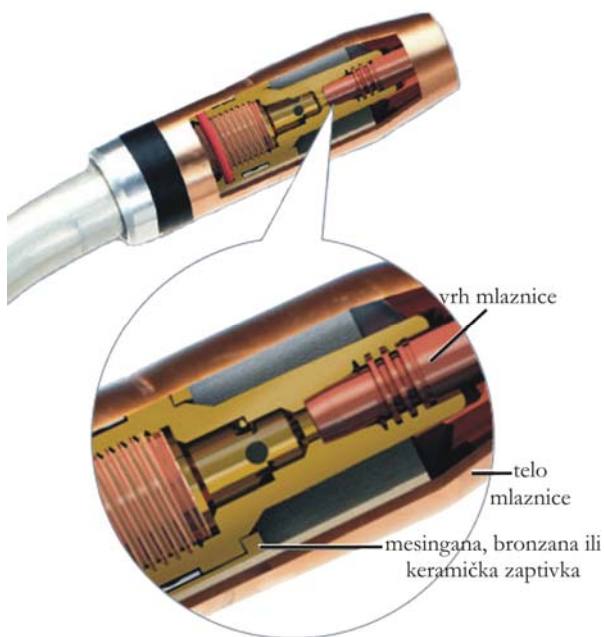
objašnjena u poglavlju 2.

Od njih se vodi vod (crevo ili cev) do izvora struje za zavarivanje i povezuje se odgovarajućim priključkom. Dalje se zaštitni gas transportuje poliprovodnikom do mlaznice gde se koristi pri zavarivanju.

Zaštitni gasovi ne gore pa ne postoji rizik od eksplozije usled paljenja ali se zaštitni gasovi čuvaju pod pritiskom pa je rizik od eksplozije usled pritiska gasa uvek prisutan pri nepravilnom rukovanju opremom.

8.3.7 Mlaznica

Mlaznica se nalazi na samom kraju pištolja i preko nje se vrši zavarivanje. Konstrukcija mlaznice je složena – u jednom delu u njoj je izrađen sistem kanala za proticanje rashladne vode, a drugi deo je urađen od keramike. Zadatak mlaznice je da usmeri zaštitni gas tako da on laminarno struji i potpuno prekrije tečno kupatilo i zonu zavarivanja. Laminarno strujanje zaštitnog gasa u zoni zavarivanja i mlaznici je važno zbog toga što bi u suprotnom (turbulentno) uz zid mlaznice mogao da se zadrži vazduh koji bi prodirao u zonu zavarivanja. Kroz središte mlaznice prolazi elektrodna žica na koju se struja dovodi preko vrha mlaznice. Na slici 8.12 prikazana je mlaznica za zavarivanje MIG/MAG postupcima.



Slika 8.12 Mlaznica za MIG/MAG postupak

Mlaznica je izložena visokim temperaturama, utičaju električnog luka i utičaju zaštitnog gasa koji struji kroz nju.

Na mlaznici se, takođe, talože kapljice rastopljenog metala šava koje su se rasprskale tokom zavarivanja. Svi ovi uticaji razaraju mlaznicu te je neophodno da se posle određenog vremena mlaznica menja [2].

8.3.8 Sistem za hlađenje

Ukoliko je prisutan, sistem za hlađenje vodom se sastoji od cevovoda i hladnjaka i aktivira se sa uključenjem aparata za zavarivanje. Umesto vode, može da se koristi i odgovarajuće sredstvo za hlađenje (uglavnom kod aparata novije proizvodnje).

Sistem za hlađenje tečnostima i zahtevi od takvog sistema opisani su u standardu SRPS EN 60974-2:2015: Oprema za elektrolučno zavarivanje – Deo 2: Sistemi za hlađenje tečnošću¹⁰ [13].

8.3.9 Kontrolna tabla

Kontrolna tabla na izvoru struje namenjena je podešavanju parametara zavarivanja i praćenju promene istih tokom rada. Kod MIG/MAG izvora struje pri zavarivanju se prati jačina električne struje, napon električnog luka, brzina dovođenja žice, tip struje itd. Na slici 8.13 prikazana je tipična kontrolna tabla MIG/MAG uređaja.



Slika 8.13 Kontrolna tabla tipičnog MIG/MAG izvora struje

Izvori struje novije proizvodnje su bazirani na invertorskoj tehnologiji, što im omogućava primenu istog izvora struje za MIG/MAG, TIG i REL postupke

¹⁰ Identičan sa EN 60974-2:2013 CLC/TC 26A.

zavarivanja. U tom slučaju, na kontrolnoj tabli izvora se mogu naći prekidači i dugmad koji nisu upotrebljivi za MIG/MAG postupke zavarivanja. Funkcije koje se aktiviraju ovim prekidačima su aktivne samo pri izboru odgovarajućeg postupka zavarivanja dok su za druge postupke neaktivne ili neupotrebljive.

8.4 Dodatni i potrošni materijal

Dodatni materijal za MIG/MAG postupke je elektrodna žica dok su potrošni materijali zaštitni gasovi.

8.4.1 Dodatni materijali

Dodatni materijali za zavarivanje postupcima ISO 4063 — 13 se u zavarivačkoj terminologiji popularno nazivaju žice za zavarivanje. One su prečnika $d_e=0,4\text{ mm}$ – 4 mm i namotane su na „koturove”, pri čemu je namotano minimalno 20 m žice (slika 8.14).



Slika 8.14 Žice za MIG/MAG postupke zavarivanja

Izbor žice za zavarivanje vrši se prema osnovnom metalu pa su one tako i klasifikovane – prema materijalima koji se zavaruju:

SRPS EN ISO 14341:2012: Potrošni materijali za zavarivanje – Žičane elektrode i depoziti za zavarivanje u zaštiti gasa nelegiranih i finozrnih čelika – Klasifikacija¹¹ [14],

SRPS EN ISO 16834:2013: Potrošni

materijali za zavarivanje – Žičane elektrode, žice, šipke i depoziti za elektrolučno zavarivanje čelika povišene čvrstoće pod zaštitom gasa¹² [15],

SRPS EN ISO 21952:2013: Potrošni materijali za zavarivanje – Žičane elektrode, žice, šipke i depoziti za elektrolučno zavarivanje pod zaštitom gasa čelika otpornih na puzanje – Klasifikacija¹³ [16],

SRPS EN ISO 14343:2011: Potrošni materijali za zavarivanje – Elektrodne žice, elektrodne trake, žice i šipke za elektrolučno zavarivanje nerđajućih i vatrootpornih čelika – Klasifikacija¹⁴ [17],

SRPS EN ISO 18274:2012: Potrošni materijali za zavarivanje – Pune žičane i pune trakaste elektrode, pune žice i pune šipke za zavarivanje topljenjem nikla i legura nikla – Klasifikacija¹⁵ [18],

SRPS EN ISO 24373:2012: Dodatni materijali za zavarivanje – Pune žice i šipke za zavarivanje topljenjem bakra i legura bakra – Klasifikacija¹⁶ [19],

SRPS EN ISO 18273:2009: Potrošni materijali za zavarivanje – Žičane elektrode, žice i šipke za zavarivanje aluminijuma i legura aluminijuma – Klasifikacija¹⁷ [20],

SRPS EN ISO 1071:2008: Potrošni materijali za zavarivanje – Obložene elektrode, žice, šipke i punjene žice za zavarivanje topljenjem sivog liva – Klasifikacija¹⁸ [21],

SRPS EN ISO 24034:2012: Potrošni materijali za zavarivanje – Pune žičane elektrode, pune žice i pune šipke za zavarivanje topljenjem titana i legura titana – Klasifikacija¹⁹ [22].

Standardi koji definišu elektrode, prikazani su u prilogu.

Uslovi isporuke

Žice za zavarivanje moraju da se isporuče korisniku tako da zadovoljavaju

¹² Identičan sa: EN ISO 16834:2012 CEN/TC 121.

¹³ Identičan sa: EN ISO 21952:2012 CEN/TC 121.

¹⁴ Identičan sa: EN ISO 14343:2009 CEN/TC 121.

¹⁵ Identičan sa: EN ISO 18274:2010 CEN/TC 121.

¹⁶ Identičan sa: EN ISO 24373:2009 CEN/TC 121.

¹⁷ Identičan sa: EN ISO 18273:2004 CEN/TC 121.

¹⁸ Identičan sa: EN ISO 1071:2003 CEN/TC 121.

¹⁹ Identičan sa: EN ISO 24034:2010 CEN/TC 121.

¹¹ Identičan sa: EN ISO 14341:2011 CEN/TC 121.

uslove definisane standardima SRPS EN ISO 544:2013: Potrošni materijal za zavarivanje – Uslovi isporuke za dodatne materijale i praškove – Vrste proizvoda, mere, tolerancije i obeležavanja ²⁰ [23] i SRPS EN ISO 14344:2012: Potrošni materijali za zavarivanje – Uputstva za nabavku dodatnih materijala i praškova²¹ [24].

8.4.2 Potrošni materijali

Za zavarivanje MIG/MAG postupcima koriste se različiti gasovi ili mešavine gasova. Za zavarivanje MAG postupcima koriste se aktivni gasovi ili mešavine aktivnih gasova ili mešavine aktivnih gasova sa inertnim gasovima. Standardni (klasifikovani) gasovi za MAG postupke zavarivanja (prema ISO 14175) su najčešće C1 (100% CO₂) ali su u upotrebi i gasovi klasifikovani kao M11, M12, M14, M20, M21, M23, M24, M25, M26, M27, M31, M33, M34, M35, M36, C2 i Z. Za MIG postupke zavarivanja se najčešće koriste gasovi klasifikovani kao I1 (100% Ar), I2 (100% He) i I3 (Ar+He), ali se koriste i pojedini gasovi iz grupe M [25].

8.5 Tehnologija zavarivanja

Tehnologija zavarivanja postupcima iz grupe ISO 4063 — 13 obuhvata se aktivnosti koje treba sprovesti kako bi se uspešno izvršilo spajanje dva tela u monolitnu celinu. Te aktivnosti se mogu podeliti na:

- pripremne aktivnosti, odnosno, aktivnosti koje treba sprovesti pre početka zavarivanja,
- tekuće aktivnosti, odnosno, aktivnosti koje treba sprovesti u toku zavarivanja i
- završne aktivnosti, odnosno, aktivnosti koje treba sprovesti nakon završenog zavarivanja.

Pripremne aktivnosti (pre zavarivanja) treba da pripreme realizaciju samog čina zavarivanja: vrši se projektovanje tehnologije zavarivanja, definiše se postupak zavarivanja,

određuju se parametri zavarivanja, biraju dodatni i potrošni materijali, priprema se osnovni metal – vrši se čišćenje, ispravljanje, stezanje, izrađuje se žleb itd.

Tekuće aktivnosti u toku zavarivanja obuhvataju realizaciju samog zavarivanja: upoznavanje radnika sa aktivnostima koje treba realizovati i tehničkom dokumentacijom, proveru električne i gasne instalacije, otvaranje ventila, podešavanje parametara zavarivanja, zavarivanje ranije definisanom tehnikom, međuprolazno čišćenje i ispravljanje (ako je potrebno), kontrola tokom zavarivanja, obezbeđenje instalacije i uređaja za zavarivanje, odlaganje opreme i, po potrebi, vrši se održavanje propisanih termičkih/toplotnih režima osnovnog, dodatnog i potrošnih materijala.

Završne aktivnosti obuhvataju sve aktivnosti kojima se zavareni spoj dovodi u realizovano stanje: kontrola, čišćenje, brušenje, površinska zaštita, ispravljanje/uklanjanje deformacija, termička obrada, demontaža i uklanjanje zavarenih delova sa radnog mesta (ukoliko je to potrebno i moguće) itd.

Međutim, pod pojmom „tehnologija zavarivanja” na nivou radnog mesta (radionice i terena) podrazumevaju se aktivnosti kojima se definiše i realizuje zavarivanje određenih delova.

8.5.1 Priprema osnovnog materijala za zavarivanje

Priprema materijala za zavarivanje obuhvata sledeće aktivnosti:

- Čišćenje ivica i površina delova koje se zavaruju (uklanjanje boja, korozije, oksida, masti, prljavštine i sl.);
- Priprema žleba za zavarivanje (ako je potrebno);
- Pažljivo postavljanje delova u položaj za zavarivanje i učvršćivanje kako bi se sprečilo pomeranje tokom zavarivanja,
- Izrada pripoja („heftanje”) na odgovarajućim mestima, prema utvrđenom planu realizacije;
- Po potrebi, predgrevanje materijala radi

²⁰ Identičan sa: EN ISO 544:2011 CEN/TC 121.

²¹ Identičan sa: EN ISO 14344:2010 CEN/TC 121.

poboljšanja zavarivosti, sprečavanja nastanka krtih faza u ZUT-u itd.

Čišćenje ivica i površina

Sve prljavštine (masnoće, boja, lakovi, korozija, ostaci mašinske obrade itd) na površinama koje se zavaruju su potencijalni izvori uključaka koji mogu da prodru u tečno kupatilo i ostanu zarobljeni u metalu šava. Masnoće, boje i lakovi koji sagorevaju pri zavarivanju mogu formirati kancerogena isparenja i mogu uticati na zdravlje ljudi.

Poseban problem pri zavarivanju ISO 4063 — 13 postupcima (naročito kod MAG postupaka) predstavlja rasprskavanje materijala prilikom zavarivanja. Ukoliko se zavarivanje vrši u više prolaza, neophodno je ukloniti sav rasprsnuti materijal po površini osnovnog metala i metala šava, pre nego se uradi novi prolaz.

Priprema žlebova

Priprema žlebova je obavezna aktivnost koja mora da se sprovede pri realizaciji tehnologije zavarivanja.

Standard SRPS EN ISO 9692-1:2014: Zavarivanje i srodni postupci – Tipovi pripreme spoja – Deo 1: Ručno elektrolučno zavarivanje topivom elektrodom, elektrolučno zavarivanje topivom elektrodom u zaštitnom gasu, gasno zavarivanje, TIG zavarivanje i zavarivanje čelika snopom ²² daje opšte preporuke za pripremu žlebova za zavarivanje TIG postupkom [26].

Standard SRPS EN ISO 9692-3:2008: Zavarivanje i srodni postupci – Preporuke za pripremu spoja – Deo 3: Elektrolučno zavarivanje u zaštiti inertnih gasova i elektrolučno zavarivanje sa volframovom elektrodom u zaštiti inertnog gasa aluminijuma i njegovih legura ²³ daje opšte preporuke za pripremu žlebova na delovima izrađenim od aluminijumovih legura [27].

U upotrebi su i stariji EN standardi koji su proistekli iz nemačkih DIN standarda. Oni ne propisuju i ne zahtevaju standardizaciju spojeva, niti sužavaju izbor mogućih rešenja pri izradi spojeva, već prikazuju primere

realizovanih spojeva koji uspešno funkcionišu na tehničkim sistemima:

- SRPS EN 1708-1:2013: Zavarivanje – Osnovni detalji zavarenih čeličnih spojeva – Deo 1: Komponente pod pritiskom²⁴ [28],
- SRPS EN 1708-2:2008: Zavarivanje – Osnovni detalji zavarenih čeličnih spojeva - Deo 2: Komponente bez unutrašnjeg pritiska²⁵ [29] i
- SRPS EN 1708-3:2012: Zavarivanje – Osnovni detalji zavarenih čeličnih spojeva – Deo 3: Komponente pod pritiskom sa plakaturom, puferom i sa prevlakom (trakama)²⁶ [30].

U prilogu su dati detalji vezani za pripremu žleba za ISO 4063 — 13 postupke zavarivanja.

Pozicioniranje delova

Pozicioniranje delova podrazumeva postavljanje delova u položaj za zavarivanje, njihovo učvršćivanje (fiksiranje, stezanje) i zadržavanje željenog položaja delova do kraja zavarivanja. U ovu svrhu koriste se različiti alati i pribori: pozicioneri, stege, hvataljke, stezne šape, ugaonici, ali i mašine sa magnetnim pločama, valjcima, laserski pozicioneri, manipulatori itd [31].

Izrada pripojnih šavova

Pripajanje je postupak spajanja ivica materijala samo na pojedinim mestima, pre početka samog zavarivanja. Svrha pripajanja je fiksiranje delova koji se zavaruju jedan u odnosu na drugi kako bi se umanjilo njihovo pomeranje tokom zavarivanja.

Pripajanje, po pravilu, počinje od sredine spoja koji treba izraditi pa se izvodi naizmenično sa jedne i sa druge strane. Pripojni šavovi bi trebali da budu 2 do 5 puta debljina materijala a izvode se na rastojanju od 20 do 30 puta debljina materijala koji se zavaruje (slika 8.15). Ovakvim pristupom zavarivanja se ostvaruje ravnomerno rastojanje između ivica zavarenih limova pa je i šav homogenijeg sastava.

Pripojni šavovi moraju da budu istog kvaliteta kao puni šav.

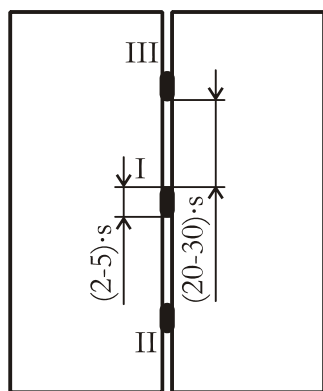
²² Identičan sa: EN ISO 9692-1:2013 CEN/TC 121.

²³ Identičan sa: EN ISO 9692-3:2001 i EN ISO 9692-3:2001A1:2003 CEN/TC 121.

²⁴ Identičan sa: EN 1708-1:2010 CEN/TC 121.

²⁵ Identičan sa: EN 1708-2:2000 CEN/TC 121.

²⁶ Identičan sa: EN 1708-3:2012 CEN/TC 121.



Slika 8.15 Pripojni šav, s – debljina limova koji se zavaruju, I, II, III – redosled izvođenja pripoja

Pripojni šavovi se ne izvode kod limova veće debljine ili kod pojedinih cevastih delova gde poprečne dilatacije ne utiču na postupak zavarivanja [2-4, 6, 32].

Predgrevanje materijala

Predgrevanje materijala je termički postupak koji se primenjuje na osnovnom materijalu sa ciljem da se poboljša zavarivost. Odluku o predgrevanju materijala ne donosi zavarivač – zavarivač samo mora da sprovede postupak predgrevanja po utvrđenoj proceduri [33]. Određivanje režima predgrevanja je različito za različite materijale, položaje i opšte uslove zavarivanja pa se o predgrevanju materijala ne može govoriti uopšteno. Ipak, dovoljno je pomenuti: predgrevanje osnovnog materijala je deo tehnologije zavarivanja.

8.5.2 Rad sa opremom, priborom, dodatnim i potrošnim materijalima za zavarivanje

Oprema za zavarivanje MIG/MAG postupcima zavarivanja je robusna i otporna na različite mehaničke, termičke, hemijske i fizičke uticaje okoline. Bez obzira na to, sa opremom za zavarivanje je neophodno postupati odgovorno i po uputstvima proizvođača, prema uputstvima na radnim listama ili prema primerima dobre prakse kada nema definisanih uputstava. Opremu i pribor za zavarivanje, kao i dodatne i potrošne materijale je neophodno održavati u ispravnom stanju prevashodno radi sopstvene bezbednosti i bezbednosti ljudi u okolini ali i radi ostvarenja projektovane funkcije sistema

za zavarivanje

Pored ispravnog rada sa opremom i priborom, neophodno je poštovati i držati se ustaljenih aktivnosti pre, tokom i nakon zavarivanja.

Pored osnovnih aktivnosti vezanih za bezbedan rad sa električnom strujom, pri zavarivanju MIG/MAG postupcima zavarivanja neophodno je obratiti pažnju na rad sa sistemom za snabdevanje zaštitnim gasom. Pri tom je neophodno voditi računa o pritisku u sistemu, redosledu otvaranja i zatvaranja ventila u sistemu itd. Posebnu pažnju treba obratiti na sistem za dovod zaštitnih gasova kada se radi sa mešavinom više gasova. Svaki od gasova ima svoje osobenosti primene o kojima treba voditi računa sa aspekta bezbednosti ali je neophodno voditi računa i o formiranju mešavine gasova u odgovarajućem odnosu i sa odgovarajućim protokom.

8.5.3 Zavarivanje

Zavarivanje postupcima ISO 4063 — 13, bez obzira jesu li ručni, mehanizovani ili automatizovani, obavlja se uz nekoliko ograničenja/preporuka:

- Vrh elektrode ne bi trebalo da se uroni u tečno kupatilo već mora da se drži na konstantnom rastojanju od 3 mm do 5 mm od površine tečnog kupatila [2].
- Zona električnog luka mora uvek da prekriva celu površinu tečnog kupatila.
- Zaštitni gas mora da teče pre uspostavljanja električnog luka, tokom zavarivanja i nakon prekidanja luka.
- Pištolj se vodi paralelno ivicama žleba, bez poprečnih pomeranja izvan granica žleba.
- Zavarivač mora da bude dobro obučen kako bi mogao sinhronizovano da vodi pištolj sa elektrodom i održava električni luk.

8.5.4 Paljenje električnog luka

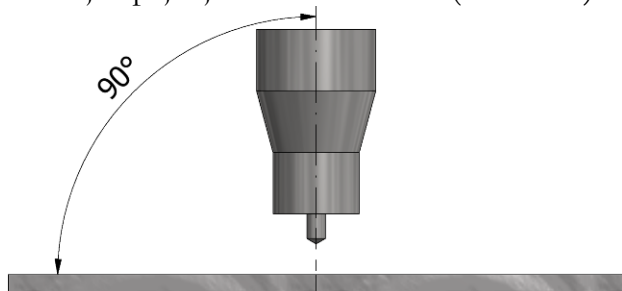
Paljenje električnog luka kod svih ručnih MIG/MAG postupaka vrši se kratkim dodirnom elektrodne žice po površini osnovnog metala. Takav kratkotrajni dodir dva suprotno naelektrisana tela dovodi do

pojave varnice koju zavarivač održava i tako se uspostavlja trajan električni luk [2].

8.5.5 Tehnika zavarivanja

Pištolj sa elektrodnom žicom se približava početnoj tački zavarivanja i uspostavlja se električni luk između elektrode i radnih komada. Zaštitni gas se neprekidno uduvava u zonu zavarivanja.

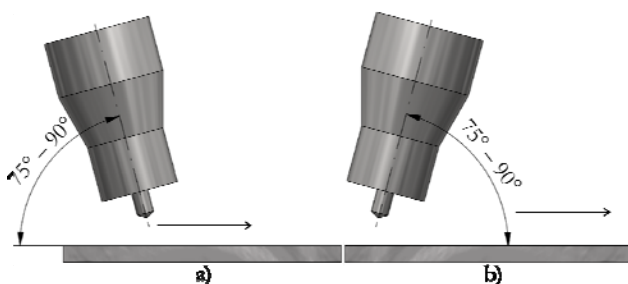
Kada je u pitanju postupak zavarivanja sučeono postavljenih ploča u horizontalnom položaju, mlaznica i elektroda se drže upravno na liniju spajanja i radne komade (slika 8.16).



Slika 8.16 Tehnika zavarivanja sučeono postavljenih ploča MIG/MAG postupcima – početak zavarivanja



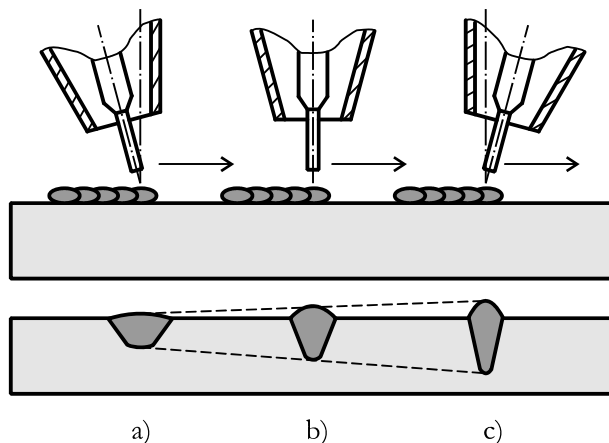
Slika 8.17 Tehnika zavarivanja sučeono postavljenih ploča MIG/MAG postupcima – naganjanje elektrode



Slika 8.18 Nagib pištolja duž linije zavarivanja MIG/MAG postupcima u horizontalnom položaju: a) pištolj nagnut suprotno od smera zavarivanja, b) pištolj nagnut u smeru zavarivanja

Po uspostavljanju stabilnog električnog luka, pištolj se naginje do 15° po vertikali bilo u smeru suprotnom od smera zavarivanja, bilo u smeru zavarivanja (slike 8.17 i 8.18).

Ukoliko je tokom zavarivanja pištolj nagnut suprotno od smera zavarivanja (tehnika guranja, tehnika duvanja), šav koji se dobija je širok, plitak i sa malim nadvišenjem u odnosu na osnovni metal (slika 8.19, a).

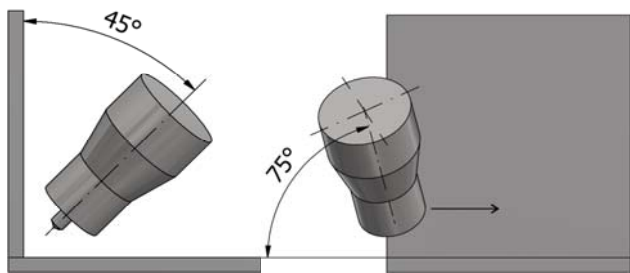


Slika 8.19 Tehnika zavarivanja i njen uticaj na oblik i dimenzije šava dobijene MIG/MAG postupcima zavarivanja: a) tehnika guranja, b) tehnika normale, c) tehnika povlačenja

Ukoliko je tokom zavarivanja pištolj nagnut u smeru zavarivanja (tehnika povlačenja), dobijeni šav je dublji, užiji ali sa većim nadvišenjem. Tehnika držanja pištolja upravnim na liniju spajanja (tehnika normale) se retko primenjuje zbog pojačanog rasprskavanja materijala pri zavarivanju i velike količine koncentrisane energije po maloj površini, ali je ipak moguća. Šav dobijen ovakvom tehnikom je po dimenzijama negde između dve prethodno navedene tehnike zavarivanja (slika 8.19, b).

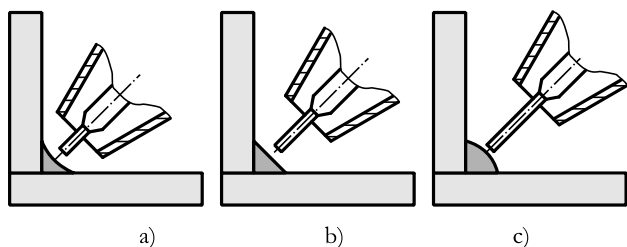
U zavisnosti od širine žleba, elektroda se vodi po pravoj liniji bez njihanja i zastoja kod tanjih delova ali se primenjuje njihanje levo-desno ili kretanje u krugovima kod širih žlebova.

Zavarivanje ploča postavljenih pod uglom vrši se primenom tehnike guranja (retko primenom tehnike povlačenja) sa tim da se pištolj drži pod uglom od 45° u odnosu na čeonu površinu osnovnih materijala (slika 8.20).



Slika 8.20 Tehnika zavarivanja ploča u horizontalnom položaju postavjenih pod uglom, MIG/MAG postupci zavarivanja

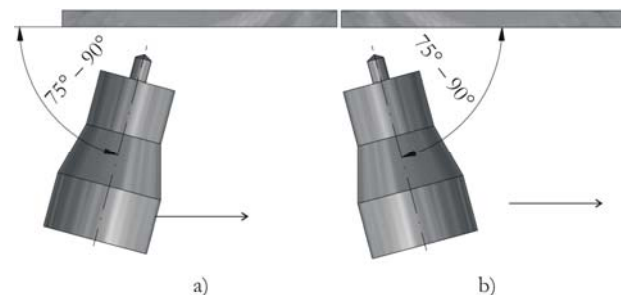
Oblik lica šava (konkavni, ravan ili konveksni) se dobija promenom dužine elektrodne žice koja učestvuje u formiranju električnog luka (slika 8.21).



Slika 8.21 Lice šava kod MIG/MAG postupaka zavarivanja: a) konkavno lice dobijeno kratkom elektrodnom žicom, b) ravno lice dobijeno elektrodnom žicom normalne dužine, c) konveksno lice dobijeno dugačkom elektrodnom žicom

Ukoliko je elektrodna žica kratka, dobija se konkavni oblik lica metala šava dok dugačka elektrodna žica formira konveksni oblik lica šava.

Zavarivanje preklopnih spojeva vrši se na istovetan način kao zavarivanje ploča postavjenih pod uglom.

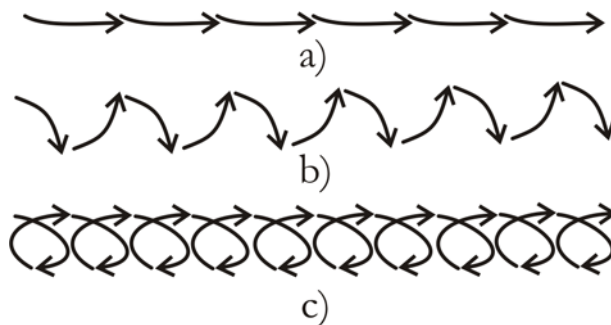


Slika 8.22 Nagib pištolja duž linije zavarivanja MIG/MAG postupcima u nadglavnom položaju: a) pištolj nagnut suprotno od smera zavarivanja, b) pištolj nagnut u smeru zavarivanja

Zavarivanje sučeono postavljenih ploča u položaju iznad glave se izvodi istovetno kao

zavarivanje sučeono postavljenih ploča u horizontalnom položaju ali preslikano u ogledalu (slika 8.22).

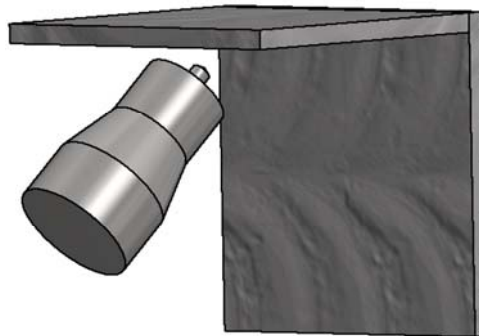
Zavarivanje je moguće izvoditi i tehnikom guranja (slika 8.22, a) i tehnikom povlačenja (slika 8.22 b) ali je uvek potrebno izbegavati ravnomerno kretanje po pravoj liniji. Preporučuje se kretanje po pravoj liniji uz zastajanje (kreni-stani) na kratkim rastojanjima (slika 8.23, a) ili levo-desno (slika 8.23, b) ili kretanje po krugu (slika 8.23, c).



Slika 8.23 Vođenje elektrodne žice duž linije spajanja pri nadglavnom zavarivanju sučeono postavljenih ploča: a) metod kreni-stani, b) metod levo-desno, c) metod kretanjem po krugu

Radi lakšeg zavarivanja i manjeg umaranja zavarivača, pri zavarivanju nad glavom, pištolj treba držati sa dve ruke.

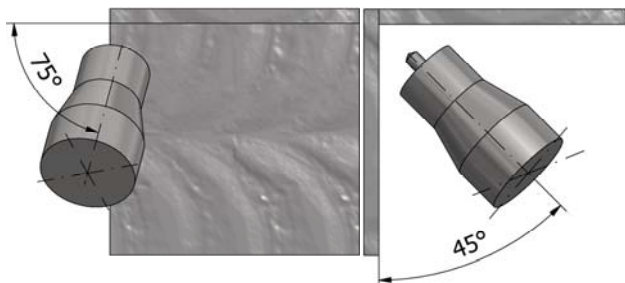
Zavarivanje sučeono postavljenih ploča u vertikalnom položaju (odozdo-naviše) vrši se tehnikom guranja, pri čemu se pištolj postavi upravno na ploče a zatim nagne naniže 5° - 15° i vodi vertikalno naviše tako da električni luk „gura” tečno kupatilo uz osnovni metal i naviše. Veće vrednosti nagiba pištolja se primenjuju za korene prolaze a manje za prolaze ispunje.



Slika 8.24 Zavarivanje ploča postavjenih pod uglom postupcima MIG/MAG u nadglavnom položaju

Zavarivanje vertikalno naniže se retko izvodi (retki su zavarivači koji su dovoljno vešti za takav poduhvat).

Zavarivanje ugaono postavljenih ploča u nadglavnom položaju vrši se slično kao zavarivanje u horizontalnom položaju, ali kao u ogledalu (slika 8.24).



Slika 8.25 Tehnika zavarivanja ploča postavljene pod uglom u nadglavnom položaju MIG/MAG postupcima zavarivanja, zavarivanje se vrši sa leva na desno, tehnika guranja

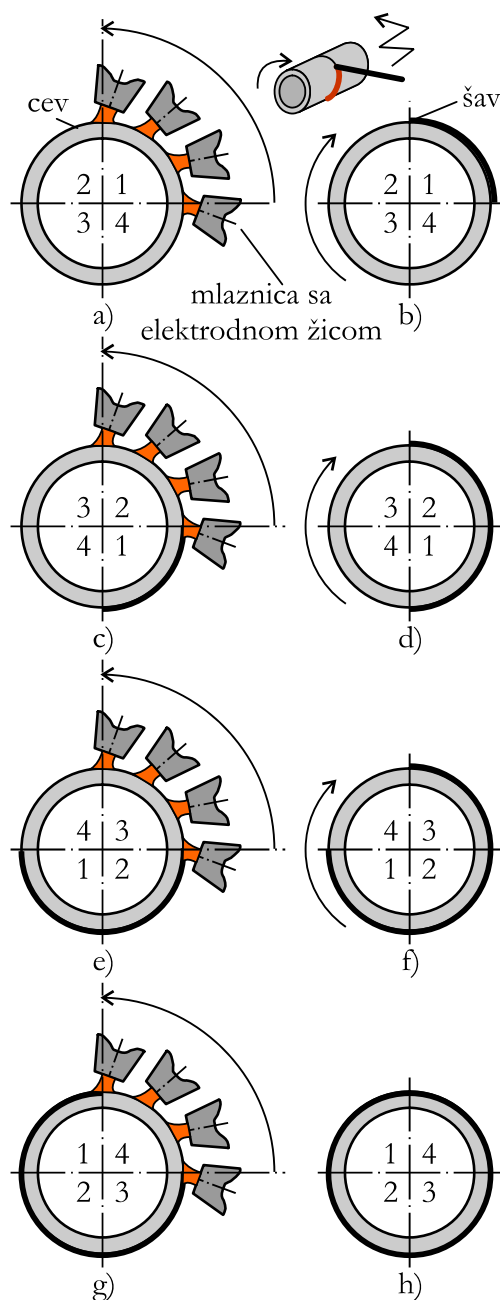
Pištolj se postavlja simetrično u odnosu na ploče (pod 45°) i naginje u napred ili nazad 15°, zavisno od toga da li se zavarivanje vrši tehnikom guranja (slika 8.25) ili povlačenja. Ukoliko je nemoguće da se zavarivanje izvrši drugačije – dozvoljeno je da se mlaznica prisloni uz radne komade. U tom slučaju nije prihvatljivo da se elektroda vodi ravnomerno po pravoj liniji već je neophodno da se primeni neki od pomenutih metoda vođenja pištolja (slika 8.23, b ili c).

Tehnika zavarivanja cevi predstavlja poseban slučaj zavarivanja radnih komada koji se može podeliti na **tehniku zavarivanja cevi koja rotira** i **tehniku zavarivanja fiksirane cevi**.

Tehnika zavarivanja cevi koja rotira oko svoje ose se primenjuje pri zavarivanju cevi uvek kada je to moguće. Zahvaljujući rotaciji, zavarivanje se vrši uvek u povoljnijem položaju nego kad je u pitanju fiksirana cev i kada zavarivač mora da se pozicionira ispod cevi – u nadglavni položaj.

Zavarivanje cevi koja rotira se najčešće radi tehnikom guranja. Postupak počinje iz horizontale, odnosno, iz tačke na cevi koja bi, u poprečnom preseku cevi, predstavljala 3 h na časovniku. Zavarivanje se vrši „uz cev” do

najviše tačke na cevi, odnosno, dok se ne zavari prva četvrtina obima cevi (slika 8.26, a). Potom se prekida zavarivanje i cev rotira za 90° tako da završetak šava dođe u položaj 3 h (slika 8.26, b). Zatim se, kao na početku, vrši zavarivanje druge četvrtine obima cevi, opet do vrha cevi (slika 8.26, c). Nakon toga se prekida zavarivanje i cev opet zarotira za četvrtinu obima (90°), tako da treća četvrtina obima bude u položaju za zavarivanje (slika 8.26, d). Procedura se ponavlja sve dok se ne zavari pun obim cevi (slika 8.26, e, f, g, h).

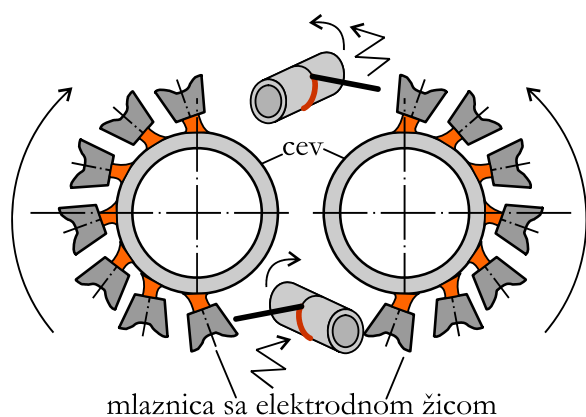


Slika 8.26 MIG/MAG postupak zavarivanja cevi, tehnika zavarivanja cevi koja rotira oko svoje ose

Pištolj se vodi uz cev, uz njihanje levo-desno od jedne strane žleba do druge strane, radi potpune ispunje praznog prostora žleba.

Ovakvom tehnikom zavarivanja, samo mali deo cevi se zavaruje u vertikalnom položaju a pregrevanje cevi je svedeno na minimum. Priprema žleba zavisi od debljine i prečnika cevi koja se zavaruje.

Tehnika zavarivanja fiksirane cevi se primenjuje za zavarivanje kada je nemoguće ostvariti zaokretanje cevi radi pojednostavljenja zavarivanja.



Slika 8.27 MIG/MAG postupak zavarivanja, tehnika zavarivanja fiksirane cevi

Po pravilu, zavarivanje fiksirane cevi se vrši po polovinama cevi (slika 8.27): prvo se zavari jedna polovina cevi (npr. leva), pa onda druga (desna). Zavarivanje se počinje od najniže tačke cevi, pri čemu je elektroda postavljena pod uglom od 70° - 80° u odnosu na tangentu cevi (koja je horizontalna) i onda se lagano penje „uz cev”. Pištolj se pri zavarivanju blago njiše levo-desno (cik-cak) kako bi se ispunila cela širina žleba.

8.5.6 Parametri zavarivanja

Pre nego što započne zavarivanje, radnik mora da pripremi radno mesto, dodatne i potrošne materijale, kao i radne komade, uključi izvor struje i posle toga da odabere neke od parametara zavarivanja na kontrolnom displeju izvora struje. Osnovni parametri zavarivanja kod MIG/MAG postupaka zavarivanja su tip dodatnog materijala, prečnik elektrodne žice, jačina električne struje, napon električnog luka, vrsta zaštitnog gasa, potrošnja zaštitnog gasa,

dužina slobodnog kraja elektrodne žice itd.

Jačina struje zavarivanja je povezana sa prečnikom elektrode, brzinom dovođenja elektrodne žice i brzinom topljenja dodatnog metala. Praktično posmatrano, izbor jačine električne struje zavarivanja mora se izvesti u odnosu na tip prenosa metala, vrste zaštitnog gasa i prečnika elektrodne žice, uvek u funkciji osnovnog metala (materijal i debljina osnovnog metala).

Napon električnog luka definiše se dužinom električnog luka. Izbor napona vrši se na osnovu prečnika elektrodne žice i spoljašnje karakteristike izvora električne struje.

Vrsta i prečnik elektrodne žice se biraju prema vrsti i debljini osnovnog metala. Osnovno pravilo pri izboru je da se bira elektroda čiji je hemijski sastav što približniji hemijskom sastavu materijala osnovnog metala. Prečnik elektrodne žice bira se na osnovu debljine osnovnog metala. Prečnici elektrodne žice su standardizovani: za pune žice $d_e=0,6; 0,8; 1; 1,2; 1,6; 2; 2,4$ mm a za punjene žice $d_e=1,2; 1,6; 2; 2,4; 3; 3,2$ mm. Za veće dubine uvarivanja biraju se manji prečnici elektrodne žice dok se za veću količinu depozita biraju veći prečnici elektrodne žice. Kada se želi kratkospojeni prenos materijala, biraju se elektrode prečnika manjeg od 1,2 mm (1,6 mm) dok se za prenos u mlazu biraju elektrode većeg prečnika.

Tabela 8.1 Preporučene vrednosti jačine električne struje i napona električnog luka za prečnike elektrodne žice [2, 4, 7]

Prečnik žice [mm]	Jačina struje [A]	Napon električnog luka [V]
0,8	50-200	16-25
1,0	80-230	18-25
1,2	100-380	18-35
1,6	150-450	22-35
2,4	380-650	26-38

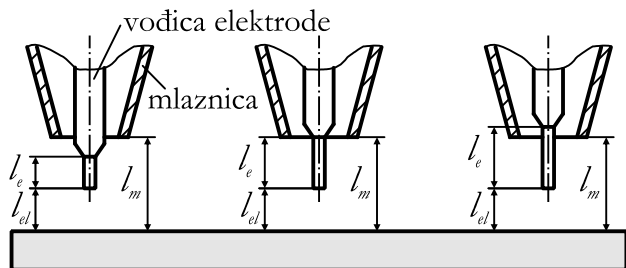
Da bi se elektrodna žica topila pri proticanju električne struje kroz nju, mora da bude ispunjen uslov minimalne jačine struje i minimalnog napona zavarivanja. U tabeli 8.1,

prikazani su preporučene vrednosti jačine struje i napona električnog luka za prečnike žice.

Brzina zavarivanja predstavlja brzinu kretanja pištolja za zavarivanje duž linije spajanja delova. Ona se propisuje u zavisnosti od debljine delova, jačine i polariteta struje, položaja zavarivanja, ali zavarivač mora da je koriguje na licu mesta kako bi ostvario zadovoljavajući kvalitet zavarenog spoja.

Vrsta zaštitnog gasa je definisana samim postupkom MIG ili MAG. Zona zavarivanja mora uvek da bude prekrivena dovoljno količinom zaštitnog gasa kako bi se izbegle pojave nesavršenosti u samom spoju. Prevelika količina zaštitnog gasa pojačava strujanje gasa što može uticati na električni luk. Neke orijentacione vrednosti protoka zaštitnih gasova su 300 l/h-400 l/h za sučione spojeve i 500 l/h-700 l/h za ugaone spojeve. Pri izboru protoka gasova, potrebno je obratiti pažnju da li je zaštitni gas lakši ili teži od vazduha, kao i na lokaciju i položaj u kome se vrši zavarivanje. Na primer, pri zavarivanju u atmosferi ugljendioksida (teži od vazduha) u nadglavnom položaju, treba birati gornje granice preporuka, dok pri zavarivanju u atmosferi helijuma (lakši od vazduha) u nadglavnom položaju treba birati donju vrednosti preporuka [2, 4, 7]. Pri radu na otvorenom (van radionice) potrošnja gasa može višestruko veća nego u radionici.

Dužina slobodnog kraja žičane elektrode i rastojanje mlaznice od osnovnog metala (slika 8.28) su dve geometrijske veličine koje mogu znatno uticati na kvalitet zavarenog spoja.



Slika 8.28 Položaj mlaznice za gas i dužina slobodnog kraja elektrode: l_m – rastojanje mlaznice od osnovnog metala, l_{el} – dužina električnog luka, l_e – dužina slobodnog kraja elektrodne žice

Preporučuje se da dužina slobodnog kraja elektrodne žice bude minimalna zbog stabilnosti električnog luka, ali ne sme biti prekratka jer temperatura električnog luka i tečnog kupatila može oštetiti vodiču elektrode. Orijentacione vrednosti ovog rastojanja su prikazane u tabeli 8.2.

Tabela 8.2 Preporučene vrednosti jačine struje, dužina slobodnog kraja i rastojanja mlaznice [2, 4, 7]

Jačina struje	Dužina slobodnog kraja žice	Rastojanje mlaznice
I [A]	l_e [mm]	l_m [mm]
50	5	10
100	6	10
150	8	10
200	10	12
250	12	12
300	14	12
350	17	15
400	20	15

Udaljenost mlaznice od radnih komada treba odabrati tako da zaštitni gas dobro prekrije zonu zavarivanja i tečno kupatilo, da električni luk bude stabilan i da se spreči prekomerno trošenje mlaznice.

Orijentacione vrednosti parametara zavarivanja prikazane su u prilogu.

8.5.7 Efekat tipa električne struje i polariteta

Zavarivanje postupcima MIG/MAG vrši se jednosmernom strujom inverzne polarnosti (JSIP) ili jednosmernom pulsirajućom strujom. Primena pulsirajuće struje daje ravniju površinu metala šava, manje je rasprskavanje rastopljenog metala i veća je brzina deponovanja. Jednosmerna struja direktne polarnosti (JSDP) i naizmjenična struja (NS) se vrlo retko primenjuju za MIG/MAG postupke zavarivanja.

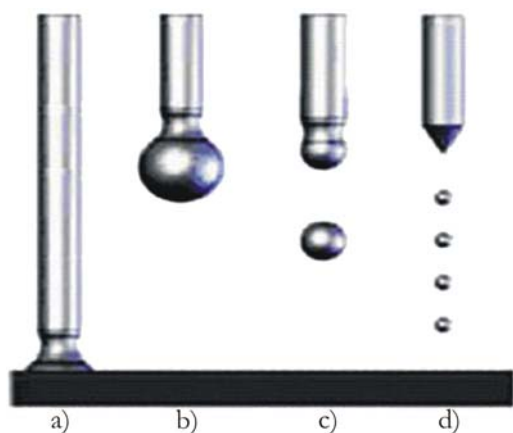
8.5.8 Tipovi prenosa metala i njihova primena

Nakon uspostavljanja električnog luka, počinje topljenje dodatnog metala (uz delimično topljenje osnovnog metala).

Rastopljeni deo dodatnog metala putuje kroz prostor u kome je uspostavljen električni luk i zaustavlja se na površini tečnog kupatila. Potom se meša sa rastopljenim metalom u tečnom kupatilu i formira metal šava [4].

Prelazak rastopljenog metala nije jedinstven ili univerzalan – on zavisi od parametara zavarivanja, dimenzija elektrode/žice, vrste zaštitnog gasa, temperature, vrste i tipa električne struje itd. U jednom slučaju rastopljeni metal kaplje kao vosak sa zapaljene sveće, naredni put curi kao tanak mlaz vode sa česme ili ponekad curi kao med sa kašičice. Ovaj proces prelaska metala u zavarivačkoj praksi se naziva „prenos materijala”.

Ova pojava je primećena sredinom dvadesetog veka (kada su MIG/MAG postupci bili u ekspanziji) i započeta su istraživanja sa ciljem pronalaženja najpovoljnijih metoda prenosa metala sa elektrode na metal šava jer je primećeno da različiti tipovi prenosa daju različite karakteristike metala šava.



Slika 8.29 Prenos metala: a) u kratkom spoju, b) krupnokapljica, c) pulsni prenos metala, d) prenos metala u mlazu

Postoji više opisa i sistematizacija ostvarenih tipova prenosa metala. Važeći standard SRPS EN ISO 4063:2013: Zavarivanje i srodni postupci – Lista postupaka i njihovo označavanje²⁷, definiše sledeće tipove prenosa metala (slika 8.29) [5]:

- D – prenos metala u kratkom spoju,
- G – krupnokapljica (globularni)

prenos metala,

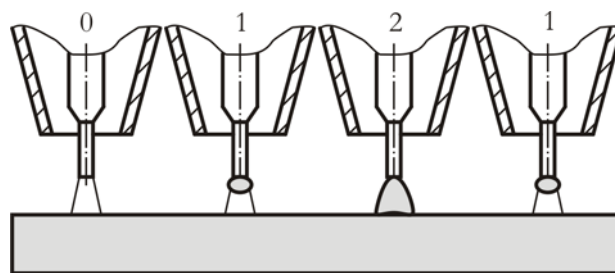
S – prenos metala u mlazu i

P – pulsni prenos metala.

Ovde nisu prikazani svi postojeći tipovi prenosa metala ali su navedeni tipovi prenosa koji su najefikasniji i najčešće korišćeni prilikom zavarivanja.

Prenos metala u kratkom spoju (D)

[4] se ostvaruje povremenim uranjanjem vrha elektrode u tečno kupatilo čime se proizvode kratki (električni) spojevi u električnom sistemu elektroda-osnovni metal. Karakteristične su dve diskretne faze (slika 8.30): faza formiranja i rasta tečne kapljice na vrhu elektrodne žice (slika 8.30, faza 1) i faza nastajanja kratkog spoja vrha kapljice i tečnog kupatila, praćena odvajanjem kapljice od elektrodne žice na kraju faze (slika 8.30, faza 2). Nakon toga započinje novi ciklus formiranja kapljice na vrhu elektrodne žice (slika 8.30, faza 1). Prenos metala sa elektrode na osnovni materijal događa se periodično, samo u diskretnim trenucima kratkog spoja (stoga se naziva i diskretnim prenosom). Koriste se elektrode najmanjih prečnika i najmanje jačine struje, zbog čega se ovaj tip prenosa ostvaruje u uslovima male količine unete toplote.



Slika 8.30 Princip i faze prenosa metala u kratkom spoju

Kao posledica unosa male količine toplote, dobija se šav malog preseka koji se brzo hladi pa je izražena opasnost pojave zakaljivanja.

Osnovna primena ovakvog prenosa metala susreće se pri zavarivanju tankih limova (do 5 mm), za izradu spojeva kod kojih su ograničene dopuštene deformacije kao i za zavarivanje korenih prolaza.

Najuticajniji parametri na formiranje prenosa metala u kratkom spoju su prečnik

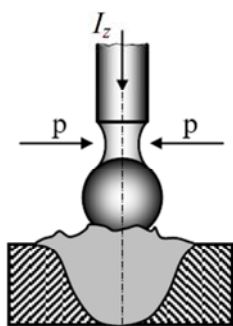
²⁷ Identičan sa: EN ISO 4063:2010 CEN/TC 121.

elektrode i vrsta zaštitnog gasa. Primenjuju se elektrode prečnika 0,6 mm do 1,1 mm, a zaštitna atmosfera je čisti CO_2 ili mešavine koje čine 75%-80%Ar i 25%-20% CO_2 ili mešavine Ar+ CO_2 + O_2 [4].

Prednosti prenosa materijala u kratkom spoju su: primena u svim položajima zavarivanja, mala ili nikakva priprema osnovnog metala za zavarivanje, male deformacije zavarenih delova, jednostavan rad, iskorišćenje elektrode preko 90% itd.

Ograničenja su: moguća pojava nepotpunog provara, odnosno, moguća pojava tzv. hladnih šavova, javlja se prekomerno rasprskavanje što povećava troškove naknadnog čišćenja i pogoršava se vizuelni izgled šava; može da se koristi izvan radionice, ali se kao zaštita od vetra i mogućeg oduvavanja zaštitne atmosfere koriste pokrivači od polimera ili impregniranih tkanina.

Transfer jedne rastopljene metalne kapljice, od elektrode do tečnog kupatila, odvija se kratko: fizički dodir elektrode i tečnog kupatila događa se i preko 200 puta u sekundi. Elektromagnetno polje, koje okružuje elektrodu i koje je posledica proticanja struje kroz nju, proizvodi površinsku silu pritiska koja „stiska” rastopljeni vrh elektrode, što je poznato kao „pinč efekt” (eng. *pinch effect*, slika 8.31).



Slika 8.31 Pinč efekat, I_z - struja zavarivanja, p - površinska sila pritiska [4, 34]

Ciklus prenosa metala u kratkom spoju (slika 8.32), detaljno može da se opiše kroz pet karakterističnih diskretnih događaja (A, B, C, D, E).

Događaj A: Elektroda ostvaruje fizički dodir sa tečnim kupatilom. Napon električnog

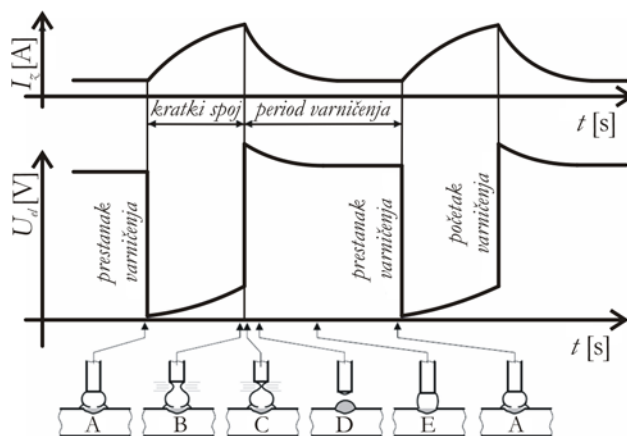
luka (U_{el}) je približno jednak nuli a struja zavarivanja (I_z) počinje da raste.

Događaj B: Pod uticajem elektromagnetne sile, formira se vrat elektrode (stiskanje, eng. *pinch*). Lagani rast napona okončava se neposredno pre početka varničenja. Jačina struje se približava svojoj maksimalnoj vrednosti.

Događaj C: Rastopljeni metal kapljice ne može da se širi u pravcu ose elektrode jer je u tome sprečava pritisak čvrstog elektrodnog materijala. Kapljici je onemogućeno odbijanje od tečnog kupatila i povratak na elektrodu usled dejstva pritiska plazme. Jačina struje je dostigla svoj maksimum.

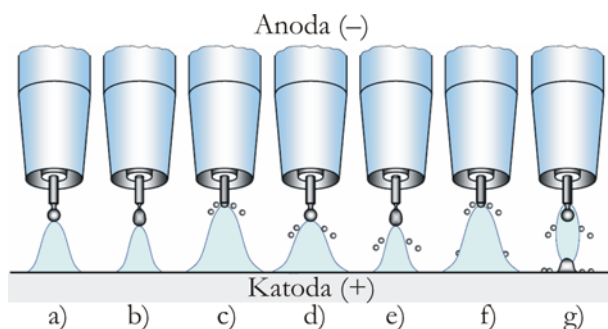
Događaj D: Ovo je kraj ciklusa prenosa materijala, odnosno, električnog kratkog spoja, i ogleda se u otkidanju kapljice sa vrha elektrode. Kidanje kapljice se odvija tokom perioda opadanja struje ka nominalnoj vrednosti – pri kojoj započinje nastajanje nove rastopljene kapljice.

Događaj E: Elektroda ponovo uspostavlja fizički dodir sa površinom tečnog kupatila. Napon naglo opada na minimalnu vrednost. Jačina struje je nominalna i nedovoljna je za rastapanje metala u budućoj kapljici. Time je zatvoren ciklus prenosa metala u kratkom spoju. Frekvencija ovog ciklusa varira od 20 do 200 ponavljanja u sekundi što zavisi od induktivnosti i vrste zaštitnog gasa. Povećanjem frekvencije ciklusa smanjuje se veličina rastopljene kapljice (postaju sitnije) dok se smanjenjem frekvencije ciklusa rastopljene kapljice povećavaju [4].



Slika 8.32 Ciklus prenosa metala [4]

Krupnokapličasti (globularni, G) prenos metala [4] je bio popularan tokom druge polovine dvadesetog veka i primenjivao se za zavarivanje obradaka velikih debljina. Krupnokapličasti prenos rastopljenog metala se odvija u pojedinačnim kapljicama koje nemaju pravilan oblik i, u većini slučajeva, čak su većih dimenzija od prečnika elektrode. Kapljice se formiraju kao u prvom diskretnom periodu kod kratkospojenog prenosa (slika 8.33, a, b). Umesto da rastu do momenta kada bi se ostvario kratak spoj, kapljice se odvajaju od elektrodne žice mnogo pre uranjanja u rastop tečnog kupatila (c). Odmah započinje formiranje nove kapljice (slika 8.33, a i d su identični diskretni događaji). Uporedo sa formiranjem nove kapljice, prethodna kapljica putuje ka tečnom kupatilu (e). Ciklusi formiranja kapljica brzo se smenjuju (brže nego što kapljica putuje kroz prostor) tako da nastaje mlaz krupnih kapljica koje putuju ka tečnom kupatilu.



Slika 8.33 Krupnokapličasti prenos materijala [4, 34]

Kvalitet dobijenog šava pri krupnokapličastom prenosu metala je lošiji nego pri kratkospojenom prenosu metala i to uglavnom zbog nedovoljnog uvarivanja i velikog rasprskavanja dodatnog materijala (simbolično prikazano sitnijim kapljicama na slici 8.33).

Rastapanje vrha elektrode nastaje usled neprekidnog oscilovanja aktivne mrlje električnog luka. Kretanje aktivne mrlje posledica je neravnomernog temperaturnog polja na sferičnoj površini vrha elektrode i težnje da se ostvari najmanje rastojanje od osnovnog metala. U stvari, tim oscilovanjem obezbeđuje se rastapanje površine vrha

elektrode a pod dejstvom površinskih napona na rastopljenom vrhu formira se sferična kapljica (a). U oblasti aktivne mrlje metal se zagreva do temperature ključanja što za posledicu ima pojavu lokalnog isparavanja. Pod dejstvom reaktivnog pritiska para metala formira se vrat elektrode, tako da između njega i vrha žice nastaje kapljica tečnog metala (b). Reaktivni pritisak para metala pojačan pritiskom struje plazme, gravitacionim i elektromagnetnim silama, sve više sužava vrat kapljice tako da u jednom momentu dolazi do odvajanja kapljice od vrha elektrode (c). Te sile istovremeno usmeravaju kretanje kapljice ka radnom komadu i ne dopuštaju joj da se odbije od površine rastopine u tečnom kupatilu. Krupne kapljice nastaju usled međusobnog sudaranja ili povremenih kratkih spojeva sa osnovnim materijalom. Proces transfera materijala krupnim kapljicama je složen pa je zbog toga otežan za upravljanje [4, 34].

Ukoliko se postigne velika gustine električne struje, nastaje povećanje brzine čestica u struji plazme, tečni metal na vrhu elektrode obrazuje konus sa čijeg vrha se odvajaju kapljice vrlo malih dimenzija, odnosno, nastaje sitnokapličasti ili prenos metala u mlazu.

Rasprskavanje tečnih kapljica dodatnog materijala iz prostora električnog luka predstavlja ključnu negativnu osobinu i posledicu krupnokapličastog prenosa. Problem rasprskavanja nije vezan samo za potrebu naknadnog uklanjanja navarenih kapljica sa površina radnih predmeta u okolini šava i sa lica samog šava, već zato što se ova pojava vezuje za nastanak neprovarenih mesta i uključaka troske u metalu šava. Na površinu dela i stranice žleba se, uglavnom, nalepljuju krupnije kapljice. Na kontaktnu vodiču, i na unutrašnju površinu mlaznice, nalepljuju se sitnije kapljice dodatnog materijala.

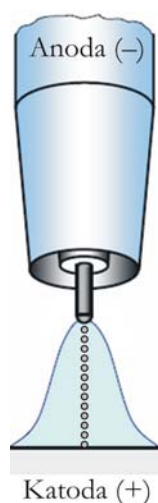
Pored smanjenja preseka i protoka zaštitnog gasa, nalepljeni dodatni materijal na unutrašnjoj površini mlaznice remeti (poželjan) laminarni oblik strujanja gasa čime se pogoršava zaštita zone zavarivanja. Privlačna sila katode predstavlja dodatni

razlog da kapljice na nepravilnoj putanji dobijaju dodatno rotaciono kretanje (spin). Neredovno uklanjanje kapljica sa unutrašnje površine mlaznice i sa kontaktne vođice dovodi do njihovog nagomilavanja i nekontrolisanog odvajanja. Kada se naslage otkače sa mlaznice i dospeju u rastop, one sa sobom donose čestice vazduha (i snižavaju temperaturu tečnog kupatila) te nastaju neželjene posledice u metalu šava [4, 34].

Otklanjanje ili ublažavanje pojave rasprskavanja postiže se regulisanjem struje i napona zavarivanja, mada se primenom raznih i specijalnih sprejova i pasta, odnosno, stvaranjem zaštitnog filma na površini osnovnog materijala, sprečava lepljenje kapljica, odnosno omogućuje se njihovo lakše uklanjanje. Preporučuje se primena što manjih napona.

Prednosti krupnokapljicačkog prenosa metala: koristi se jeftini CO₂ zaštitni gas (ali često i mešavina u kombinaciji Ar+CO₂), postižu se velike brzine zavarivanja, pogodan je za ravnopravnu upotrebu punih ili praškom punjenih elektrodnih žica [4].

Ograničenja krupnokapljicačkog prenosa: povišeno rasprskavanje materijala i porast troškova naknadnog uklanjanja (čišćenje), sklonost ka stvaranju hladnih šavova, odnosno grešaka u zoni rastapanja, lice šava je konkavno, šavovi se ostvaruju sa nedovoljnom penetracijom u oblasti granice žleba, veliko rasprskavanje metala snižava stepen iskorišćenja elektrode na 87%-93%.



Slika 8.34 Prenos metala u mlazu [4, 34]

Prenos metala u mlazu (S) [4, 34] predstavlja varijantu prenosa metala sa najvećom količinom energije što dovodi do formiranja mlaza rastopljenih kapljica malih dimenzija i velike brzine. Kapljice imaju težnju saosnog kretanja kroz električni luk (slika 8.34).

Kao jedan od elemenata koji stvara uslove za formiranje prenosa u mlazu jeste primena aktivne zaštitne atmosfere dvokomponentnih mešavina Ar i 1%-5% O₂ ili Ar i 18% CO₂. Ovaj tip prenosa može da se primeni na svim uobičajenim materijalima kao što su aluminijum, magnezijum, ugljenični čelik, legure nikla, legure bakra, itd [4, 34].

Tabela 8.3 Vrednosti jačine struje za prenos metala u mlazu [4, 34]

Elektroda		Zaštitni gas	Jačina električne struje
Osnovni metal	Prečnik elektrode		
[-]	[mm]	[%]	[A]
Ugljenični i niskolegirani čelik	0,8	90% Ar, 10% CO ₂	155-165
	0,9		175-185
	1,2		215-225
	1,3		265-275
	1,6		280-290
	0,9	98% Ar, 2% O ₂	130-140
	1,2		205-215
	1,3		240-250
	1,6		265-270
Ugljenični i niskolegirani kompozitni čelik	1,0	90% Ar, 10% CO ₂	140-150
	1,2		160-170
	1,3		170-180
	1,6		220-230
Nerđajući čelik	0,8	98% Ar, 2% O ₂	120-130
	0,9		140-150
	1,2		185-195
	1,6		250-260
	0,8	98% Ar, 2% CO ₂	130-140
	0,9		200-210
	1,2		145-155
	1,6		255-265

Pošto omogućava unos velike količine materijala (veliki depozit, jer se koriste elektrode velikih prečnika i struje velikih jačina, tabela 8.3), prenos metala u mlazu je

pogodan za zavarivanje limova od ugljeničnih čelika velike debljine, kod svih vrsta šavova (posebno kod ugaonih spojeva). Nije pogodan za zavarivanje u prinudnim položajima zbog velike količine rastopljenog metala i njegove velike tečljivosti u kupatilu, odnosno mogućnosti razlivanja. Stoga se, uglavnom, primenjuje za horizontalne položaje zavarivanja.

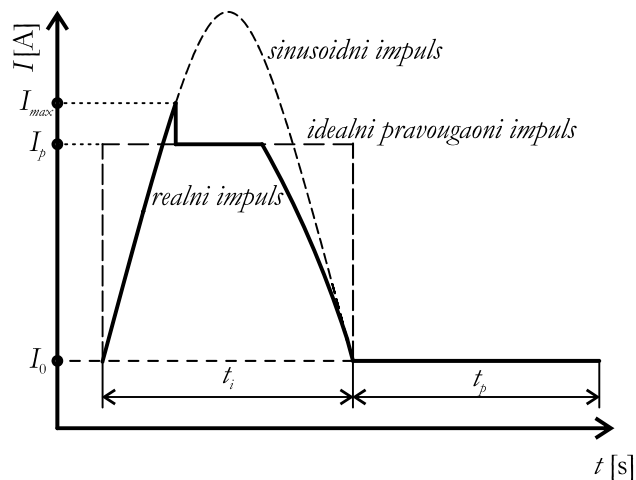
Minimalne vrednosti jačine struje biraju se u zavisnosti od prečnika elektrodne žice. Primena mešavine koju čine 95% Ar i komplementarna količina CO₂, omogućuje dobru penetraciju i dobijanje lepog izgleda lica šava, dok primena mešavine koja sadrži više od 10% CO₂, smanjuje penetraciju i stvara loš izgled lica šava. Najbolji rezultati ostvaruju se na čistom osnovnom metalu (bez ulja, prljavštine, korozije i prašine).

Prednosti prenosa u mlazu su: veliki depozit, veliko iskorišćenje elektrode (preko 98%), primena raznovrsnih dodatnih materijala (kako po vrsti tako i po prečniku), lep izgled šava, laka obuka radnika i jednostavna primena, odsustvo rasprskavanja, odlično rastapanje osnovnog i dodatnog materijala, mogućnost automatizacije i primene robota.

Ograničenja prenosa u mlazu su: primena u pretežno horizontalnim položajima, povišena emisija dima, povišeno toplotno zračenje i emitovanje izuzetno snažne svetlosti (što nameće potrebu povišene zaštite vida zavarivača i osoba u neposrednom okruženju), upotreba postupka van radionice zahteva primenu zaštite od vetra/promaje, troškovi zaštitne atmosfere su veći nego kod CO₂ zaštite, potrebno je dodatno čišćenje osnovnog metala itd [4, 34].

Pulsni prenos metala (P) [4, 34] je upravljana varijanta prenosa u mlazu i predstavlja najčešće korišćeni način za dobijanje visokog kvaliteta šava (približno do nivoa kvaliteta pri TIG postupku zavarivanja). Ostvaruje se primenom pulsirajuće struje (impulsna, pulsna I_p), sastavljene iz osnovne (bazne, I_0) jednosmerne struje niskog intenziteta i impulsne struje, koju modulira poseban uređaj tako da nastaju visoki skokovi

intenziteta u ograničenom vremenskom intervalu (slika 8.35). Zavarivanje se izvodi bez pojave kratkog spoja.



Slika 8.35 Primer realnog impulsa struje, t_i – vreme trajanja impulsa, t_p – vreme trajanja pauze, I_0 – osnovna jačina struje, I_p – jačina impulsa struje, I_{max} – realni maksimum impulsa [34]

Transfer materijala ostvaruje se u toku strujnog pika u obliku jedne rastopljene kapi i, s obzirom da se od elektrodne žice odvaja 60 do 120 puta u sekundi, ostvaruje se prenos metala u mlazu.

Pulsni prenos metala je razvijen iz dva razloga: upravljanje pojavom rasprskavanja i eliminacija nepotpunog provara (svojestvenog krupnokapljicaštom prenosu). Pulsni prenos metala omogućava povećanje stepena iskorišćenja elektrodnih žica i smanjenje prisustva vodonika u šavovima. Za zavarivanje se koriste pune elektrodne žice u rasponu prečnika 0,8 mm do 1,6 mm a kod praškom punjenih žica prečnika 1,1 mm do 2 mm. Upravljanje promenom jačine struje omogućuje da angažovana energija pulsnog prenosa u mlazu bude manja od energije običnog prenosa u mlazu, iako odgovarajuće vršne vrednosti struje premašuju intenzitete struja koje se primenjuju kod krupnokapljicaštog i kratkospojenog prenosa. U kratkom periodu trajanja vršne vrednosti struje, u idealnim uslovima, odvaja se jedna kapljica tečnog metala i putuje kroz električni luk ka tečnom kupatilu. Baznom strujom obezbeđuje se stabilnost luka i uglavnom je njena uloga da obezbedi dovoljan unos

toplote radi održavanja električnog luka između pulseva i održavanje rastopa u tečnom kupatilu. S druge strane, intenzitet osnovne struje treba da bude niži od najmanje vrednosti nastajanja običnog prenosa u mlazu [4, 34].

Karakteristika visokoupravljanog tipa prenosa proizilazi iz mogućnosti upravljanja frekvencijom pulsirajuće struje (broj vrhova u jedinici vremena), i vremenom trajanja jednog pika. Frekvencija vršnih vrednosti struje raste proporcionalno sa porastom brzine dotura žice, odnosno, pri datoj brzini dotura žice povećanjem učestanosti povećava se broj oslobođenih kapljica i postiže prenos u mlazu sitnijih kapljica metala.

Na način prenosa dodatnog materijala od uticaja su vrsta i jačina struje, strujno naponska karakteristika izvora napajanja, zaštitni gas, sastav dodatnog materijala i slobodna dužina elektrodne žice. Ipak, najbitniji uticaj imaju jačina struje, vrsta i sastav zaštitnog gasa.

Pulsni prenos metala se najviše primenjuje za zavarivanje niskolegiranih čelika povišene čvrstoće u atmosferi mešavine Ar i najviše 18% CO₂.

Prednosti primene impulsnog prenosa u mlazu su: visoka stabilnost luka pri minimalnim vrednostima struje zavarivanja, odsustvo ili vrlo malo izraženo rasprskavanje, povećana otpornost na pojavu grešaka u metalu šava, brzine dotura žice mogu biti veće od 1,2 m/min, visok stepen čistoće površina šava i njegove okoline, lep izgled površine šava, mala emisija dima, snižen nivo toplotnih deformacija spoja, moguća primena izvan radionice, snižen sadržaj vodonika u šavu, elektrodne žice su niske cene koštanja i visokog stepena iskorišćenja (98%), primena u robotizovanim i visokoautomatizovanim procesima, primenjuje se za tandem ili druge višelučne tehnike zavarivanja, predstavlja vid zamene za TIG postupak zavarivanja naizmeničnom strujom.

Ograničenja primene impulsnog prenosa u mlazu su: oprema je mnogo skuplja nego kod drugih tipova prenosa materijala, mešavine gasova za zaštitnu atmosferu su

skuplje od CO₂, visoka energija u električnom luku nameće potrebu povišenja mera zaštite radnika, posebno vida, složenije zavarivanje, neophodna je zaštita od vetra na terenu [4, 34].

Hladni prenos metala [4] se koristi da se prevaziđu ograničenja karakteristična za MIG/MAG postupke zavarivanja u smislu zavarivanja raznorodnih materijala (na primer, aluminijuma i čelika). U savremenoj automobilske industriji koju karakterišu automobili tzv. „hibridne” konstrukcije, pravi izazov predstavlja upravo spajanje ta dva materijala. Kako su izazovi ovladavanja hibridnim konstrukcijama postajali sve prisutniji, tako je rasla primena tehnika spajanja materijala postupcima zasnovanim na toploti kao što je MIG lemljenje, ali ne i zavarivanje.

Zavareni spojevi raznorodnih materijala (bimetalni), prvenstveno se ostvaruju primenom postupaka sa mehaničkom energijom aktivacije, a u nekim slučajevima, kombinacijom mehaničke i toplotne. Postupke na bazi toplotne energije aktivacije bilo je vrlo teško ili skoro nemoguće primeniti kod bimetalnih spojeva. Problemi zavarivanja bimetala, posledica su različitosti fizičkih i hemijskih osobina osnovnih metala: korozione otpornosti, koeficijenta toplotnog širenja, odnosno, posledica su atomskih struktura zasnovanih na različitim tipovima i parametrima kristalnih rešetki.

Nastanak hladnog prenosa metala vezuje se za 1991. godinu i prva istraživanja usmerena na zavarivanje aluminijuma i čelika MIG postupkom, odnosno, postupkom baziranom na toplotnoj energiji aktivacije. Pošlo se od ideje da se razvije postupak sa niskim unosom toplote i odsustvom rasprskavanja dodatnog materijala. Osnovno dostignuće i novina ostvarena je u kinematici dodatnog materijala iz čega su proizašle i ostale dobre osobine. Naime, žica se, u jednom periodu, potiskuje ka osnovnom materijalu sve dok se ne ostvari fizički dodir sa tečnim kupatilom, kada nastaje kratki spoj. Potom se, u drugom poluperiodu, žica odvaja od tečnog kupatila promenom smera kretanja,

čime se prekida kratki spoj. Odmah po prekidu kratkog spoja obnavlja se električni luk i, u toku udaljavanja od radnog predmeta, uspostavlja se njegova potrebna dužina. S obzirom da se opisano kretanje žice relativno lako izvodi (na osnovu promene kinematskih karakteristika a ne karakteristika električnog luka – napon), realizacija predmetnog transfera materijala nije više tehnički neizvodljiva.

Hladni prenos metala može da se razume kao MIG postupak zavarivanja kod koga je unos toplote niži u odnosu na ostale tipove prenosa metala zbog čega se u njegovom nazivu koristi pridev „hladan”. Reč je o elektrolučnom postupku zavarivanja u

zaštitnoj atmosferi sa neznatno izmenjenom strukturom u odnosu na ostale tipove prenosa.

Oblasti komercijalne primene hladnog prenosa metala su: MIG lemljenje bez rasprskavanja, zavarivanje limova malih debljina (aluminijum, čelik, nerđajući čelik), elektrolučno zavarivanje čelika i aluminijuma.

Prednosti primene su: vrlo nizak unos toplote, zavarivanje bez rasprskavanja (i tvrdo lemljenje), odlično upravljanje dužinom električnog luka (stabilan električni luk), stalna vrednost maksimalne dužine električnog luka, mogućnost kombinovanja sa drugim tipovima prenosa metala.

LITERATURA

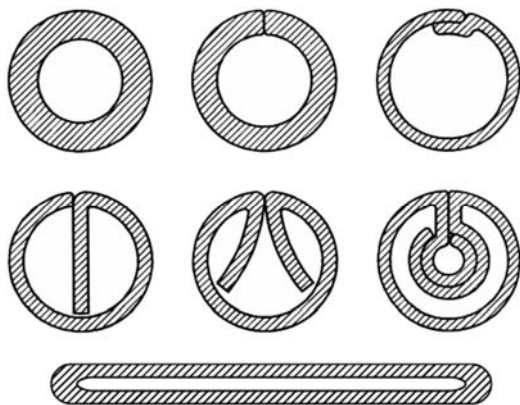
- [1] United States Department of Labor, bureau of Labor Statistics: Welders, Cutters, Solderers, and Brazers: Statistical Bulletin 2015;
<https://www.bls.gov/ooh/production/welders-cutters-solderers-and-brazers.htm#tab-1>, (dokument pregledan 12.02.2017.);
- [2] The James F. Lincoln Arc Welding: The Procedure Handbook of Arc Welding, 14th Edition, ASIN: B000FBCQ4M, 2015;
- [3] Autorizovana predavanja na kursovima za međunarodne inženjere i tehnologe zavarivanja, Mašinski fakultet Niš, 2007-2016;
- [4] Miomir Vukićević: Autorizovana predavanja na kursovima za međunarodne inženjere i tehnologe zavarivanja, Mašinski fakultet Niš, 2007-2016
- [5] SRPS EN ISO 4063:2013 Zavarivanje i srodni postupci – Lista postupaka i njihovo označavanje, 28.01.2013;
- [6] Miomir Vukićević: Tehnologija spajanja materijala – Zavarivanje 1, ISBN 978-86-82631-73-6, Fakultet za mašinstvo i građevinarstvo u Kraljevu, 2014;
- [7] Milorad Jovanović, Dragan Adamović, Vukić Lazić, Nada Ratković: CO2 zavarivanje – priručnik, YU ISBN 86-80581-71-2, Mašinski fakultet Kragujevac, Srbija, 2005;
- [8] SRPS EN 60974-1:2012: Oprema za elektrolučno zavarivanje – Deo 1: Izvori struje za zavarivanje, 29.11.2012;
- [9] SRPS EN 60974-7:2014: Oprema za elektrolučno zavarivanje – Deo 7: Gorionici, 30.05.2014;
- [10] SRPS EN 60974-12:2012: Oprema za elektrolučno zavarivanje – Deo 12: Spojne naprave za zavarivačke kablove, 30.03.2012;
- [11] <https://www.millerwelds.com/equipment/>, (dokument pregledan 14.11.2016. godine);
- [12] SRPS EN 60974-5:2014: Oprema za elektrolučno zavarivanje – Deo 5: Dodavači žice, 30.05.2014;
- [13] SRPS EN 60974-2:2015: Oprema za elektrolučno zavarivanje – Deo 2: Sistemi za hlađenje tečnošću, 24.03.2015;
- [14] SRPS EN ISO 14341:2012: Potrošni materijali za zavarivanje – Žičane elektrode i depoziti za zavarivanje u zaštiti gasa nelegiranih i fino zrnih čelika – Klasifikacija, 23.05.2012;
- [15] SRPS EN ISO 16834:2013: Potrošni materijali za zavarivanje – Žičane elektrode, žice, šipke i depoziti za elektrolučno zavarivanje čelika povišene čvrstoće pod zaštitom gasa, 29.11.2013;
- [16] SRPS EN ISO 21952:2013: Potrošni materijali za zavarivanje – Žičane elektrode, žice, šipke i depoziti za elektrolučno zavarivanje pod zaštitom gasa čelika otpornih na puzanje – Klasifikacija, 29.11.2013;
- [17] SRPS EN ISO 14343:2011: Potrošni materijali za zavarivanje – Elektrodne žice, elektrodne trake, žice i šipke za elektrolučno zavarivanje nerđajućih i vatrootpornih čelika – Klasifikacija, 30.09.2011;
- [18] SRPS EN ISO 18274:2012: Potrošni materijali za zavarivanje – Pune žičane i pune trakaste elektrode, pune žice i pune šipke za zavarivanje topljenjem nikla i legura nikla – Klasifikacija, 21.06.2012;
- [19] SRPS EN ISO 24373:2012: Dodatni materijali za zavarivanje – Pune žice i šipke za zavarivanje topljenjem bakra i legura bakra – Klasifikacija, 21.06.2012;
- [20] SRPS EN ISO 18273:2017: Potrošni materijali za zavarivanje – Žičane elektrode, žice i šipke za zavarivanje aluminijuma i legura aluminijuma – Klasifikacija, 31.01.2017;

- [21] SRPS EN ISO 1071:2017: Potrošni materijali za zavarivanje – Obložene elektrode, žice, šipke i punjene žice za zavarivanje topljenjem sivog liva – Klasifikacija, 31.01.2017;
- [22] SRPS EN ISO 24034:2012: Potrošni materijali za zavarivanje – Pune žičane elektrode, pune žice i pune šipke za zavarivanje topljenjem titana i legura titana – Klasifikacija, 21.06.2012;
- [23] SRPS EN ISO 544:2013: Potrošni materijal za zavarivanje – Uslovi isporuke za dodatne materijale i praškove – Vrste proizvoda, mere, tolerancije i obeležavanja, 28.01.2013;
- [24] SRPS EN ISO 14344:2012: Potrošni materijali za zavarivanje – Uputstva za nabavku dodatnih materijala i praškova, 23.05.2012;
- [25] SRPS EN ISO 14175:2009: Potrošni materijali za zavarivanje – Gasovi i gasne mešavine za zavarivanje topljenjem i srodne postupke, 09.07.2009;
- [26] SRPS EN ISO 9692-1:2014: Zavarivanje i srodni postupci – Tipovi pripreme spoja – Deo 1: Ručno elektrolučno zavarivanje topivom elektrodom, elektrolučno zavarivanje topivom elektrodom u zaštitnom gasu, gasno zavarivanje, TIG zavarivanje i zavarivanje čelika snopom, 29.08.2014;
- [27] Standard SRPS EN ISO 9692-3:2008: Zavarivanje i srodni postupci – Preporuke za pripremu spoja - Deo 3: Elektrolučno zavarivanje u zaštiti inertnih gasova i elektrolučno zavarivanje sa volframovom (tungstenovom) elektrodom u zaštiti inertnog gasa aluminijuma i njegovih legura, 27.02.2008;
- [28] SRPS EN 1708-1:2013: Zavarivanje – Osnovni detalji zavarenih čeličnih spojeva – Deo 1: Komponente pod pritiskom, 28.01.2013;
- [29] SRPS EN 1708-2:2008: Zavarivanje – Osnovni detalji zavarenih čeličnih spojeva - Deo 2: Komponente bez unutrašnjeg pritiska, 27.02.2008;
- [30] SRPS EN 1708-3:2012: Zavarivanje – Osnovni detalji zavarenih čeličnih spojeva – Deo 3: Komponente pod pritiskom sa plakaturom, puferom i sa prevlakom (trakama), 21.06.2012;
- [31] Miomir Vukićević, Uređaji i pribori u zavarivanju, ISBN 978-86-82631-60-6, Mašinski fakultet Kraljevo, 2012;
- [32] Avram Majstorović, Milorad Jovanović: Osnovi zavarivanja, lemljenja i lepljenja, ISBN 86-23-43076-X, Naučna knjiga, Beograd, 1991;
- [33] SRPS EN ISO 13916:2013: Zavarivanje – Uputstvo za merenje temperature predgrevanja, međuprolazne temperature i temperature održavanja predgrevanja, 28.01.2013;
- [34] Lincoln Electric: Gas Metal Arc Welding, Product and Procedure Selection, 2016;
- [35] C. Hasse, W. Reitze: Elektrolučno zavarivanje – priručnik, Građevinska knjiga, Beograd, 1982;
- [36] SRPS EN 169:2008: Lična zaštita očiju - Filtri za zavarivanje i srodne tehnike - Zahtevi u pogledu koeficijenta transmisije i preporučena upotreba, 21.01.2008;
- [37] SRPS EN 170:2008: Lična zaštita očiju – Filtri za ultraljubičasto zračenje – Zahtevi u pogledu koeficijenta i preporučena upotreba, 27.02.2008;
- [38] SRPS EN 171:2008: Lična zaštita očiju – Filtri za infracrveno zračenje – Zahtevi u pogledu koeficijenta transmisije i preporučena upotreba, 27.02.2008;
- [39] SRPS EN 175:2008: Lična zaštita – Oprema za zaštitu očiju i lica tokom zavarivanja i srodnih postupaka, 21.01.2008;
- [40] SRPS EN 379:2011: Lična zaštita očiju - Automatski filtri za zavarivanje, 28.11.2011;
- [41] SRPS EN ISO 11611:2016: Zaštitna odeća koja se upotrebljava prilikom zavarivanja i srodnih procesa, 29.02.2016;
- [42] SRPS EN 12477:2007: Zaštitne rukavice za zavarivače, 25.07.2007;
- [43] SRPS EN ISO 10882-1:2012: Zdravlje i bezbednost pri zavarivanju i srodnim postupcima – Uzorkovanje čestica i gasova iz vazduha u zoni disanja operatera – Deo 1: Uzorkovanje

- čestica iz vazduha, 23.05.2012;
- [44] SRPS EN ISO 10882-2:2008: Zdravlje i bezbednost pri zavarivanju i srodnim postupcima – Uzorkovanje čestica i gasova iz vazduha u zoni disanja operatera – Deo 2: Uzorkovanje gasova, 09.09.2008;
- [45] SRPS EN ISO 14114:2015: Oprema za gasno zavarivanje – Sistemi za snabdevanje acetilenom za zavarivanje, rezanje i srodne postupke – Opšti zahtevi, 30.09.2015;
- [46] SRPS EN ISO 15615:2014: Oprema za gasno zavarivanje – Sistemi acetilenskih vodova za zavarivanje, rezanje i srodne postupke – Zahtevi za bezbednost uređaja pod visokim pritiskom, 29.08.2014;

9 ELEKTROLUČNI POSTUPAK ZAVARIVANJA TOPIVOM PUNJENOM ELEKTRODNOM ŽICOM U ATMOSFERI ZAŠTITNOG GASA

Postupci zavarivanja topivom punjenom elektrodnom žicom u atmosferi zaštitnog gasa su podgrupa postupaka zavarivanja topivom elektrodnom žicom u atmosferi zaštitnog gasa pri čemu je osnovna razlika u tipu/obliku žice. Obična žica za zavarivanje je punog poprečnog preseka i izrađena je od jednog materijala (najčešće je to legura). Punjena žica za zavarivanje predstavlja cev koja je ispunjena mineralnim ili metalnim praškom/prahom [1, 2].



Slika 9.1 Poprečni presezi punjenih žica [1]

Cevasti deo elektrodne žice se najčešće izrađuje od lima (koji je istog materijala kao i puna žica) koji se savija i oblikuje u kalupu (provlaču). Pre savijanja i oblikovanja cevi, na lim se sipa prašak kojim se elektroda „punji“. Oblici cevi mogu biti prosti (obična cev) ili složeni (cev sa preklopom, cev sa jezičkom unutar zapremine ili cev sa složenim oblicima unutar zapremine). Cevi sa složenijim poprečnim presecima imaju manju zapreminu koja je popunjena praškom.

Prašak kojim su elektrodne žice „punjene“ može biti mineralnog karaktera, ali se koristi i metalni prah koji je osobina različitih od materijala cevi žice [1, 2].

Prašak unutar elektrode se ponaša kao obloga kod elektroda za REL postupak: on ima zaštitnu (štiti metal šava jer formira zaštitnu trosku), metaluršku (legira metal šava)

i stabilizacionu ulogu (stabilizuje električni luk). Punjene elektrodne žice, takođe, dozvoljavaju primenu većih jačina struja zavarivanja, lako zavarivanje u svim položajima i neznatno je manja potrošnja zaštitnog gasa.

Metalni prah u žicama nema zaštitnu ulogu ali zato ima izražena metalurška svojstva.

Punjenim žicama se zavaruju svi tehnološki zavarivi čelici, aluminijum, bakar, nikal i livena železa, pri čemu debljina osnovnog metala može da bude i do 200 mm. Debljine limova do 10 mm ne zahtevaju nikakvu pripremu žleba i zavaruju se u jednom prolazu [1, 2].

Kao i kod pune žice, postupci zavarivanja se prema vrsti zaštitnog gasa koji se koristi pri zavarivanju dele na MIG i MAG. Prva upotreba punjenih elektroda vezuje se za sredinu dvadesetog veka i spajanje debelih limova u brodogradnji [3].

9.1 Podela i klasifikacija postupka

Elektrolučni postupci zavarivanja topivom punjenom elektrodnom žicom u atmosferi zaštitnog gasa su standardizovani i klasifikovani prema ISO 4063 kao grupa 13 (ISO 4063 — 13) [4]. Na osnovu sopstvenih specifičnosti, postupci su klasifikovani kao¹:

ISO 4063 — 131 – MIG postupak zavarivanja punom elektrodnom žicom,

*ISO 4063 — 132 – MIG postupak zavarivanja punjenom elektrodnom žicom,

*ISO 4063 — 133 – MIG postupak zavarivanja metalnim prahom punjenom elektrodnom žicom,

ISO 4063 — 135 – MAG postupak

¹ Postupci zavarivanja punjenom žicom obeleženi su *.

zavarivanja punom elektrodom žicom,

*ISO 4063 — 136 – MAG postupak zavarivanja punjenom elektrodom žicom,

*ISO 4063 — 138 – MAG postupak zavarivanja metalnim prahom punjenom elektrodom žicom.

9.2 Osnovna oprema za zavarivanje

Osim elektrodne žice, oprema za zavarivanje topivom punjenom žicom u atmosferi zaštitnog gasa je potpuno identična kao kod postupaka zavarivanja punom elektrodom žicom. Osnovna oprema za MIG/MAG postupke je opisana u poglavlju 8.

9.3 Dodatni i potrošni materijali

Dodatni materijali pri zavarivanju topivom punjenom elektrodom u atmosferi zaštitnog gasa su punjene elektrodne žice dok se u potrošne materijale svrstavaju zaštitni gasovi. Zaštitni gasovi koji se koriste pri zavarivanju punjenom žicom su isti zaštitni gasovi koji se koriste pri zavarivanju punom žicom.

9.3.1 Podela dodatnih materijala

Punjene žice za MIG/MAG postupke zavarivanja mogu da se podele prema:

- tehnološkom postupku izrade,
- obliku,
- zaštitnim svojstvima,
- hemijskom sastavu punjenja.

Prema tehnološkom postupku izrade, punjene elektrodne žice se dele na potpuno zatvorene i delimično zatvorene. Tehnološki postupak izrade potpuno zatvorenih žica je složeniji u odnosu na delimično zatvorene pa je samim tim potpuno zatvorena žica skuplja u odnosu na delimično zatvorenu (čak i do 30%). Međutim, potpuno zatvorene elektrodne žice sadrže manju količinu vlage u prašku nego elektrodne žice koje su delimično

zatvorene. Kako se elektrodne punjene žice ne suše (kao pojedine obložene elektrode za REL postupak zavarivanja), potpuno zatvorene elektrodne žice se koriste za zavarivanje spojeva gde se zahteva što niža količina vodonika u metalu šava.

Prema obliku, punjene žice se dele na cevaste i pločaste.

Pločaste (trakaste) punjene elektrodne žice se koriste za zavarivanje sa većim nanosom dodatnog materijala u zonu zavarivanja i one zahtevaju primenu izvora struje sa boljom intermitencijom pa je obavezna primena opreme sa prinudnim hlađenjem.

Prema zaštitnim svojstvima, punjene žice se dele na samozaštitne i normalne. Prašak iz žice sagoreva prilikom zavarivanja i uspostavlja zaštitnu atmosferu oko zone zavarivanja. Ukoliko je količina gasova dobijenih sagorevanjem, kao i njihov uticaj na zavareni spoj, dovoljan da zaštiti zonu zavarivanja, elektroda je samozaštitna. U tom slučaju primena zaštitnog gasa nije obavezna. Ukoliko gasovi dobijeni sagorevanjem praška nisu dovoljni da zaštite zonu zavarivanja (i neophodna je primena zaštitnog gasa), elektrodna žica je normalna.

Prema hemijskom sastavu punjenja žice, one se dele na rutilne, bazične i čisto-mineralne.

Rutilne žice su sastavljene od minimalno 50% rutila dok ostatak sačinjavaju kalcijum-oksidi, jedinjenja aluminijuma i dezoksidatori na bazi železa. Usled prisustva rutila, električni luk je stabilan i ugljenično-manganski čelici zavareni rutilnim žicama imaju dobru žilavost čak i na temperaturama od -20°C . Rutilne žice dobro provaruju koren šava, daju lepo lice šava, prenose metal u mlazu i daju trosku koja se jednostavno uklanja. Zavarivanje rutilnom punjenom žicom vrši se MAG postupkom.

Prašak kod bazične punjene žice se sastoji od kalcijum-oksida, soli kalijuma i rutila; on formira obilnu trosku na površini tečnog kupatila. Ovakva troska je gasno nepropusna i predstavlja veoma dobru zaštitu tečnog kupatila od uticaja atmosfere. Površina

zavarenog spoja je dobra, retko dolazi do pojave prslina u metalu šava i primenjuje se za zavarivanje tanjih delova. Problem predstavlja izbor parametara za zavarivanje – najčešće se parametri nalaze u jako uskoj zoni optimalnih vrednosti. Prenos metala u električnom luku je krupnokapljica pa je prisutno znatno rasprskavanje metala. Zavarivanje bazičnom žicom se najčešće vrši MAG postupkom.

Žice punjene metalnim prahom se primenjuju za zavarivanje visokolegiranih čelika i dobijaju se šavovi koji imaju dobru žilavost i na jako niskim temperaturama. Za razliku od rutilne i bazične žice, žica punjena metalnim prahom ne formira trosku (ili je ona neznatna) pa je neophodan veliki protok zaštitnog gasa u zoni zavarivanja. Prenos metala je sitnokapljica i ostvaruje se kako pri visokim tako i pri niskim strujama zavarivanja. Zavarivanje žicama punjenim prahom se najčešće vrši MIG postupkom.

9.3.2 Klasifikacija dodatnih materijala

Punjene žice za zavarivanje postupcima ISO 4063 — 13 su prečnika $d_e=0,8\text{ mm}-5\text{ mm}$ i namotane su na „koturove”, pri čemu je namotano minimalno 20 m žice.

Izbor žice za zavarivanje vrši se prema osnovnom metalu pa su one tako i klasifikovane – prema materijalima koji se zavaruju:

SRPS EN ISO 17632:2017: Potrošni materijali za zavarivanje – Punjene elektrodne žice za zavarivanje u zaštitnom gasu i bez zaštitnog gasa nelegiranih i finozrnih čelika – Klasifikacija² [5],

SRPS EN ISO 18276:2009: Potrošni materijali – Punjene žice za elektrolučno zavarivanje sa zaštitom gasa i bez zaštite gasa čelika povišene čvrstoće – Klasifikacija³ [6],

SRPS EN ISO 17634:2017: Potrošni materijali za zavarivanje – Punjene žice za elektrolučno zavarivanje u zaštitnom gasu vatropostojanih čelika – Klasifikacija⁴ [7],

SRPS EN ISO 17633:2012: Potrošni materijali za zavarivanje – Punjene žice i šipke za elektrolučno zavarivanje sa zaštitnim gasom i bez zaštitnog gasa nerđajućih i vatrootpornih čelika – Klasifikacija⁵ [8],

SRPS EN ISO 12153:2013: Potrošni materijali za zavarivanje – Punjene elektrodne žice za zavarivanje nikla i legura nikla pod zaštitom gasa i bez nje – Klasifikacija⁶ [9],

SRPS EN ISO 1071:2017: Potrošni materijali za zavarivanje – Obložene elektrode, žice, šipke i punjene žice za zavarivanje topljenjem sivog liva – Klasifikacija⁷ [10].

Standardi koji definišu punjene elektrode, prikazani su u prilogu.

Uslovi isporuke

Žice za zavarivanje moraju da se isporuče korisniku tako da zadovoljavaju uslove definisane standardima SRPS EN ISO 544:2013: Potrošni materijal za zavarivanje – Uslovi isporuke za dodatne materijale i praškove – Vrste proizvoda, mere, tolerancije i obeležavanja⁸ [11] i SRPS EN ISO 14344:2012: Potrošni materijali za zavarivanje – Uputstva za nabavku dodatnih materijala i praškova⁹ [12].

9.4 Tehnologija zavarivanja

Tehnologija zavarivanja punjenom elektrodnom žicom MAG/MIG postupcima je gotovo istovetna tehnologiji zavarivanja punom žicom. Rad sa opremom, paljenje električnog luka, tehnika zavarivanja i prekidanje zavarivanja su istovetni kao kod postupka zavarivanja punom elektrodnom žicom. Priprema žleba za zavarivanje punjenom žicom se neznatno razlikuje: limovi debljina do 5 mm se zavaruju bez posebne pripreme dok se limovi preko 5 mm pripremaju na isti način kao pri zavarivanju

² Identičan sa: EN ISO 17632:2015 CEN/TC 121 i ISO 17632:2015 ISO/TC 44/SC 3.

³ Identičan sa: EN ISO 18276:2006 CEN/TC 121.

⁴ Identičan sa: EN ISO 17634:2015 CEN/TC 121 i ISO 17634:2015 ISO/TC 44/SC 3.

⁵ Identičan sa: EN ISO 17633:2010 CEN/TC 121.

⁶ Identičan sa: EN ISO 12153:2012 CEN/TC 121.

⁷ Identičan sa: EN ISO 1071:2015 CEN/TC 121 i ISO 1071:2015 ISO/TC 44/SC 3.

⁸ Identičan sa: EN ISO 544:2011 CEN/TC 121.

⁹ Identičan sa: EN ISO 14344:2010 CEN/TC 121.

punom žicom [13-19].

Parametri zavarivanja punjenom žicom se razlikuju od parametara zavarivanja punom žicom: koriste se struje veće jačine, brže je topljenje dodatnog metala pa je samim tim i brzina zavarivanja veća. Prenos metala je isti kao pri primeni pune žice ali upotreba kompjuterom upravljanih izvora struje

olakšava prenos metala u mlazu [20-22]. U zavisnosti od vrste punjene elektrodne žice (samozaštitna ili normalna) potrošnja zaštitnog gasa je manja ili ista kao pri zavarivanju punom žicom. Osnovni parametri zavarivanja punjenom elektrodom žicom prikazani se u prilogu.

LITERATURA

- [1] http://www.sfsb.unios.hr/kth/zavar/mb_dipl1/toc2/2_1.pdf (dokument pregledan 17.01.2017);
- [2] Autorizovana predavanja na kursevima za međunarodne inženjere i tehnologe zavarivanja, Mašinski fakultet Niš, 2007-2016;
- [3] <http://welding.com>: Welding History (dokument pregledan 31.05.2016. godine);
- [4] SRPS EN ISO 4063:2013 Zavarivanje i srodni postupci – Lista postupaka i njihovo označavanje, 28.01.2013;
- [5] SRPS EN ISO 17632:2017: Potrošni materijali za zavarivanje – Punjene elektrodne žice za zavarivanje u zaštitnom gasu i bez zaštitnog gasa nelegiranih i finozičnih čelika – Klasifikacija, 31.01.2017;
- [6] SRPS EN ISO 18276:2009: Potrošni materijali – Punjene žice za elektrolučno zavarivanje sa zaštitom gasa i bez zaštite gasa čelika povišene čvrstoće – Klasifikacija, 30.11.2009;
- [7] SRPS EN ISO 17634:2017: Potrošni materijali za zavarivanje – Punjene žice za elektrolučno zavarivanje u zaštitnom gasu vatropostojanih čelika – Klasifikacija, 31.01.2017;
- [8] SRPS EN ISO 17633:2012: Potrošni materijali za zavarivanje – Punjene žice i šipke za elektrolučno zavarivanje sa zaštitnim gasom i bez zaštitnog gasa nerđajućih i vatrootpornih čelika – Klasifikacija, 23.05.2012;
- [9] SRPS EN ISO 12153:2013: Potrošni materijali za zavarivanje – Punjene elektrodne žice za zavarivanje nikla i legura nikla pod zaštitom gasa i bez nje – Klasifikacija, 29.11.2013;
- [10] SRPS EN ISO 1071:2017: Potrošni materijali za zavarivanje – Obložene elektrode, žice, šipke i punjene žice za zavarivanje topljenjem sivog liva – Klasifikacija, 31.01.2017;
- [11] SRPS EN ISO 544:2013: Potrošni materijal za zavarivanje – Uslovi isporuke za dodatne materijale i praškove – Vrste proizvoda, mere, tolerancije i obeležavanja, 28.01.2013;
- [12] SRPS EN ISO 14344:2012: Potrošni materijali za zavarivanje – Uputstva za nabavku dodatnih materijala i praškova, 23.05.2012;
- [13] SRPS EN ISO 9692-1:2014: Zavarivanje i srodni postupci – Tipovi pripreme spoja – Deo 1: Ručno elektrolučno zavarivanje topivom elektrodom, elektrolučno zavarivanje topivom elektrodom u zaštitnom gasu, gasno zavarivanje, TIG zavarivanje i zavarivanje čelika snopom, 29.08.2014;
- [14] Standard SRPS EN ISO 9692-3:2008: Zavarivanje i srodni postupci – Preporuke za pripremu spoja - Deo 3: Elektrolučno zavarivanje u zaštiti inertnih gasova i elektrolučno zavarivanje sa volframovom (tungstenovom) elektrodom u zaštiti inertnog gasa aluminijuma i njegovih legura, 27.02.2008;
- [15] SRPS EN 1708-1:2013: Zavarivanje – Osnovni detalji zavarenih čeličnih spojeva – Deo 1: Komponente pod pritiskom, 28.01.2013;
- [16] SRPS EN 1708-2:2008: Zavarivanje – Osnovni detalji zavarenih čeličnih spojeva - Deo 2: Komponente bez unutrašnjeg pritiska, 27.02.2008;
- [17] SRPS EN 1708-3:2012: Zavarivanje – Osnovni detalji zavarenih čeličnih spojeva – Deo 3: Komponente pod pritiskom sa plakaturom, puferom i sa prevlakom (trakama), 21.06.2012;
- [18] http://www.sfsb.unios.hr/kth/zavar/mb_dipl1/toc2/2_3.pdf (dokument pregledan 17.01.2017);
- [19] <http://www.gowelding.org/welding/fcaw-flux-cored-arc-welding/> (dokument pregledan 17.01.2017);

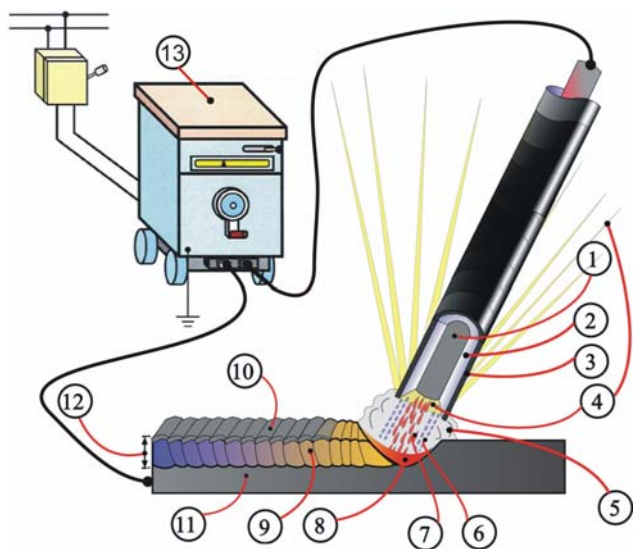
- [20] Lincoln Electric: Gas Metal Arc Welding, Product and Procedure Selection, 2016;
- [21] Miomir Vukićević: Tehnologija spajanja materijala – Zavarivanje 1, ISBN 978-86-82631-73-6, Fakultet za mašinstvo i građevinarstvo u Kraljevu, 2014;
- [22] Milorad Jovanović, Dragan Adamović, Vukić Lazić, Nada Ratković: CO₂ zavarivanje – priručnik, YU ISBN 86-80581-71-2, Mašinski fakultet Kragujevac, Srbija, 2005;
- [23] C. Hasse, W. Reitze: Elektrolučno zavarivanje – priručnik, Građevinska knjiga, Beograd, 1982;
- [24] SRPS EN 169:2008: Lična zaštita očiju – Filtri za zavarivanje i srodne tehnike – Zahtevi u pogledu koeficijenta transmisije i preporučena upotreba, 21.01.2008;
- [25] SRPS EN 170:2008: Lična zaštita očiju – Filtri za ultraljubičasto zračenje – Zahtevi u pogledu koeficijenta i preporučena upotreba, 27.02.2008;
- [26] SRPS EN 171:2008: Lična zaštita očiju – Filtri za infracrveno zračenje – Zahtevi u pogledu koeficijenta transmisije i preporučena upotreba, 27.02.2008;
- [27] SRPS EN 175:2008: Lična zaštita – Oprema za zaštitu očiju i lica tokom zavarivanja i srodnih postupaka, 21.01.2008;
- [28] SRPS EN 379:2011: Lična zaštita očiju – Automatski filtri za zavarivanje, 28.11.2011;
- [29] SRPS EN ISO 11611:2016: Zaštitna odeća koja se upotrebljava prilikom zavarivanja i srodnih procesa, 29.02.2016;
- [30] SRPS EN 12477:2007: Zaštitne rukavice za zavarivače, 25.07.2007;
- [31] SRPS EN ISO 10882-1:2012: Zdravlje i bezbednost pri zavarivanju i srodnim postupcima – Uzorkovanje čestica i gasova iz vazduha u zoni disanja operatera – Deo 1: Uzorkovanje čestica iz vazduha, 23.05.2012;
- [32] SRPS EN ISO 10882-2:2008: Zdravlje i bezbednost pri zavarivanju i srodnim postupcima – Uzorkovanje čestica i gasova iz vazduha u zoni disanja operatera – Deo 2: Uzorkovanje gasova, 09.09.2008;
- [33] SRPS EN ISO 14114:2015: Oprema za gasno zavarivanje – Sistemi za snabdevanje acetilenom za zavarivanje, rezanje i srodne postupke – Opšti zahtevi, 30.09.2015;
- [34] SRPS EN ISO 15615:2014: Oprema za gasno zavarivanje – Sistemi acetilenskih vodova za zavarivanje, rezanje i srodne postupke – Zahtevi za bezbednost uređaja pod visokim pritiskom, 29.08.2014.

10 RUČNI ELEKTROLUČNI POSTUPCI ZAVARIVANJA OBLOŽENOM TOPIVOM ELEKTRODOM

Postupci iz grupe ručnih elektrolučnih postupaka zavarivanja obloženom topivom elektrodom spadaju u najkorišćenije postupke zavarivanja u Srbiji ali i na planeti. Jednostavna i vrlo pristupačna oprema za zavarivanje, kratkotrajna obuka zavarivača ali i dobar kvalitet spojeva koji se dobija ovim postupcima, samo su neke od osnovnih prednosti postupaka zavarivanja iz ove grupe [1].

10.1 Osnovni principi postupka

Postupci zavarivanja sa obloženim elektrodama su po pravilu svi ručni, mada se u poslednje vreme pojavljuju i mehanizovane varijante postupaka.



Slika 10.1 Šema ručnog elektrolučnog postupka zavarivanja obloženom topivom elektrodom: 1) metalno jezgro elektrode, 2) obloga elektrode, 3) vodootporni sloj (prisutan je samo kod specijalnih elektroda), 4) električni luk, 5) zaštitna atmosfera od gasova nastalih kao proizvod sagorevanja obloge, 6) granica zaštitne atmosfere, 7) rastopljeni metal elektrode, 8) tečno kupatilo, 9) očvršli metal šava, 10) troska/šljaka, 11) osnovni metal, 12) visina deponovanog sloja, 13) izvor struje za zavarivanje

Zavarivanje se vrši topivom elektrodom čije jezgro je od metala a spoljašnji deo

(obloga) je od različitih mineralnih materijala. Jedan pol izvora električne struje se povezuje sa držačem elektrode (tzv. klešta) u koji se postavlja topiva elektroda. Drugi pol izvora struje povezuje sa radnim komadima (osnovnim metalom) i tako se uspostavlja razlika potencijala između osnovnog metala i elektrode. Električni luk za zavarivanje se uspostavlja između topive elektrode i radnih komada (slika 10.1). Toplota koju generiše električni luk topi elektrodu i deo osnovnog metala koji se mešaju u tečnom kupatilu i nakon očvršćavanja formiraju metal šava. Metalni deo elektrode se topi u potpunosti dok se nemetalni deo (obloga) delimično topi a delimično sagoreva. Produkti sagorevanja obloge formiraju zaštitnu atmosferu oko električnog luka i oko zone zavarivanja dok čvrsti ostaci elektrode plivaju na površini tečnog kupatila i formiraju trosku/šljaku. Kao i gasovi, troska takođe štiti tečno kupatilo od negativnog uticaja gasova i vlage iz atmosfere. Troska, takođe, sprečava brzo hlađenje metala šava i pojavu zakaljivanja zavarenog spoja (stvaranje sitnozrne strukture koja je veoma tvrda i krta) [1, 2].

Čitavim postupkom zavarivanja upravlja čovek: on povezuje polove izvora struje sa provodnicima, podešava parametre zavarivanja na izvoru struje, uspostavlja električni luk, zavaruje i prekida zavarivanje.

Jedna od specifičnosti ovih postupaka je prekidni režim rada: elektroda se troši tokom zavarivanja i radnik mora da prekida električni luk kako bi ostatak potrošene elektrode iz klešta zamenio novom elektrodom. Nakon zamene elektrode, zavarivač nastavlja rad na mestu gde je prekinuo zavarivanje.

Započinjanje i prekidanje električnog luka su kritični trenuci kada je verovatnoća pojave greške u zavarenom šavu velika [2]. Zbog toga je neophodno da zavarivač ima odgovarajuća znanja o pravilnom prekidanju i nastavljajući zavarivanja nakon izmene

elektrode. Zavarivač mora da poseduje znanja o ispravnim tehnikama zavarivanja obloženom topivom elektrodom, takođe.

Najpoznatiji predstavnik ove grupe postupaka je ručni elektrolučni postupak zavarivanja obloženom topivom elektrodom – u praksi poznatiji kao REL¹.

10.2 Podela i klasifikacija postupka

Elektrolučni postupci zavarivanja metala topivom elektrodom bez zaštitnog gasa su standardizovani i klasifikovani prema ISO 4063 kao grupa 11 (ISO 4063 — 11). Klasifikacija je izvedena na osnovu tipova zavarivanja pa su standardizovani postupci iz ove grupe [3]:

- ISO 4063 — 111 – Ručni elektrolučni postupak zavarivanja obloženom topivom elektrodom bez zaštitnog gasa,
- ISO 4063 — 112 – Gravitaciono zavarivanje obloženom elektrodom,
- ISO 4063 — 114 – Ručni elektrolučni postupak zavarivanja samozaštitnom topivom elektrodom.

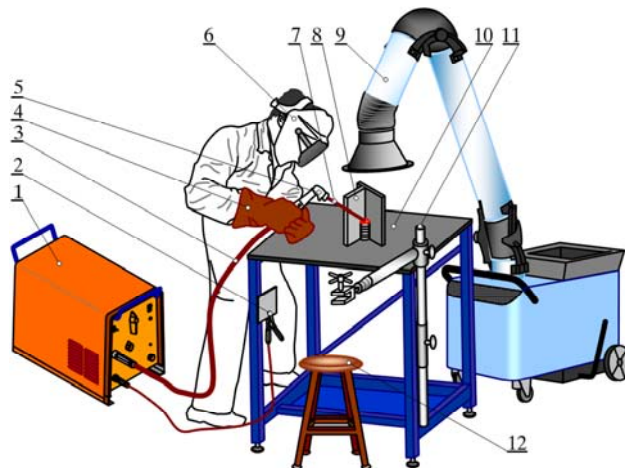
Navedeni standardizovani postupci se u praksi jednostavno nazivaju REL, gravitaciono i REL samozaštitnom elektrodom.

Ova knjiga obrađuje samo klasičan REL postupak zavarivanja jer se on mnogostruko više koristi od ostala dva tipa REL-a.

10.3 Osnovna oprema za zavarivanje

Osnovnu opremu za zavarivanje REL postupkom čine: izvor električne struje, držač elektrode, klešta za povezivanje provodnika, električni provodnici za uspostavljanje strujnog kola, ali se za zavarivanje koriste i metalni radni sto, zavarivački alat (zavarivački čekić, žičana četka itd), lična sredstva radnika

(zaštitne naočare/maska, rukavice, keclja, itd) i sistem za odvođenje produkata sagorevanja. Tipičan REL izvor električne struje nema sistem za hlađenje hvataljke (klešta).



Slika 10.2 Šematski prikaz opreme i radnog mesta za ručni elektrolučni postupak zavarivanja obloženom topivom elektrodom [4]: 1) izvor struje, 2) klešta za povezivanje naponskog provodnika, 3) provodnik, 4) zaštitne kožne rukavice, 5) hvataljka za elektrodu, 6) zaštitna kaciga, 7) obložena elektroda, 8) osnovni metal, 9) sistem za odvođenje produkata sagorevanja, 10) radni sto, 11) podesivi konzolni držač, 12) stolica

Na slici 10.2 prikazana je šema radnog mesta za zavarivanje REL postupkom.

Standard SRPS EN 60974-9:2011: Oprema za elektrolučno zavarivanje – Deo 9: Instalacija i upotreba² odnosi se na instalaciju i upotrebu opreme za elektrolučno zavarivanje i pridružene procese koji su projektovani u saglasnosti sa zahtevima za bezbednost prema SRPS EN 60974-1, SRPS EN 60974-6 itd [5-7]. Treba ga primenjivati kao uputstvo za instruktore, operatere, rukovodioce i nadzorne organe prilikom kontrolisanja bezbednosti instalacija i električne opreme u procesima zavarivanja i sečenja.

10.3.1 Izvor električne struje

U opštem slučaju, zavarivanje REL postupkom vrši se i jednosmernom strujom (obe polarnosti: JSDP i JSIP) i naizmeničnom strujom (sinusoidalnog ali i pravougaoonog oblika) pri čemu je električni luk kod naizmenične struje nestabilniji nego kod

¹ Sve češće se ovaj postupak naziva E postupak zavarivanja.

² Identičan sa EN 60974-9:2010 CLC/TC 26A.

jednosmerne struje [8].

Izvori električne struje za REL postupke zavarivanja moraju da ispunjavaju nekoliko uslova da bi zavarivanje bilo moguće [1, 2, 4, 8]:

- Izvor struje mora da bude takav da tokom zavarivanja obezbeđuje pad napona pri porastu jačine struje zavarivanja (strma strujna karakteristika);
- Izvor struje mora da pruža ograničenu promenu jačine električne struje pri promeni napona zavarivanja;
- Napon praznog hoda ne sme da bude veći od $U_0=80$ V;
- Izvor struje mora da bude sposoban da se brzo prilagođava naglim promenama režima rada;
- Izvor struje mora da ima mogućnost kontinualnog ili stepenastog regulisanja jačine električne struje;
- Uglavnom svi izvori struje za zavarivanje poseduju automatske uređaje (sklopke) za regulisanje napona praznog hoda, kao i uređaje za održavanje električnog luka.

Za REL postupak zavarivanja je moguća primena najvećeg broja postojećih izvora električne struje. Međutim, najčešće se primenjuju: transformatori, ispravljači, pretvarači, agregati i sve više – invertori.

Neki od tipičnih parametara koje izvor električne struje za REL postupak mora da obezbedi su: napon zavarivanja $U_{\text{z}}=18$ V-26 V, jačina struje zavarivanja $I_{\text{z}}=50$ A-300 A, napon praznog hoda $U_0=60$ V, stepen iskorišćenja uređaja $\eta_{\text{z}}=0,75-0,85$ [4, 8].

Izvori struje za REL postupak zavarivanja moraju da ispunjavaju zahteve date u standardu SRPS EN 60974-1:2012: Oprema za elektrolučno zavarivanje – Deo 1: Izvori struje za zavarivanje³ [6].

10.3.2 Kontrolna tabla

Tipičan (moderni) uređaj za REL postupak zavarivanja je invertorskog karaktera: malih je dimenzija, kompaktan je ima jednostavnu kontrolnu tablu (slika 10.3).



Slika 10.3 Jednostavan JS inverter za REL postupak zavarivanja sa kontrolnom tablom [9]



Slika 10.4 Renomirani JS/NS invertori za REL postupak zavarivanja sa kontrolnom tablom [9]

Osnovni delovi kontrolne table kod ovakvog uređaja su: prekidač za uključivanje i isključivanje, signalna lampica i potencijometar za izbor jačine struje zavarivanja (ili za definisanje prečnika elektrodne žice, čime se posredno bira jačina električne struje). Rad sa ovakvim uređajem je krajnje jednostavan: posle povezivanja provodnika (odgovarajući pol na odgovarajući kontakt), uključuje se uređaj, podešava se jačina električne struje i zavarivanje se započinje. Ovakav izvor struje za zavarivanje je predviđen za rad sa jednosmernom strujom.

³ Identičan sa EN 60974-1:2012 CLC/TC 26A.

Invertori više klase (primer prikazan na slici 10.4) su JS/NS i kontrolna tabla je tada složenija: pored prekidača i potenciometra za jačinu struje, postoje prekidači za izbor tipa struje (JS, NS, pulsna), dugmad za podešavanje pulseva (učestanost, trajanje pulseva, trajanje pauze među pulsevima itd). Saglasno složenosti izvora struje, menja se i cena ovih uređaja.

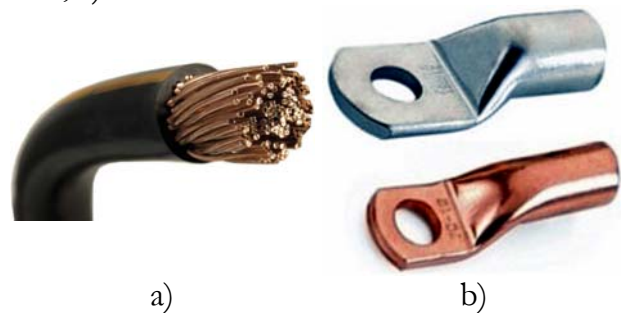
10.3.3 Električni provodnici

Električnim provodnicima se od izvora struje dovodi električna struja u zonu zavarivanja. Za REL postupak zavarivanja koriste se dva provodnika, koji su identičnih osobina ali su sa drugačijim priključcima za različite polove (slika 10.5).



Slika 10.5 Provodnici za REL postupak zavarivanja

Sam provodnik se izrađuje od bakra ili aluminijuma, i retko se izrađuje kao pun provodnik već kao set tanjih provodnika (slika 10.6, a).



Slika 10.6 Poprečni presek provodnika (a) i konektor za povezivanje zavrtnjem (b)

Tako izrađen provodnik se oblaže gumenim ili plastičnim omotačem koji predstavlja izolaciju od električne struje ali i izolaciju od uticaja okoline. Ovakva konstrukcija provodnika je kruta i veoma

otporna na habanje i mehanička oštećenja, ali je istovremeno dovoljno elastična da može da se koristi u radionicama ili na terenu, može da podnese razumna savijanja, pritiske, uticaj prašine i vlage.

Provodnik se za izvor struje vezuje odgovarajućim tipiziranim konektorima dok se za elektrodu ili klešta vezuje zavrtnjskom vezom preko odgovarajućih čeličnih, bakarnih ili aluminijumskih „klema” (slika 10.6, b).

Izbor električnih provodnika (površine poprečnog preseka) vrši se na osnovu maksimalno dozvoljene jačine električne struje koju izvor struje može da isporuči – struja kratkog spoja. Brzi proračun poprečnog preseka provodnika se vrši na osnovu gustine električne struje:

$$S_s = \frac{I_k}{A_p} \quad (1).$$

gde je S_s - gustina električne struje [A/m^2], I_k – struja kratkog spoja [A], A_p – površina poprečnog preseka provodnika [m^2].

Ako su poznate dozvoljena gustina električne struje u provodniku (na primer $S_{sg}=5 A/m^2-15 A/m^2$) i kritična vrednost jačine struje I_k , na osnovu jednačine 1 se jednostavno određuje nominalna (potrebna) površina poprečnog preseka provodnika A_n :

$$A_n \geq \frac{I_k}{S_{sg}} [m^2] \quad (2).$$

Tabela 10.1 Površina poprečnog preseka provodnika za zavarivanje [8]

Prečnik elektrode d_e	Maksimalna jačina struje I_{max}	Dužina dovodnog provodnika l_p [m]				
		10	15	20	25	30
[mm]	[A]	Poprečni presek A_k [mm ²]				
2	50	25	25	35	35	35
2,5	100	25	35	35	35	35
3,25	150	35	35	35	50	50
4	200	35	50	50	50	70
5	250	50	50	70	70	70
6	300	50	50	70	70	70
8	500	70	70	95	95	95

Na osnovu kataloga proizvođača provodnika bira se provodnik koji ima veći poprečni presek od računski određenog poprečnog preseka.

U tabeli 10.1 prikazana je empirijski ustanovljena veza između prečnika elektrode, maksimalne jačine struje zavarivanja i potrebnog poprečnog preseka provodnika kako ne bi došlo do paljenja obloge provodnika.

Brojni zahtevi i specifičnosti vezane za provodnike električne struje koji se koriste za REL postupak zavarivanja, definisani su standardima:

- SRPS EN 50525-2-81:2011: Električni kablovi - Niskonaponski energetske kablovi naznačenih napona do i uključujući 450/750 V (U_0/U) – Deo 2-81: Kablovi za opštu primenu – Kablovi sa umreženom prekrivkom od elastomera za elektrolučno zavarivanje⁴ [10],
- SRPS EN 50525-1:2011: Električni kablovi – Niskonaponski energetske kablovi naznačenih napona do i uključujući 450/750 V (U_0/U) – Deo 1: Opšti zahtevi⁵ [11],
- SRPS EN 60228:2009: Provodnici izolovanih kablova⁶ [12].

10.3.4 Držać elektrode

Držać elektrode ima dvojaku funkciju: on je provodnik, koji obezbeđuje dovod električne struje do elektrode, a s druge strane on je izolator, koji obezbeđuje siguran rad zavarivača jer odvaja ruke zavarivača od električne struje. Samim tim, držać elektrode ima dva osnovna dela: provodni (od provodnika do čeljusti za hvatanje elektrode) i izolatorski (ručica sa polugom za otvaranje/zatvaranje čeljusti). Tipični držać elektrode za REL postupak zavarivanja prikazan je na slici 10.7.

Čeljusti držača, koje su u direktnom kontaktu sa elektrodom, moraju da budu u dobrom stanju i moraju da imaju što manji otpor proticanju električne struje da se ne bi

pregrevale (zbog Džulovog efekta [13]). Zagrevanje čeljusti, ne samo da je neugodno i opasno za zavarivača, već povećava pad napona električnog luka, što loše utiče na kvalitet zavarenog spoja.



Slika 10.7 Držać elektrode

Čeljusti držača moraju da imaju odgovarajuće žlebove kako bi bilo moguće da se koriste elektrode različitih prečnika i kako bi elektrode mogle da se postavljaju u čeljusti pod raznim uglovima.

Ručica držača mora da bude jednostavna za upotrebu, da je male mase, ali istovremeno mora da bude dovoljno robusna da izdrži teške uslove rada.

Držači elektroda moraju da ispunjavaju zahteve standarda SRPS EN 60974-11:2012: Oprema za elektrolučno zavarivanje – Deo 11: Držači elektroda⁷ [14].

10.3.5 Klešta za povezivanje naponskog provodnika

Klešta za povezivanje naponskog provodnika za osnovni metal se u praksi nazivaju „klešta za masu” i njima se povezuje drugi pol izvora struje (prvi pol je vezan za elektrodu). Klešta se izrađuju od provodnih metala sa niskim otporom proticanju električne struje (kao što su bakar, aluminijum, pojedini čelici) kako bi se umanjilo zagrevanje klešta i provodnika ali i da bi se umanjio pad napona zavarivanja. Klešta se za radni komad

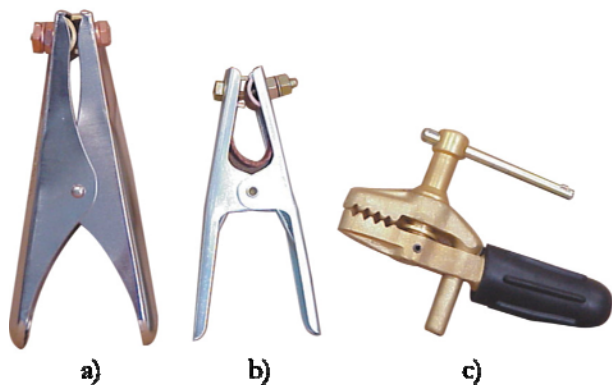
⁴ Identičan sa: EN 50525-2-81:2011 CLC/TC 20.

⁵ Identičan sa: EN 50525-1:2011 CLC/TC 20.

⁶ Identičan sa: EN 60228:2005 CLC/TC 20.

⁷ Identičan sa EN 60974-11:2010 CLC/TC 26A.

pričvršćavaju preko steznih čeljusti (koje su najčešće od bakra) a osiguravaju se od skidanja oprugom (za relativno male jačine električne struje) ili zavrtnjem (za zavarivanje velikim jačinama struje). Tipični predstavnici klešta prikazani su na slici 10.8.



Slika 10.8 Klešta za povezivanje naponskog provodnika na radni komad: a) sa oprugom, za srednje jačine struje, b) sa oprugom, za male jačine struje, c) sa zavrtnjem, za velike jačine struje

Veza klešta i provodnika struje mora da bude čvrsta, kruta i izolovana kako bi se sprečilo varničenje pri proticanju električne struje. Loša praksa velikog broja zavarivača u Srbiji je uklanjanje klešta i direktno vezivanje provodnika za osnovni metal. Tako se drastično narušava bezbednost radnika i prisutnih lica, ne dobija se konstantan protok električne struje pa električni luk može da bude nestabilan a izvor električne struje radi sa nepotrebnim preopterećenjem.

Klešta moraju da ispunjavaju zahteve standarda SRPS EN 60974-13:2012: Oprema za elektrolučno zavarivanje – Deo 13: Sprega za zavarivanje⁸ [15].

10.3.6 Radni sto, sistem za odvođenje produkata sagorevanja, zavarivački alat i pribor

Radni sto i sistem za odvođenje produkata sagorevanja se često smatraju neobaveznim delovima radnog mesta za REL postupak zavarivanja. Pogotovu se tako misli ukoliko se zavarivanje vrši na terenu gde su uslovi rada drugačiji nego što je to rad u radionici/zavarivačkom pogonu.

Radni sto je gotovo uvek izrađen od metala (radi čvrstoće i krutosti delova, ali i provodnosti električne struje pri zavarivanju), korisne radne površine manje od 1 m² [16]. Stolovi novijeg datuma su najčešće rasklopivi i lako prenosivi, sa žlebovima, čivijama i sličnim elementima kojima se olakšava učvršćivanje radnih komada (slika 10.9).



Slika 10.9 Pokretni sistem za odvođenje gasovitih produkata sagorevanja i rasklopljivi sto za zavarivanje [17]

Sistem za odvođenje gasova kod REL postupka zavarivanja mora uvek da se primenjuje zbog velike količine različitih gasova koji nastaju tokom sagorevanja obloge elektrode. Većina proizvođača elektroda garantuje hemijski sastav obloge ali to nije garancija da gasovi koji nastaju sagorevanjem obloge nisu bezazleni po zavarivača [2].

Postoje stacionarni i pokretni sistemi za odvođenje gasova i u oba slučaja mora da postoji odgovarajuća regulacija rada sistema – promaja, količina usisanog vazduha u jedinici vremena itd.

Pored navedene opreme za zavarivanje, zavarivač REL postupkom uvek mora da ima kraj sebe: čekić, čeličnu četku i ručnu brusilicu (slika 10.10).

Čekić za zavarivanje je specifičan – sa jedne strane je špicast kako bi lakše razbijao

⁸ Identičan sa EN 60974-13:2011 CLC/TC 26A.

šljaku i trosku, a sa druge strane je pločast – kako bi se njome lakše skidali (strugali) nemetalni materijali na metalu šava.



Slika 10.10 Osnovna oprema zavarivača: čekić, čelična četka i ručna brusilica

Čeličnom četkom se čiste lice i/ili koren zavarenog šava od troske. Za razliku od TIG postupka, REL postupak daje vrlo „zaprljane” šavove koje je neophodno očistiti do metalnog sjaja pre nanošenja novog zavarenog sloja [1, 2, 4].

Ručna brusilica ima funkciju u pripremi žleba za zavarivanje i pri čišćenju zavarenog mesta, ali značajnu ulogu ima i pri korekcijama zavarenog šava. Bez obzira kako je pripremljen žleb, često je neophodno da se ivice osnovnog metala dorađuju i popravljaju. Po završenom zavarivanju, vrši se vizualni pregled zavarenog šava. Ukoliko se primete nesavršenosti/greške u metalu šava, neophodno je da se te greške uklone i onda se naknadno vrši zavarivanje na korigovanom mestu. Uklanjanje ovih grešaka se najefikasnije vrši ručnom brusilicom, bez obzira da li se radi na terenu ili u radionici.

10.4 Potrošni i dodatni materijali

REL postupak zavarivanja (kao i ostali postupci iz ove grupe) vrše se obloženim elektrodama (slika 10.11). Pojava obloženih

elektroda predstavljala je veliki iskorak u razvoju tehnologije zavarivanja.



Slika 10.11 Obložene elektrode za REL postupak

Obložena elektroda se sastoji od metalnog jezgra i obloge oko jezgra (slika 10.12).

Metalno jezgro elektrode je osnova elektrode i mora da bude od materijala koji po hemijskom sastavu odgovara hemijskom sastavu osnovnog metala. Dobija se livenjem ili sinterovanjem metala u odgovarajućim kalupima. Jezgro metala predstavlja „pravi” dodatni materijal – metal šava nastaje mešanjem rastopljenog jezgra elektrode i osnovnog metala.



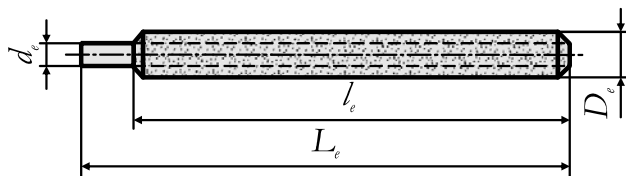
Slika 10.12 Metalno jezgro i obloga elektrode za REL postupak zavarivanja

Na jezgro elektrode se tokom izrade nanosi obloga koja je sačinjena od mineralnih i organskih materija. Funkcija obloge je višeznačna pa se koriste različite obloge za različite osnovne materijale.

Obloga se ne nanosi na celoj dužini elektrode – na jednom kraju jezgro elektrode ostaje nepokriveno i taj deo elektrode se postavlja u držač elektrode. Kontakti deo

elektrode ostaje ogoljen kako se ne bi narušila provodnost elektrode nanošenjem obloge koja može da se ponaša kao izolator (slika 10.13).

Elektrode se proizvode sa nazivnim dužinama $L_e=250, 300, 350, 450$ mm sa prečnicima $d_e=1,6; 2; 2,5; 3,25; 4; 5; 6$ mm. Elektrode se pakuju u kartonskim, plastičnim ili metalnim kutijama od 1, 5, 10 kg.



Slika 10.13 Skica obložene elektrode: d_e – merodavni prečnik elektrode, D_e – prečnik elektrode sa oblogom, l_e – dužina zavarivog dela elektrode, L_e – nazivna dužina elektrode

Obložene elektrode moraju da se isporuče korisniku tako da zadovoljavaju uslove definisane standardima SRPS EN ISO 544:2013: Potrošni materijal za zavarivanje – Uslovi isporuke za dodatne materijale i praškove – Vrste proizvoda, mere, tolerancije i obeležavanja⁹ i SRPS EN ISO 14344:2012: Potrošni materijali za zavarivanje – Uputstva za nabavku dodatnih materijala i praškova¹⁰ [18, 19].

10.4.1 Hemijski sastav obložene elektrode

Obloženu elektrodu čine metalno jezgro i obloga. Metalno jezgro je izrađeno od čistog metala ili od neke legure metala dok oblogu elektrode sačinjava najmanje 6 različitih komponenti [8]:

- materijali koji formiraju trosku,
- dezoksidanti,
- materijali koji formiraju zaštitne gasove,
- jonizatori,
- vezivno sredstvo,
- legirajući elementi ali i
- metalni prah, različiti topitelji, oksidanti itd.

Sastav i maseni odnos komponenti u

oblogama definiše namenu elektrode pa samim tim definiše i kvalitet realizovanog spoja.

10.4.2 Funkcija obložene elektrode

Pored osnovne funkcije (dodatni materijal), obložena topiva elektroda za REL postupak ima trostruku dodatnu funkciju: električnu, zaštitnu i metaluršku.

Električna funkcija elektrode ogleda se u uspostavljanju i održavanju električnog luka kako bi zavarivanje uopšte bilo izvodljivo. Zavisno od osobina elektrode kroz koju protiče električna struja, gasovi u zoni zavarivanja mogu da budu manje ili više jonizovani, i usled toga može doći da nestabilnog (ali i stabilnog) gorenja električnog luka. Količina toplote koja se unosi u zavareni šav najviše zavisi od parametara zavarivanja (napona zavarivanja i jačine električne struje) ali u velikoj meri zavisi od elektrode i provodnih osobina elektrode. Provođenje električne struje se u većoj meri događa kroz metalno jezgro dok obloga elektrode najčešće predstavlja slabi izolator [2, 8].

Zaštitna funkcija elektrode je, u najvećoj meri, zavisna od obloge elektrode. Tokom gorenja električnog luka, zajedno sa metalnim jezgrom elektrode, topi se i obloga elektrode. Jedan deo obloge elektrode sagoreva tokom gorenja električnog luka a kao produkti sagorevanja nastaju ugljendioksid i drugi gasovi, ali se javljaju i čvrsti produkti sagorevanja.

Gasoviti produkti sagorevanja obloge elektrode formiraju posebnu atmosferu koja se, makar privremeno, nalazi u zoni električnog luka i zoni zavarivanja. Ovi gasovi imaju niži potencijal jonizacije od gasova iz vazduha te njihovo prisustvo olakšava gorenje električnog luka. Dalje, ovi gasovi, svojim prisustvom, eliminišu vlagu, odnosno, vodonik i kiseonik iz zone zavarivanja i tako snižavaju količinu vodonika deponovanog u metalu šava.

Rastopljeni i sagoreli (čvrsti) deo obloge elektrode se vrlo malo (ili nimalo) meša sa rastopljenim metalima već se sakuplja na površini metala šava i formira polutečnu

⁹ Identičan sa: EN ISO 544:2011 CEN/TC 121.

¹⁰ Identičan sa: EN ISO 14344:2010 CEN/TC 121.

trosku (šljaku, prljavštinu). Troska se sporije hladi od metala i ne dozvoljava brzo odvođenje toplote sa lica šava (ponaša se kao toplotni izolator). Usled sporijeg odvođenja toplote, metal šava se sporije hladi, pa samim tim, sporije rekristališe i formiraju se metalurška zrna većih dimenzija koja daju bolji odnos tvrdoće, čvrstoće i krutosti kod metala šava nego što je to slučaj kod metala šava sačinjenog od sitnijih zrna. Troska razlivena po površini šava dodatno sprečava prodor gasova iz atmosfere u metal šava tokom očvršćavanja.

Rastopljeni metal iz jezgra elektrode, rastopljeni deo obloge elektrode i rastopljeni deo osnovnog metala se mešaju i formiraju tečno kupatilo koje očvršćava u metal šava. Kako se elektrode i njihova obloga prave namenski za zavarivanje određene vrste osnovnog metala (ili čak posebno za određeni materijal), mešavina jezgra i obloge legira osnovni metal i gotovo uvek se dobija metal šava boljih **metalurških osobina** nego što je to kod osnovnog metala¹¹. Vrlo često se uključci iz obloge elektrode ponašaju kao „rafinatori” koji vezuju nečistoće iz tečnog kupatila u određena hemijska jedinjenja koja „isplivaju” na površinu metala šava kao šljaka.

10.4.3 Klasifikacija, podela i tipovi obloženih elektroda

Elektrode za postupke iz grupe ISO 406 — 11 se mogu podeliti prema stepenu legiranosti, nameni, prema tipu obloge, prema posebnim tehnološkim zahtevima i prema vrsti osnovnog metala [8].

Podela elektrode prema stepenu legiranosti

Elektrode mogu da budu nelegirajuće i legirajuće. Nelegirajuće elektrode su izrađene od metalnog jezgra i obloge koja nema uticaj na poboljšanje metala šava (legiranje). Kod legirajućih elektroda obloga sadrži metale koji aktivno utiču na legiranje metala šava.

Podela elektroda prema nameni

Elektrode se prema nameni dele na elektrode za zavarivanje, elektrode za navarivanje i elektrode namenjene žlebljenju, rezanju i sečenju.

Elektrode za zavarivanje moraju da ispune dva važna uslova kako bi mogle da se primenjuju:

- moraju da imaju odgovarajuće fizičke, hemijske i mehaničke osobine i
- moraju da imaju metalurške (zavarivačke) osobine koje su u funkciji obloge elektrode.

Materijal jezgra elektrode mora da ima fizičke i hemijske osobine koje su bliske osobinama osnovnog metala i da daje zavareni šav projektovanih osobina¹². Tvrdoća metala šava treba da bude što je niža i što bliskija tvrdoći osnovnog metala.

Pri navarivanju je važno da se nanese sloj određene debljine, pri čemu sloj mora da ima poboljšanu otpornost na habanje, površinski pritisak i povećanu tvrdoću. U oblogama elektroda za navarivanje nalaze se legirajući elementi koji grade tvrde karbide čijim prisustvom se povećava tvrdoća metala šava. Takvi materijali su C, Mn, Cr i W. Međutim, navari dobijeni ovakvim elektrodama imaju malo izduženje i malu žilavost [8].

Elektrode za žlebljenje i sečenje se ni u kom slučaju ne koriste za zavarivanje ili navarivanje. Osnovna namena ovih elektroda je kontrolisano razaranje metala sa ciljem dobijanja žleba, reza ili otvora u materijalu. Karakteristika elektroda je da uspostave električni luk, tope deo osnovnog metala a pritiskom gasa i pritiskom plazme oduvavaju tečni metal iz tečnog kupatila. Tako na mestu tečnog kupatila ostaje „rupa”. Kontinualnim ponavljanjem ove procedure, dobija se žleb ili

¹¹ Jasno je da upotreba neodgovarajuće elektrode (sa neodgovarajućim metalnim jezgrom i oblogom) može da ima suprotan efekat po metal šava. Pravilan izbor elektrode je jedan od uslova pravilnog zavarivanja REL postupkom.

¹² U prošlosti je među tehnolozima i zavarivačima važno pravilo da zavareno mesto, odnosno, metal šava, ne sme da bude najslabije mesto konstrukcije. Dobar zavarivač je bio onaj čije konstrukcije nisu „pucale” po šavu već je lom nastajao (ukoliko je do njega dolazilo) pored šava! Ispravniji pristup je: težnja stanju da se zavareno mesto minimalno razlikuje od konstrukcije (osnovnog metala) po pitanjima fizike, hemije, metalurgije i čvrstoće/nosivosti.

rez u metalu. Najčešće se koriste elektrode sa povećanim sadržajem organskih materijala u oblozi. Zbog toga se proizvodi velika količina dima koji dodatnim pritiskom na površinu tečnog kupatila oduvava tečni metal.

Klasifikacija elektroda vrši se na osnovu mehaničkih osobina (granica tečenja, zatezna čvrstoća i udarna žilavost) uzoraka metala šava dobijenih zavarivanjem elektrodom koja se klasifikuje. Razlikuju se dva kriterijuma za klasifikaciju:

- kriterijum A: prema naponu na granici tečenja i udarnoj energiji (žilavosti) od 47 J,
- kriterijum B: prema zateznoj čvrstoći i udarnoj energiji (žilavosti) od 27 J.

Elektrode koje su klasifikovane prema kriterijumu A mogu imati različite tipove obloga. Tabela 10.3 daje pregled tipova obloga koje se koriste za ove elektrode kao i njihove oznake.

Tabela 10.2 Tipovi obloga elektroda i oznake

Tip obloge	Oznaka
Kisela obloga	A
Celulozna obloga	C
Rutilna obloga	R
Rutilna debela obloga	RR
Rutilno-celulozna obloga	RC
Rutilno-kisela obloga	RA
Rutilno-bazna obloga	RB
Bazna obloga	B

Elektrode koje su klasifikovane prema kriterijumu B, takođe mogu da imaju različite tipove obloga (tabela 10.3).

Zavisno od odnosa D_e i d_e (slika 10.13) obložene elektrode se dele na:

- tanko obložene ($D_e/d_e < 1,2$)
- srednje obložene ($1,2 \leq D_e/d_e < 1,4$)
- debelo obložene ($D_e/d_e \geq 1,4$).

Elektrode sa kiselom oblogom (A) imaju veliki procenat oksida gvožđa i mangana i, kao rezultat visokog sadržaja kiseonika, imaju veliku dezoksidacionu sposobnost. Elektrode sa debelom kiselom oblogom formiraju prenos metala u mlazu što za rezultat ima ravne i glatke površine zavarenih spojeva, sa homogenim sastavom i dobrim

mehaničkim osobinama.

Tabela 10.3 Tipovi obloga elektroda i oznake

Tip obloge	Oznaka	Položaj zavarivanja	Vrsta i tip struje
Rutilno-bazna	03	svi osim PG ukoliko proizvođač nije naznačio drugačije	NS, JSDP, JSIP
Celulozna	10		JSIP
	11		NS, JSIP
Rutilna	12		NS, JSDP
Rutilna	13		NS, JSDP, JSIP
Rutilna+ gvozdeni prah	14		NS, JSDP, JSIP
Bazična	15		JSIP
Bazična	16		NS, JSIP
Bazična+ gvozdeni prah	18		NS, JSIP
Ilmenit	19		NS, JSDP, JSIP
Oksid gvožđa	20	PA, PB	NS, JSDP
Rutilna+ gvozdeni prah	24		NS, JSDP, JSIP
Oksid gvožđa+ gvozdeni prah	27		NS, JSDP, JSIP
Bazična+ gvozdeni prah	28	PA, PB, PC	NS, JSIP
Nije definisano	40	preporuka proizvođača	
Bazična	45	svi položaji	JSIP
Bazična	48		NS, JSDP, JSIP

Međutim, mana ovih elektroda je što zavarivanje u položajima različitim od horizontalnog zahteva dobru veštinu zavarivača pri radu – električni luk se teško uspostavlja pri „hladnom startu” (sa hladnim osnovnim metalom, kod toplog osnovnog metala nema problema), dubina uvarivanja je velika pa je i unos toplote u šav veliki itd.

Šavovi dobijeni ovim elektrodama su podložniji pojavi toplih (međukristalnih) prslina nego šavovi dobijeni ostalim tipovima elektroda. Elektrode sa kiselom oblogom primenjuju se za zavarivanje čelika sa niskim sadržajem ugljenika, ali treba izbegavati čelike sa visokim sadržajem sumpora i fosfora. Zavarivanje kiselim elektrodama je moguće naizmeničnom strujom i jednosmernom strujom obe polarnosti.

Elektrode sa oblogom sačinjenom samo od oksida železa (20) se retko koriste jer je njihova troska veoma tečna i nije moguće zavarivanje u položajima različitim od PA (horizontalni).

Elektrode sa oblogom sačinjenom od oksida železa i železnog praha (27) imaju oblogu velike debljine i koriste se za zavarivanje čelika sa malim sadržajem ugljenika. Koriste se za zavarivanje sućeonih i preklopnih šavova, i to primenom velikih brzina zavarivanja.

Elektrode sa celuloznom oblogom (C, 10, 11) u sebi sadrže veliki procenat gorivih organskih materija od kojih je najviše zastupljena celuloza (minimalno 30%). Zbog toga je električni luk kod ovakvih elektroda intenzivan i prodoran pa se one često koriste za zavarivanje korenih zavara (najčešće kod cevi). Tokom zavarivanja celuloznom elektrodom, nastaje velika količina dima koji je bogat sumpordioksidom (SO_2) koji se ponaša kao slabi zaštitni gas. Količina troske koja nastaje je manja, rasprskavanje je veće a količina vodonika deponovanog u metalu šava je veća nego kod kiselih elektroda. Celulozne elektrode su po pravilu kraće od drugih elektroda (usled velikog električnog otpora same elektrode dolazi do zagrevanja obloge i može doći do paljenja obloge blizu držača elektrode). Za zavarivanje celuloznim

elektrodama se koriste i jednosmerna i naizmenična struja.

Celulozne elektrode su znatno skuplje nego elektrode sa drugim tipovima obloge.

Elektrode sa rutilnom oblogom elektrode (R, 12, 13) ima oblogu koja sadrži najmanje 50% rutila (TiO_2) dok ostatak čine fero materijali isl. Rutil pomaže gorenje električnog luka čak i pri malim naponima i strujama a troska koja nastaje od rutila je obilna i veoma viskozna, a nakon očvršćavanja se jednostavno uklanja sa lica šava. Prenos metala kod rutilnih elektroda je u mlazu ali sa krupnijim kapljicama. Rutilnim elektrodama se vrši zavarivanje u svim položajima (osim u položaju vertikalno naniže jer troska klizi niz žleb), koriste se i naizmenična i jednosmerna struja oba polariteta. Zbog lepog lica šava, koristi se za završne prolaze, najčešće kod niskolegiranih čelika. **Ukoliko se u rutilnoj oblozi nalazi železni prah (14, 24)**, zavarivanje se vrši strujama veće jačine nego kada su u pitanju samo rutilne elektrode ali se povećava brzina deponovanja dodatnog materijala.

Elektrode sa debelom rutilnom oblogom (RR) su najčešće prečnika većeg od 1,6 mm i koriste se za zavarivanje završnih šavova od kojih se očekuje mala hrapavost lica šava i sporo hlađenje nakon zavarivanja (zbog troske velike debljine). Elektrode sa debelom rutilnom oblogom vrlo lako uspostavljaju električni luk, bez obzira da li je osnovni metal hladan ili topao.

Elektrode sa oblogom od ilmenita FeTiO_3 (19) obezbeđuju nizak unos vodonika u metal šava a pri tom ne zahtevaju sušenje elektrode ili predgrevanje osnovnog metala. Ove elektrode se koriste za zavarivanje niskolegiranih čelika i daju metal šava velike čvrstoće.

Elektrode sa rutilno-celuloznom oblogom (RC) imaju većinu osobina kao rutilne elektrode, ali prisustvo celuloze pojačava količinu dima koji se javlja pri zavarivanju, povećava rasprskavanje ali povećava i dubinu uvarivanja u odnosu na čisto rutilne elektrode. Ovim elektrodama je moguće zavarivanje i vertikalno naniže.

Elektrode sa rutilno-kiselom oblogom (RA) imaju debelu oblogu u poređenju sa kiselim elektrodama). Prisustvo oksida železa omogućava zavarivanje u gotovo svim položajima (kao kod rutilne obloge) i lakše se uspostavlja električni luk nego kod kiselih elektroda.

Elektrode sa bazičnom oblogom (B, 15, 16, 45, 48) se odlikuju velikim sadržajem soli kalcijum karbonata (CaCO_3) i kalcijum fluorida (CaF_2) u oblozi. Koriste za zavarivanje čelika sa povišenim sadržajem nečistoća (materijali iz bazične obloge efikasno uklanjaju sumpor i fosfor iz materijala), ali se koriste i za zavarivanje čelika sa velikim procentom ugljenika ($\text{C} \geq 0,3 \%$). Zavarivanje se najčešće vrši jednosmernom strujom inverznog polariteta (JSIP)¹³, kratkim električnim lukom i malom brzinom zavarivanja. Zavarivanje se radi na delovima velike debljine, u gotovo svim položajima zavarivanja (osim vertikalno naniže), i to za delove koji trpe velika dinamička opterećenja (odgovorne konstrukcije). Šavovi su plastični i žilavi, sa veoma dobrim mehaničkim osobinama, prsline se javljaju ređe nego kod drugih elektroda, a troska na licu šava se teško uklanja.

Topljenjem obloge oslobađa se SO_2 čime se prvenstveno snižava sadržaj O_2 u tečnom kupatilu, ali se dodatno štiti zona zavarivanja od uticaja okolnog vazduha.

Obloga elektroda sa bazičnom oblogom je higroskopna pa je elektrodu neophodno sušiti pre svake upotrebe. Vreme sušenja je najčešće 2 h na temperaturi 150°C do 200°C .

Elektrode sa bazičnom oblogom kojoj je dodat gvozdni prah (18, 28) imaju deblju oblogu, zavarivanje se vrši strujama veće jačine nego što je to slučaj kod bazičnih elektroda i veća je brzina nanošenja sloja.

Elektrode sa rutilno-bazičnom oblogom (RB, 03) su sa debelom oblogom i najčešće se koriste za spojeve gde se očekuje metal šava sa mehaničkim osobinama boljim

nego što su to osobine osnovnog metala¹⁴. Titanijum dioksid i kalcijum karbonat su dve osnovne komponente koje sačinjavaju oblogu ovih elektroda.

Prema posebnim tehnološkim zahtevima, elektrode se dele na normalne, elektrode za duboke provare (za zavarivanje u uskom žlebu), visokoproduktivne i elektrode za posebne uslove rada.

Normalne elektrode se primenjuju za zavarivanje pri normalnim uslovima, sa normalnom efektivnošću, brzinom i proizvodnošću.

Duboko penetrirajuće elektrode se koriste za izradu šavova u uskim žlebovima i za zavarivanje sa što manje prolaza. Upotrebom ovih elektroda moguće je, u jednom prolazu, zavarivanje limova debljine do 16 mm, ali i I-šav u jednom ili dva prolaza bez prethodne izrade žleba [1, 8]. Prvi zavar ima zadatak da prodre do polovine debljine lima da bi se na suprotnoj strani uradio drugi zavar sa zadatkom da provari koren prethodnog. Obloga ovih elektroda je najčešće rutilna+celulozna.

Osnovne karakteristike visoko produktivnih elektroda su povećani sadržaj železnog praha u oblozi i veća debljina obloge. Zahvaljujući većoj debljini obloge ostvaruje se bolje razvijena rastopljena mrlja na elektrodi zbog čega je veći stepen iskorišćenja energije i manje rasipanje materijala rasprskavanjem. Povećani sadržaj gvođenog praha u oblozi utiče na povećanje stabilnosti luka i brzinu zavarivanja.

Elektrode za posebne uslove primene su razvijene za zavarivanje u položaju vertikalno na dole (što je problem za zavarivanje kod većine klasičnih elektroda). Obloga ovih elektroda je bazična ili rutilna.

Prema vrsti osnovnog metala, elektrode za REL postupak zavarivanja se dele na elektrode za zavarivanje čelika, nikla, bakra i livenog železa.

Elektrode za zavarivanje čelika, klasifikovane su prema:

- SRPS EN ISO 2560:2011: Potrošni

¹³ Tip struje i polaritet kojom se vrši zavarivanje elektrodama sa bazičnom oblogom definiše proizvođač. Podaci o tipu struje i polaritetu struje nalaze se na kutiji elektroda i u pratećoj dokumentaciji.

¹⁴ Na engleskom: *overmatching welding*.

materijali za zavarivanje – Obložene elektrode za ručno elektrolučno zavarivanje nelegiranih i finozrnih čelika – Klasifikacija¹⁵ [20],

- SRPS EN ISO 18275:2013: Potrošni materijali za zavarivanje – Obložene elektrode za ručno elektrolučno zavarivanje čelika povišene čvrstoće – Klasifikacija¹⁶ [21],
- SRPS EN ISO 3580:2012: Potrošni materijali za zavarivanje – Obložene elektrode za ručno elektrolučno zavarivanje vatropostojanih čelika – Klasifikacija¹⁷ [22],
- SRPS EN ISO 3581:2017: Potrošni materijali za zavarivanje – Obložene elektrode za ručno elektrolučno zavarivanje nerđajućih i vatrootpornih čelika – Klasifikacija¹⁸ [23].

Elektrode za zavarivanje nikla i njegovih legura klasifikovane su standardom SRPS EN ISO 14172:2017: Potrošni materijali za zavarivanje – Obložene elektrode za ručno elektrolučno zavarivanje nikla i njegovih legura – Klasifikacija¹⁹ [24].

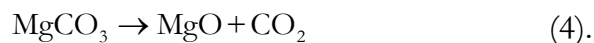
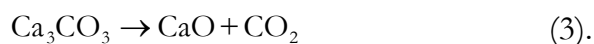
Elektrode za zavarivanje bakra i njegovih legura su klasifikovane standardom SRPS EN ISO 17777:2017: Potrošni materijali za zavarivanje – Obložene elektrode za ručno elektrolučno zavarivanje bakra i legura bakra – Klasifikacija²⁰ [25].

Elektrode za zavarivanje livenog železa su klasifikovane prema SRPS EN ISO 1071:2017: Potrošni materijali za zavarivanje – Obložene elektrode, žice, šipke i punjene žice za zavarivanje topljenjem sivog liva – Klasifikacija²¹ [26].

10.4.4 Sagorevanje obloge elektroda – osnovne hemijske reakcije

Pri topljenju i sagorevanju obloge elektrode, nastaje ugljendioksid koji potiskuje vazduh iz okoline. Ugljendioksid nastaje razlaganjem magnezijum ili kalcijum karbonata ili sagorevanjem organskih delova iz obloge. Razlaganje karbonata dešava se

prema jednačinama [2, 8]:



Kalcijum oksid (CaO) i magnezijum oksid (MgO) se ponašaju kao „čistači” metala od sumpora:



Železo-sulfid (FeS) je neželjeni sastojak metala šava dok su kalcijum-sulfid (CaS) i magnezijum-sulfid (MgS) osnovni sastojci (potrebne i poželjne) troske.

Silicijum-dioksid (SiO₂) i titanijum-dioksid (TiO₂) – rutil difuzionom dezoksidacijom prelaze u trosku:



Manjak silicijum-dioksida i titanijum-dioksida dovodi do reakcije FeS sa ugljenikom:



Ugljenmonoksid je štetan u svakom pogledu: štetan je po čoveka ali je štetan i po metal šava – on ostaje zarobljen u metalu šava i dolazi do pada čvrstoće metala šava. Uvođenjem dezoksidatora, FeS umesto da vezuje ugljenik, vezuje Mn, Si i Ti i tako direktno formira trosku bez pojave CO.

10.4.5 Proizvodnja elektroda

Proizvodnja obloženih elektroda je tehnološki zahtevan i složen proces jer je potrebno uskladiti metalni deo elektrode i materijale iz obloge da daju projektovani rezultat pri zavarivanju. U današnje vreme, za izradu obloge elektroda koristi se preko 100 različitih materijala – različiti minerali, rude, hemijska jedinjenja, metali, i pri tom su oni različitih granulacija, masenog udela i sl [8].

Od elektroda se zahteva da sve imaju iste osobine pa se zbog toga koriste složeni i skupi tehnološki postupci izrade radi obezbeđenja ponovljivosti kvaliteta.

Većina sirovih materijala za obloge se pakuje u male posude tako da sitnjenje

¹⁵ Identičan sa EN ISO 2560:2009 CEN/TC 121.

¹⁶ Identičan sa EN ISO 18275:2012 CEN/TC 121.

¹⁷ Identičan sa EN ISO 3580:2011 CEN/TC 121.

¹⁸ Identičan sa EN ISO 3581:2012 CEN/TC 121.

¹⁹ Identičan sa EN ISO 14172:2008 CEN/TC 121.

²⁰ identičan sa ISO 17777:2016 ISO/TC 44/SC 3.

²¹ Identičan sa EN ISO 1071:2015 CEN/TC 121.

sirovine pri transportu bude minimalno. Veličina čestica sirovih materijala je veoma značajna za radne karakteristike završno obrađenih obloženih elektroda. Hemijska analiza materijala se sprovodi na svakoj količini materijala koja se primi u pogon da bi se proverilo da li su zahtevani standardi ispunjeni.

Elektrode se uvek proizvode po šaržama te se kontrola mora sprovesti još pri formiranju mešavine obloge. Sve šarže se mešaju prema propisanoj recepturi, u kontrolisanim radnim uslovima. Prvo se mešaju suvi materijali u šarži a zatim se postepeno dodaju vlažni materijali. Tako se obrazuje gusta „masa”, koja se posle mešanja postavlja na presu radi obrazovanja cilindra od obloge, koji se dalje prenose u presu za izvlačenje. Na presi se vrši završno formiranje elektroda: presa za izvlačenje preuzima cilindar materijala obloge i oblikuje ga oko metalnog jezgra elektrode, koje je odsečeno na određenu dužinu. Čitav proces se dešava pri veoma velikim brzinama (elektrode od 360 mm se proizvode na ovakvim mašinama brzinama do 1200 komada/min) [8].

Obložene elektrode koje napuštaju presu za izvlačenje se postavljaju na pokretnu traku i šalju u peć na sušenje i pečenje. Peć mora da obezbedi postepeni rast temperature tako da se „mokre elektrode” (tek oblikovane) prvo šalju u niskotemperaturnu zonu peći gde se započinje sušenje elektrode. Posle određenog vremena se elektrode prevode u drugi deo peći gde je temperatura sušenja viša. U toj zoni se vrši dodatno sušenje elektroda i odvodi se zaostali deo vlage iz obloge. U trećem delu peći, gde je najviša temperatura, vrši se završno sušenje elektroda (pečenje elektroda) kako bi se formirao konačni oblik elektrode.

I nakon temeljne termičke obrade elektrode, elektrode nisu potpuno suve i neke od njih ne rade pravilno ako se dodatno ne osuše. Zbog toga proizvođači kontrolišu sadržaj vlage u oblogama elektrode i predstavljaju je u dokumentaciji kao deo sastava elektrode. Ukoliko je proizvođač predvideo prethodnu termičku obradu

elektrode pre upotrebe, korisnik mora da se pridržava uputstva proizvođača i da koristi peć za sušenje i držanje elektroda.

Svaka šarža elektroda treba da bude ispitana da bi se ustanovilo da li je izrađena prema standardima.

Žica koja se koristi za proizvodnju metalnog dela elektroda je u većini slučajeva od „neumirenog” čelika (površina je veoma glatka i sadrži čisto železo, sa određenim sadržajem ugljenika). Tipična analiza punog preseka žice mekog čelika za jezgro elektrode pokazuje: $C_{\max}=0,15\%$; $S_{\max}=0,04\%$; $P_{\max}=0,04\%$; $Si_{\max}=0,25\%$ i $Mn=0,30-0,60\%$.

Standardi, po pravilu, ne postavljaju ograničenja proizvođačima u pogledu materijala koji će koristiti za izradu obloge. Proizvođačima je dozvoljeno da eksperimentišu pri izradi elektroda. Međutim, osobine elektroda i rezultati zavarivanja elektrodama su potpuno definisani standardima po pitanju upotrebljivih položaja zavarivanja, električnim i mehaničkim osobinama metala šava.

10.4.6 Upotreba i skladištenje elektroda

Elektrode se najčešće pakuju u komercijalne kartonsko-plastične kutije mase do 10 kg. Kutije su vidno obeležene: na njima je proizvođač, logo proizvođača, datum proizvodnje, homologacioni znak itd (slika 10.14). Na većini pakovanja je naznačen način skladištenja i upotrebe, u obliku: „Čuvati na suvom i tamnom mestu. Rok upotrebe do datuma naznačenog na kutiji.”



Slika 10.14 Pakovanje obloženih elektroda [27]

Na svakoj kutiji nalazi se nalepnica gde se vide dodatni podaci o elektrodama u kutiji (čak podaci i o šarži): proizvođač, standard, oznaka, komercijalno ime, klasifikacija, prateći

standardi, prečnici elektrode, opseg primenjive jačine struje, tip i polaritet električne struje, položaji zavarivanja, zatezna čvrstoća, napon na granici tečenja, izduženje, udarna energija itd. Na slici 10.15 prikazana je jedna tipična nalepnica na kutiji sa elektrodama.



Slika 10.15 Tipična nalepnica na pakovanju obloženih elektroda [27]



Slika 10.16 Peć za sušenje elektroda

Na nalepnici se obavezno nalazi podatak o termičkoj pripremi elektroda pre upotrebe, ukoliko je priprema potrebna. Na primer, kod bazičnih elektroda piše: „Sušiti na temperaturi od 250°C minimalno 2 h”. Na primeru rutilne debeloizidne elektrode sa slike 10.15 piše: „Ponovno sušenje 140°C/1 h” što znači: svako ponovno sušenje izvršiti na temperaturi od 140°C u trajanju od 1 h.

U takvim slučajevima elektroda se suši u peći (za sušenje elektroda) pre upotrebe inače zavareni spoj neće imati projektovane osobine. Osnovni zadatak sušenja elektrode je izvlačenje higroskopne vlage iz obloge koja bi se, u određenom procentu, deponovala u metalu šava tokom zavarivanja. Na slici 10.16

prikazana je tipična peć za sušenje elektroda.

Osušena elektroda se prebacuje u tobolac za elektrode (slika 10.17) gde se elektrode drže na konstantnoj povišenoj temperaturi (npr. 120°C). Zavarivač nosi sa sobom tobolac na radno mesto i tokom zavarivanja uzima jednu po jednu elektrodu iz tobolca.

Tipična greška koju zavarivači prave je korišćenje sušenih elektroda koje su nakon sušenja bile na slobodnom vazduhu. Elektrode koje su osušene i nisu čuvane u tobolcu do neposredno pred zavarivanje, imaju osobine kao da nisu sušene – one ponovo upijaju vlagu iz vazduha i vraćaju se u „fabričko stanje”. Dobra praksa u zavarivačkom pogonu sa srednjom ili velikom potrošnjom elektroda je neprekidno sušenje elektroda: elektrode se neprekidno suše i troše pri čemu se sušenje vrši čak i u vremenu kada radnici ne rade. Tako se osigurava kvalitet zavarivanja koji dolazi direktno od poluproizvoda – što neosušena elektroda predstavlja.



Slika 10.17 Tobolac za zavarivanje

Ipak, važno je napomenuti da postoji veliki broj različitih tipova elektroda koje ne zahtevaju nikakvu termičku pripremu pre upotrebe.

10.5 Tehnologija zavarivanja

Tehnologija zavarivanja postupcima iz grupe ISO 4063 — 11 obuhvata aktivnosti koje treba sprovesti kako bi se uspešno izvršilo spajanje dva tela u monolitnu celinu. Aktivnosti koje treba sprovesti se mogu podeliti na:

- pripremne aktivnosti, odnosno, aktivnosti koje treba sprovesti pre početka zavarivanja,
- tekuće aktivnosti, odnosno, aktivnosti koje treba sprovesti u toku zavarivanja i
- završne aktivnosti, odnosno, aktivnosti koje treba sprovesti nakon završenog zavarivanja.

Pripremne aktivnosti (aktivnosti pre zavarivanja) treba da pripreme realizaciju samog čina zavarivanja: vrši se projektovanje tehnologije zavarivanja, definiše se postupak zavarivanja, određuju se parametri zavarivanja, biraju dodatni i potrošni materijali, priprema se osnovni metal – vrši se čišćenje, ispravljanje, stezanje, izrađuje se žleb, suše se elektrode itd.

Tekuće aktivnosti (aktivnosti u toku zavarivanja) obuhvataju realizaciju samog zavarivanja: upoznavanje radnika sa aktivnostima koje treba realizovati, upoznavanje sa tehničkom dokumentacijom, proveru električne i gasne instalacije, podešavanje parametara zavarivanja, zavarivanje ranije definisanom tehnikom, međuprolazno čišćenje i ispravljanje (ako je potrebno), kontrola tokom zavarivanja, obezbeđenje instalacije i uređaja za zavarivanje, odlaganje opreme i, po potrebi, vrši se održavanje propisanih termičkih/toplotnih režima osnovnog, dodatnog i potrošnih materijala.

Završne aktivnosti obuhvataju sve aktivnosti kojima se zavareni spoj dovodi u realizovano stanje: kontrola, čišćenje, brušenje, površinska zaštita, ispravljanje/uklanjanje deformacija, termička obrada [28], demontaža i uklanjanje zavarenih delova sa radnog mesta (ukoliko je to potrebno i moguće) itd.

Međutim, pod pojmom „tehnologija zavarivanja” na nivou radnog mesta (radionice i terena) podrazumevaju se aktivnosti kojima se definiše i realizuje zavarivanje određenih delova.

10.5.1 Priprema osnovnog materijala za zavarivanje

Priprema materijala za zavarivanje obuhvata sledeće aktivnosti:

- Čišćenje ivica i površina delova koje se zavaruju (uklanjanje boja, korozije, oksida, masti, prljavštine isl.);
- Priprema žleba za zavarivanje (ako je potrebno);
- Pažljivo postavljanje delova u položaj za zavarivanje i učvršćivanje kako bi se sprečilo pomeranje tokom zavarivanja,
- Izrada pripoja („heftanje”) na odgovarajućim mestima, prema utvrđenom planu realizacije;
- Po potrebi, predgrevanje materijala radi poboljšanja zavarivosti, sprečavanja nastanka krtih faza u ZUT-u itd.

Čišćenje ivica i površina

Sve prljavštine (masnoće, boja, lakovi, korozija, ostaci mašinske obrade itd.) na površinama koje se zavaruju su potencijalni izvori uključaka koji mogu da prodru u tečno kupatilo i ostanu zarobljeni u metlu šava. Masnoće, boje i lakovi koji sagorevaju pri zavarivanju mogu formirati kancerogena isparenja i mogu uticati na zdravlje ljudi.

Poseban problem pri ISO 4063 — 11 postupcima zavarivanja predstavlja potreba za međuprolaznim čišćenjem zbog velike količine troske koja ostaje na licu šava.

Priprema žlebova

Priprema žlebova je obavezna aktivnost koja mora da se sprovede pri realizaciji tehnologije zavarivanja.

Standard SRPS EN ISO 9692-1:2014: Zavarivanje i srodni postupci – Tipovi pripreme spoja – Deo 1: Ručno elektrolučno zavarivanje topivom elektrodom, elektrolučno zavarivanje topivom elektrodom u zaštitnom gasu, gasno zavarivanje, TIG zavarivanje i

zavarivanje čelika snopom²² daje opšte preporuke za pripremu žlebova za zavarivanje TIG postupkom [29].

U upotrebi su i stariji EN standardi koji su proistekli iz nemačkih DIN standarda. Oni ne propisuju, ne zahtevaju standardizaciju spojeva, niti sužavaju izbor mogućih rešenja pri izradi spojeva, već prikazuju primere realizovanih spojeva koji uspešno funkcionišu na tehničkim sistemima:

- SRPS EN 1708-1:2013: Zavarivanje – Osnovni detalji zavarenih čeličnih spojeva – Deo 1: Komponente pod pritiskom²³ [30],
- SRPS EN 1708-2:2008: Zavarivanje – Osnovni detalji zavarenih čeličnih spojeva – Deo 2: Komponente bez unutrašnjeg pritiska²⁴ [31] i
- SRPS EN 1708-3:2012: Zavarivanje – Osnovni detalji zavarenih čeličnih spojeva – Deo 3: Komponente pod pritiskom sa plakaturom, puferom i sa prevlakom (trakama)²⁵ [32].

U prilogu su dati detalji vezani za pripremu žleba za ISO 4063 – 11 postupke.

Pozicioniranje delova

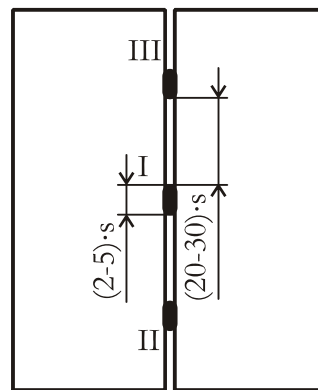
Pozicioniranje delova podrazumeva postavljanje delova u položaj za zavarivanje, njihovo učvršćivanje (fiksiranje, stezanje) i zadržavanje željenog položaja delova do kraja zavarivanja. U ovu svrhu koriste se različiti alati i pribori: pozicioneri, stege, hvataljke, stezači, stezne šape, ugaonici, ali i mašine sa magnetnim pločama, valjcima, pozicionerima, robotizovani manipulatori itd [16].

Izrada pripojnih šavova

Pripajanje je postupak spajanja ivica materijala samo na pojedinim mestima, pre početka samog zavarivanja. Svrha pripajanja je fiksiranje delova koji se zavaruju jedan u odnosu na drugi kako bi se umanjilo njihovo pomeranje tokom zavarivanja.

Pripajanje, po pravilu, počinje od sredine spoja koji treba izraditi pa se izvodi naizmenično sa jedne i sa druge strane. Pripojni šavovi bi trebali da budu od 2 do 5

puta debljina materijala a izvode se na rastojanju od 20 do 30 puta debljina materijala koji se zavaruje (slika 10.18). Ovakvim pristupom zavarivanja se ostvaruje ravnomerno rastojanje između ivica zavarenih limova pa je i šav homogenijeg sastava. Pripojni šavovi moraju da budu istog kvaliteta kao puni šav.



Slika 10.18 Pripojni šav s - debljina limova koji se zavaruju, I, II, III - redosled izvođenja pripoja

Pripojni šavovi se ne izvode kod limova veće debljine ili kod pojedinih cevastih delova gde poprečne dilatacije ne utiču na postupak zavarivanja.

Predgrevanje materijala

Predgrevanje materijala je termički postupak koji se primenjuje na osnovnom materijalu sa ciljem da se poboljša zavarivost. Odluku o predgrevanju materijala ne donosi zavarivač – zavarivač samo mora da sprovede postupak predgrevanja po utvrđenoj proceduri [33]. Određivanje režima predgrevanja je različito za različite materijale, položaje i opšte uslove zavarivanja pa se o predgrevanju materijala ne može govoriti uopšteno. Ipak, dovoljno je pomenuti: predgrevanje osnovnog materijala je deo tehnologije zavarivanja.

10.5.2 Oprema, pribor, dodatni i potrošni materijali za zavarivanje

Oprema za zavarivanje REL postupkom je robusna i otporna na različite mehaničke, termičke, hemijske i fizičke uticaje okoline. Bez obzira na to, sa opremom za zavarivanje je neophodno postupati odgovorno i po uputstvima proizvođača, prema uputstvima na

²² Identičan sa: EN ISO 9692-1:2013 CEN/TC 121.

²³ Identičan sa: EN 1708-1:2010 CEN/TC 121.

²⁴ Identičan sa: EN 1708-2:2000 CEN/TC 121.

²⁵ Identičan sa: EN 1708-3:2012 CEN/TC 121.

radnim listama ili prema primerima dobre prakse kada nema definisanih uputstava. Opremu i pribor za zavarivanje, kao i dodatne i potrošne materijale je neophodno održavati u ispravnom stanju prevashodno radi sopstvene bezbednosti i bezbednosti ljudi u okolini ali i radi ostvarenja projektovane funkcije sistema za zavarivanje

Pored ispravnog rada sa opremom i priborom, neophodno je poštovati i držati se ustaljenih aktivnosti pre, tokom i nakon zavarivanja kako bi se dostigao zahtevani kvalitet zavarenih spojeva uz minimalne troškove.

10.5.3 Zavarivanje

Zavarivanje postupcima ISO 4063 — 11, sa posebnim osvrtom na REL postupak, je uvek ručno, i vrši se sa nekoliko važnih preporuka/ograničenja:

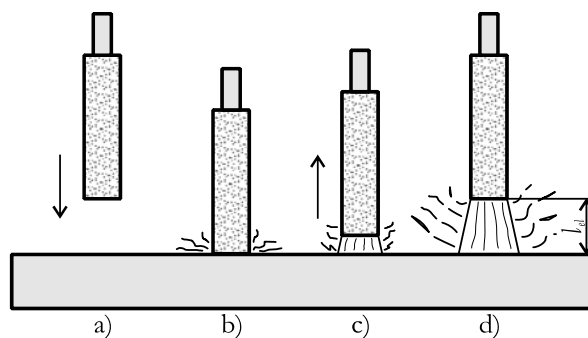
- Vrh elektrode ne sme da se uroni u tečno kupatilo već mora da se drži na konstantnom rastojanju od 3 mm do 5 mm od površine tečnog kupatila.
- Zona električnog luka mora uvek da prekriva celu površinu tečnog kupatila.
- Elektroda se vodi paralelno ivicama žleba, bez poprečnih pomeranja izvan granica žleba osim u slučaju kada je tehnologijom zavarivanja predviđeno njihanje elektrode van žleba.
- Zavarivač mora da ima dobru koordinaciju pokreta kako bi mogao da vodi elektrodu i održava električni luk.
- Zavarivač mora da vodi računa o prekidu zavarivanja usled promene elektrode i naknadnom uspostavljanju električnog luka.

10.5.4 Uspostavljanje i prekidanje električnog luka

Uspostavljanje električnog luka kod REL postupka zavarivanja se vrši bez upotrebe električnih uređaja već direktnim kontaktom elektrode i osnovnog metala. U praksi se koriste dve metode uspostavljanja električnog luka: dodirom-odmicanjem elektrode od osnovnog metala ili povlačenjem vrha elektrode („kresanjem”) po površini

osnovnog metala [2, 8].

Prilikom uspostavljanja električnog luka primicanjem-odmicanjem elektrode, elektroda se približava osnovnom metalu (slika 10.19, a) sve do kontakta i uspostavljanja kratkog spoja (slika 10.19, b). Odmah nakon uspostavljanja kontakta elektroda se odmiče od osnovnog metala ali se uspostavlja električni luk (slika 10.19, c). Elektroda se odmiče od osnovnog metala sve dok se ne dostigne željeno rastojanje vrha elektrode od osnovnog metala, odnosno, dok se ne dostigne optimalna dužina električnog luka l_{el} (slika 10.19, d).

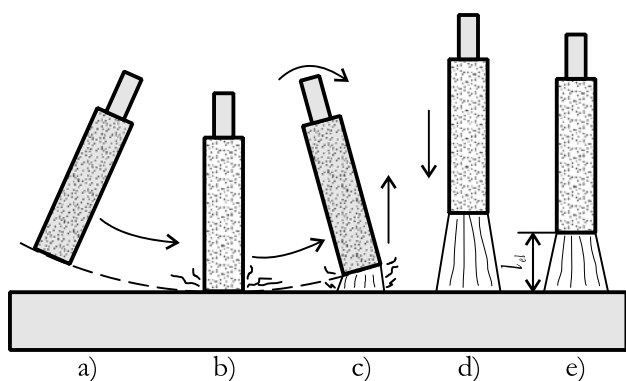


Slika 10.19 Uspostavljanje električnog luka primicanjem-odmicanjem: a) primicanje elektrode, b) dodir elektrode i osnovnog metala, c) odmicanje elektrode i povećanje dužine električnog luka, d) zaustavljanje elektrode u položaju stabilnog gorenja električnog luka

Iako uspostavljanje električnog luka izgleda jednostavno, neiskusni zavarivač ima problema sa „lepljenjem” vrha elektrode za osnovni metal. Tom prilikom dolazi do oštećenja obloge elektrode koja može da ostane zarobljena u metalu šava i tako nastaje greška u spoju. Ovakav metod „paljenja” električnog luka treba izbegavati osim u slučajevima kad nije moguće drugačije uspostaviti električni luk ili je zavarivač iskusan i siguran u sebe.

Bolja metoda uspostavljanja električnog luka je povlačenjem vrha elektrode po osnovnom metalu.

Elektroda se blago zaniše iznad osnovnog metala (slika 10.20, a) i vrhom okrzne osnovni metal (slika 10.20, b). Tada dolazi do uspostavljanja kratkog spoja ali se brzim odmicanjem elektrode od osnovnog metala (slika 10.20, c) uspostavlja električni luk.

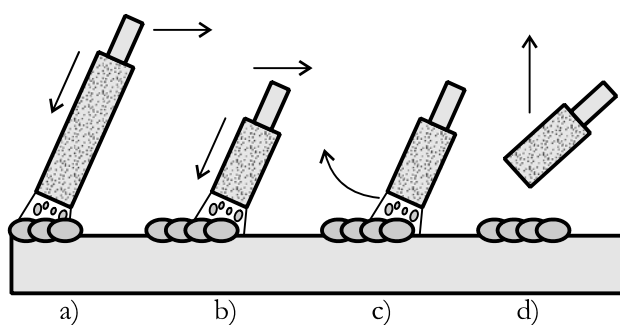


Slika 10.20 Uspostavljanje električnog luka primicanjem-odmicanjem: a) primicanje elektrode, b) dodir elektrode i osnovnog metala, c) odmicanje i ispravljanje elektrode uz povećanje dužine električnog luka, d) približavanje elektrode radi skraćivanja električnog luka, e) zaustavljanje elektrode u položaju stabilnog gorenja električnog luka

Daljim odmicanjem elektrode od osnovnog metala, produžava se električni luk. Tako dobijeni električni luk je, po pravilu, predugačak i potrebno je približiti elektrodu osnovnom metalu radi dostizanja optimalne dužine (slika 10.20, d). Primicanje elektrode vrši se sve dok se ne dostigne željena dužina električnog luka, odnosno, stabilan električni luk (slika 10.20, e).

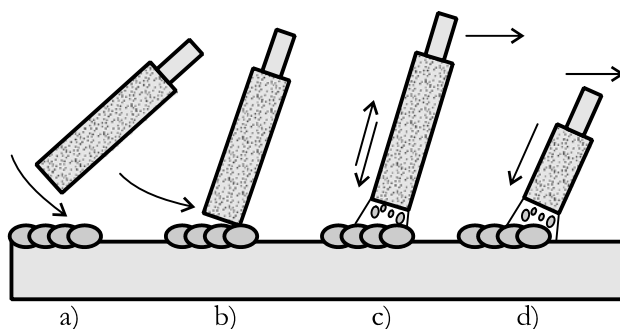
Ovom metodom uspostavljanja električnog luka se izbegava lepljenje elektrode za osnovni metal i izbegava se oštećenje obloge elektrode. Stabilisanje dužine električnog luka se, u ovom slučaju, vrši skraćivanjem rastojanja, što je uglavnom jednostavnije nego produživanjem rastojanja (kao kod uspostavljanja električnog luka „lepljenjem”).

Prekidanje električnog luka ne sme da se izvede jednostavnim uklanjanjem elektrode iz zone zavarivanja. Kada je elektroda kojom se zavaruje (slika 10.21, a) istrošena (slika 10.21, b), povlači se u nazad na prethodno zavareno mesto, odnosno, na očvrslu trosku (slika 10.21, c). Nakon toga se elektroda podiže, prekida se električni luk i elektroda se uklanja iz zone zavarivanja (slika 10.21, d). Pri direktnom podizanju elektrode nastaje greška u šavu tipa poroznosti [34].



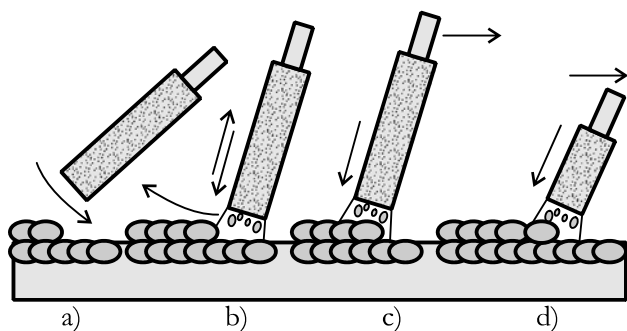
Slika 10.21 Prekidanje električnog luka: a) zavarivanje odmah nakon uspostavljanja električnog luka, b) zavarivanje gotovo potpuno istrošenom elektrodom, c) vraćanje elektrode u nazad radi prekidanja električnog luka, d) bezbedno odmicanje preostalog dela elektrode od zone zavarivanja

Nastavak zavarivanja novom elektrodom se vrši drugačije ukoliko je u pitanju prvi šav (koreni) ili ukoliko je neki drugi šav (pokrivni, završni).



Slika 10.22 Nastavljanje zavarivanja posle zamene potrošene elektrode novom pri prvom prolazu: a) kresanje elektrode na prethodno deponovanom materijalu, b) uspostavljanje električnog luka na prethodno deponovanom materijalu, c) stabilizacija luka na prethodno deponovanom materijalu i kretanje ka nezavarenoj zoni, d) nastavak zavarivanja

Prilikom zavarivanja prvog šava, „kresanje” elektrode vrši se na mestu gde je zavarivanje prethodnom elektrodom prekinuto (slika 10.22, a), što bi trebalo da je približno 20 mm od zavarenog kraja. Električni luk se uspostavlja na metalu šava (slika 10.22, b) i zavarivanje se nastavlja na nezavarenom delu (slika 10.22, c) do trošenja elektrode (slika 10.22, d) kada se procedura ponavlja).



Slika 10.23 Nastavljanje zavarivanja posle zamene potrošene elektrode novom pri drugom prolazu: a) kresanje elektrode na deponovanom materijalu prvog prolaza, b) uspostavljanje električnog luka na deponovanom materijalu prvog prolaza, c) stabilizacija luka na završetku drugog prolaza i kretanje ka nezavarenoj zoni, d) nastavak zavarivanja

Kada se nastavlja zavarivanje, na prolazu različitom od prvog, „kresanje” elektrode se vrši na samom kraju metala šava (gde je prekinuto zavarivanje, slika 10.23, a) a električni luk se uspostavlja i stabilizuje na mestu prethodnog prolaza (slika 10.23, b). Nakon toga se elektroda povlači u nazad radi popune mesta završetka prethodne elektrode (slika 10.23, c) i nastavlja se zavarivanje u smeru prethodnog prolaza.

Zavarivanje se izvodi dok se ne potroši elektroda i ciklus paljenja luka novom elektrodom se ponavlja.

10.5.5 Tehnika zavarivanja

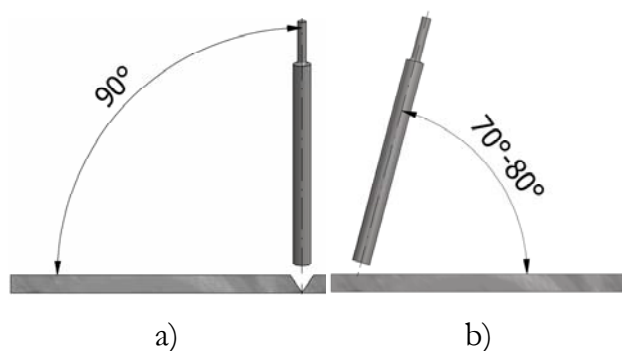
Zavarivanje REL postupkom započinje se uspostavljanjem električnog luka nekom od opisanih tehnika. Posle toga se elektroda dovodi u položaj pogodan za zavarivanje i započinje sa ispunom žleba.

Kada je u pitanju sučeono zavarivanje ploča (slika 10.24), zavarivanje započinje na mestu propisanom tehnologijom zavarivanja, što je najčešće, početak ili sredina ploča za zavarivanje.

Elektroda se drži simetrično u odnosu na ploče koje se zavaruju (90° u odnosu na čeonu površinu ploča, slika 10.25, a), ali se nagnje u smeru zavarivanja, tako da osa elektrode zaklapa ugao od 70° - 80° u odnosu na liniju spajanja (slika 10.25, b).

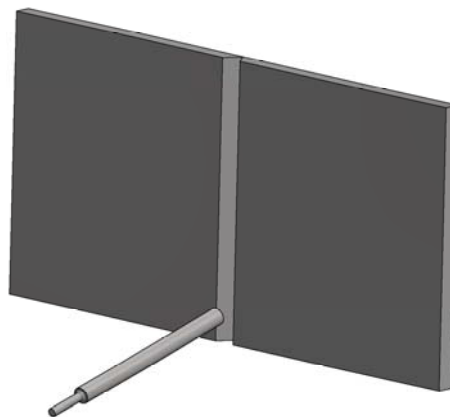


Slika 10.24 Sučeono zavarivanje ploča REL postupkom u horizontalnom položaju – sa leva na desno



Slika 10.25 Položaj elektrode u odnosu na ploče: a) u odnosu na čeonu površinu ploča, b) u odnosu na liniju spajanja – zavarivanje se vrši sa leva na desno

Ovakva tehnika zavarivanja, gde elektroda prednjači u odnosu na električni luk, naziva se **tehnikom povlačenja**.

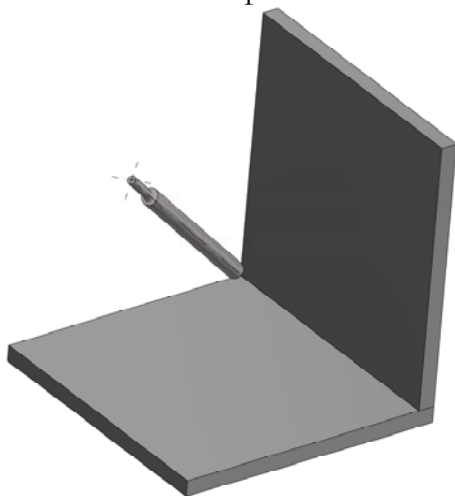


Slika 10.26 Sučeono zavarivanje ploča REL postupkom u vertikalnom položaju – odozdo naviše

Tehnika guranja, gde električni luk prednjači u odnosu na elektrodu se koristi za zavarivanje REL postupkom u vertikalnom položaju (slika 10.26) odozdo naviše (ista tehnika se koristi za izradu žleba ili sečenje

osnovnog metala elektrodom). Nagib ose elektrode u odnosu na liniju spajanja je 70° - 80° u smeru suprotnom od smera zavarivanja.

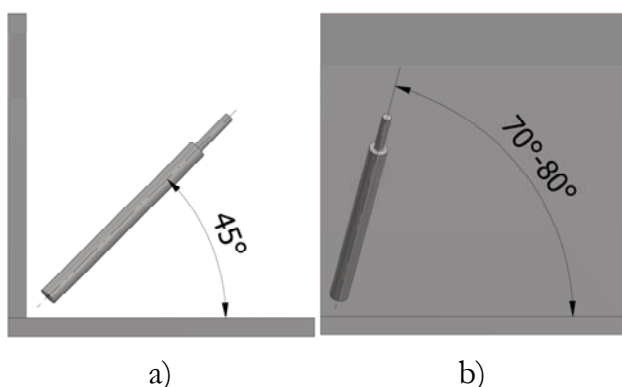
I u ovom slučaju se elektroda drži simetrično u odnosu na ploče.



Slika 10.27 Zavarivanje ploča pod uglom REL postupkom – zavarivanje se vrši sa leva u desno (od dalje ivice ka bližoj)

Zavarivanje odozgo naniže se retko izvodi jer većina elektroda nije predviđena za takav položaj zavarivanja i zavarivačima je ovo najteži položaj zavarivanja.

Zavarivanje ploča pod uglom (slika 10.27) vrši se elektrodom koja se postavlja simetrično između ploča (pod uglom od 45° , slika 10.28, a) i naginje se u napred tako da ugao između ose elektrode i linije spajanja bude 70° - 80° (slika 10.28, b), odnosno, zavarivanje se vrši tehnikom povlačenja.



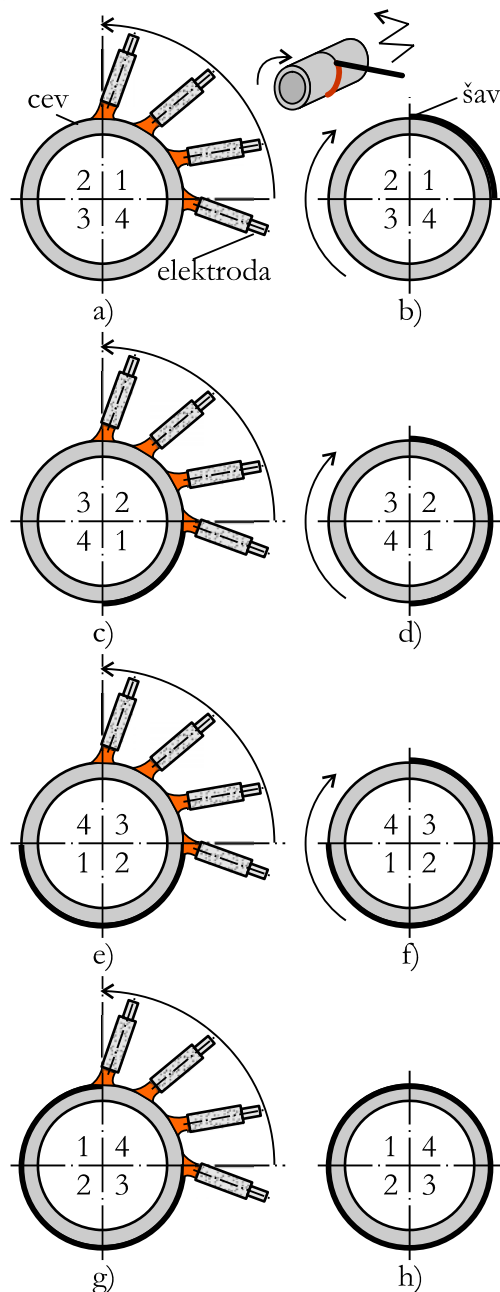
Slika 10.28 Zavarivanje ploča pod uglom REL postupkom zavarivanja: a) nagib elektrode u odnosu na osnovni metal, b) nagib elektrode u odnosu na liniju spajanja – zavarivanje se vrši sa leva u desno

Zavarivanje tehnikom guranja se vrši samo ukoliko se ugaoni spoj zavaruje u

vertikalnom položaju odozdo naviše.

Preklopni spoj se zavaruje istovetno ugaonom: elektroda se drži simetrično u odnosu na osnovni metal (pod uglom od 45° u odnosu na oba radna komada) i naginje se u smeru zavarivanja (tehnika povlačenja).

Tehnika zavarivanja cevi predstavlja poseban slučaj zavarivanja radnih komada koji se može podeliti na **tehniku zavarivanja cevi koja rotira** i **tehniku zavarivanja fiksirane cevi**.



Slika 10.29 REL postupak zavarivanja, tehnika zavarivanja cevi koja rotira oko svoje ose

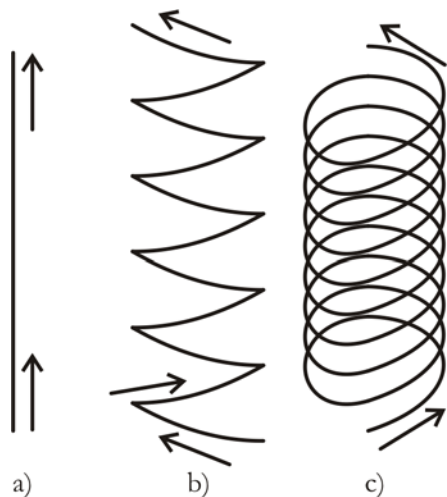
Tehnika zavarivanja cevi koja rotira oko svoje ose se primenjuje pri zavarivanju

cevi uvek kada je to moguće. Zahvaljujući rotaciji, zavarivanje se vrši uvek u povoljnijem položaju nego kad je u pitanju fiksirana cev i kada zavarivač mora da se postavlja ispod cevi – u nadglavni položaj.

Zavarivanje cevi koja rotira se najčešće radi tehnikom guranja. Postupak počinje iz horizontale, odnosno, iz tačke na cevi koja bi, u poprečnom preseku cevi, predstavljala „3 sati” na časovniku.

Zavarivanje se vrši „uz cev” do najviše tačke na cevi, odnosno, dok se ne zavari prva četvrtina obima cevi (slika 10.29, a). Potom se prekida zavarivanje i cev rotira za 90° tako da završetak šava dođe u položaj „3 sati” (slika 10.29, b). Zatim se, kao na početku, vrši zavarivanje druge četvrtine obima cevi, opet do vrha cevi (slika 10.29, c). Nakon toga se prekida zavarivanje i cev opet zarotira za četvrtinu obima (90°), tako da treća četvrtina obima bude u položaju za zavarivanje (slika 10.29, d). Procedura se ponavlja sve dok se ne zavari pun obim cevi (slika 10.29, e, f, g, h).

Elektrodna žica se vodi uz cev uz njihanje levo-desno (cik-cak, slika 10.30, b) od jedne strane žleba do druge strane, radi potpune ispunje praznog prostora žleba.

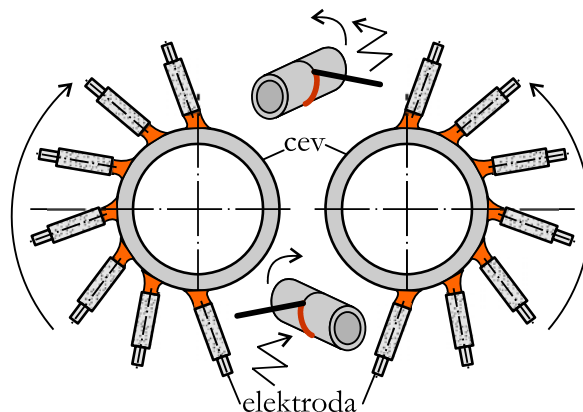


Slika 10.30 Vodenje elektrode: a) po pravoj liniji, b) levo-desno (cik-cak), c) kružno sa usponom

Ovakvom tehnikom zavarivanja, samo mali deo cevi se zavaruje u vertikalnom položaju a pregrevanje cevi je svedeno na minimum. Priprema žleba zavisi od debljine i prečnika cevi koja se zavaruje.

Tehnika zavarivanja fiksirane cevi se

primenjuje za zavarivanje kada je nemoguće ostvariti zaokretanje cevi radi pojednostavljenja zavarivanja.



Slika 10.31 REL postupak zavarivanja, tehnika zavarivanja fiksirane cevi

Po pravilu, zavarivanje fiksirane cevi se vrši po polovinama cevi (slika 10.31): prvo se zavari jedna polovina cevi (npr. leva), pa onda druga (desna). Zavarivanje se počinje od najniže tačke cevi, pri čemu je elektroda postavljena pod uglom od 70° - 80° u odnosu na tangentu cevi (koja je horizontalna) i onda se lagano penje „uz cev”. Elektroda se pri zavarivanju blago njiše levo-desno (cik-cak, slika 10.30, b) kako bi se ispunila cela širina žleba.

Tehnika vođenja elektrode

Elektroda se duž linije spajanja vodi tako da popuni ceo žleb i pri tom se ostvari određeno nadvišenje na osnovnom metalu. Za zavarivanje se koriste različite tehnike vođenja ali su najčešće tehnike po pravoj liniji, cik-cak i kružnim kretanjem (slika 10.30, a, b i c).

Svaka tehnika vođenja ima svoje prednosti i nedostatke:

- vođenje po pravoj liniji (slika 10.20, a) daje najmanji depozit, najmanji unos toplote, najveću brzinu zavarivanja,
- vođenje cik-cak (slika 10.20, b) je sporije od vođenja po pravoj liniji, daje veći depozit metala, veći unos toplote ali je i je jednostavnije zavarivanje vertikalno naviše,
- vođenje kružnim kretanjem (slika 10.20, c) je najsporije, ali daje najveći unos toplote i najveći depozit metala, metal šava se sporije hladi i potrošnja elektrode je veća.

Pored navedenih koriste se i tehnika sa

povratnim korakom (napred-nazad), kretanje po trouglu itd.

10.5.6 Parametri zavarivanja

Izbor parametara zavarivanja je, prevashodno, uslovljen vrstom osnovnog materijala, debljinom materijala i položajem zavarivanja. Međutim, zavarivanje direktno zavisi od osobina elektrode, pa je neophodno prvo izabrati elektrodu.

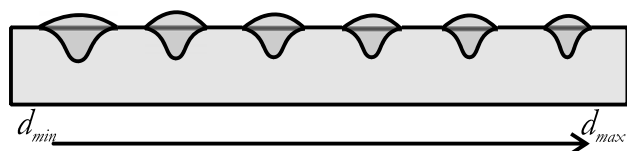
Tip, odnosno, vrsta elektrode bira se prema hemijskom sastavu osnovnog materijala, zahtevanim mehaničkim osobinama šava, karakteristikama primene, a na osnovu podataka proizvođača elektroda.

Izbor prečnika elektrode d_e , zavisi od debljine osnovnog materijala i oblika žleba. Za zavarivanje u jednom prolazu bira se najveći prečnik elektrode koji dozvoljavaju dimenzije žleba. Za zavarivanje debljih materijala u više prolaza, biraju se elektrode različitih prečnika: za prvi prolaz (ili koreni zavar), primenjuje se najmanji prečnik elektrode radi boljeg provara, a za ostale slojeve biraju se elektrode najvećeg prečnika, koje dozvoljavaju zadate dimenzije žleba.

Tabela 10.3 Preporuke za izbor prečnika elektrode u odnosu na debljinu osnovnog metala – OM [8]

Debljina OM		0-2	3-5	6-8	9-12	≥ 12
Prečnik elektrode	[mm]	0-2	3	3-4	4-5	5-6

Tabela 10.3 daje preporuke za izbor prečnika elektrode na osnovu debljine dodatnog materijala za sučeono spojeve ali se one primenjuju i za ostale spojeve pri čemu se treba držati minimalnih vrednosti prečnika.



Slika 10.32 Promena dimenzija i oblika šava sa promenom prečnika elektrode [2, 4, 8]

Prečnik elektrode kojom se vrši zavarivanje ima uticaj na dimenzije i oblik šava. Povećanje prečnika elektrode, uz zadržavanje tipa električne struje, jačine struje

zavarivanja i napona električnog luka, dovodi do sužavanja šava i blagog smanjenja dubine uvarivanja (slika 10.32).

Razlog ovakvom ponašanju šava je umanjenje gustine električne struje i brže odvođenje toplote iz zone električnog luka.

Izbor obložene elektrode i primena

Osnovni metal i položaj zavarivanja su dva dominantna parametra za izbor elektroda za zavarivanje: neophodno je poznavati hemijski sastav osnovnog metala pa na osnovu njega izvršiti izbor elektrode čiji je hemijski sastav približan hemijskom sastavu osnovnog metala. Izbor elektrode bi trebao da odgovara preporukama proizvođača [8].

Izbor jačine struje treba sprovesti prema preporukama proizvođača. Jačina struje zavarivanja I_z određuje se prema izabranom prečniku elektrode d_e :

$$\begin{aligned} I_z &= 35d_e \text{ [A]}, \text{ za } d_e \leq 3,25 \text{ mm}, \\ I_z &= 45d_e \text{ [A]}, \text{ za } d_e > 4,00 \text{ mm}. \end{aligned} \quad (10).$$

Pri izradi korenog zavarivanja i provarivanja sa korene strane treba koristiti izraze:

$$\begin{aligned} I_z &= 16d_e^2 \text{ [A]}, \text{ ili} \\ I_z &= 40d_e \text{ [A]}. \end{aligned} \quad (11).$$

Navedenim izrazima se dobijaju visoke vrednosti struje koje će se primeniti za zavarivanje materijala kod kojih je neophodno postići velike dubine uvarivanja. Tada se koriste debelo obložene elektrode za koje je neophodno obezbediti velike gustine struje. Obloge su rutilne sa dodacima organskih materija ili kiselog tipa.

Treća iskustvena preporuka za izbor jačine struje pri zavarivanju ugljeničnih i niskolegiranih čelika u horizontalnom položaju glasi:

$$\begin{aligned} I_z &= (20-25)d_e \text{ za } d_e \leq 4 \text{ mm}; \\ I_z &= (35-50)d_e \text{ za } 4 \text{ mm} < d_e \leq 5 \text{ mm}; \\ I_z &= (15+6 d_e)d_e \text{ za } d_e \geq 5 \text{ mm}. \end{aligned} \quad (12).$$

Na jačinu struje, pored prečnika elektrode utiču još:

- Debljina i tip obloge elektrode;
- Debljina osnovnog materijala;
- Oblik žleba;
- Položaj zavarivanja;
- Fizičke osobine osnovnog materijala,

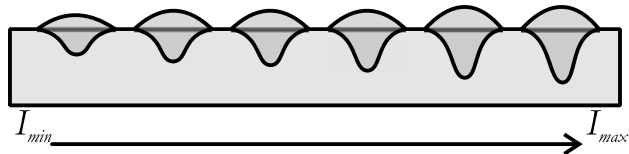
posebno elektro i toplotna provodnost, itd.

Struja zavarivanja, određena po nekoj od prethodnih jednačina, uzima se kao početna vrednost, sa kojom se isprobava zavarivanje na uzorku. Vrednost jačine struje se koriguje dok se ne dođe do odgovarajuće jačine struje.

Ukoliko se zavarivanje izvodi u vertikalnom položaju, a elektrode su sa tanjom oblogom, jačina struje se smanjuje do 20% u odnosu na jačinu struje koja bi se koristila za zavarivanje u horizontalnom položaju. Cilj smanjenja jačine struje je smanjenje zapremine rastopljenog metala u žlebu [8].

Zavarivanje sa većim vrednostima jačine struje od optimalne može dovesti do pojave rasprskavanja i pojave zajedu u metalu šava, dok zavarivanje strujom manje jačine ima za posledicu otežano uspostavljanje električnog luka, nedovoljno uvarivanje, nastanak poroznih mesta u šavu itd.

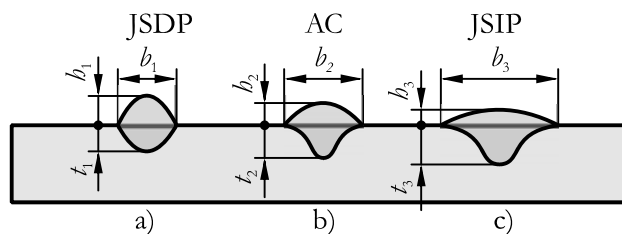
Jačina električne struje ima uticaj i na oblik i dimenzije šava. Povećanje jačine električne struje dovodi do dubljeg provara i povećanje nadvišenja uz minimalnu promenu širine šava (slika 10.33).



Slika 10.33 Promena dimenzija i oblika šava sa promenom struje zavarivanja [2, 4, 8]

Pored izbora jačine struje, u vezi čega treba poštovati preporuke proizvođača koje se obavezno navode u deklaraciji na pakovanju elektroda, neophodno je voditi računa i o preporučenoj primeni tipa struje zavarivanja. Za kisele i rutilne najčešće se koriste naizmenična ili jednosmerna struja direktne polarnosti, dok se kod bazičnih, po pravilu, koristi jednosmerna struja indirektno polarnosti.

Vrsta struje koja je primenjena za zavarivanje utiče na oblik i dimenzije šava (slika 10.33). Pogrešan izbor vrste i polariteta struje dovodi do grešaka tipa poroznosti, nestabilnog električnog luka i većeg rasprskavanja dodatnog metala.



Slika 10.34 Dubine provara ostvarene primenom različitih struja zavarivanja: b – širina šava, h – visina nadvišenja, t – dubina provara

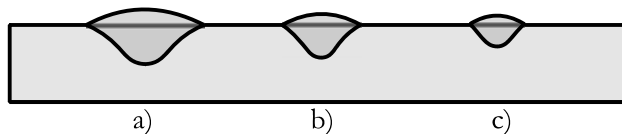
Primenom jednosmerne struje direktne polarnosti (slika 10.34, a) postižu se veće brzine zavarivanja (smanjuje se širina lica šava), manje je uvarivanje i veće je nadvišenje, pa se preporučuje za zavarivanje tankih materijala i žlebova sa većim korenim zazorom.

Primenom naizmenične struje (slika 10.34, b), uvar i nadvišenje šava imaće vrednosti između onih koje su dobijene direktnom i obrnutom polarnošću jednosmerne struje. Karakteristično je da se sve elektrode namenjene za naizmničnu struju mogu koristiti za jednosmernu, ali obrnuto ne važi uvek.

Primena jednosmerne struje obrnute polarnosti (slika 10.34, c), omogućuje postizanje najvećeg uvarivanja i najmanjeg nadvišenja lica šava.

Nadvišenje šava ima najveću vrednost pri zavarivanju jednosmernom strujom direktne polarnosti. U ovom slučaju se dobijaju najmanja širina i dubina šava.

Povećanjem brzine zavarivanja v_z , smanjuje se vreme zadržavanja električnog luka na određenom mestu te se smanjuje količina rastopljenog dodatnog i osnovnog metala. Zbog toga je šav manji (slika 10.35, c) nego pri zavarivanju preporučenom brzinom (slika 10.35, b). Ukoliko je brzina zavarivanja mala dimenzije šava rastu (slika 10.35, a).



Slika 10.35 Uticaj brzine zavarivanja na oblik šava: a) mala brzina, b) preporučena brzina, c) velika brzina

Brzina zavarivanja može da se odredi na osnovu izraza [2, 4, 8]:

$$v_z = \frac{k_e \cdot I_z}{\rho \cdot A_z} \left[\frac{\text{m}}{\text{h}} \right] \quad (13).$$

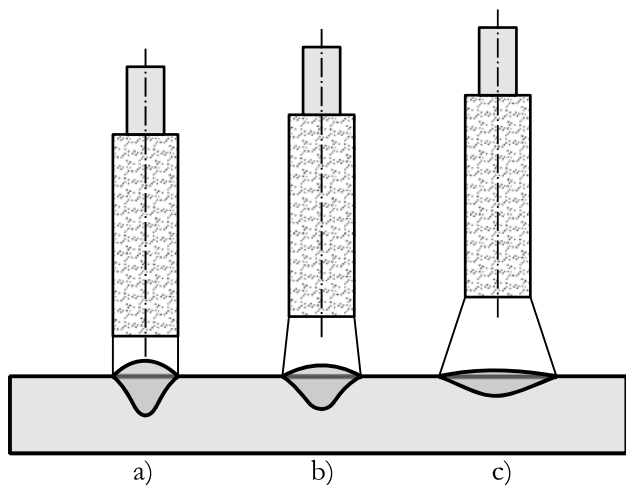
gde je: $k_e = (7-12) \cdot 10^{-3} [\text{kg}/(\text{h} \cdot \text{A})]$ – faktor topljenja, I_z – struja zavarivanja [A], ρ – gustina metala šava $[\text{kg}/\text{m}^3]$, A_z – površina zavora $[\text{m}^2]$.

Napon električnog luka U_l prvenstveno utiče na širinu šava – ona raste sa povećanjem napona, dok je uticaj na dubinu uvara i nadvišenje šava neznatan. Početna vrednost napona može da se odredi izrazom:

$$U_l = 20 + 0,04 \cdot I_z \quad (14).$$

Vrednost se kreće u malom rasponu promene: $U_l = 22 \text{ V} - 32 \text{ V}$.

Dužina električnog luka utiče na dimenzije šava, takođe.



Slika 10.36. Promena geometrije šava sa promenom dužine električnog luka: a) kratak električni luk, b) normalan električni luk, c) dugačak električni luk

Suviše kratak luk povećava pritisak na površinu tečnog kupatila i uslovljava povećanje turbulencije tečnog metala (slika 10.36, a). Zato se tečni metal razliva ka periferiji tečnog kupatila, odnosno prema nezagrejanim površinama žleba, što proizvodi loš kvalitet šava sa greškama tipa nalepljivanja i uključaka troske [34].

Predugačak luk je nestabilan i proizvodi rasprskavanje dodatnog metala (slika 10.36, c).

Na osnovu praktičnih iskustava [1, 2, 4, 8] preporučuju se sledeće dužine električnog luka (l_e):

1. Za sućeone spojeve ugljeničnih i niskolegiranih čelika:

$$l_e = (0,9-1,1) \cdot d_e \quad (15).$$

2. Za spojeve pod uglom kod ugljeničnih i niskolegiranih čelika:

$$l_e = (0,8-0,9) \cdot d_e \quad (16).$$

3. Za sućeone spojeve visokolegiranih čelika:

$$l_e = (0,8-0,9) \cdot d_e \quad (17).$$

4. Za spojeve pod uglom kod visokolegiranih čelika:

$$l_e = (0,7-0,8) \cdot d_e \quad (18).$$

Na izbor dužine luka utiče vrsta obloge elektrode. Kod kiselih i rutilnih obloga preporučuje se dužina približno jednaka prečniku elektrode, a kod baznih obloga i kod elektroda od obojenih metala preporučuje se dvostruko manja dužina, kako bi se povećala zaštita tečnog kupatila.

Pri masovnoj proizvodnji, važno je znati kolika je efikasnost elektrode i koje mere treba preduzeti da bi se efikasnost povećala. Standard SRPS EN 22401:2008: Obložene elektrode – Određivanje stepena iskorišćenja, konstante topljenja i koeficijenta deponovanja ²⁶, daje metodologiju za eksperimentalno određivanje stepena iskorišćenja elektroda pri zavarivanju [35].

Preporuke parametara zavarivanja za pojedine tipove osnovnih materijala i položaje zavarivanja, prikazane su u prilogu.

10.5.7 Prekidanje zavarivanja

Prekidanje zavarivanja vrši se u dva koraka: prvo se prekida električni luk a posle toga se elektroda odvodi iz zone zavarivanja.

Po završetku rada, stezač za elektrodu sa ostatkom elektrode se odlaže na odgovarajuće mesto i isključuje se izvor električne struje.

Posebna pažnja treba da se obrati na provodnike – po pravilu, oni su razvučeni po podu zavarivačke radionice i preko njih se prelazi bez prevelikog obzira.

²⁶ Identičan sa EN 22401:1994/AC:1994 CEN/TC 121

LITERATURA

- [1] Autorizovana predavanja na kursovima za međunarodne inženjere i tehnologe zavarivanja, Mašinski fakultet Niš, 2007-2016;
- [2] The James F. Lincoln Arc Welding: The Procedure Handbook of Arc Welding, 14th Edition, ASIN: B000FBCQ4M, 2015;
- [3] SRPS EN ISO 4063:2013 Zavarivanje i srodni postupci – Lista postupaka i njihovo označavanje, 28.01.2013;
- [4] Miomir Vukićević: Tehnologija spajanja materijala – Zavarivanje 1, ISBN 978-86-82631-73-6, Fakultet za mašinstvo i građevinarstvo u Kraljevu, 2014;
- [5] SRPS EN 60974-9:2011: Oprema za elektrolučno zavarivanje - Deo 9: Instalacija i upotreba, 30.09.2011;
- [6] SRPS EN 60974-1:2012: Oprema za elektrolučno zavarivanje – Deo 1: Izvori struje za zavarivanje, 29.11.2012;
- [7] SRPS EN 60974-6:2012: Oprema za elektrolučno zavarivanje – Deo 6: Oprema sa ograničenim radnim ciklusom, 30.03.2012;
- [8] Milorad Jovanović, Dragan Adamović, Vukić Lazić, Nada Ratković: REL zavarivanje – priručnik, YU ISBN 86-80581-69-0, Mašinski fakultet Kragujevac, Srbija, 2005;
- [9] <http://www.esab.com> (dokument preuzet 12.02.2017);
- [10] SRPS EN 50525-2-81:2011: Električni kablovi - Niskonaponski energetske kablovi naznačenih napona do i uključujući 450/750 V (U₀/U) – Deo 2-81: Kablovi za opštu primenu – Kablovi sa umreženom prekrivkom od elastomera za elektrolučno zavarivanje, 30.09.2011;
- [11] SRPS EN 50525-1:2011: Električni kablovi – Niskonaponski energetske kablovi naznačenih napona do i uključujući 450/750 V (U₀/U) – Deo 1: Opšti zahtevi, 30.09.2011;
- [12] SRPS EN 60228:2009: Provodnici izolovanih kablova, 20.05.2009;
- [13] https://en.wikipedia.org/wiki/Joule_effect (dokument pregledan 12.12.2016);
- [14] SRPS EN 60974-11:2012: Oprema za elektrolučno zavarivanje - Deo 11: Držači elektroda 30.03.2012;
- [15] SRPS EN 60974-13:2012: Oprema za elektrolučno zavarivanje – Deo 13: Sprega za zavarivanje, 30.03.2012;
- [16] Miomir Vukićević, Uređaji i pribori u zavarivanju, ISBN 978-86-82631-60-6, Mašinski fakultet Kraljevo, 2012;
- [17] <http://www.lincolnelectric.com> (grafički prikaz preuzet i retuširan tokom januara 2017);
- [18] SRPS EN ISO 544:2013: Potrošni materijal za zavarivanje – Uslovi isporuke za dodatne materijale i praškove – Vrste proizvoda, mere, tolerancije i obeležavanja, 28.01.2013;
- [19] SRPS EN ISO 14344:2012: Potrošni materijali za zavarivanje – Uputstva za nabavku dodatnih materijala i praškova, 23.05.2012;
- [20] SRPS EN ISO 2560:2011: Potrošni materijali za zavarivanje – Obložene elektrode za ručno elektrolučno zavarivanje nelegiranih i fino zrnih čelika – Klasifikacija, 30.09.2011;
- [21] SRPS EN ISO 18275:2013: Potrošni materijali za zavarivanje – Obložene elektrode za ručno elektrolučno zavarivanje čelika povišene čvrstoće – Klasifikacija, 29.11.2013;
- [22] SRPS EN ISO 3580:2012: Potrošni materijali za zavarivanje – Obložene elektrode za ručno elektrolučno zavarivanje vatropostojanih čelika – Klasifikacija, 21.06.2012;
- [23] SRPS EN ISO 3581:2017: Potrošni materijali za zavarivanje – Obložene elektrode za ručno elektrolučno zavarivanje nerđajućih i vatrootpornih čelika – Klasifikacija,

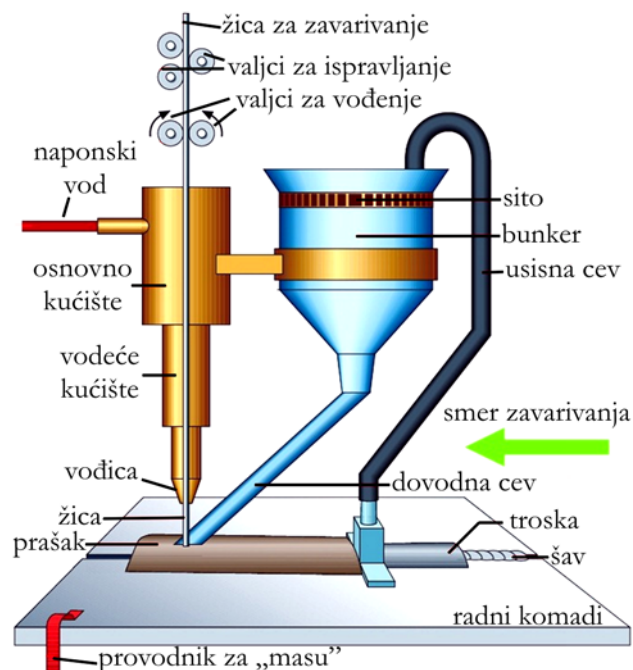
- 31.01.2017;
- [24] SRPS EN ISO 14172:2017: Potrošni materijali za zavarivanje – Obložene elektrode za ručno elektrolučno zavarivanje nikla i njegovih legura – Klasifikacija, 31.01.2017;
- [25] SRPS EN ISO 17777:2017: Potrošni materijali za zavarivanje – Obložene elektrode za ručno elektrolučno zavarivanje bakra i legura bakra – Klasifikacija, 31.01.2017;
- [26] SRPS EN ISO 1071:2017: Potrošni materijali za zavarivanje – Obložene elektrode, žice, šipke i punjene žice za zavarivanje topljenjem sivog liva – Klasifikacija, 31.01.017;
- [27] <http://sij.elektrode.si/sl/> (grafički prikazi preuzeti i retuširani januara 2017);
- [28] SRPS CEN ISO/TR 14745:2016: Zavarivanje — Parametri termičke obrade posle zavarivanja na čelicima, 22.03.2016;
- [29] SRPS EN ISO 9692-1:2014: Zavarivanje i srodni postupci – Tipovi pripreme spoja – Deo 1: Ručno elektrolučno zavarivanje topivom elektrodom, elektrolučno zavarivanje topivom elektrodom u zaštitnom gasu, gasno zavarivanje, TIG zavarivanje i zavarivanje čelika snopom, 29.08.2014;
- [30] SRPS EN 1708-1:2013: Zavarivanje – Osnovni detalji zavarenih čeličnih spojeva – Deo 1: Komponente pod pritiskom, 28.01.2013;
- [31] SRPS EN 1708-2:2008: Zavarivanje – Osnovni detalji zavarenih čeličnih spojeva - Deo 2: Komponente bez unutrašnjeg pritiska, 27.02.2008;
- [32] SRPS EN 1708-3:2012: Zavarivanje – Osnovni detalji zavarenih čeličnih spojeva – Deo 3: Komponente pod pritiskom sa plakaturom, puferom i sa prevlakom (trakama), 21.06.2012;
- [33] SRPS EN ISO 13916:2013: Zavarivanje – Uputstvo za merenje temperature predgrevanja, međuprolazne temperature i temperature održavanja predgrevanja, 28.01.2013;
- [34] SRPS EN ISO 5817:2008: Zavarivanje – Zavareni spojevi topljenjem na čeliku, niklu, titanu i njihovim legurama (ne obuhvata zavarivanje snopom) – Nivoi kvaliteta nepravilnosti, 30.09.2015;
- [35] SRPS EN 22401:2008: Obložene elektrode – Određivanje stepena iskorišćenja, konstante topljenja i koeficijenta deponovanja, 28.07.2008;
- [36] C. Hasse, W. Reitze: Elektrolučno zavarivanje – priručnik, Građevinska knjiga, Beograd, 1982;
- [37] SRPS EN 169:2008: Lična zaštita očiju – Filtri za zavarivanje i srodne tehnike - Zahtevi u pogledu koeficijenta transmisije i preporučena upotreba, 21.01.2008;
- [38] SRPS EN 170:2008: Lična zaštita očiju – Filtri za ultraljubičasto zračenje – Zahtevi u pogledu koeficijenta i preporučena upotreba, 27.02.2008;
- [39] SRPS EN 171:2008: Lična zaštita očiju – Filtri za infracrveno zračenje – Zahtevi u pogledu koeficijenta transmisije i preporučena upotreba, 27.02.2008;
- [40] SRPS EN 175:2008: Lična zaštita – Oprema za zaštitu očiju i lica tokom zavarivanja i srodnih postupaka, 21.01.2008;
- [41] SRPS EN 379:2011: Lična zaštita očiju - Automatski filtri za zavarivanje, 28.11.2011;
- [42] SRPS EN ISO 11611:2016: Zaštitna odeća koja se upotrebljava prilikom zavarivanja i srodnih procesa, 29.02.2016;
- [43] SRPS EN 12477:2007: Zaštitne rukavice za zavarivače, 25.07.2007;
- [44] SRPS EN ISO 10882-1:2012: Zdravlje i bezbednost pri zavarivanju i srodnim postupcima – Uzorkovanje čestica i gasova iz vazduha u zoni disanja operatera – Deo 1: Uzorkovanje čestica iz vazduha, 23.05.2012;
- [45] SRPS EN ISO 10882-2:2008: Zdravlje i bezbednost pri zavarivanju i srodnim postupcima – Uzorkovanje čestica i gasova iz vazduha u zoni disanja operatera – Deo 2: Uzorkovanje gasova, 09.09.2008.

11 ELEKTROLUČNI POSTUPAK ZAVARIVANJA POD PRAŠKOM

Elektrolučni postupak zavarivanja pod praškom je najproduktivniji elektrolučni postupak zavarivanja kojim je moguće zavarivati delove velikih debljina brzinama koje su višestruko veće nego brzine kod ostalih elektrolučnih postupaka zavarivanja. Ovaj postupak je osnova spajanja masivnih delova u teškoj industriji [1].

11.1 Osnovni principi postupka

Postupak elektrolučnog zavarivanja pod praškom¹ zasniva se na topljenju elektrodne žice usled dejstva električnog luka ispod sloja praška, koji čini ovaj postupak jedinstvenim u odnosu na druge elektrolučne postupke [1]. Prašak predstavlja zaštitu zone zavarivanja i omogućava primenu velikih jačina struje pa samim tim i veliku proizvodnost.



Slika 11.1 Šematski prikaz opreme i radnog mesta za elektrolučni postupak zavarivanja pod praškom [2]

Šematski prikaz postupka prikazan je na slici 11.1.

Zaštitni prašak se iz bunkera dovodi u zonu zavarivanja sistemom cevi, i popunjava žleb za zavarivanje (a nadvišava osnovni metal). Nakon toga se pištoljem za zavarivanje u žleb ispunjen praškom uvodi topiva elektrodna žica. Kako je elektrodna žica povezana sa jednim polom izvora struje a osnovni metal sa drugim polom izvora struje, između elektrodne žice i osnovnog metala se, pod praškom, uspostavlja električni luk. Uspostavljeni električni luk topi dodatni materijal (elektrodnu žicu) i deo osnovnog materijala, isto kao i kod ostalih elektrolučnih postupaka zavarivanja. Međutim, u ovom slučaju električni luk topi i jedan deo praška koji se nalazi u žlebu oko elektrodne žice, te metal šava nastaje mešanjem istopljenog dodatnog metala, dela osnovnog metala i dela rastopine praška [1]. Deo rastopljenog praška ne učestvuje u formiranju metala šava (a sačinjen je uglavnom od nemetalnih jedinjenja, produkata sagorevanja, masnoća i nečistoća) i isplivava na površinu tečnog kupatila i formira trosku. Deo praška sagoreva usled toplotnog dejstva električnog luka a kao produkti sagorevanja nastaju ugljendioksid i čvrsti (mineralni) produkti sagorevanja.

Prisustvo praška i troske u zoni zavarivanja EPP postupkom, pri optimalnim parametrima zavarivanja, u potpunosti sakriva električni luk i njegovo svetlosno dejstvo.

Na dovoljnoj udaljenosti iza zone zavarivanja, sistemom cevi i sisaljkom se usisava višak praška koji je ostao u žlebu. Usisani prašak se po potrebi melje, prosejava i vraća nazad u bunker. Taj prašak se ponovo koristi za zavarivanje.

Po uklanjanju praška, na licu šava postaje vidljiva (očvrsla) troska.

Neistopljeni deo praška u žlebu (zajedno sa troskom) deluje kao zaštita od uticaja gasova i vlage iz atmosfere, ali i kao toplotni

¹ Poznat kao EPP postupak zavarivanja (elektrolučno pod praškom).

izolator. Preostali prašak fizički sprečava prisustvo nečistoća i gasova u zoni zavarivanja, pa je prema tome, prašak u svim varijantama povoljan za zavareni spoj. Ugljendioksid koji se dobija sagorevanjem praška se ponaša kao zaštita (aktivni zaštitni gas), takođe. [3].

Troska je izolator koji sprečava brzo hlađenje zavarenog šava i stvaranje sitnozrnih struktura koje su tvrde i krte. Troska, takođe, ima ulogu stabilizatora električnog luka (snižava energiju jonizacije vazduha u okolini elektrodne žice) a može da utiče na metal šava – hemijske reakcije različitih jedinjenja i elementa iz troske sa nečistoćama u metalu šava ga „čiste” a metali koji se mešaju sa metalom šava ga legiraju [1, 3].

EPP postupak je najčešće mehanizovan ili automatizovan, postoje i robotizovana izvođenja, postoje i ručna izvođenja ali su ona najređa u praktičnoj industrijskoj praksi. Postupak se primenjuje za spajanje čelika ili nikla većih debljina u horizontalnom ili koritastom položaju. Dve važne osobenosti postupka su da se zavarivanje gotovo uvek vrši sa bakarnom podložnom pločicom na korenoj strani i moguće je zavarivanje sa jednom ili više žica istovremeno (povećani depozit materijala) [1, 3, 4].

11.2 Klasifikacija i podela postupka

Elektrolučni postupci zavarivanja pod praškom su standardizovani i klasifikovani prema ISO 4063 kao grupa 12 (ISO 4063 — 12). Standardizovani postupci iz ove grupe postupaka su [5]:

ISO 4063 — 121 — Elektrolučni postupak zavarivanja žičanom elektrodom pod praškom,

ISO 4063 — 122 — Elektrolučni postupak zavarivanja trakastom elektrodom pod praškom,

ISO 4063 — 124 — Elektrolučni postupak zavarivanja pod praškom uz dodatak metalnog praha,

ISO 4063 — 125 — Elektrolučni

postupak zavarivanja punjenom žicom pod praškom,

ISO 4063 — 126 — Elektrolučni postupak zavarivanja punjenom trakastom elektrodom pod praškom.

11.3 Osnovna oprema za zavarivanje

Osnovnu opremu za zavarivanje EPP postupkom čine sistem za upravljanje, izvor električne struje za zavarivanje, pištolj za zavarivanje, sistem za snabdevanje dodatnim materijalom, sistem za snabdevanje potrošnim materijalom (praškom) i sistem za stabilizaciju i pozicioniranje radnih komada. Jedan takav sistem je prikazan na slici 11.2.



Slika 11.2 Tipičan EPP uređaj za zavarivanje [6]

Čitav sistem za zavarivanje je postavljen na kolica sa točkovima (traktor za zavarivanje) koja se kreću duž linije spajanja te uređaj za zavarivanje vrši samo zavarivanje. Brzina kretanja kolica je sinhronizovana sa brzinom topljenja materijala, odnosno, sa brzinom zavarivanja. Izvor električne struje se ne postavlja na traktor za zavarivanje – zbog svojih dimenzija i glomaznosti, već je on stacionaran a veza između kolica (opreme na kolicima) i izvora je ostvarena odgovarajućim provodnicima.

11.3.1 Sistem za upravljanje

Sistem za upravljanje ima zadatak da koordinira radom ostalih sistema i delova na uređaju za zavarivanje EPP postupkom kako

bi se dobili željeni rezultati zavarivanja. Prema načinu regulacije, razlikuju se dva tipa uređaja [14]:

- Uređaji sa regulacijom brzine dodavanja elektrodne žice i
- Uređaji sa konstantnom brzinom dodavanja žice.

Tipičan sistem za upravljanje EPP postupkom zavarivanja prikazan je na slici 11.3



Slika 11.3 Kontrolni panel sistema za upravljanje

Uređaji sa regulacijom brzine podešavaju rad uređaja prema naponu električnog luka, odnosno, prema dužini električnog luka. Ukoliko se smanji dužina luka, uređaj smanjuje brzinu dodavanja elektrodne žice, usled čega se povećavaju dužina i napon električnog luka.

Kod uređaja sa konstantnom brzinom dodavanja elektrodne žice, elektrodna žica se ravnomerno dovodi u zonu zavarivanja, odnosno, brzina dovodenja žice jednaka je brzini topljenja elektrodne žice i ne zavisi od napona (dužine) električnog luka. Brzina topljenja žice se menja u zavisnosti od promene dužine električnog luka, čime se postiže efekat samoregulacije procesa. Efikasnost tako dobijene samoregulacije zavisi od jačine struje i brzine dodavanja žice – što je veća jačina električne struje, efekat samoregulacije je dominantniji i nikakav vid druge regulacije procesa nije potreban [1, 3, 4].

Sistem za upravljanje kontroliše čovek ili čovek uz asistenciju računara.

11.3.2 Izvori električne struje, karakteristike izvora električne struje

Izvor struje za EPP postupke zavarivanja mora da bude prilagođen dugotrajnom radu što podrazumeva veliku jačinu struje i 100% radni ciklus. Uobičajeni opseg jačine struje za zavarivanje je $I_z=400\text{ A}$ -1500 A, elektrodnom žicom prečnika $d_e=1,6\text{ mm}$ -6 mm, mada su u upotrebi i struje znatno veće jačine (npr. 4000 A pri 55 V elektrodnom žicom prečnika 6 mm ili više) ali i struje manje jačine (npr. 150 A pri 18 V, elektrodnom žicom prečnika 1,6 mm). Napon električnog luka se kreće do $U_{el}=80\text{ V}$ (odnosno 120 V u pojedinim izvođenjima) [1, 3, 4].

Kod EPP postupaka zavarivanja se koristi jednosmerna struja strmoopadajuće ili blagoopadajuće karakteristike, ali se koristi i naizmenična struja blagoopadajuće karakteristike.

Primena strmoopadajuće karakteristike zahteva pažljivo praćenje dužine električnog luka i njegovo održavanje u što užim granicama, jer kod takvih izvora struje nema efekta samoregulacije kao kod uređaja sa blagoopadajućom karakteristikom. Regulacija dužine luka se postiže automatskim podešavanjem brzine dovodenja žice koja se povećava ako se poveća dužina ili napon električnog luka (pri čemu važi i obrnuto) [1].

Kod primene blagoopadajuće karakteristike koristi se efekat samoregulacije (koji je povoljniji sa aspekta primene) jer je reakcija električnog luka na promenu napona gotovo trenutna (zbog velike promene jačine struje i brzine topljenja elektrodne žice). Treba imati u vidu da je ova prednost blagoopadajuće karakteristike izraženija kod predmeta manje debljine [1].

Druga prednost blagoopadajuće karakteristike je struja kratkog spoja, koja je znatno veća nego kod strmoopadajuće karakteristike, što olakšava uspostavljanje električnog luka.

U slučaju primene naizmenične struje obavezno se koristi izvor električne struje sa blagoopadajućom karakteristikom jer je

električni luk nestabilniji (sam po sebi), pa bi dodatna nestabilnost usled inercije pri regulaciji kod strmoopadajuće karakteristike bila neprihvatljiva. Naizmjenična struja zahteva viši napon praznog hoda (po pravilu ne niže od 80 V), takođe zbog smanjene stabilnosti luka. Prednost naizmjenične struje je u manjem skretanju električnog luka, tako da je pogodna za veće intenzitete struje, npr. preko 900 A, kao i za zavarivanje sa više elektrodnih žica istovremeno. Za zavarivanje se koriste i naizmjenične struje kvadratnog oblika [1].

Pri zavarivanju jednosmernom strujom se bolje kontroliše oblik i veličina metala šava, a uspostavljanje električnog luka je mnogo lakše, što posebno važi za primenu jednosmernih struja indirektna polarnosti (JSIP). Primena jednosmerne struje direktna polarnosti (JSDP) daje najveće brzine topljenja dodatnog metala, ali i manju dubinu uvarivanja (20% do 25% manju u odnosu na JSIP), pa dolazi u obzir za zavarivanje tanjih limova [1].



Slika 11.4 Sistem zavarivanja sa dve elektrodne žice

Za zavarivanje sa više elektrodnih žica (slika 11.4) može da se koristi jedan izvor struje na koji se žice povezuju paralelno ili serijski, ili više izvora struje, od kojih je po pravilu onaj za prednju žicu sa jednosmernom strujom, a onaj za zadnju žicu sa naizmjeničnom. Druga varijanta je da su oba izvora sa naizmjeničnom strujom i oba izvora moraju da imaju podesivu kontrolu faznog pomeraja električne struje.

U teoriji je moguće zavarivanje sa više elektrodnih žica ali se najčešće vrši zavarivanje sa jednom ili dve žice.

Izvori struje za EPP postupak zavarivanja moraju da ispunjavaju zahteve date u standardu SRPS EN 60974-1:2012: Oprema za elektrolučno zavarivanje – Deo 1: Izvori struje za zavarivanje² [7].

11.3.3 Pištolj za zavarivanje

Pištolji za zavarivanje mogu biti za ručnu ili za mehanizovanu primenu.

Ručni pištolji za EPP postupak su slični pištoljima za MIG/MAG postupke zavarivanja: osnovni delovi su mlaznica, rukohvat sa prekidačem, masivno telo i veza sa poliprovodnikom (slika 11.5).



Slika 11.5 Ručni pištolj za EPP

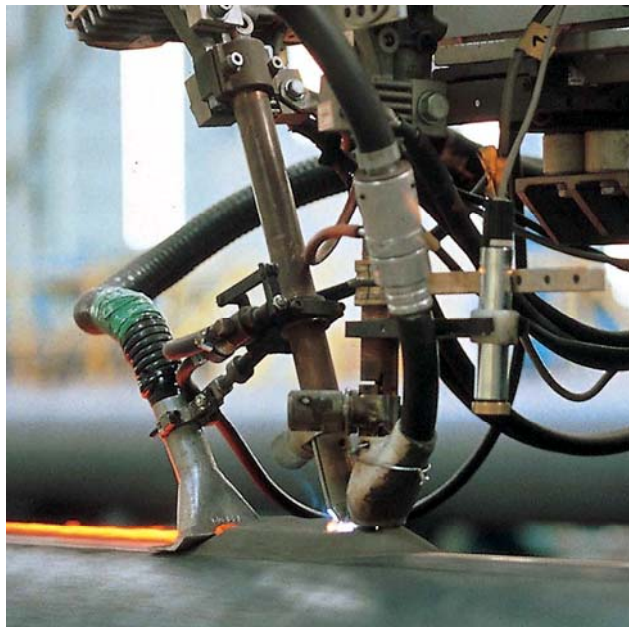
Mlaznica pištolja je najčešće od bakra ili keramike i mora da bude otporna na visoke temperature i habanje (do koga dolazi usled dejstva električnog luka i mehaničkog-abrazivnog dejstva praška). Mlaznica je povezana sa vođicom kroz koju prolazi dodatni materijal (elektrodna žica) i zajedno su prikačeni na rukohvat [8]. Rukohvat sa prekidačem je najčešće napravljen od plastike i metala, i mora da bude otporan na grube režime rada ali i lagan. Na rukohvat se povezuje poliprovodnik kroz koji idu vodovi za elektrodnu žicu, električnu struju i, ukoliko postoji hlađenje pištolja, vodovi za rashladnu vodu [1, 3, 4].

Pištolji za ručno izvođenje EPP postupka nisu masivni i predviđeni su za manje debljine osnovnog metala.

Pištolji koji se koriste za mehanizovano EPP zavarivanje su jednostavnije konstrukcije od ručnih pištolja: sastoje se samo od mlaznice i vođice za elektrodnu žicu. Vođica

² Identičan sa EN 60974-1:2012 CLC/TC 26A.

je, u ovom slučaju, masivnija nego vođica kod ručnih pištolja i ima dodatne parove valjaka za vođenje i ispravljanje elektrodne žice. Mlaznica je istovetna mlaznici za ručni pištolj, ali je saglasno većim jačinama struje, masivnija od mlaznice za ručni pištolj.



Slika 11.6 Pištolj za mehanizovano EPP zavarivanje sa dovodom/odvodom praška

Na pištolju za mehanizovani EPP ne postoji rukohvat ili prekidač za aktiviranje zavarivanja ali postoje nosači i vođice pomoću kojih se pištolj pričvršćava na glavu za zavarivanje (slika 11.6).

Upravljanje pištoljem za mehanizovano zavarivanje se vrši „od spolja” – preko upravljačke jedinice.

11.3.4 Sistem za snabdevanje dodatnim materijalom

Sistem za snabdevanje dodatnim materijalom se sastoji od kotura sa žicom (ili kućišta za elektrodnu žicu), pogonskog sistema, valjaka za ispravljanje elektrodne žice i valjaka za vođenje žice (slika 11.7).

Osnovna funkcija sistema je da odmota elektrodnu žicu sa kalema, ispravi je i dovede kroz pištolj do zone zavarivanja.

Sistem za dovođenje elektrodne žice je gurajući (eng. *push*), vučni (eng. *pull*) ili kombinovani (eng. *push and pull*).



Slika 11.7 Tipičan sistem za dovođenje EPP žice sa bunkerom za prašak: 1) zavrtanj za podešavanje brzine dotura žice, 2) ispravljač elektrodne žice, 3) nosač mehanizma, 4) električni osigurač, 5) električni priključak, 6) naponski kabel, 7) motor, 8) valjak za vođenje, 9) senzor, 10) bunker za prašak, 11) električni priključak ventila za regulisanje dotura praška [9]

Mehanizmi za dodavanje žice treba da ispunjavaju zahteve propisane standardom SRPS EN 60974-5:2014: Oprema za elektro-lučno zavarivanje – Deo 5: Dodavači žice³ [10].

11.3.5 Sistem za snabdevanje potrošnim materijalom (praškom)

Sistem za snabdevanje uređaja za zavarivanje praškom se sastoji od skladišta (bunkera) sa praškom, sita za prosejavanje praška od grubih nečistoća, dovodne i usisne (odvodne) cevi (slika 11.1).

³ Ovaj standard je identičan sa EN 60974-5:2013.

Dovod praška je najčešće gravitacioni (slobodnim padom iz bunkera) dok se odvođenje praška iz zone zavarivanja vrši vakuumom (usisivač) ili mehanički (rotacionim metlicama) [10].

Ceo sistem je veoma robustan i retko dolazi do pojave kvarova.

11.3.6 Sistem za stabilizaciju i pozicioniranje radnih komada

Sistem za stabilizaciju i pozicioniranje radnih komada ne predstavlja obavezni deo sistema za zavarivanje EPP postupkom. Ovaj sistem čine hvataljke, držači, okretači i sl [11].

11.4 Dodatni i potrošni materijali

Zavarivanje EPP postupkom vrši se topljenjem elektrodne žice u sredini okruženoj praškom. Elektrodna žica predstavlja dodatni materijal dok prašak predstavlja potrošni materijal. U nekim slučajevima se, uz elektrodnu žicu, kao dodatni materijal koristi i metalni prah.

11.4.1 Elektrodne žice

Elektrodna žica za zavarivanje može da bude cilindričnog (žica, slika 11.8) ili pljosnatog oblika (traka, slika 11.9). Ni jedne ni druge elektrodne žice za EPP ne zahtevaju prethodno sušenje pre upotrebe [2].



Slika 11.8 Elektrodna žica za EPP namotana na kotur

Elektrodne žice se najčešće proizvode sa prečnicima 0,8 mm; 1,0 mm; 1,2 mm; 1,6 mm; 2,0 mm; 2,4 mm; 3,2 mm; 4,0 mm; 5,0 mm; 6,0 mm itd, i pakuju se na koturovima mase 15 kg do 120 kg.

Elektrodna traka se na tržištu prodaje u pakovanjima od 170 kg do 700 kg pri čemu je traka širine 20 mm, 30 mm, 60 mm, 90 mm ili 120 mm a najčešće se koriste debljine trake 0,4 mm ili 0,5 mm. Ona se odlikuje većom produktivnošću u odnosu na elektrodne žice.



Slika 11.9 Elektrodna traka za EPP

Elektrodne žice mogu biti pune i punjene a pune žice su klasifikovane prema vrsti osnovnog metala:

- SRPS EN ISO 14171:2017: Potrošni materijali za zavarivanje – Pune žičane elektrode, puna elektrodna žica i kombinacije elektroda/prašak za elektrolučno zavarivanje pod praškom nelegiranih i sitnozrnih čelika – Klasifikacija⁴ [12],
- SRPS EN ISO 26304:2013: Potrošni materijali za zavarivanje – Pune elektrodne žice, cevaste punjene žice i kombinacije žica – prašak za EPP zavarivanje čelika povišene čvrstoće – Klasifikacija⁵ [13],
- SRPS EN ISO 24598:2013: Potrošni materijali za zavarivanje – Pune žice, punjene žice i kombinacije elektrode/praška za zavarivanje pod praškom čelika otpornih na puzanje – Klasifikacija⁶ [14],
- SRPS EN ISO 14343:2011: Potrošni

⁴ Identičan sa: ISO 14171:2016 ISO/TC 44/SC 3.

⁵ Identičan sa: EN ISO 26304:2011 CEN/TC 121.

⁶ Identičan sa: EN ISO 24598:2012 CEN/TC 121.

materijali za zavarivanje – Elektrode žice, elektrodne trake, žice i šipke za elektrolučno zavarivanje nerđajućih i vatrootpornih čelika – Klasifikacija⁷ [15],

- SRPS EN ISO 18274:2012: Potrošni materijali za zavarivanje – Pune žičane i pune trakaste elektrode, pune žice i pune šipke za zavarivanje topljenjem nikla i legura nikla – Klasifikacija⁸ [16].

Uslovi isporuke

Žice za zavarivanje moraju da se isporuče korisniku tako da zadovoljavaju uslove definisane standardima SRPS EN ISO 544:2013: Potrošni materijal za zavarivanje – Uslovi isporuke za dodatne materijale i praškove – Vrste proizvoda, mere, tolerancije i obeležavanja⁹ [17] i SRPS EN ISO 14344:2012: Potrošni materijali za zavarivanje – Uputstva za nabavku dodatnih materijala i praškova¹⁰ [18].

11.4.2 Prašak za zavarivanje

Prašak za zavarivanje je osnovni potrošni materijal pri zavarivanju EPP postupkom (slika 11.10).



Slika 11.10 Prašak za EPP

Koriste se različite smeše praškova, različitih granulacija. Praškovi se pakuju i čuvaju u džakovima.

Praškovima koji se koriste za zavarivanje

EPP postupcima su definisani standardom SRPS EN ISO 14174:2012 – Potrošni materijali za zavarivanje – Topitelji¹¹ za elektrolučno zavarivanje pod praškom i pod troskom – Klasifikacija¹². Praškovi za zavarivanje su granulacije od 0,2 mm do 2,6 mm i svrstani su u klase [19]:

Klasa 1 – ovi praškovi su namenjeni za zavarivanje nelegiranih, fino-zrnih, visokolegiranih čelika, kao i za čelike otporne na puzanje; jedini legirajući elementi su Mn i Si; primenjuju se i za zavarivanje ali je moguće i navarivanje; koriste se za zavarivanje u jednom ili više prolaza;

Klasa 2 – ovi praškovi su namenjeni za zavarivanje nerđajućih i vatrootpornih čelika, nikla i njegovih legura; koriste se za zavarivanje i navarivanje, u jednom ili više prolaza;

Klasa 3 – ovi praškovi su namenjeni za zavarivanje svih čelika koji trpe zamorno naprezanje, pojačao habanje i trenje; legirajući elementi u praškovima su C, Cr i Mo;

Klasa 4 – ovi praškovi su namenjeni samo za pojedine nerđajuće čelike i legure nikla.

11.4.3 Funkcije praška i žice

Funkcija praška za zavarivanje EPP postupkom je višestruka: zaštitna, legirajuća i stabilizirajuća [2].

Prašak u žlebu predstavlja zaštitu električnog luka od uticaja sredine u kojoj se vrši zavarivanje i snižava potencijal jonizacije vazduha oko elektrodne žice, što olakšava paljenje i gorenje električnog luka. Samim tim, električni luk je stabilniji, lakše se održava i gori sa projektovanim parametrima zavarivanja. Istopljeni deo praška se pretvara u (tečnu) trosku koja pliva po površini metala šava i sprečava prodor gasova iz vazduha u tečno kupatilo metala šava, a samim tim, sprečava se nastajanje jedinjenja koja mogu

⁷ Identičan sa: EN ISO 14343:2009 CEN/TC 121.

⁸ Identičan sa: EN ISO 18274:2010 CEN/TC 121.

⁹ Identičan sa: EN ISO 544:2011 CEN/TC 121.

¹⁰ Identičan sa: EN ISO 14344:2010 CEN/TC 121.

¹¹ Većina SRPS EN ISO standarda je dobijena prevođenjem EN i/ili ISO standarda. Naziv „topitelji” u navedenom standardu je nespretno prevođenje engleskog pojma *flux*. Odgovarajući prevod, u ovom slučaju, bio bi prašak (prah), odnosno, praškovi (mišljenje autora).

¹² Identičan sa: EN ISO 14174:2012 CEN/TC 121.

biti štetna po metal šava. Takođe, troska predstavlja toplotni izolator koji sprečava brzo i nesmetano hlađenje metala šava i tako sprečava nastajanje sitnozrnih, tvrdih i veoma krutih metalurških struktura u metalu šava. Pojedini metali i jedinjenja iz rastopljene troske se mešaju sa metalom šava, legiraju ga i poboljšavaju njegove mehaničke osobine.

Izbor odgovarajućeg praška je podjednako važan kao i izbor dodatnog materijala.

11.4.4 Tipovi praškova i žica

Prema karakteru troske koja nastaje tokom zavarivanja, praškovi se dele na kisele, bazične i neutralne [1]. Prašak je bazični ukoliko njegovi oksidi lako disociraju u metalni katjon i oksidni anjon, dok je prašak kod kog je navedena reakcija slabog intenziteta – kiseli prašak. Neutralni prašak je onaj koji ima mali uticaj na legirajuće elemente u metalu šava.

Prema stepenu legiranja metala šava, praškovi se dele na pasivne (koji ne legiraju metal šava) i aktivne (koji legiraju metal šava).

11.4.5 Proizvodnja i podela potrošnih materijala prema načinu proizvodnje (način dobijanja, tipični defekti)

Prema načinu proizvodnje, standardizovani praškovi za EPP postupak zavarivanja se dele na: topljene (I), aglomerisane (A) i mešane (M), a susreću se i sinterovani praškovi (S) [1, 20].

Topljeni praškovi se dobijaju mlevenjem odgovarajućih mineralnih sirovina i mešanjem u suvom stanju, uz naknadno topljenje u elektro pećima, očvršćavanje rastopine (hlađenje) u kalupima i naknadno usitnjavanje (drobljenje) na potrebnu veličinu zrna. Ovako dobijeni praškovi su veoma homogeni, odlikuju se malom higroskopnošću, i moguća je ponovna upotreba istog praška jer ne dolazi do velike promene veličine zrna i promene sastava praška posle zavarivanja. Osnovni nedostatak topljenih praškova predstavljaju teškoće pri dodavanju dezoksikatora i fero-

legura u rastopinu (usled visoke temperature topljenja osnovnih sirovina 1500°C do 1700°C) [4].

Agglomerisani praškovi nastaju suvim mešanjem mineralnih sirovina uz dodatak vezivnog materijala (najčešće je to keramika). Nakon mešanja, vrši se zagrevanje praška radi aglomeracije. Zagrevanje se vrši do temperature od 1400°C (što otežava dodavanje dezoksikatora i fero-legura u prašak radi poboljšanja legirajućih svojstava praška).

Mešani praškovi nastaju prostim mešanjem različitih topljenih ili aglomerisanih praškova u odnosu koji definiše proizvođač.

Sinterovani praškovi se proizvode suvim mešanjem samlevenih sirovina do dimenzija praha. Prahu se dodaju silikati a potom se vrši vlaženje smeše. Od vlažne mešavine prave se kuglice koje se suše na temperaturama do 800°C a potom melju i prosejavaju da bi se dobili praškovi različitih granulacija. Sinterovanim praškovima se dodaju dezoksidatori i legirajući elementi [1, 4, 20].

11.4.6 Korišćenje i skladištenje potrošnih materijala (uslovi skladištenja, naknadno sušenje)

Prašak mora da bude rastresit da bi se slobodno transportovao sistemom za zavarivanje. Veličina zrna praška mora da bude uniformna za različita pakovanja istog praška ali moraju postojati različite granulacije praška istog hemijskog i fizičkog sastava.

Prašak se korisniku isporučuje upakovan. Pakovanje praška mora da bude dovoljno čvrsto i robusno kako bi sprečilo oštećenje praška ali i zagađenje praška nečistoćama ili vlagom.

Kada postoji slovo H u oznaci praška, proizvođač praška mora da naznači da li je maksimalni nivo vodonika (koji ostaje u metalu šava posle upotrebe navedenog praška) 15 ml, 10 ml ili 5 ml na 100 g deponovanog metala, pri naznačenom tipu električne struje koja se koristi, pri naznačenom naponu električnog luka i uz upotrebu naznačenog tipa elektrodne žice [21].

Ukoliko je neophodno, prašak za

zavarivanje EPP postupkom se suši radi ostvarenja projektovanog maksimalnog nivoa udela vodonika u metalu šava [21]. Preporuke za sušenje praška nalaze se na pakovanju praška ili u pratećoj dokumentaciji. Najčešće preporuke za sušenje praška su sušenje 2 h na temperaturi od $250 \pm 50^\circ\text{C}$ za topljeni prašak i sušenje 2 h na temperaturi od $350 \pm 50^\circ\text{C}$ za aglomerisani prašak [22].

Ukoliko je neophodno da se ostvari vrlo nizak nivo vodonika u metalu šava (ispod 5 ml H_2 /100 g deponovanog metala), potrebno je da se konsultuje proizvođač praška radi definisanja posebnih uslova skladištenja, sušenja i upotrebe praška [21, 22].

11.5 Tehnologija zavarivanja

Tehnologija zavarivanja postupcima iz grupe ISO 4063 — 12 obuhvata aktivnosti koje se mogu podeliti na:

- pripremne aktivnosti, odnosno, aktivnosti koje treba sprovesti pre početka zavarivanja,
- tekuće aktivnosti, odnosno, aktivnosti koje treba sprovesti u toku zavarivanja i
- završne aktivnosti, odnosno, aktivnosti koje treba sprovesti nakon završenog zavarivanja.

Pripremne aktivnosti treba da pripreme realizaciju samog čina zavarivanja: vrši se projektovanje tehnologije zavarivanja, definiše se postupak zavarivanja, određuju se parametri zavarivanja, biraju dodatni i potrošni materijali, priprema se osnovni metal — vrši se čišćenje, ispravljanje, stezanje, izrađuje se žleb itd.

Tekuće aktivnosti u toku zavarivanja obuhvataju realizaciju samog zavarivanja: upoznavanje radnika sa aktivnostima koje treba realizovati, zatim sa tehničkom dokumentacijom, potrebna je provera električne instalacije, podešavanje parametara zavarivanja, zavarivanje ranije definisanom tehnikom, međuprolazno čišćenje i ispravljanje (ako je potrebno); zatim kontrolu tokom zavarivanja, obezbeđenje instalacije i uređaja za zavarivanje, odlaganje opreme i, po

potrebi, vrši se održavanje propisanih termičkih/toplotnih režima osnovnog, dodatnog i potrošnih materijala.

Završne aktivnosti obuhvataju sve aktivnosti kojima se zavareni spoj dovodi u realizovano stanje: kontrola, čišćenje, brušenje, površinska zaštita, ispravljanje/uklanjanje deformacija, termička obrada, demontaža i uklanjanje zavarenih delova sa radnog mesta (ukoliko je to potrebno i moguće) itd.

Međutim, pod pojmom „tehnologija zavarivanja” na nivou radnog mesta (radionice i terena) podrazumevaju se aktivnosti kojima se definiše i realizuje zavarivanje delova.

11.5.1 Priprema osnovnog materijala za zavarivanje

Priprema materijala za zavarivanje obuhvata sledeće aktivnosti:

- čišćenje ivica i površina delova koje se zavaruju (uklanjanje boje, korozije, oksida, masti, prljavštine i sl.);
- priprema žleba za zavarivanje (ako je potrebno);
- postavljanje delova u položaj za zavarivanje i učvršćivanje kako bi se sprečilo pomeranje tokom zavarivanja;
- pozicioniranje mašine/uređaja za zavarivanje u položaj;
- izrada pripoja („heftanje”) na odgovarajućim mestima, prema utvrđenom planu realizacije;
- po potrebi, predgrevanje materijala radi poboljšanja zavarivosti, sprečavanja nastanka krtih faza u ZUT-u itd.

Čišćenje ivica i površina

Nečistoće (masnoće, boja, lakovi, korozija itd.) na površinama koje se zavaruju su potencijalni izvori čestica koje mogu da prodru u tečno kupatilo i ostanu zarobljene kao uključci. Masnoće, boje i lakovi, koji sagorevaju pri zavarivanju, mogu da formiraju kancerogena isparenja pa mogu da utiču na zdravlje ljudi.

Priprema žlebova

Priprema žlebova je obavezna aktivnost koja mora da se sprovede pri realizaciji

tehnologije zavarivanja. Standard SRPS EN ISO 9692-2:2008: Zavarivanje i srodni postupci – Priprema spoja – Deo 2: Elektrolučno zavarivanje čelika pod praškom¹³ daje preporuke za pripremu žlebova za zavarivanje EPP postupkom [23].

U upotrebi su i stariji EN standardi koji su proistekli iz nemačkih DIN standarda. Oni ne propisuju, ne zahtevaju standardizaciju spojeva niti sužavaju izbor mogućih rešenja pri izradi spojeva, već prikazuju primere realizovanih spojeva koji uspešno funkcionišu na tehničkim sistemima:

- SRPS EN 1708-1:2013: Zavarivanje – Osnovni detalji zavarenih čeličnih spojeva – Deo 1: Komponente pod pritiskom¹⁴ [24],
- SRPS EN 1708-2:2008: Zavarivanje – Osnovni detalji zavarenih čeličnih spojeva – Deo 2: Komponente bez unutrašnjeg pritiska¹⁵ [25] i
- SRPS EN 1708-3:2012: Zavarivanje – Osnovni detalji zavarenih čeličnih spojeva – Deo 3: Komponente pod pritiskom sa plakaturom, puferom i sa prevlakom (trakama)¹⁶ [26].

U prilogu su dati detalji vezani za pripremu žleba za ISO 4063 — 12 postupke zavarivanja.

Pozicioniranje delova

Pozicioniranje delova podrazumeva postavljanje delova u položaj za zavarivanje, njihovo učvršćivanje (fiksiranje, stezanje) i zadržavanje željenog položaja delova do kraja zavarivanja [11].

Izrada pripojnih šavova

Pripojni šavovi se ne izvode kod limova veće debljine ili kod pojedinih cevastih delova gde poprečne dilatacije ne utiču na postupak zavarivanja, što je slučaj kod EPP postupka zavarivanja.

Predgrevanje materijala

Predgrevanje materijala se retko (ili nikad) ne izvodi kod EPP postupka zavarivanja [27].

11.5.2 Rad sa opremom, priborom, dodatnim i potrošnim materijalima za zavarivanje

Oprema za zavarivanje EPP postupkom je robusna i otporna na različite mehaničke, termičke, hemijske i fizičke uticaje okoline. Bez obzira na to, sa opremom za zavarivanje je neophodno postupati odgovorno i po uputstvima proizvođača, prema uputstvima na radnim listama ili prema primerima dobre prakse kada nema definisanih uputstava. Opremu i pribor za zavarivanje, kao i dodatne i potrošne materijale je neophodno održavati u ispravnom stanju, prevashodno radi sopstvene bezbednosti i bezbednosti ljudi u okolini, ali i radi ostvarenja projektovane funkcije sistema za zavarivanje.

Pored ispravnog rada sa opremom i priborom, neophodno je poštovati i držati se ustaljenih aktivnosti pre, tokom i nakon zavarivanja kako bi se dostigao zahtevani kvalitet zavarenih spojeva uz minimalne troškove.

11.5.3 Zavarivanje

Zavarivanje postupcima ISO 4063 — 12 je proces koji je vizualno u potpunosti zaklonjen praškom, postupak nije ručni i uticaj čoveka na proces zavarivanja i zavareni spoj je minimalan tokom zavarivanja. Sam čin zavarivanja teče po automatizmu, prema parametrima definisanim pre samog zavarivanja.

Zavarivanje se vrši poluautomatski, automatski ili mehanizovano [1]. Poluautomatsko zavarivanje se vrši ručno vođenim pištoljem kojim se u zonu zavarivanja dovode elektrodna žica i zaštitni prašak. Kao kod MIG/MAG pištolja za zavarivanje, elektrodnu žicu pokreće poseban uređaj sa pogonskim točkovima a prašak se kroz poseban levak (konstantnom brzinom) dovodi u zonu zavarivanja. Ovakvim zavarivanjem se postižu nešto niže brzine zavarivanja u odnosu na ostale tipove EPP zavarivanja.

Automatski postupak EPP zavarivanja isključuje prisustvo i uticaj radnika na

¹³ Identičan sa: EN ISO 9692-2:1998/AC:1999 CEN/TC 121.

¹⁴ Identičan sa: EN 1708-1:2010 CEN/TC 121.

¹⁵ Identičan sa: EN 1708-2:2000 CEN/TC 121.

¹⁶ Identičan sa: EN 1708-3:2012 CEN/TC 121.

zavarivanje tokom samog trajanja zavarivanja. Čitav postupak zavarivanja, od paljenja do gašenja električnog luka, isključuje čoveka. Međutim, ovakav postupak je prilično skup i primenjuje se za proizvodnju velikih serija.

Najčešće se primenjuje mehanizovani EPP postupak: operater na mašini za zavarivanje priprema/podešava parametre zavarivanja i pusta mašinu u rad, ali ima mogućnost da zaustavi mašinu ili promeni parametre zavarivanja radi boljih osobina zavarenog spoja. Osnovni problem predstavlja sinhronizacija brzine dovođenja i brzine topljenja elektrodne žice radi ostvarenja produktivnog zavarivanja.

Osnovni parametar za izbor varijante EPP zavarivanja jeste cena, ali, treba voditi računa i o veličini serije, dužini i debljini spoja, položaju spoja, kvalitetu spoja itd.

11.5.4 Metode uspostavljanja električnog luka

Postupci EPP su specifični u odnosu na ostale postupke zbog praška koji ispunjava prostor između osnovnog metala i elektrode što znatno otežava paljenje električnog luka klasičnim primicanje-odmicanjem elektrode. Stoga je neophodno da se električni luk uspostavi nekim alternativnim metodama, u zavisnosti od brojnih parametara (raspoloživog vremena za start, broja radnih komada i potrebnog kvaliteta spoja) [1].

Pomoćna žica u obliku loptice

Tanka žica, umotana kao loptica prečnika 10 mm, se postavlja odmah ispod elektrodne žice. Elektrodna žica se spušta i pritiska lopticu do približno polovine visine (prečnika) loptice. Zatim se sipa prašak i uspostavlja luk, pri čemu se loptica brzo topi.

Naoštrena žica

Vrh elektrodne žice se naoštiri pogodnim alatom. Luk se uspostavlja direktno između osnovnog metala i tako naoštrenog vrha žice: on se brzo topi, stabilizuje električni luk i moguće je da se nastavi zavarivanje.

Kratak spoj

To je uobičajen način uspostavljanja luka, uz pokretanje zavarivačkih kolica, što sprečava lepljenje žice za osnovni metal.

Rastopljeni prašak

Ako postoji rastopljeni prašak (ili tečno kupatilo), električni luk može da se uspostavi jednostavnim ubacivanjem elektrodne žice i puštanjem struje. Ova metoda se uvek koristi pri zavarivanju sa više žica, gde je dovoljno da se jedan luk uspostavi na neki drugi način, a ostale žice se, par trenutaka kasnije, jednostavno urone u rastopljeni prašak.

Primicanje-odmicanje žice

Ovo je jedan od najboljih načina uspostavljanja luka, ali zahteva posebno projektovani uređaj. Naročito je efikasan kada je potrebno često uspostavljanje-prekidanje električnog luka, a traži se visok kvalitet spoja. Elektrodna žica se spušta sve dok ne dodirne vrh radnog komada, zatim se posipa prašak i uključuje struja. Nizak napon između žice i radnog komada signalizira pogonskim točkicama da odmaknu vrh žice od radnog komada, a istovremeno se uspostavlja luk. Kako napon luka raste, tako pogonski točkici menjaju smer obrtanja i počinju da dovode žicu prema radnom komadu. Dovođenje žice se ubrzava sve dok se ne uspostavi stabilan luk (konstantan napon i brzina topljenja žice).

Visokofrekventna struja

Ovaj način uspostavljanja luka zahteva dodatni uređaj (visokofrekventni generator – VF), ali operater ne radi ništa drugo sem što aktivira uređaj kada je žica na oko 1,5 mm iznad radnog komada, tako da se luk uspostavlja pomoću varnice koju VF proizvodi između žice i radnog komada. Postupak paljenja je posebno efikasan kada je potrebno često uspostavljanje električnog luka.

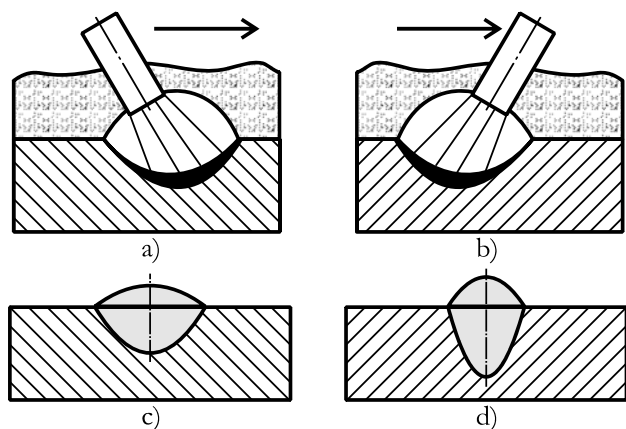
11.5.5 Tehnika zavarivanja

Tehnika zavarivanja EPP postupkom može biti u nazad ili u napred (slika 11.11).

U oba slučaja je elektrodna žica nagnuta za ugao 15°-30° u odnosu na vertikalu, pri čemu je prilikom tehnike zavarivanja u nazad, elektrodna žica nagnuta suprotno od smera zavarivanja (slika 11.11, a), dok je kod tehnike zavarivanja u nazad elektrodna žica nagnuta u smeru zavarivanja (slika 11.11, b).

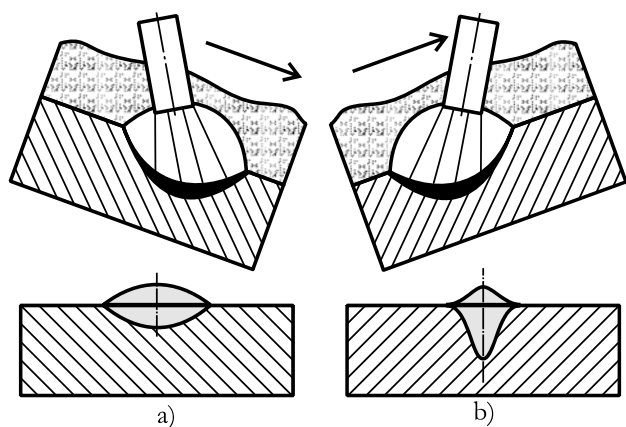
Prilikom zavarivanja tehnikom u napred,

pritisak gasne plazme „gura” rastopljeni metal i toplotu u napred, što dovodi do boljeg topljenja osnovnog metala i ujednačenijeg formiranja šava (slika 11.11, c).



Slika 11.11 Tehnika zavarivanja EPP postupkom: a) u napred, b) u nazad, c) oblik šava dobijen tehnikom zavarivanja u napred; d) oblik šava dobijen tehnikom zavarivanja u nazad

Pri zavarivanju tehnikom u nazad, pritisak plazme „gura” toplotu i rastopljeni metal u nazad – suprotno od smjera zavarivanja. Tako se dobija už i dublji šav, ali se dobija i veće nadvišenje (slika 11.11, d).



Slika 11.12 Tehnika zavarivanja EPP postupkom: a) niz nagib; b) uz nagib

Obe tehnike se ravnopravno primenjuju, u zavisnosti od potrebe. Primenuje se i tehnika zavarivanja gde je elektroda upravna na radne komade, međutim, tokom kretanja duž linije spajanja, elektroda se blago savija dok se probija kroz prašak tako da se u ovom slučaju dobijaju isti rezultati kao da se zavarivanje vrši tehnikom u nazad.

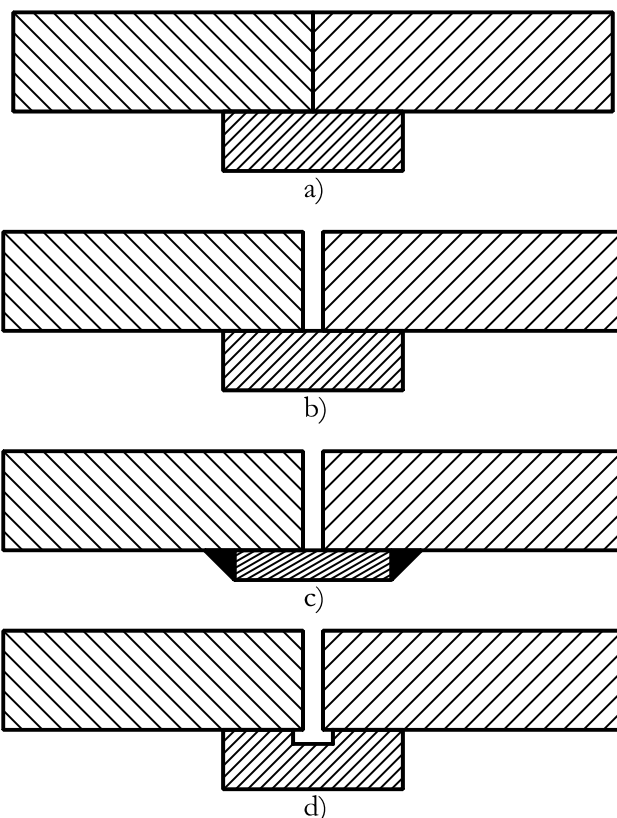
Bez obzira na primenjenu tehniku, zavarivanje EPP postupkom je moguće samo

u horizontalnom, blago nagnutom ili koristastom položaju.

Ukoliko se zavarivanje vrši niz nagib, dobijeni šav je plitak i širok (slika 11.12, a). Zavarivanje uz nagib (slika 11.12, b) daje dublji ali už žleb, dok nadvišenje zavisi od brzine zavarivanja (manja brzina, veće nadvišenje) [1].

Jednostrano zavarivanje sučeono postavljenih ploča (sa podloškom)

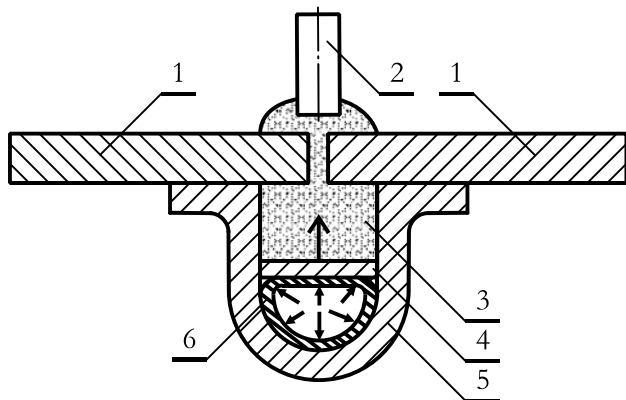
Zavarivanje sučeonih spojeva sa jedne strane, u jednom prolazu, uglavnom se primenjuje za delove debljine do 20 mm.



Slika 11.13 Sučeono zavarivanje u jednom prolazu

Za manje debljine delova se ne primenjuje zazor između čeonih površina delova (slika 11.13, a) dok se kod debljih zazor uzima na osnovu preporuka iz standarda ISO 9692-2. Zavarivanje u jednom prolazu se gotovo uvek radi sa podloškom – od čelika ili od bakra, koja se postavlja sa korene strane delova koji se zavaruju i uklanja se nakon zavarivanja (slika 11.13, b) ili se prethodno spaja montažnim zavarima sa krenom stranom delova koji se zavaruju i nakon zavarivanja delova ostaje u sklopu zavarenog spoja (slika 11.13, c). Kada postoji

zazor između delova koji se zavaruju, u podlošci se pravi odgovarajući žleb, u koji prodire prašak tokom zavarivanja (slika 11.13, d). Prašak se topi i utiče na formiranje i oblikovanje korena šava.



Slika 11.14 Sučeono zavarivanje sa zaštitom korena praškom: 1) radni komad, 2) elektrodna žica, 3) prašak, 4) pritiskač, 5) oblikač, 6) gumeno crevo

Kod tanjih limova (debljine do 8 mm), često se umesto podloške koristi prašak, kao osnova za sprečavanje procurivanja metala šava ali i za oblikovanje korena (slika 11.14).

Radni komadi se postavljaju tako da između njih postoji zazor. Sa korene strane se postavlja oblikač ispunjen praškom, koji pritiskač lepi uz koren radnih komada. Povećanjem pritiska gasa u gumenom crevu na dnu oblikača, povećava se sila pritiska na prašak, čime se pritiska i koren šava. Zavarivanjem sa čone strane, ispunjava se žleb i formira se šav sa oblikovanim korenom.

Pri zavarivanju u više prolaza, nije neuobičajeno da se koreni prolaz spoja izradi nekim ručnim postupkom – REL, TIG ili MIG/MAG postupcima zavarivanja a drugi (i ostali prolazi) se izradi EPP postupkom. U tom slučaju je moguće zavarivanje bez primene podloške i koren šava se formira pre masivne ispune žleba EPP postupkom (slika 11.15).

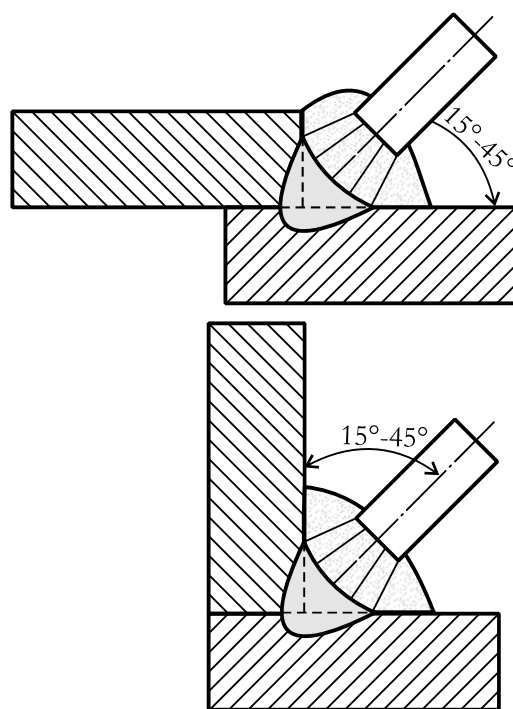


Slika 11.15 Sučeono zavarivanje u više prolaza, koren izrađen TIG postupkom, a ispuna u dva prolaza EPP postupkom zavarivanja

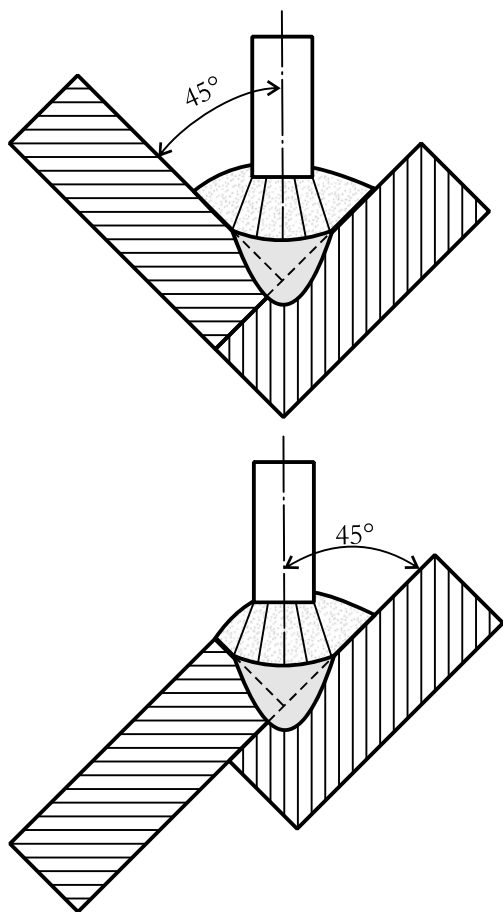
Sučeono zavarivanje sa obe strane

Sučeono zavarivanje ploča sa obe strane vrši se kod limova velike debljine (u praksi, preko 20 mm, ali nije neuobičajeno i za manje debljine limova) i to u slučaju kada je moguće jednostavno okretanje delova kako bi se izvelo zavarivanje sa druge strane. Zavarivanje se uvek izvodi u horizontalnom položaju (PA).

Zavarivanje preklopnih i T spojeva se izvodi u „koritu”, sa nagnutom elektrodnom žicom (slike 11.16 i 11.17) ali je zavarivanje moguće i u horizontalnom položaju. Postupak zavarivanja „u koritu” najbolje oblikuje šav, pa se primenjuje uvek kada je moguće postaviti delove koji se zavaruju u odgovarajući položaj. Kada je u pitanju zavarivanje T spojeva, ukoliko postoji veliki zazor između delova koji se zavaruju, neophodno je da se spreči isticanje metala šava i troske iz zone zavarivanja.



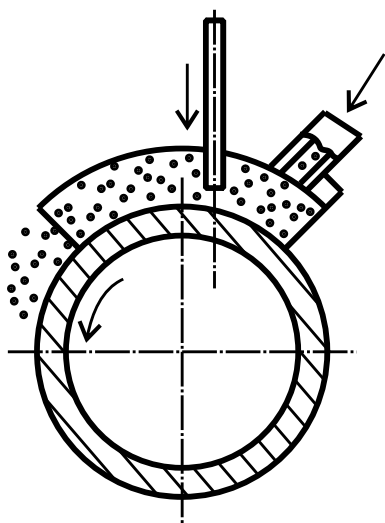
Slika 11.16 Zavarivanje ploča u horizontalnom položaju – preklopni spoj i ugaoni spoj



Slika 11.17 Zavarivanje ploča u koritastom položaju – preklapni spoj i ugaoni spoj

Zavarivanje kružnih sučeonih i ugaonih spojeva

Kružni sučeonni spojevi se najčešće izrađuju na cevima, pri spajanju cevi i prirubnica ili kod cilindričnih sudova.



Slika 11.18 Kružno zavarivanje cevi

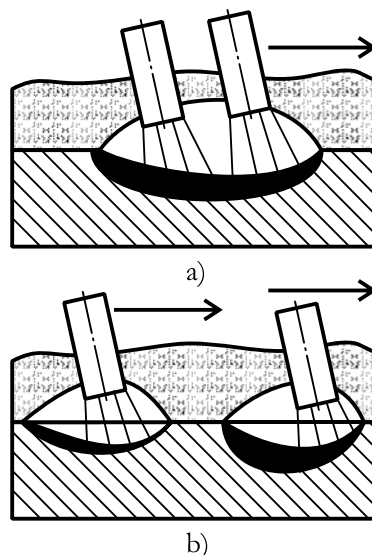
Zbog specifičnosti postupka (primena praška), neophodno je **obezbediti okretanje**

delova koji se zavaruju dok uređaj za zavarivanje stoji iznad zone zavarivanja. Tako se obezbeđuje da se zavarivanje vrši uvek u horizontalnom ili koritastom položaju (slika 11.18).

Ukoliko se zavarivanje vrši jednostrano, sa spoljne strane, sa korene strane (unutrašnjost cevi) se postavlja bakarna podloška, kako bi se sprečilo curenje rastopine i praška. Kod cevi velikog prečnika, primenjuje se dvostrano zavarivanje – prvo se zavaruje unutrašnja strana cevi (nekim ručnim postupkom zavarivanja) a nakon toga se vrši zavarivanje sa spoljašnje strane EPP postupkom.

Zavarivanje sa jednom ili više žica

Sa ciljem povećanja produktivnosti, moguće je zavarivanje sa više elektrodnih žica. Pored zavarivanja sa jednom žicom, vrlo često se primenjuje zavarivanje sa dve elektrodne žice. Žice mogu biti postavljene paralelno jedna drugoj, ali mogu biti postavljene i pod nekim uglom. Pri tom, elektrodne žice uspostavljaju odvojene električne lukove koji se uranjaju u jedno ili različita tečna kupatila (slika 11.19, a i b).



Slika 11.19 Tehnika zavarivanja sa dve elektrode: a) sa jednim zajedničkim tečnim kupatilom, b) sa dva odvojena tečna kupatila

Pri zavarivanju sa više elektroda, koje imaju jedno tečno kupatilo, žice se tope istom brzinom zavarivanja pa je količina deponovanog materijala jednaka za svaku

elektrodu. Pri zavarivanju sa više elektroda koje imaju različita tečna kupatila, brzina topljenja elektroda nije ista – uglavnom se uzima da elektroda koja prednjači ima veću brzinu topljenja/deponovanja nego ostale elektrode. U tom slučaju, poslednja elektroda ima najmanji depozit, temperatura tečnog kupatila kod nje je niža nego kod prethodnih elektroda itd. U ovom slučaju, poslednja elektroda se ponaša kao elektroda za „umirivanje” zavarenog spoja.

11.5.6 Prekidanje električnog luka

Električni luk može da se prekine na tri načina:

- istovremeno sa izvorom struje za zavarivanje zaustavlja se i topljenje elektrodne žice,
- žica se topi još neko vreme i lagano izvlači iz praška i u jednom trenutku dođe do gašenja električnog luka, i
- po završetku šava, zavarivanje se nastavlja u smeru suprotnom od smera zavarivanja i žica se izvlači iz praška te se električni luk prekine.

Najjednostavnija metoda prekidanja električnog luka je „isključivanje struje” (prvi slučaj) ali on nosi najveći rizik od pojave nesavršenosti zavarenog spoja na mestu prekida – elektrodna žica ostaje zarobljena u tečnom kupatilu, moguć je prodor praška u tečno kupatilo itd [28]. Bolja varijanta je gašenje električnog luka laganim izvlačenjem elektrodne žice iz zone zavarivanja (bilo pri kretanju u napred, bilo pri kretanju u nazad). Tada je gašenje električnog luka postepeno, tečno kupatilo ima više vremena da očvrstne po površini i spreči prodor praška u unutrašnjost metala šava [1].

11.5.7 Efekat tipa električne struje i polariteta

Zbog primene električne struje relativno velike jačine i napona, EPP postupak zavarivanja jednosmernom strujom je sklon pojavi skretanja električnog luka [1, 3, 4]. To je jedan od razloga primene naizmenečne struje pri zavarivanju EPP postupkom.

Prilikom primene više elektrodnih žica za zavarivanje, moguća je pojava pojačanja/slabljenja skretanja električnih lukova usled međusobnog dejstva električnih polja (od različitih električnih lukova).

Upotreba jednosmerne struje direktne polarnosti (JSDP) daje veću dubinu penetracije, ali manju širinu šava u odnosu na zavarivanje jednosmernom strujom indirektna polarnosti (JSIP), posmatrano za iste parametre električne struje i uslove zavarivanja.

Primena naizmenečne struje za zavarivanje daje ujednačeniji odnos dubine uvarivanja (penetracije) i širine zavarenog spoja u odnosu na primenu jednosmerne struje. Međutim, električni luk kod naizmenečne struje je nestabilniji i neophodna je primena VF uređaja za reaktiviranje električnog luka pri svakoj promeni polariteta električne struje.

11.5.8 Parametri zavarivanja

Osnovni parametri zavarivanja EPP postupkom su vrsta električne struje, jačina i napon struje, brzina zavarivanja i prečnik elektrodne žice koja se koristi za zavarivanje.

Vrsta električne struje: za zavarivanje se, nabrojano po obimu upotrebe, koriste JSDP, JSIP i NS tipovi električne struje.

Jačina struje i napon električnog luka: koristi se jačina od približno 100 A do 4000 A, pri naponu električnog luka od 10 V do 100 V.

Brzina zavarivanja: u zavisnosti od debljine materijala koji se zavaruje, ali i vrste materijala, brzina zavarivanja dostiže i 40 mm/s.

Prečnik elektrodne žice: koriste se standardni prečnici elektrodnih žica saglasno jačini električne struje (veća jačina električne struje zahteva primenu većeg prečnika elektrodne žice).

Osnovne preporuke parametara zavarivanja date su u prilogu.

11.5.9 Prekidanje zavarivanja

Prekidanje zavarivanja vrši se u dva

koraka: prvo se prekida električni luk (i isključuje se izvor struje za zavarivanje) i uklanja se žica iz zone zavarivanja. Posle toga se usisava prašak koji je ostao na osnovnom metalu i deponuje u bunkeru, zatim se isključuje čitav sistem i odlaže oprema na odgovarajućem mestu.

Posebna pažnja treba da se obrati na

provodnike – po pravilu, oni su razvučeni po podu zavarivačke radionice i preko njih se prelazi bez prevelikog obzira.

Troska na površini metala šava se hladi i najčešće se sama odvaja od metala šava, ali je neophodno da se mehanički ukloni iz zone zavarivanja nakon hlađenja.

LITERATURA

- [1] Autorizovana predavanja na kursovima za međunarodne inženjere i tehnologe zavarivanja, Mašinski fakultet Niš, 2007-2016;
- [2] <http://marinenotes.blogspot.rs/2013/01/submerged-arc-welding-saw-submerged-arc.html> (grafički prikaz preuzet i retuširan oktobra 2016);
- [3] The James F. Lincoln Arc Welding: The Procedure Handbook of Arc Welding, 14th Edition, ASIN: B000FBCQ4M, 2015;
- [4] Miomir Vukićević: Tehnologija spajanja materijala – Zavarivanje 1, ISBN 978-86-82631-73-6, Fakultet za mašinstvo i građevinarstvo u Kraljevu, 2014;
- [5] SRPS EN ISO 4063:2013 Zavarivanje i srodni postupci – Lista postupaka i njihovo označavanje, 28.01.2013;
- [6] http://www.aotaiwelding.com/products_list.asp?big=1&small=4 (grafički prikaz preuzet i retuširan oktobra 2016);
- [7] SRPS EN 60974-1:2012: Oprema za elektrolučno zavarivanje – Deo 1: Izvori struje za zavarivanje, 29.11.2012;
- [8] SRPS EN 60974-7:2014: Oprema za elektrolučno zavarivanje – Deo 7: Gorionici, 30.05.2014;
- [9] <http://www.lincolnelectric.com> (grafički prikazi preuzeti i retuširani tokom oktobra 2016);
- [10] SRPS EN 60974-5:2014: Oprema za elektrolučno zavarivanje – Deo 5: Dodavači žice, 30.05.2014;
- [11] Miomir Vukićević, Uređaji i pribori u zavarivanju, ISBN 978-86-82631-60-6, Mašinski fakultet Kraljevo, 2012;
- [12] SRPS EN ISO 14171:2017: Potrošni materijali za zavarivanje – Pune žičane elektrode, puna elektrodna žica i kombinacije elektroda/prašak za elektrolučno zavarivanje pod praškom nelegiranih i sitnozrnih čelika – Klasifikacija, 31.01.2017;
- [13] SRPS EN ISO 26304:2013: Potrošni materijali za zavarivanje – Pune elektrodne žice, cevaste punjene žice i kombinacije žica –prašak za EPP zavarivanje čelika povišene čvrstoće – Klasifikacija, 29.11.2013;
- [14] SRPS EN ISO 24598:2013: Potrošni materijali za zavarivanje – Pune žice, punjene žice i kombinacije elektrode/praška za zavarivanje pod praškom čelika otpornih na puzanje – Klasifikacija, 29.11.2013;
- [15] SRPS EN ISO 14343:2011: Potrošni materijali za zavarivanje – Elektrodne žice, elektrodne trake, žice i šipke za elektrolučno zavarivanje nerđajućih i vatrootpornih čelika – Klasifikacija, 30.09.2011;
- [16] SRPS EN ISO 18274:2012: Potrošni materijali za zavarivanje – Pune žičane i pune trakaste elektrode, pune žice i pune šipke za zavarivanje topljenjem nikla i legura nikla – Klasifikacija, 21.06.2012;
- [17] SRPS EN ISO 544:2013: Potrošni materijal za zavarivanje – Uslovi isporuke za dodatne materijale i praškove – Vrste proizvoda, mere, tolerancije i obeležavanja, 28.01.2013;
- [18] SRPS EN ISO 14344:2012: Potrošni materijali za zavarivanje – Uputstva za nabavku dodatnih materijala i praškova, 23.05.2012;
- [19] SRPS EN ISO 14174:2012 – Potrošni materijali za zavarivanje – Topitelji za elektrolučno zavarivanje pod praškom i pod troskom – Klasifikacija, 21.06.2012;
- [20] Avram Majstorović, Milorad Jovanović: Osnovi zavarivanja, lemljenja i lepljenja, ISBN 86-23-43076-X, Naučna knjiga, Beograd, 1991;

- [21] SRPS EN ISO 3690:2013: Zavarivanje i srodni postupci – Određivanje sadržaja vodonika u metalu šava elektrolučnih zavarenih čelika, 29.11.2013;
- [22] SRPS EN 13479:2008: Potrošni materijali za zavarivanje – Opšti standard za dodatne materijale i praškove za zavarivanje topljenjem metalnih materijala, 27.02.2008;
- [23] SRPS EN ISO 9692-2:2008: Zavarivanje i srodni postupci – Priprema spoja – Deo 2: Elektrolučno zavarivanje čelika pod praškom, 27.02.2008;
- [24] SRPS EN 1708-1:2013: Zavarivanje – Osnovni detalji zavarenih čeličnih spojeva – Deo 1: Komponente pod pritiskom, 28.01.2013;
- [25] SRPS EN 1708-2:2008: Zavarivanje – Osnovni detalji zavarenih čeličnih spojeva – Deo 2: Komponente bez unutrašnjeg pritiska, 27.02.2008;
- [26] SRPS EN 1708-3:2012: Zavarivanje – Osnovni detalji zavarenih čeličnih spojeva – Deo 3: Komponente pod pritiskom sa plakaturom, puferom i sa prevlakom (trakama), 21.06.2012;
- [27] SRPS EN ISO 13916:2013: Zavarivanje – Uputstvo za merenje temperature predgrevanja, međuprolazne temperature i temperature održavanja predgrevanja, 28.01.2013;
- [28] SRPS EN ISO 5817:2008: Zavarivanje – Zavareni spojevi topljenjem na čeliku, niklu, titanu i njihovim legurama (ne obuhvata zavarivanje snopom) – Nivoi kvaliteta nepravilnosti, 30.09.2015;
- [29] C. Hasse, W. Reitze: Elektrolučno zavarivanje – priručnik, Građevinska knjiga, Beograd, 1982;
- [30] SRPS EN 169:2008: Lična zaštita očiju – Filtri za zavarivanje i srodne tehnike - Zahtevi u pogledu koeficijenta transmisije i preporučena upotreba, 21.01.2008;
- [31] SRPS EN 170:2008: Lična zaštita očiju – Filtri za ultraljubičasto zračenje – Zahtevi u pogledu koeficijenta i preporučena upotreba, 27.02.2008;
- [32] SRPS EN 171:2008: Lična zaštita očiju – Filtri za infracrveno zračenje – Zahtevi u pogledu koeficijenta transmisije i preporučena upotreba, 27.02.2008;
- [33] SRPS EN 175:2008: Lična zaštita – Oprema za zaštitu očiju i lica tokom zavarivanja i srodnih postupaka, 21.01.2008;
- [34] SRPS EN 379:2011: Lična zaštita očiju – Automatski filtri za zavarivanje, 28.11.2011;
- [35] SRPS EN ISO 11611:2016: Zaštitna odeća koja se upotrebljava prilikom zavarivanja i srodnih procesa, 29.02.2016;
- [36] SRPS EN 12477:2007: Zaštitne rukavice za zavarivače, 25.07.2007;
- [37] SRPS EN ISO 10882-1:2012: Zdravlje i bezbednost pri zavarivanju i srodnim postupcima – Uzorkovanje čestica i gasova iz vazduha u zoni disanja operatera – Deo 1: Uzorkovanje čestica iz vazduha, 23.05.2012;
- [38] SRPS EN ISO 10882-2:2008: Zdravlje i bezbednost pri zavarivanju i srodnim postupcima – Uzorkovanje čestica i gasova iz vazduha u zoni disanja operatera – Deo 2: Uzorkovanje gasova, 09.09.2008;

12 ZDRAVSTVENI I BEZBEDNOSNI ZAHTEVI SPECIFIČNI ZA ZAVARIVANJE

Zavarivanje bilo kojim postupkom zahteva preduzimanje svih zdravstveno-bezbednosnih mera koje su neophodne kako ne bi došlo do narušavanja zdravlja radnika [1].

Postoje četiri velika zdravstveno-bezbednosna aspekta na koje treba obratiti pažnju:

- Električna struja (ne važi za gasni postupak zavarivanja),
- Visoka temperatura,
- Prisustvo svetlosnog zračenja i
- Prisustvo opasnih i štetnih gasova/isparenja.

O električnoj energiji i uticaju električne energije na zdravlje i bezbednost, bilo je reči u poglavljima 3 i 4. Međutim, neophodno je da se ponovi: sa električnom strujom treba oprezno raditi.

Temperatura električnog luka/plamena, kao i temperatura metala šava višestruko premašuju temperature koje nisu opasne po ljudsko telo. Zbog toga zavarivač mora da preduzima sve mere lične zaštite i zaštititi svoje telo od uticaja visoke temperature.

Svetlosno zračenje potiče od električnog luka ili od plamena. Jaka svetlost je, u najmanju ruku, neugodna po zavarivačeve oči te je neophodna upotreba zaštitnih naočara sa odgovarajućim zatamnjenjem. Osnovni zahtevi zaštite očiju tokom zavarivanja dati su u standardima:

- SRPS EN 169:2008: Lična zaštita očiju – Filtri za zavarivanje i srodne tehnike – Zahtevi u pogledu koeficijenta transmisije i preporučena upotreba¹ [39];
- SRPS EN 170:2008: Lična zaštita očiju – Filtri za ultraljubičasto zračenje – Zahtevi u pogledu koeficijenta i preporučena upotreba² [40];

- SRPS EN 171:2008: Lična zaštita očiju – Filtri za infracrveno zračenje – Zahtevi u pogledu koeficijenta transmisije i preporučena upotreba³ [41];

- SRPS EN 175:2008: Lična zaštita – Oprema za zaštitu očiju i lica tokom zavarivanja i srodnih postupaka⁴ [2];

- SRPS EN 379:2011: Lična zaštita očiju – Automatski filtri za zavarivanje⁵ [3].

Kako bi se zaštitio od većine rizika/opasnosti koje se javljaju pri zavarivanju, zavarivač je dužan da nosi zaštitnu radnu odeću koja minimalno zadovoljava zahteve standarda SRPS EN ISO 11611:2016: Zaštitna odeća koja se upotrebljava prilikom zavarivanja i srodnih procesa⁶ [4] i SRPS EN 12477:2007: Zaštitne rukavice za zavarivače⁷ [5].

Potencijalno opasni gasovi su kod postupka zavarivanja prisutni neprekidno: zaštitni i gorivi gasovi su uvek pod pritiskom i nose određeni bezbednosni i zdravstveni rizik po zavarivača. Tokom zavarivanja nastaju drugi gasovi i isparenja koji mogu imati dodatni uticaj na zdravlje i bezbednost radnika. Zbog toga je neophodno da zavarivač radi sa opremom po utvrđenom pravilu (otvaranje i zatvaranje ventila, redosled aktivnosti, propisana udaljenost od zone zavarivanja itd) a uticaj produkata sagorevanja i isparenja se uklanja primenom odgovarajućeg sistema ventilacije. Zbog toga je neophodno da vazduh u radnom prostoru minimalno zadovoljava zahteve definisane standardima:

- SRPS EN ISO 10882-1:2012: Zdravlje i

¹ Identičan sa: EN 169:2002 CEN/TC 85.

² Identičan sa: EN 170:2002 CEN/TC 85.

³ Identičan sa: EN 171:2002 CEN/TC 85.

⁴ Identičan sa: EN 175:1997 CEN/TC 85.

⁵ Identičan sa: EN 379:2003+A1:2009 CEN/TC 85.

⁶ Identičan sa: EN ISO 11611:2015 CEN/TC 162 i ISO/TC 94/SC 13.

⁷ Identičan sa: EN 12477:2001/A1:2005 i CEN/TC 162.

bezbednost pri zavarivanju i srodnim postupcima – Uzorkovanje čestica i gasova iz vazduha u zoni disanja operatera – Deo 1: Uzorkovanje čestica iz vazduha⁸ [6];

- SRPS EN ISO 10882-2:2008: Zdravlje i bezbednost pri zavarivanju i srodnim postupcima – Uzorkovanje čestica i gasova iz vazduha u zoni disanja operatera – Deo 2: Uzorkovanje gasova⁹ [7];

- Još neki od bezbednosnih rizika koji se odnose na rad sa gasovima pod pritiskom, kao i aktivnosti i zadaci koji moraju da budu ispunjeni radi bezbednog rada dati su/opisani su standardima:

- SRPS EN ISO 14114:2015: Oprema za gasno zavarivanje – Sistemi za snabdevanje acetilenom za zavarivanje, rezanje i srodne postupke – Opšti zahtevi¹⁰ (u standardu su prikazani neki od dobrih primera iz prakse u radu sa opremom pod visokim pritiskom) [8];

- SRPS EN ISO 15615:2014: Oprema za gasno zavarivanje – Sistemi acetilenskih vodova za zavarivanje, rezanje i srodne postupke – Zahtevi za bezbednost uređaja pod visokim pritiskom¹¹ (u standardu su prikazani neki od dobrih primera iz prakse u radu sa opremom pod visokim pritiskom)[9].

Pored opštih bezbednosnih i zdravstvenih zahteva, postupci zavarivanja mogu da imaju nekoliko specifičnih zahteva o kojima treba voditi računa u radu.

Osobama sa srčanim tegobama i ugrađenim pejsmejkerima je strogo zabranjeno približavanje ili rad sa uređajima za zavarivanje koji imaju VF. VF uređaji emituju električne i magnetne talase koji mogu poremetiti rad pejsmejкера što može biti fatalno po čoveka. Bezbedno rastojanje za takve osobe ne sme biti manje od 5 m.

Netopive elektrode u sebi imaju torijum koji spada u blago radioaktivne elemente. On ne predstavlja direktnu opasnost po ljude, ali, dugotrajna izloženost parama i prašini torijuma ili gutanje komada elektrode može da

izazove kobne posledice po čoveka.

Još neki od bezbednosnih rizika pri gasnom zavarivanju, kao i zahtevi koji moraju da budu ispunjeni radi bezopasnog rada dati su/opisani su standardima:

- SRPS EN ISO 14114:2015: Oprema za gasno zavarivanje – Sistemi za snabdevanje acetilenom za zavarivanje, rezanje i srodne postupke – Opšti zahtevi¹² [11];

- SRPS EN ISO 15615:2014: Oprema za gasno zavarivanje – Sistemi acetilenskih vodova za zavarivanje, rezanje i srodne postupke – Zahtevi za bezbednost uređaja pod visokim pritiskom¹³ [12].

⁸ Identičan sa: EN ISO 10882-1:2011 CEN/TC 121.

⁹ Identičan sa: EN ISO 10882-2:2000 CEN/TC 121.

¹⁰ Identičan sa: EN ISO 14114:2014 CEN/TC 121 i ISO/TC 44/SC 8.

¹¹ Identičan sa: EN ISO 15615:2013 CEN/TC 121.

¹² Identičan sa: EN ISO 14114:2014 CEN/TC 121 i ISO/TC 44/SC 8.

¹³ Identičan sa: EN ISO 15615:2013 CEN/TC 121.

LITERATURA

- [1] C. Hasse, W. Reitze: Elektrolučno zavarivanje – priručnik, Građevinska knjiga, Beograd, 1982;
- [2] SRPS EN 169:2008: Lična zaštita očiju - Filtri za zavarivanje i srodne tehnike - Zahtevi u pogledu koeficijenta transmisije i preporučena upotreba, 21.01.2008;
- [3] SRPS EN 170:2008: Lična zaštita očiju – Filtri za ultraljubičasto zračenje – Zahtevi u pogledu koeficijenta i preporučena upotreba, 27.02.2008;
- [4] SRPS EN 171:2008: Lična zaštita očiju – Filtri za infracrveno zračenje – Zahtevi u pogledu koeficijenta transmisije i preporučena upotreba, 27.02.2008;
- [5] SRPS EN 175:2008: Lična zaštita – Oprema za zaštitu očiju i lica tokom zavarivanja i srodnih postupaka, 21.01.2008;
- [6] SRPS EN 379:2011: Lična zaštita očiju - Automatski filtri za zavarivanje, 28.11.2011;
- [7] SRPS EN ISO 11611:2016: Zaštitna odeća koja se upotrebljava prilikom zavarivanja i srodnih procesa, 29.02.2016;
- [8] SRPS EN 12477:2007: Zaštitne rukavice za zavarivače, 25.07.2007;
- [9] SRPS EN ISO 10882-1:2012: Zdravlje i bezbednost pri zavarivanju i srodnim postupcima – Uzorkovanje čestica i gasova iz vazduha u zoni disanja operatera – Deo 1: Uzorkovanje čestica iz vazduha, 23.05.2012;
- [10] SRPS EN ISO 10882-2:2008: Zdravlje i bezbednost pri zavarivanju i srodnim postupcima – Uzorkovanje čestica i gasova iz vazduha u zoni disanja operatera – Deo 2: Uzorkovanje gasova, 09.09.2008;
- [11] SRPS EN ISO 14114:2015: Oprema za gasno zavarivanje – Sistemi za snabdevanje acetilenom za zavarivanje, rezanje i srodne postupke – Opšti zahtevi, 30.09.2015;
- [12] SRPS EN ISO 15615:2014: Oprema za gasno zavarivanje – Sistemi acetilenskih vodova za zavarivanje, rezanje i srodne postupke – Zahtevi za bezbednost uređaja pod visokim pritiskom, 29.08.2014.

13 PRAKTIČNE VEŽBE

Zavarivačka laboratorija ili zavarivački pogon je prostor u kome se nalaze uređaji, alati, pribori, osnovni i dodatni materijali kojima se vrši zavarivanje postupcima zavarivanja koji su prikazani u prethodnim poglavljima (osim EPP postupka zavarivanja).

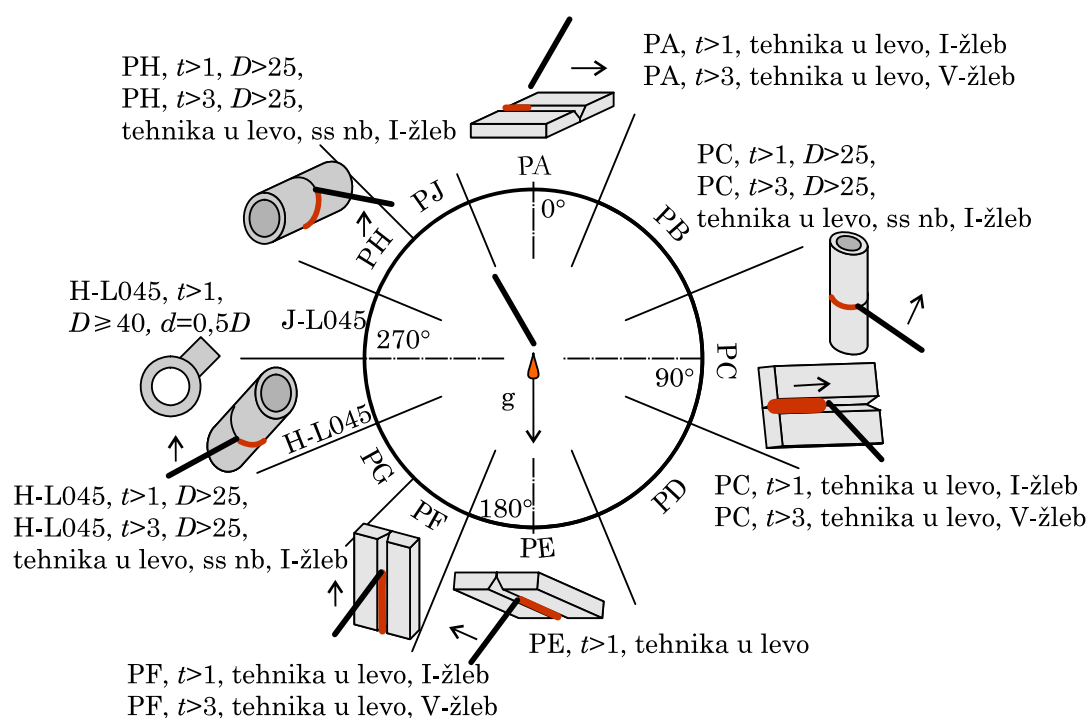
Praktične vežbe imaju za cilj da pokažu kako se vrši podešavanje osnovnih parametara zavarivanja na konkretnim pripremima (primeri parametara zavarivanja su prikazani u prilogu), uticaj osnovnih parametara zavarivanja na oblik i dimenzije šava kao i osobine postupaka zavarivanja (primenjene na određenim materijalima, odgovarajućom tehnikom) koje vode ka dobro/loše izvedenom zavarenom spoju. Nakon sprovedenih zavarivanja, sprovodi se analiza izvedenih zavarivanja i diskutuju se dobijeni

rezultati.

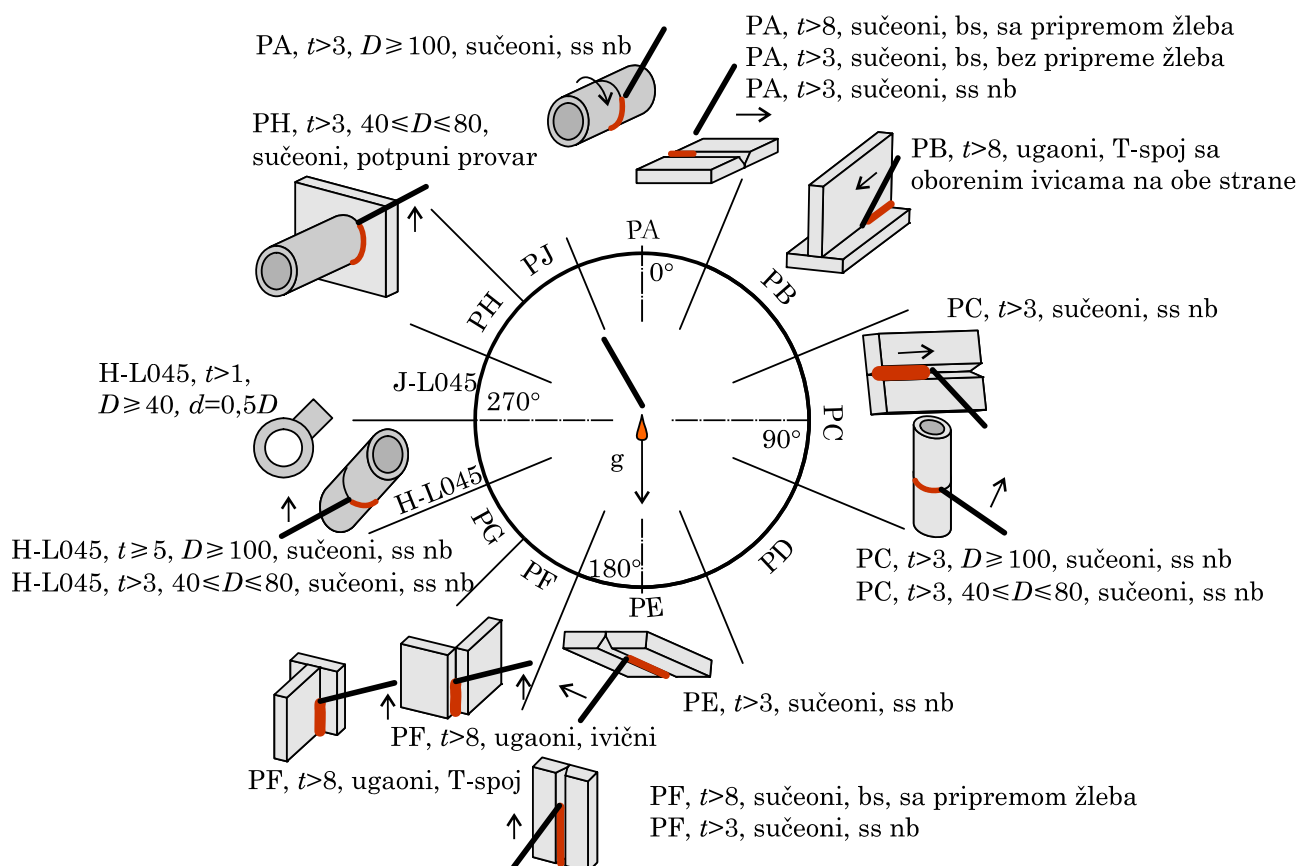
Vežbe treba da se provedu za sledeće postupke [1]:

ISO 4063 — 311,
ISO 4063 — 111,
ISO 4063 — 132,
ISO 4063 — 134,
ISO 4063 — 135,
ISO 4063 — 136,
ISO 4063 — 138 i
ISO 4063 — 141.

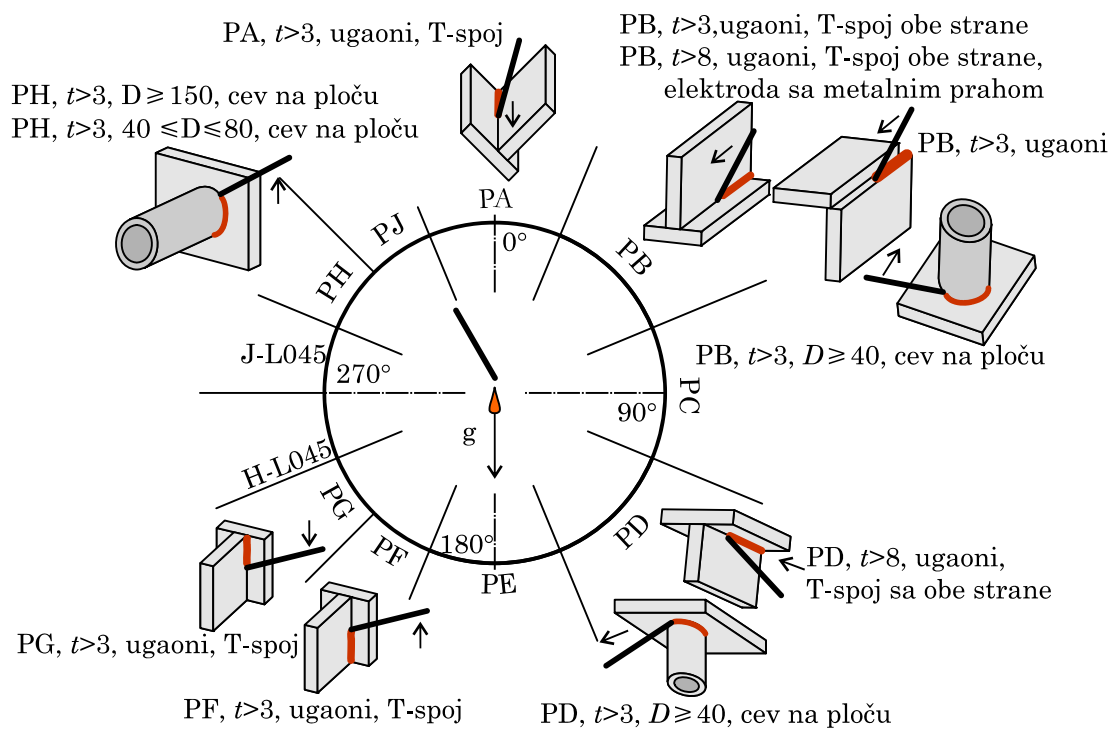
Na slikama 13.1 do 13.3 prikazani su pripremi (dat je materijal priprema, dimenzije itd), tipovi spojeva, položaji zavarivanja, načini pripreme žlebova, tehnika zavarivanja i ukoliko je potrebno, naveden je dodatni materijal kojim se zavarivanje vrši [2].



Slika 13.1 Praktične vežbe za ISO 4063—311 postupak za osnovni materijal: materijali iz grupa 1, 2, 3, 8, 10 i 11 prema SRPS CEN ISO/TR 15608:2014 [3]: t – debljina materijala [mm], d – spoljašnji prečnik manje cevi [mm], D – spoljašnji prečnik veće cevi [mm]



Slika 13.2 Praktične vežbe za sučeone ISO 4063— 1 postupke zavarivanja za osnovne materijale iz grupa 1, 2, 3, 8, 10 i 11 prema SRPS CEN ISO/TR 15608:2014: t – debljina materijala [mm], d – spoljašnji prečnik manje cevi [mm], D – spoljašnji prečnik veće cevi [mm]



Slika 13.3 Praktične vežbe za ugaone ISO 4063— 1 postupke zavarivanja za osnovne materijale iz grupa 1, 2, 3, 8, 10 i 11 prema SRPS CEN ISO/TR 15608:2014: t – debljina materijala [mm], d – spoljašnji prečnik manje cevi [mm], D – spoljašnji prečnik veće cevi [mm]

LITERATURA

- [1] SRPS EN ISO 4063:2013 Zavarivanje i srodni postupci – Lista postupaka i njihovo označavanje, 28.01.2013;
- [2] IIW Guidline: International Welder, Minimum Requirements for the Education, Examination and Qualification, IAB-089r5-14, February 2014;
- [3] SRPS CEN ISO/TR 15608:2014: Zavarivanje – Uputstvo za sistem grupisanja metalnih materijala, 29.08.2014.

PRILOG

U prilogu ovog udžbenika prikazani su izvodi iz pojedinih standarda, iskustvene preporuke kao i preporuke proizvođača koji se odnose na dodatne materijale, potrošne materijale, zaštitne gasove, pripremu osnovnog materijala za zavarivanje, parametre zavarivanja itd.

Postupci zavarivanja

U različitim varijacijama, trenutno postoji preko 500 različitih postupaka zavarivanja a veliki broj postupaka je standardizovan. U tabeli 14.1 prikazana je lista standardizovanih postupaka zavarivanja prema standardu ISO 4063 [1].

Tabela 14.1 Lista postupaka standardizovanih prema SRPS EN ISO 4063:2013 (na engleskom i nemačkom jeziku)

r.b.	engleski	nemački
1	Arc welding	Lichtbogenschweißen (Lichtbogenschmelzschweißen)
11	Metal arc welding without gas protection	Metall-Lichtbogenschweißen ohne Gasschutz
111	Manual metal arc welding (metal arc welding with covered electrode); Shielded metal arc welding, USA	Lichtbogenhandschweißen
112	Gravity (arc) welding with covered electrode Gravity feed welding, USA	Schwerkraft-Lichtbogenschweißen
114	Self-shielded tubular cored arc welding	Metall-Lichtbogenschweißen mit Fülldrahtelektrode ohne Schutzgas
12	Submerged arc welding	Unterpulverschweißen
121	Submerged arc welding with solid wire electrode	Unterpulverschweißen mit Massivdrahtelektrode
122	Submerged arc welding with strip electrode	Unterpulverschweißen mit Massivbandelektrode
124	Submerged arc welding with metallic powder addition	Unterpulverschweißen mit Metallpulverzusatz
125	Submerged arc welding with tubular cored electrode	Unterpulverschweißen mit Fülldrahtelektrode
126	Submerged arc welding with cored strip electrode	Unterpulverschweißen mit Füllbandelektrode
13	Gas-shielded metal arc welding; Gas metal arc welding, USA	Metall-Schutzgasschweißen
131	MIG welding with solid wire electrode; Gas metal arc welding using inert gas and solid wire electrode, USA	Metall-Inertgasschweißen mit Massivdrahtelektrode
132	MIG welding with flux cored electrode; Flux cored arc welding, USA	Metall-Inertgasschweißen mit schweißpulvergefüllter Drahtelektrode
133	MIG welding with metal cored electrode; Gas metal arc welding using inert gas and metal cored wire, USA	Metall-Inertgasschweißen mit metallpulvergefüllter Drahtelektrode
135	MAG welding with solid wire electrode; Gas metal arc welding using active gas with solid wire electrode, USA	Metall-Aktivgasschweißen mit Massivdrahtelektrode

r.b.	engleski	nemački
136	MAG welding with flux cored electrode; Gas metal arc welding using active gas and flux cored electrode, USA	Metall-Aktivgasschweißen mit schweißpulvergefüllter Drahtelektrode
138	MAG welding with metal cored electrode; gas metal arc welding using active gas and metal cored electrode	Metall-Aktivgasschweißen mit metallpulvergefüllter Drahtelektrode
14	Gas-shielded arc welding with non-consumable tungsten electrode; Gas tungsten arc welding, USA	Wolfram-Schutzgasschweißen
141	TIG welding with solid filler material (wire/rod); Gas tungsten arc welding using inert gas and solid filler material (wire/rod), USA	Wolfram-Inertgasschweißen mit Massivdraht- oder Massivstabzusatz; WIGSchweißen
142	Autogenous TIG welding; Autogenous gas tungsten arc welding using inert gas, USA	Wolfram-Inertgasschweißen ohne Schweißzusatz
143	TIG welding with tubular cored filler material (wire/rod); Gas tungsten arc welding using inert gas and tubular cored filler material (wire/rod), USA	Wolfram-Inertgasschweißen mit Fülldraht- oder Füllstabzusatz
145	TIG welding using reducing gas and solid filler material (wire/rod); Gas tungsten arc welding using inert gas plus reducing gas additions and solid filler material (wire/rod), USA	Wolfram-Schutzgasschweißen mit reduzierenden Gasanteilen im ansonsten inerten Schutzgas und Massivdrahtoder Massivstabzusatz
146	TIG welding using reducing gas and tubular cored filler material (wire/rod); Gas tungsten arc welding using inert gas plus reducing gas additions and tubular cored filler material (wire/rod), USA	Wolfram-Schutzgasschweißen mit reduzierenden Gasanteilen im ansonsten inerten Schutzgas und Fülldrahtoder Füllstabzusatz
147	Gas-shielded arc welding with non-consumable tungsten electrode using active gas (TAG welding); Gas tungsten arc welding using active gas, USA	Wolfram-Schutzgasschweißen mit aktiven Gasanteilen im ansonsten inerten Schutzgas
15	Plasma arc welding	Plasmaschweißen
151	Plasma MIG welding	Plasma-Metall-Inertgasschweißen
152	Powder plasma arc welding	Pulver-Plasma Lichtbogenschweißen
153	Plasma welding with transferred arc	Plasma-Stichlochschiweißen
154	Plasma arc welding with non-transferred arc	Plasmastrahlschweißen
155	Plasma arc welding with semi-transferred arc	Plasmastrahl- Plasmalichtbogen- Schweißen
185	Magnetically impelled arc welding	Lichtbogenschweißen mit magnetisch bewegtem Lichtbogen
2	Resistance welding	Widerstandsschweißen
21	Resistance spot welding; Spot welding, USA	Widerstandspunktschweißen
211	Indirect spot welding	Indirektes Widerstandspunktschweißen
212	Direct spot welding	direktes Widerstandspunktschweißen
22	Resistance seam welding; Seam welding, USA	Rollennahtschweißen
221	Lap seam welding	Überlapp-Rollennahtschweißen
222	Mash seam welding	Quetschnahtschweißen
223	Prep-lap seam welding	Rollennahtschweißen mit Kantenvorbereitung
224	Wire seam welding	Rollennahtschweißen mit Drahtelektrode
225	Foil butt-seam welding	Folien-Stumpfnahschweißen

r.b.	engleski	nemački
226	Seam welding with strip	Folien-Überlappnahtschweißen
23	Projection welding	Buckelschweißen
231	Indirect projection welding	einseitiges Buckelschweißen
232	Direct projection welding	Zweiseitiges Buckelschweißen
24	Flash welding	Abbrennstumpfschweißen
241	Flash welding with preheating	Abbrennstumpfschweißen mit Vorwärmung
242	Flash welding without preheating	Abbrennstumpfschweißen ohne Vorwärmung
25	Resistance butt welding; Upset welding, USA	Pressstumpfschweißen
26	Resistance stud welding	Widerstandsbolzenschweißen
27	HF resistance welding (high-frequency resistance welding); High-frequency upset welding, USA	Widerstandspressschweißen mit Hochfrequenz
29	Other resistance welding processes	andere Widerstandsschweißverfahren
3	Gas welding; Oxyfuel gas welding, USA	Gasschmelzschweißen
31	Oxyfuel gas welding	Gasschweißen mit Sauerstoff-Brenngas-Flamme
311	Oxyacetylene welding	Gasschweißen mit Sauerstoff-Acetylen-Flamme
312	Oxypropane welding	Gasschweißen mit Sauerstoff-Propan-Flamme
313	Oxyhydrogen welding	Gasschweißen mit Sauerstoff-Wasserstoff-Flamme
4	Welding with pressure	Pressschweißen
41	Ultrasonic welding	Ultraschallschweißen
42	Friction welding	Reibschweißen
421	Direct drive friction welding	Reibschweißen mit kontinuierlichem Antrieb
422	Inertia friction welding	Reibschweißen mit Schwungradantrieb
423	Friction stud welding	Reibbolzenschweißen
43	Friction stir welding	Rührreibschweißen
44	Welding by high mechanical energy	Schweißen mit hoher mechanischer Energie
441	Explosion welding	Sprengschweißen
442	Magnetic pulse welding	Magnetpulsschweißen
45	Diffusion welding	Diffusionsschweißen
47	Oxyfuel gas pressure welding; Pressure gas welding, USA	Gaspressschweißen
48	Cold pressure welding; Cold welding, USA	Kaltpressschweißen
49	Hot pressure welding	Heißpressschweißen
5	Beam welding	Strahlschweißen
51	Electron beam welding	Elektronenstrahlschweißen
511	Electron beam welding in vacuum	Elektronenstrahlschweißen unter Vakuum
512	Electron beam welding in atmosphere	Elektronenstrahlschweißen in Atmosphäre
513	Electron beam welding with addition of shielding gases	Elektronenstrahlschweißen unter Schutzgas
52	Laser welding; Laser beam welding, USA	Laserstrahlschweißen
521	Solid state laser welding	Festkörper-Laserstrahlschweißen
522	Gas laser welding	Gas-Laserstrahlschweißen
523	Diode laser welding; Semi-conductor laser welding, USA	Dioden-Laserstrahlschweißen, Halbleiter-Laserschweißen
7	Other welding processes	andere Schweißverfahren
71	Aluminothermic welding; Thermite welding, USA	Aluminothermisches Schweißen

r.b.	engleski	nemački
72	Electroslag welding	Elektroslackeschweißen
721	Electroslag welding with strip electrode	Elektroslackeschweißen mit Bandelektrode
722	Electroslag welding with wire electrode	Elektroslackeschweißen mit Drahtelektrode
73	Electrogas welding	Elektrogasschweißen
74	Induction welding	Induktionsschweißen
741	Induction butt welding, Induction upset welding, USA	induktives Stumpfschweißen
742	Induction seam welding	Induktives Rollennahtschweißen
743	Induction HF welding	Induktives Hochfrequenzschweißen
75	Light radiation welding	Lichtstrahlschweißen
753	Infrared welding	Infrarotschweißen
78	Arc stud welding	Bolzenschweißen
783	Drawn arc stud welding with ceramic ferrule or shielding gas; Arc stud welding, USA	Hubzündungs-Bolzenschweißen mit Keramikring oder Schutzgas
784	Short-cycle drawn arc stud welding; Arc stud welding, USA	Kurzzeit-Bolzenschweißen mit Hubzündung
785	Capacitor discharge drawn arc stud welding; Arc stud welding, USA	Kondensatorentladungs-Bolzenschweißen mit Hubzündung
786	Capacitor discharge stud welding with tip ignition; Arc stud welding, USA	Kondensatorentladungs-Bolzenschweißen mit Spitzenzündung
787	Drawn arc stud welding with fusible collar	Bolzenschweißen mit Ringzündung
8	Cutting and gouging	Schneiden und Ausfugen
81	Flame cutting; Oxygen cutting, oxyfuel cutting, USA	autogenes Brennschneiden
82	Arc cutting	Lichtbogenschneiden
821	Air arc cutting; Air carbon arc cutting, USA	Lichtbogenschneiden mit Druckluft
822	Oxygen arc cutting	Lichtbogenschneiden mit Sauerstoff
83	Plasma cutting; Plasma arc cutting, USA	Plasmaschneiden
831	Plasma cutting with oxidizing gas	Plasmaprennschneiden
832	Plasma cutting without oxidising gas	Plasmaschmelzschneiden
833	Air plasma cutting	Druckluft-Plasmaschneiden
834	High-tolerance plasma cutting	Präzisions-Plasmaschneiden
84	Laser cutting; Laser beam cutting, USA	Laserstrahlschneiden
86	Flame gouging; Thermal gouging, USA	Brennfugen (Flammausfugen)
87	Arc gouging	Lichtbogenausfugen
871	Air arc gouging; Air carbon arc cutting, USA	Lichtbogenausfugen mit Druckluft
872	Oxygen arc gouging; Oxygen gouging, USA	Lichtbogenausfugen mit Sauerstoff
88	Plasma gouging	Plasmaausfugen
9	Brazing, soldering and braze welding	Hartlöten, Weichlöten und Fugnlöten
91	Brazing with local heating	Hartlöten mit örtlich begrenzter Erwärmung
911	Infrared brazing	Infrarothartlöten
912	Flame brazing; Torch brazing, USA	Flammhartlöten
913	Laser beam brazing	Laserstrahlhartlöten
914	Electron beam brazing	Elektronenstrahlhartlöten
916	Induction brazing	Induktionshartlöten
918	Resistance brazing	Widerstandshartlöten
919	Diffusion brazing	Diffusionshartlöten

r.b.	engleski	nemački
92	Brazing with global heating	Hartlöten mit vollständiger Erwärmung
921	Furnace brazing	Ofenhartlöten
922	Vacuum brazing	Vakuumhartlöten
923	Dip-bath brazing	Lotbadhartlöten
934	Salt-bath brazing	Salzbadhartlöten
925	Flux-bath brazing	Flussmittelbadhartlöten
926	Immersion brazing	Tauchbadhartlöten
93	Other brazing processes	andere Hartlötverfahren
94	Soldering with local heating	Weichlöten mit örtlich begrenzter Erwärmung
941	Infrared soldering	Infrarotweichlöten
942	Flame soldering; Torch soldering, USA	Flammweichlöten
943	Soldering with soldering iron	Kolbenweichlöten
944	Drag soldering	Schleppweichlöten
945	Laser soldering	Laserstrahlweichlöten
946	Induction soldering	Induktionsweichlöten
947	Ultrasonic soldering	Ultraschallweichlöten
948	Resistance soldering	Widerstandsweichlöten
949	Diffusion soldering	Diffusionsweichlöten
95	Soldering with global heating	Weichlöten mit vollständiger Erwärmung
951	Wave soldering	Wellenweichlöten
953	Furnace soldering	Ofenweichlöten
954	Vacuum soldering	Vakuumweichlöten
955	Dip soldering	Lotbadweichlöten
957	Salt-bath soldering	Salzbadweichlöten
96	Other soldering processes	andere Weichlötverfahren
97	Weld brazing; Braze welding, USA	Fugendlöten
971	Gas weld brazing; Gas braze welding, USA	Fugendlöten mit Flamme
972	Arc weld brazing; Arc braze welding, USA	Lichtbogenlöten
973	Gas metal arc weld brazing; Gas metal arc braze welding, USA	Metall-Schutzgaslöten
974	Gas tungsten arc weld brazing; Gas tungsten arc braze welding, USA	Wolfram-Schutzgaslöten
975	Plasma arc weld brazing; Plasma arc braze welding, USA	Plasma-Lichtbogenlöten
976	Laser weld brazing; Laser braze welding, USA	Laserlöten
977	Electron beam weld brazing; Electron beam braze welding, USA	Elektronenstrahlfugendlöten

Postupci zavarivanja mogu biti ručni, mehanizovani automatizovani (tabela 14.2).

Tabela 14.2 Podela postupaka zavarivanja prema stepenu mehanizacije [2, 3]

Zavarivanje je...	Vođenje pištolja je...	Dovođenje dodatnog materijala je...	Pomeranje obratka je...
Ručno	ručno	ručno	ručno
Delimično mehanizovano	ručno	mehanizovano	ručno
Potpuno mehanizovano	mehanizovano	mehanizovano	ručno
Automatsko	mehanizovano	mehanizovano	mehanizovano

Dodatni i potrošni materijali

U dodatne i potrošne materijale spadaju: elektrode i elektrodne žice, zaštitni/gorivi gasovi i zaštitni praškovi.

Klasifikacija dodatnih materijala

- Kriterijum A: Klasifikacija prema naponu na granici tečenja i udarnoj energiji (žilavosti) od 47 J;
- Kriterijum B: Klasifikacija prema zateznoj čvrstoći i udarnoj energiji (žilavosti) od 27 J.

Opšta oznaka dodatnog materijala: X-Y

gde je X – oznaka standarda dodatnog materijala (ISO 2560, ISO 18275, ISO 26304, ISO 1071 itd.); Y – oznaka klasifikacije dodatnog materijala prema odgovarajućem standardu [3-22].

Pojedini dodatni materijali se klasifikuju samo prema jednom a neki prema oba kriterijuma.

Klasifikacija zaštitnih gasova

Definicije

Osnovni gas – maseno/zapreminski/količinski brojniji gas u smeši gasova ili čisti gas.

Klasifikacija – broj standarda i simbol čistog gasa ili smeše gasova (osnovna grupa i podgrupa).

Komponenta – gasna supstanca koja je značajna za ponašanje smeše gasova. Primer: u smeši gasova Ar+11% CO₂, Ar je osnovni gas a CO₂ je komponenta.

Kontejner – posuda koja se koristi za skladištenje i/ili transport čistog gasa ili smeše gasova u gasovitom ili tečnom agregatnom stanju.

Oznaka – klasifikacija + simbol svih hemijskih komponenti + nominalni udeo u zapreminskim procentima.

Nečistoća – gasna supstanca hemijskog sastava koji je različit od osnovnog gasa, komponente ili mešavine gasova.

Mešavina gasova – gas koji se sastoji od dve ili više komponenti.

Nominalna vrednost – procentualna vrednost komponente, potvrđena od strane proizvođača ili dostavljača, a koja odgovara sastavu definisanom oznakom.

Simbol – osnovna grupa i podgrupa mešavine gasova.

Fizičke i hemijske osobine gasova koji se koriste kao zaštitni pri zavarivanju

Tabela 14.3. prikazuje osnovne osobine gasova koji se koriste kao zaštitni pri zavarivanju.

Tabela 14.3 Fizičke i hemijske osobine gasova [23]

Naziv gasa	Hemijski simbol	Simbol u oznaci	Gustina ^a (vazduh=1,293)	Relativna gustina gasa ^a (u odnosu na vazduh)	Tačka ključanja na 0,101 MPa	Reaktivnost tokom zavarivanja
[-]	[-]	[-]	[kg/m ³]	[-]	[°C]	[-]
Argon	Ar	Ar	1,784	1,380	-185,9	Inertan
Helijum	He	He	0,178	0,138	-268,9	Inertan
Ugljendioksid	CO ₂	C	1,977	1,529	-78,5 ^b	Oksidira
Kiseonik	O ₂	O	1,429	1,105	-183,0	Oksidira
Azot	N ₂	N	1,251	0,968	-195,8	Slabo reaktivan ^c
Vodonik	H ₂	H	0,090	0,070	-252,8	Redukujući

^a Definisano na 0°C i 0,101 MPa (1,013 bar).
^b Temperatura sublimacije (iz čvrstog u gasovito agregatno stanje).
^c Ponašanje azota zavisi od materijala i primene.

Klasifikacija i označavanje zaštitnih gasova

Klasifikacija gasova prema ISO 14175 [23] se bazira na reaktivnosti gasa ili mešavine gasova a vrši se na osnovu glavne grupe i podgrupe (tabela 14.4).

Klasifikacija gasova vrši se prema sledećoj šemi:

ISO 14175 – [Glavna grupa+Podgrupa].

Označavanje gasova vrši se prema sledećoj šemi:

ISO 14175 – [Glavna grupa+Podgrupa] – [Simbol: osnovnog gasa+ komponenti] – [% udeo]
 [komponente 1/% udeo komponente 2/...]

Primeri:

- 1) Mešavina gasova sa 6% CO₂, 4% O₂ u Ar
 Klasifikacija: ISO 14175 – M25
 Oznaka: ISO 14175 – M25 – ArCO –6/4
- 2) Mešavina gasova sa 30% He u Ar
 Klasifikacija: ISO 14175 – I3
 Oznaka: ISO 14175 – I3 – ArHe –30
- 3) Mešavina gasova sa 0,05% O₂ u Ar
 Klasifikacija: ISO 14175 – Z
 Oznaka: ISO 14175 – Z – ArO –0,05

Tabela 14.4 Klasifikacija gasova za zavarivanje i srodne postupke [23]

Simbol		Komponente u nominalnom zapreminskom %					
Glavna grupa	Podgrupa	Oksidirajući		Inertni		Redukujući	Slabo reaktivan
		CO ₂ (C)	O ₂ (O)	Ar	He	H ₂ (H)	N ₂ (N)
I	1			100			
	2				100		
	3			ostatak	0,5 ≤ He ≤ 95		
M1	1	0,5 ≤ CO ₂ ≤ 5		ostatak ^a		0,5 ≤ H ₂ ≤ 5	
	2	0,5 ≤ CO ₂ ≤ 5		ostatak ^a			
	3		0,5 ≤ O ₂ ≤ 3	ostatak ^a			
	4	0,5 ≤ CO ₂ ≤ 5	0,5 ≤ O ₂ ≤ 3	ostatak ^a			
M2	0	5 < CO ₂ ≤ 15		ostatak ^a			
	1	15 < CO ₂ ≤ 25		ostatak ^a			
	2		3 < O ₂ ≤ 10	ostatak ^a			
	3	0,5 ≤ CO ₂ ≤ 5	3 < O ₂ ≤ 10	ostatak ^a			
	4	5 < CO ₂ ≤ 15	0,5 ≤ O ₂ ≤ 3	ostatak ^a			
	5	5 < CO ₂ ≤ 15	3 < O ₂ ≤ 10	ostatak ^a			
	6	15 < CO ₂ ≤ 25	0,5 ≤ O ₂ ≤ 3	ostatak ^a			
	7	15 < CO ₂ ≤ 25	3 < O ₂ ≤ 10	ostatak ^a			
M3	1	25 < CO ₂ ≤ 50		ostatak ^a			
	2		10 < O ₂ ≤ 15	ostatak ^a			
	3	25 < CO ₂ ≤ 50	2 < O ₂ ≤ 10	ostatak ^a			
	4	5 < CO ₂ ≤ 25	10 < O ₂ ≤ 15	ostatak ^a			
	5	25 < CO ₂ ≤ 50	10 < O ₂ ≤ 15	ostatak ^a			
C	1	100					
	2	ostatak	0,5 ≤ O ₂ ≤ 30				
R	1			ostatak ^a		0,5 ≤ H ₂ ≤ 15	
	2					15 < H ₂ ≤ 50	
N	1			ostatak ^a			100
	2			ostatak ^a			0,5 ≤ N ₂ ≤ 5
	3			ostatak ^a			5 < N ₂ ≤ 50
	4			ostatak ^a		0,5 ≤ H ₂ ≤ 10	0,5 ≤ N ₂ ≤ 5
	5					0,5 ≤ H ₂ ≤ 50	ostatak
O	1		100				
Z	Smeše gasova čije komponente nisu navedene ili smeše gasova čiji sastav nije prikazan u tabeli ^b .						

^a Za potrebe ove klasifikacije, argon se može zameniti, delimično ili potpuno, helijumom.

^b Dve mešavine gasova sa istom Z-klasifikacijom se ne mogu menjati.

Klasifikacija i označavanje netopivih elektroda

U tabelama 14.5 i 14.6 prikazani su sistem klasifikacije i obeležavanje elektroda prema ISO 6848 kao i neke od preporuka za primenu volframovih elektroda pri zavarivanju.

Tabela 14.5 Hemijski sastav i označavanje volframove netopive elektrode [24]

Simbol	Hemijski sastav				Boja	Primena
	Oksid	Nečistoće	Volfram			
	Naziv	Maseni udeo u %				
WP	–	–	≤0,5	≥ 99,5	Zelena #008000	Najjeftinije su, najbrže se troše, formiraju čist, stabilan električni luk pri zavarivanju Al i Mg (NS struja). Ne preporučuju se za JS struje.
WCe 20	CeO ₂	1,8-2,2	≤0,5	Ostatak	Siva #808080	Najbolje rezultate pokazuju pri zavarivanju JS strujama male jačine ali je moguća primena i pri ostalim uslovima. Primenjuje se za zavarivanje ugljeničnih i nerđajućih čelika, nikla i titanijuma. Primenjuje sa za orbitalno zavarivanje cevi, tanke limove i delove relativno malih dimenzija.
WLa 10	La ₂ O ₃	0,8-1,2	≤0,5	Ostatak	Crna #000000	Lako uspostavljanje luka, dug radni vek, stabilan električni luk. Dobro se ponašaju pri zavarivanju JS i NS– strujama i koriste se za zavarivanje ugljeničnih i nerđajućih čelika.
WLa 15		1,3-1,7	≤0,5	Ostatak	Zlatna #FFD700	
WLa 20		1,8-2,2	≤0,5	Ostatak	Plava #0000FF	
WTh 10	ThO ₂	0,8-1,2	≤0,5	Ostatak	Žuta #FFFF00	Najčešće korišćene elektrode sa dugim radnim vekom. Lako uspostavljanje električnog luka, nema skretanja luka, JS struje pri zavarivanju nerđajućih čelika, nikla i titanijuma, NS struje za legure Al.
WTh 20		1,7-2,2	≤0,5	Ostatak	Crvena #FF0000	
WTh 30		2,8-3,2	≤0,5	Ostatak	Ljubičasta #EE82EE	
WZr 3	ZrO ₂	0,15-0,5	≤0,5	Ostatak	Braon #A52A2A	Idealne za zavarivanje NS strujama i potpuno neupotrebljive za JS struje. Električni luk je stabilan.
WZr 8		0,7-0,9	≤0,5	Ostatak	Bela #FFFFFF	

Tabela 14.6 Dimenzije volframovih elektroda (prečnik i dužina), orijentacione vrednosti jačine struje I_z i tipovi struja koje se koriste pri radu [24]

Prečnik elektrode	JS				NS	
	JSDP		JSIP			
	I_z [A]					
d_e [mm]	Čisti Volfram	Volfram sa dodacima	Čisti Volfram	Volfram sa dodacima	Čisti Volfram	Volfram sa dodacima
0,25	≤15	≤15	–	–	≤15	≤15
0,30	≤15	≤15	–	–	≤15	≤15
0,50	2-20	2-20	–	–	2-15	2-15
1,00	10-75	10-75	–	–	10-55	15-70
1,50	60-150	60-150	10-20	10-20	45-90	60-125
1,60	60-150	60-150	10-20	10-20	45-90	60-125
2,00	75-180	100-200	15-25	15-25	65-125	85-160
2,40	122-220	150-250	15-30	15-30	80-140	120-210
2,50	130-230	170-250	17-30	17-30	80-140	120-210
3,00	150-300	210-310	20-35	20-35	140-180	140-230
3,20	160-310	225-330	20-35	20-35	160-190	150-250
4,00	275-450	350-480	35-50	35-50	180-260	240-350
4,80	380-600	480-650	50-70	50-70	240-350	330-450
5,00	400-625	500-675	50-70	50-70	240-350	330-460
6,30	550-875	650-950	65-100	65-100	300-450	430-575
6,40	575-900	750-1000	70-125	70-125	325-450	450-600
8,00						650-830
10,00						
Standardne dužine elektroda $l=50, 75, 150, 175, 300, 450, 600$ mm.						

Priprema osnovnog materijala za zavarivanje

Tabele 14.7 do 14.10 prikazuju tipove pripreme spoja prema SRPS EN ISO 9692-1:2014: Zavarivanje i srodni postupci – Tipovi pripreme spoja – Deo 1: Ručno elektrolučno zavarivanje topivom elektrodom, elektrolučno zavarivanje topivom elektrodom u zaštitnom gasu, gasno zavarivanje, TIG zavarivanje i zavarivanje čelika snopom [25].

Tabele 14.11 i 14.12 prikazuju tipove pripreme spoja prema SRPS EN ISO 9692-2:2008: Zavarivanje i srodni postupci – Priprema spoja – Deo 2: Elektrolučno zavarivanje čelika pod praškom [26].

Tabele 14.13 i 14.15 prikazuju tipove pripreme spoja prema SRPS EN ISO 9692-3:2017: Zavarivanje i srodni postupci – Tipovi spojeva – Deo 3: Elektrolučno zavarivanje u zaštitnom inertnom gasu i elektrolučno zavarivanje sa volframovom (tungstenovom) elektrodom u zaštitnom inertnom gasu aluminijuma i njegovih legura [27].

Tabela 14.7 Priprava žlebova za sučone spojene žavarene samo sa jedne strane (gasno, REL, MIG/MAG, TIG, žavarivanje snopom) [25]

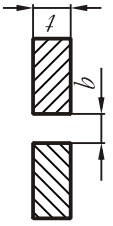
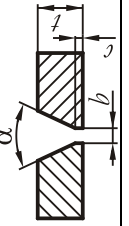
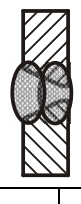
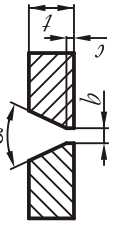
Ref. broj	Debljina materijala	Tip pripreme	Simbol ISO 2553	Poprečni presek	Ugao ^a	Zazor ^b	Debljina korena	Dubina zavarivanja	Postupak ISO 4063	Ilustracija šava	Napomene
[-]	t [mm]	[-]	[-]	[-]	α, β [°]	b [mm]	c [mm]	h [mm]	[-]	[-]	[-]
1.1	$t \leq 2$ ($r=t$)	Sučeonu rubni			-	-	-	-	3 111 141 512		Uglavnom bez dodatnog materijala
1.2.1	$t \leq 4$	Bez pripreme/Ravno čelo			-	$\approx t$	-	-	3 111 141		-
1.2.2	$3 < t \leq 8$					$6 \leq b \leq 8$			13		
	$t \leq 15$					$\approx t$ $\leq 1^d$ 0			141 ^c 52		
1.2.3	$t \leq 100$	Ravno čelo sa podloškom			-	-	-	-	51		-
1.2.4		Ravno čelo sa stepenikom									
1.3	$3 < t \leq 10$	V-šav			$40^\circ \leq \alpha \leq 60^\circ$	$b \leq 4$	$b \leq 2$	-	3 111 13 141		Gde je moguće, sa podložnom trakom
	$8 < t \leq 12$				$6^\circ \leq \alpha \leq 8^\circ$	-			52 ^d		

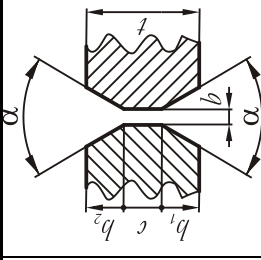
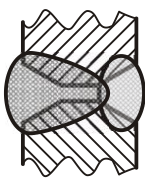
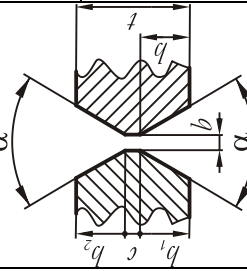
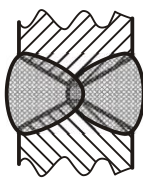
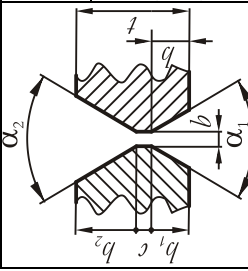
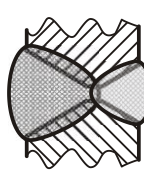
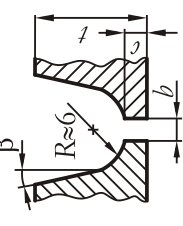
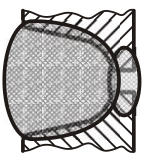
Ref.	Debljina materijala	Tip pripreme	Simbol ISO 2553	Poprečni presek	Ugao ^a	Zazor ^b	Debljina korena	Dubina	Postupak zavarivanja ISO 4063	Ilustracija šava	Napomene
[-]	t [mm]	[-]	[-]	[-]	α, β [°]	b [mm]	c [mm]	h [mm]	[-]	[-]	[-]
1.4	$t > 16$	V-šav sa podložnom pločom			$5^\circ \leq \beta \leq 20^\circ$	$5 \leq b \leq 15$	–	–	111 13		Sa podložnom pločom
1.5	$5 \leq t \leq 40$	V-šav sa širokim licem korena			$\alpha \approx 60^\circ$	$1 \leq b \leq 4$	$2 \leq c \leq 4$	–	111 13 141		–
1.6	$t > 12$	U-šav sa V- krenom			$60^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$ $8^\circ \leq \beta \leq 12^\circ$	$1 \leq b \leq 3$	–	$h \approx 4$	111 13 141		$6 \leq R \leq 9$
1.7	$t > 12$	V-šav sa V- krenom			$60^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$ $10^\circ \leq \beta \leq 15^\circ$	$2 \leq b \leq 4$	$c > 2$	–	111 13 141		–
1.8	$t > 12$	U-šav			$8^\circ \leq \beta \leq 12^\circ$	$b \leq 4$	$c \leq 3$	–	111 13 141		–

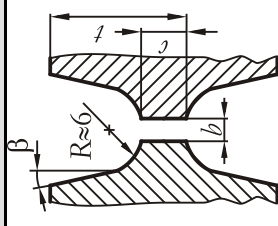
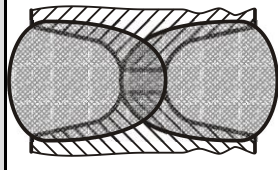
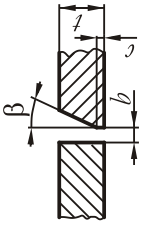
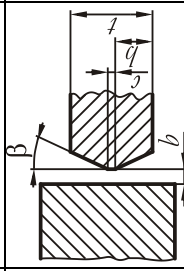
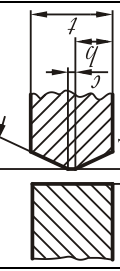
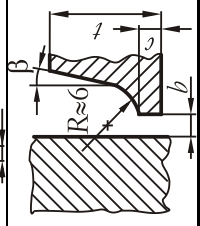
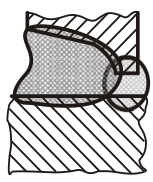
Ref. broj	Debljina materijala	Tip pripreme	Simbol ISO 2553	Poprečni presek	Ugao ^a	Zazor ^b	Debljina korena	Dubina	Postupak zavarivanja ISO 4063	Ilustracija šava	Napomene
[-]	t [mm]	[-]	[-]	[-]	α, β [°]	b [mm]	c [mm]	h [mm]	[-]	[-]	[-]
1.9.1	$3 < t \leq 10$	Nesimetrični V-šav	✓		$35^\circ \leq \beta \leq 60^\circ$	$2 \leq b \leq 4$	$1 \leq c \leq 2$	-	111 13 141		-
1.9.2											
1.10	$t > 16$	Nesimetrični V-šav sa podložnom trakom	┘┘		$15^\circ \leq \beta \leq 60^\circ$	$6 \leq b \leq 12$ $b \approx 12$	-	-	111 13 141		Sa podložnom trakom/pločom
1.11	$t > 16$	J-šav	┘		$10^\circ \leq \beta \leq 20^\circ$	$2 \leq b \leq 4$	$1 \leq c \leq 2$	-	111 13 141		-
1.12	$t \leq 16$	Ravno čelo	- ^e		-	-	-	-	52		-
	$t \leq 100$								51		
1.13	$t \leq 15$	Ravno čelo	- ^e		-	-	-	-	52		-
	$t \leq 100$								51		

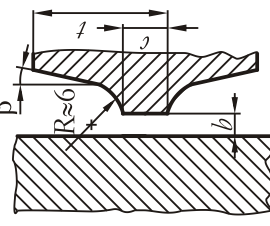
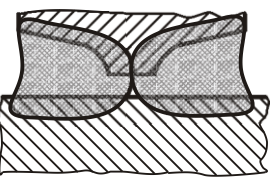
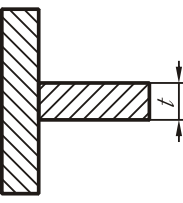
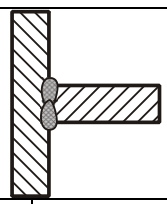
Ref. broj	Debljina materijala	Tip pripreme	Simbol ISO 2553	Poprečni presek	Ugao ^a	Zazor ^b	Debljina korena	Dubina zavarivanja	Postupak ISO 4063	Ilustracija šava	Napomene
[-]	t [mm]	[-]	[-]	[-]	α, β [°]	b [mm]	c [mm]	h [mm]	[-]	[-]	[-]
^a Uglovi su takođe veći i/ili asimetrični za zavarivanje u položaju PC prema ISO 6947 (horizontalni položaj),											
^b Prikazane dimenzije se odnose na spojeno stanje.											
^c Indikator postupka zavarivanja ne znači da je primenjiv na sve debljine osnovnog metala											
^d Sa dodatnim metalom.											
^e Simbol i broj nisu standardizovani prema ISO 2553:1992.											

Tabela 14.8 Priprema žlebova za sučone spojene zavarane sa obe strane (gasno, REL, MIG/MAG, TIG, zavarivanje snopom) [25]

Ref. broj	Debljina materijala	Tip pripreme	Simbol ISO 2553	Poprečni presek	Ugao ^a	Zazor ^b	Debljina korena	Dubina pripreme	Postupak zavarivanja ISO 4063	Ilustracija šava	Napomene
2.1	$t \leq 8$ $t \leq 15$	Ravno čelo			-	$b \approx 0,5 \cdot t$ $b \leq 0,5 \cdot t$ 0	-	-	111 141 13 52		-
2.2	$3 \leq t \leq 40$	V-šav			$\alpha \approx 60^\circ$ $40^\circ \leq \alpha \leq 60^\circ$	$b \leq 3$	$c \leq 2$	-	111 141 13		Završni prolaz je naznačen
2.3	$t > 15$	V-šav sa širokim licem korena			$\alpha \approx 60^\circ$	$1 \leq b \leq 3$ $40^\circ \leq \alpha \leq 60^\circ$	$2 \leq c \leq 4$	-	111 141 13		Izvodljivo i za manje debljine. Završni prolaz je naznačen

Ref. broj	Debljina materijala	Tip pripreme	Simbol ISO 2553	Poprečni presjek	Ugao ^a	Zazor ^b	Debljina korena	Dubina pripreme	Postupak zavarivanja ISO 4063	Ilustracija šava	Napomene
[-]	t [mm]	[-]	[-]	[-]	α, β [°]	b [mm]	c [mm]	b [mm]	[-]	[-]	[-]
2.4	$t > 10$	Dvostruki V-šav sa širokim licem korena			$\alpha \approx 60^\circ$ $40^\circ \leq \alpha \leq 60^\circ$	$1 \leq b \leq 4$	$1 \leq c \leq 6$ $b_1 = b_2 = 0,5(t-c)$	b	111 141 13		–
2.5.1	$t > 10$	Dvostruki V-šav			$\alpha_1 \approx 60^\circ$ $\alpha_2 \approx 60^\circ$ $40^\circ \leq \alpha \leq 60^\circ$	$1 \leq b \leq 3$	$c \leq 2$	$l \approx 0,5 \cdot t$	111 141 13		–
2.5.2		Asimetrični dvostruki V-šav			$\alpha_1 \approx 60^\circ$ $\alpha_2 \approx 60^\circ$ $40^\circ \leq \alpha_1 \leq 60^\circ$ $40^\circ \leq \alpha_2 \leq 60^\circ$			$l \approx 0,333 \cdot t$	111 141 13		–
2.6	$t > 12$	U-šav			$8^\circ \leq \beta \leq 12^\circ$	$1 \leq b \leq 3$ $b \leq 3$	$c \approx 5$	–	111 13 141 ^c		Završni prolaz je naznačen

Ref. broj	Debljina materijala	Tip pripreme	Simbol ISO 2553	Poprečni presjek	Ugao ^a	Zazor ^b	Debljina korena	Dubina pripreme	Postupak zavarivanja ISO 4063	Ilustracija šava	Napomene
[-]	t [mm]	[-]	[-]	[-]	α, β [°]	b [mm]	c [mm]	b [mm]	[-]	[-]	[-]
2.7	$t \geq 30$	Dvostruki U-šav			$8^\circ \leq \beta \leq 12^\circ$	$b \leq 3$	$c \approx 3$	$h \approx 0,5 \cdot (t - c)$	111 13 141 ^c		Izvodljivo kao 2.5.2
2.8	$3 \leq t \leq 30$	Asimetrični V-šav			$35^\circ \leq \beta \leq 60^\circ$	$1 \leq b \leq 4$	$c \leq 2$	–	111 13 141 ^c		Završni prolaz je naznačen
2.9.1	$t \geq 10$	K-šav			$35^\circ \leq \beta \leq 60^\circ$	$1 \leq b \leq 4$	$c \leq 2$	$h \approx 0,5 \cdot t$ ili $h \approx 0,333 \cdot t$	111 13 141		Izvodljivo kao 2.5.1
2.9.2											
2.10	$t \geq 16$	J-šav			$10^\circ \leq \beta \leq 20^\circ$	$1 \leq b \leq 3$	$c \geq 2$	–	111 13 141 ^c		Završni prolaz je naznačen

Ref. broj	Debljina materijala	Tip pripreme	Simbol ISO 2553	Poprečni presjek	Ugao ^a	Zazor ^b	Debljina korena	Dubina pripreme	Postupak zavarivanja ISO 4063	Ilustracija šava	Napomene
[-]	t [mm]	[-]	[-]	[-]	α, β [°]	b [mm]	c [mm]	b [mm]	[-]	[-]	[-]
2.11	$t > 30$	Dvostruki J-šav			$10^\circ \leq \beta \leq 20^\circ$	$b \leq 3$	$c \geq 2$	$h \approx 0,5 \cdot (t - c)$	111 13 141 ^c		Izvodljivo kao 2.5.1
2.12	$t \leq 25$ $t \leq 170$	Ravno čelo	- ^d		-	-	-	-	52 51		-

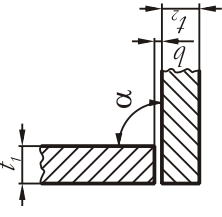
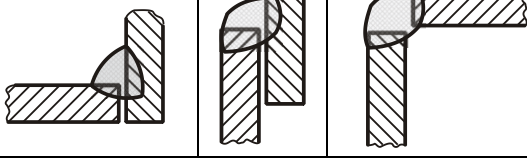
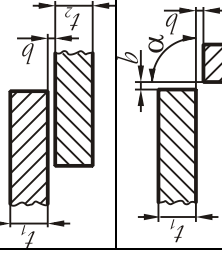
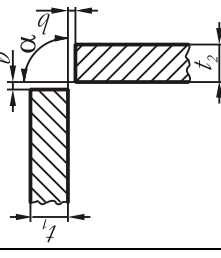
^a Uglovi su veći i/ili asimetrično postavljene kod PC položaja zavarivanja.

^b Prikazane dimenzije se odnose na spojeno stanje.

^c Indikator postupka zavarivanja ne znači da je primjenjiv na sve debljine osnovnog metala.

^d Simbol i broj nisu standardizovani prema ISO 2553.

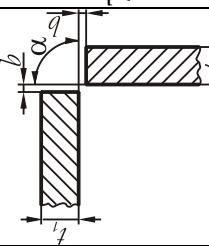
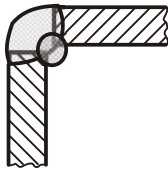
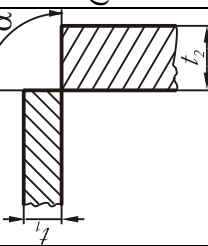
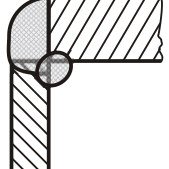
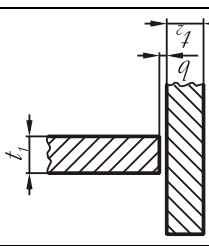
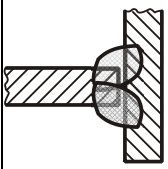
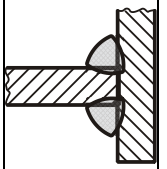
Tabela 14.9 Priprava šlebov za ugaone šarove (gasno, REL, MIG/MAG, TIG, zavarivanje snopom) [25]

Referentni broj	Debljina materijala	Tip pripreme	Simbol prema ISO 2553	Poprečni presek	Ugao	Zazor	Preporučeni postupak zavarivanja prema ISO 4063	Ilustracija šava
[-]	t [mm]	[-]	[-]	[-]	α, β [°]	b [mm]	[-]	[-]
3.1.1					$70^\circ \leq \alpha \leq 100^\circ$			
3.1.2	$t_1 > 2$ $t_2 > 2$	Ravno čelo			—	$b \leq 2$	3 111 13 141	
3.1.3					—			

^a Indikator postupka zavarivanja ne znači da je primenjiv na sve debljine osnovnog metala.

^b Simbol je primjenljiv jedino za $\alpha = 90^\circ$.

Tabela 14.10 Priprava šlebova za ugaone žarove žavarene sa obe strane (gasno, REL, MIG/MAG, TIG, zavaranjanje snopom) [25]

Referentni broj	Debljina materijala	Tip pripreme/spoja	Simbol prema ISO 2553	Poprečni presek	Ugao	Zazor	Preporučeni postupak zavarivanja prema ISO 4063	Ilustracija šava
[-]	t [mm]	[-]	[-]	[-]	α, β [°]	b [mm]	[-]	[-]
4.1.1	$t_1 > 3$ $t_2 \geq 3$	Ravno čelo			$70^\circ \leq \alpha \leq 100^\circ$	$b \leq 2$	3 111 13 141	
4.1.2	$t_1 > 2$ $t_2 \geq 5$				$60^\circ \leq \alpha \leq 120^\circ$	—		
4.1.3	$2 \leq t_1 \leq 4$ $2 \leq t_2 \leq 4$				—	$b \leq 2$		
	$t_1 > 4$ $t_2 \geq 4$					—		

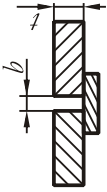
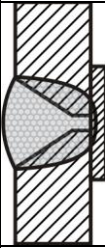
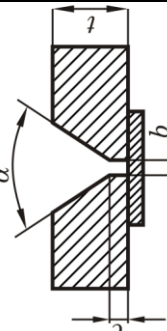
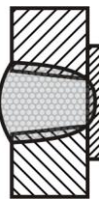
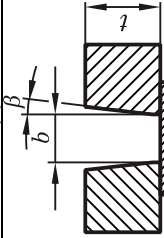
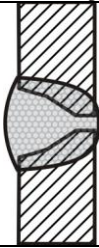
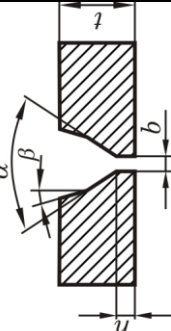
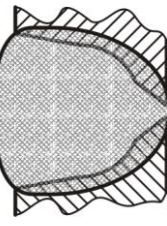
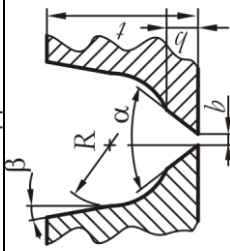
^a Indikator postupka zavarivanja ne znači da je primjenjiv na sve debljine osnovnog metala.

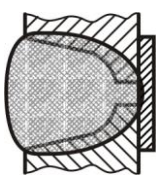
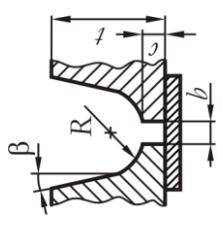
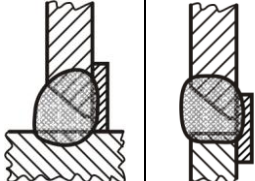
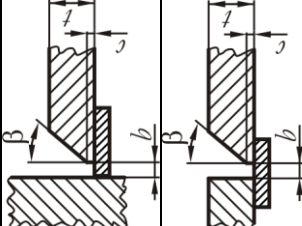
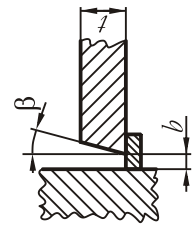
^b Simbol je primjenjiv jedino za $\alpha = 90^\circ$.

^a Indikator postupka zavarivanja ne znači da je primenljiv na sve debljine osnovnog metala.

^b Simbol je primjenljiv jedino za $\alpha=90^\circ$.

Tabela 14.11 Priprava žlebova za sučone šavove zavarjene samo sa jedne strane (EPP) [26]

Spoj				Priprema spoja					Položaj zavarivanja (prema ISO 6947)	Napomene	
Ref. broj	Debljina materijala	Tip pripreme	Simbol prema ISO 2553	Ilustracija	Poprečni presek	Ugao	Zazor Radijus	Debljina korene površine	Dubina pripreme		
[-]	t [mm]	[-]	[-]	[-]	[-]	α, β [°]	b, R [mm]	c [mm]	b [mm]	[-]	
1.2	$3 \leq t \leq 12$	Sučeoní spoj bez pripreme/ ravn o čelo				–	$b \leq 0,5t$ maks. 5	–	–	Sa podloškom Minimalna debljina podloške: 5 mm ili 0,5t.	
1.3.	$10 \leq t \leq 20$	V-šav	∨			$30^\circ \leq \alpha \leq 50^\circ$	$4 \leq b \leq 8$	$c \leq 2$	–		PA
1.14	$t > 20$	V-šav sa podložnom pločicom	∪			$4^\circ \leq \beta \leq 10^\circ$	$10 \leq b \leq 25$	–	–		
1.3.3	$t > 12$	V-šav sa V-korenom	∪∪			$60^\circ \leq \alpha \leq 70^\circ$ $4^\circ \leq \beta \leq 10^\circ$	$1 \leq b \leq 4$	$0 \leq c \leq 3$	$4 \leq b \leq 6$	PA	Koreni prolaz izveden nekim drugim postupkom
1.3.7	$t \geq 12$	U-šav sa V-korenom	∪∩			$60^\circ \leq \alpha \leq 70^\circ$ $4^\circ \leq \beta \leq 10^\circ$	$1 \leq b \leq 4$ $5 \leq R \leq 10$	$0 \leq c \leq 3$	$4 \leq b \leq 6$	PA	

Spoj				Priprema spoja					Položaj zavarivanja (prema ISO 6947)	Napomene
Ref. broj	Debljina materijala	Tip pripreme	Simbol prema ISO 2553	Ilustracija	Poprečni presek	Ugao	Zazor Radijus	Debljina korene površine	Dubina pripreme	
[-]	t [mm]	[-]	[-]	[-]	[-]	α, β [°]	b, R [mm]	c [mm]	b [mm]	[-]
1.7	$t \geq 30$	U-šav				$4^\circ \leq \beta \leq 10^\circ$	$1 \leq b \leq 4$ $5 \leq R \leq 10$	$2 \leq c \leq 3$	–	PA Sa podloškom Minimalna debljina podloške: 5 mm ili 0,5t.
1.4	$3 \leq t \leq 16$	Nesimetrični V-šav				$30^\circ \leq \beta \leq 50^\circ$	$1 \leq b \leq 4$	$c \leq 2$	–	PA PB Sa podloškom Minimalna debljina podloške: 5 mm ili 0,5t.
1.15	$t \geq 16$	Nesimetrični V-šav sa podloškom				$8^\circ \leq \beta \leq 10^\circ$	$5 \leq b \leq 15$	–	–	PA PB Sa podloškom Minimalna debljina podloške: 5 mm ili 0,5t.

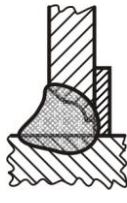
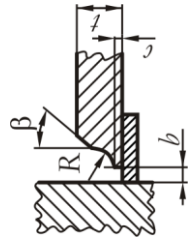
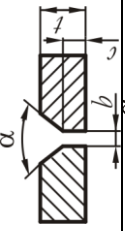
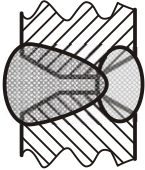
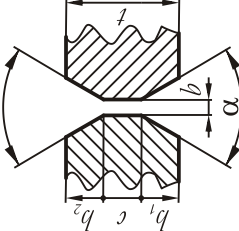
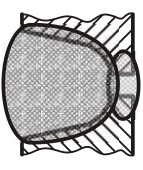
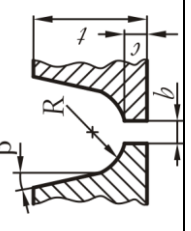
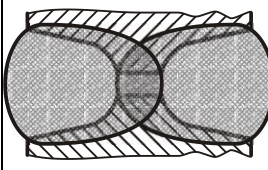
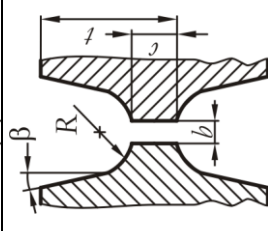
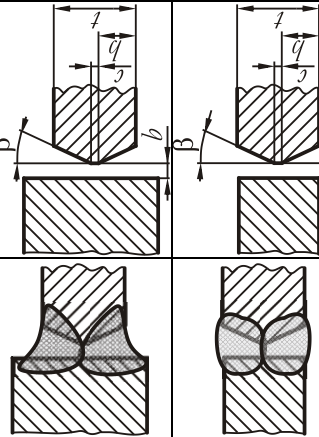
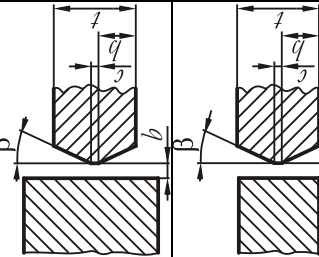
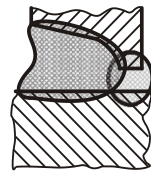
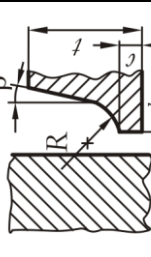
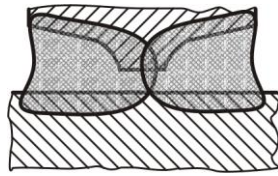
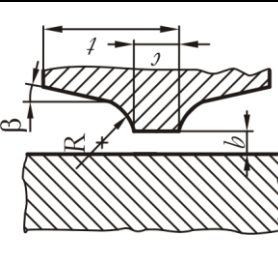
Spoj				Priprema spoja					Položaj zavarivanja (prema ISO 6947)	Napomene
Ref. broj materijala	Tip pripreme	Simbol prema ISO 2553	Ilustracija	Poprečni presek	Ugao	Zazor Radijus	Debljina korene površine	Dubina pripreme		
[-]	t [mm]	[-]	[-]	[-]	α, β [°]	b, R [mm]	c [mm]	b [mm]	[-]	[-]
1.6	$t \geq 16$	J-šav			$4^\circ \leq \beta \leq 10^\circ$	$2 \leq b \leq 4$ $5 \leq R \leq 10$	$2 \leq c \leq 3$	–	PA PB	Sa podloškom Minimalna debljina podloške: 5 mm ili 0,5 <i>t</i>

Tabela 14.12 Priprema žlebova za sučone šavove zavarene sa obe strane (EPP) [26]

Spoj				Priprema spoja					Položaj zavarivanja (prema ISO 6947)	Napomene	
Ref. broj	Debljina materijala	Tip pripreme	Simbol prema ISO 2553	Ilustracija	Poprečni presek	Ugao	Zazor Radijus	Debljina korene površine			Dubina pripreme
2.2	t [mm]	[-]	[-]		[-]	α, β [°]	b, R [mm]	c [mm]	b [mm]	[-]	[-]
2.2	$3 \leq t \leq 20$	Ravno čelo				—	$b \leq 2$	—	—	PA	Što manji zazor
2.5.9	$10 \leq t \leq 35$	Y-šav sa širokim korenom (uz prethodno izvedeni koreni prolaz)				$30^\circ \leq \alpha \leq 60^\circ$	$b \leq 4$	$4 \leq c \leq 10$	—	PA	Koreni prolaz izveden nekim drugim

Spoj					Priprema spoja					Položaj zavarivanja (prema ISO 6947)	Napomene
Ref. broj	Debljina materijala	Tip pripreme	Simbol prema ISO 2553	Ilustracija	Poprečni presek	Ugao	Zazor Radijus	Debljina korene površine	Dubina pripreme		
[-]	t [mm]	[-]	[-]		[-]	α, β [°]	b, R [mm]	c [mm]	b [mm]	[-]	
2.5.2	$10 \leq t \leq 20$	V-šav sa širokim korenom				$60^\circ \leq \alpha \leq 80^\circ$	$b \leq 4$	$5 \leq c \leq 15$	–	PA	postupkom
2.5.5	$t \geq 16$	Dvostruki V-šav sa širokim korenom				$30^\circ \leq \alpha \leq 70^\circ$	$b \leq 4$	$4 \leq c \leq 10$	$b_1 \approx b_2$	PA	–
2.7.9	$t \geq 30$	Y-šav sa širokim korenom				$5^\circ \leq \beta \leq 10^\circ$	$b \leq 4$ $5 \leq R \leq 10$	$4 \leq c \leq 10$	–	PA	
2.7.7	$t \geq 50$	Dvostruki U-šav sa širokim korenom				$5^\circ \leq \beta \leq 10^\circ$	$b \leq 4$ $5 \leq R \leq 10$	$4 \leq c \leq 10$	$b = 0,5(t-c)$	PA	Isto kao 2.5.5

Spoj				Priprema spoja						Položaj zavarivanja (prema ISO 6947)	Napomene
Ref. broj	Debljina materijala	Tip pripreme	Simbol prema ISO 2553	Ilustracija	Poprečni presek	Ugao	Zazor Radijus	Debljina korene površine	Dubina pripreme		
[-]	t [mm]	[-]	[-]		[-]	α, β [°]	b, R [mm]	c [mm]	b [mm]	[-]	[-]
2.6.6	$t \geq 12$	K-šav sa širokim korenom	K			$30^\circ \leq \beta \leq 50^\circ$	$b \leq 4$	$4 \leq c \leq 10$	–	PA PB	Isto kao 2.5.5. Obavezan koreni prolaz.
2.8.9	$t \geq 12$	J-šav sa širokim korenom	J			$5^\circ \leq \beta \leq 10^\circ$	$b \leq 4$ $5 \leq R \leq 10$	$4 \leq c \leq 10$	–	PA PB	Obavezan koreni prolaz.
2.4.9	$t < 12$	Nesimetrični V-šav sa širokim korenom				$30^\circ \leq \beta \leq 50^\circ$	$b \leq 4$	$c \leq 2$	–	PA PB	
2.8.8 A	$t \geq 30$	Dvostruki J-šav	K			$5^\circ \leq \beta \leq 10^\circ$	$b \leq 4$ $5 \leq R \leq 10$	$2 \leq c \leq 7$	–	PA PB	Isto kao 2.5.5. Obavezan koreni prolaz.

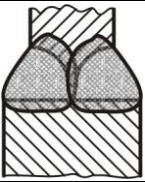
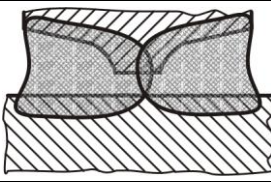
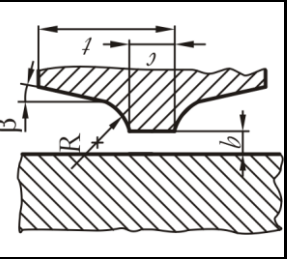
Spoj				Priprema spoja					Položaj zavarivanja (prema ISO 6947)	Napomene
Ref. broj	Debljina materijala	Tip pripreme	Simbol prema ISO 2553	Ilustracija	Poprečni presjek	Ugao	Zazor Radijus	Debljina korene površine		
[-]	t [mm]	[-]	[-]		[-]	α, β [°]	b, R [mm]	c [mm]	[-]	[-]
2.8.8 B	$t \leq 12$	Dvostruki J-šav za zavarivanje u jednom prolazu				-	$b \leq 2$ $5 \leq R \leq 10$	$2 \leq c \leq 3$	PA PB	U jednom prolazu.
2.8.8 C	$t > 12$	Dvostruki J-šav za zavarivanje u više prolaza				$5^\circ \leq \beta \leq 10^\circ$	$b \leq 4$ $5 \leq R \leq 10$	$2 \leq c \leq 7$	PA PB	Sa više prolaza. Obavezan koreni prolaz.

Tabela 14.13 Priprema šlebova za sučione šavove od aluminijuma zavarane samo sa jedne strane (MIG i TIG) [27]

Spoj				Priprema spoja					Preporučeni postupak zavarivanja ^c	Napomena
Ref. broj ^a	Debljina materijala	Oznaka	Simbol ^b	Ilustracija	Poprečni presjek	Ugao	Zazor	Debljina korena		
[-]	t [mm]	[-]	[-]	[-]	[-]	α, β [°]	b, R [mm]	c [mm]	[-]	[-]
1.1	$t \leq 2$	Sučeonni rubni spoj				-	-	-	141	-

Spoj				Priprema spoja					Preporučeni postupak zavarivanja ^c	Napomena
Ref. broj ^a	Debljina materijala	Oznaka	Simbol ^b	Ilustracija	Poprečni presjek	Ugao	Zazor	Debljina korena		
[-]	<i>t</i> [mm]	[-]	[-]	[-]	[-]	α, β [°]	<i>b, R</i> [mm]	<i>c</i> [mm]	– [mm]	[-]
1.2	$t \leq 4$	Ravno čelo				–	$b \leq 2$	–	–	141
	$2 \leq t \leq 4$	Ravno čelo sa podložnom pločom				–	$b \leq 1,5$	–	–	131
		V-šav				$\alpha \geq 50^\circ$	$b \leq 3$	$c \leq 2$	–	141
1.3	$3 \leq t \leq 5$	V-šav sa privremenom podloškom				$60^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$	$b \leq 2$	$c \leq 2$	–	131
1.14	$8 \leq t \leq 20$	V-šav sa podloškom				$15^\circ \leq \beta \leq 20^\circ$	$3 \leq b \leq 10$	–	–	131
1.5	$3 \leq t \leq 15$	V-šav sa širokim licem korena				$\alpha \geq 50^\circ$	$b \leq 2$	$c \leq 2$	–	131 141
1.5	$6 \leq t \leq 25$	V-šav sa širokim licem korena i podloškom				$\alpha \geq 50^\circ$	$4 \leq b \leq 10$	$c = 3$	–	131

Spoj					Priprava spoja				Preporučeni postupak zavarivanja ^c	Napomena
Ref. broj ^a	Debljina materijala	Oznaka	Simbol ^b	Ilustracija	Poprečni presek	Ugao	Zazor	Debljina korena	Ostalo	
[-]	t [mm]	[-]	[-]	[-]	[-]	α, β [°]	b, R [mm]	c [mm]	– [mm]	[-]
1.7	ploča $t \geq 12$	U-šav				$15^\circ \leq \beta \leq 20^\circ$	$b \leq 2$	$2 \leq c \leq 4$	$4 \leq r \leq 6$	141
	cev $t \geq 5$					$15^\circ \leq \beta \leq 20^\circ$	$1 \leq b \leq 3$	$2 \leq c \leq 4$	$3 \leq f \leq 4$ $0 \leq e \leq 4$	
1.4	$4 \leq t \leq 10$	Nesimetrični V-šav				$\beta \geq 50^\circ$	$b \leq 3$	$c \leq 2$	–	131 141
	$3 \leq t \leq 20$	Nesimetrični V-šav sa podložnom pločicom				$50^\circ \leq \beta \leq 70^\circ$	$b \leq 6$	$c \leq 2$	–	131 141
	$2 \leq t \leq 20$	V-šav na profilu				$20^\circ \leq \beta \leq 40^\circ$	$b \leq 3$	$1 \leq c \leq 3$	–	131 141

Spoj				Priprema spoja				Preporučeni postupak zavarivanja ^c	Napomena
Ref. broj ^a	Debljina materijala	Oznaka	Simbol ^b	Ilustracija	Poprečni presek	Ugao	Zazor	Debljina korena	Ostalo
[-]	t [mm]	[-]	[-]	[-]	[-]	α, β [°]	b, R [mm]	c [mm]	– [mm]
1.3.B		V-šav na profilu				$10^\circ \leq \beta \leq 20^\circ$	$0 \leq b \leq 3$	$2 \leq c \leq 3$	$c_1 \geq 1$
^a Na osnovu ISO 2553:1992; ^b Saglasno sa ISO 2553 kasnijeg od 1992; ^c Referentni broj saglasan sa ISO 4063.									

Tabela 14.14 Priprema žlebova za sućone šavove od aluminijuma zavarene sa obe strane (MIG i TIG) [27]

Spoj				Priprema spoja				Preporučeni postupak zavarivanja ^c	Napomena
Ref. broj ^a	Debljina materijala	Oznaka	Simbol ^b	Ilustracija	Poprečni presek	Ugao	Zazor	Debljina korena	Ostalo
[-]	t [mm]	[-]	[-]	[-]	[-]	α, β [°]	b, R [mm]	c [mm]	– [mm]
2.2	$6 \leq t \leq 20$	Ravno čelo				–	$b \leq 6$	–	–
2.5.9	$6 \leq t \leq 15$	V-šav sa širokim korenom (uz prethodno izvedeni koreni prolaz)				$\alpha \geq 50^\circ$	$b \leq 3$	$2 \leq c \leq 4$	–

Spoj				Priprema spoja					Preporučeni postupak zavarivanja ^c	Napomena
Ref. broj ^a	Debljina materijala	Oznaka	Symbol ^b	Ilustracija	Poprečni presek	Ugao	Zazor	Debljina korena	Ostalo	
[-]	t [mm]	[-]	[-]	[-]	[-]	α, β [°]	b, R [mm]	c [mm]	– [mm]	[-]
2.3.3	$6 \leq t \leq 15$	Dvostruki V-šav sa širokim licem korena				$\alpha \geq 60^\circ$	$b \leq 3$	$c \leq 2$	–	141
	$t > 15$					$\alpha \geq 70^\circ$				131
2.5.5	$6 \leq t \leq 15$	Dvostruki V-šav sa širokim licem korena				$\alpha \geq 50^\circ$	$b \leq 3$	$2 \leq c \leq 4$	$b_1 = b_2$	141
	$t > 15$					$60^\circ \leq \alpha \leq 70^\circ$		$2 \leq c \leq 6$		131
2.4.9	$3 \leq t \leq 15$	Asimetrični V-šav				$\beta \geq 50^\circ$	$b \leq 3$	$c \leq 2$	–	141 131
2.7.7	$t \geq 15$	Dvostruki U-šav				$15^\circ \leq \beta \leq 20^\circ$	$b \leq 3$	$2 \leq c \leq 4$	$b = 0,5(t-c)$ $R=6$	131

^a Na osnovu ISO 2553:1992; ^b Saglasno sa ISO 2553 kasnijeg od 1992.; ^c Referentni broj saglasan sa ISO 4063.

Tabela 14.15 Priprava žlebova za ugaone šavove od aluminijuma (MIG i TIG) [27]

Ref. broj ^a	Spoj			Priprema spoja					Preporučeni postupak zavarivanja ^c	Napomena
	Debljina materijala	Oznaka	Symbol ^b	Ilustracija	Poprečni presek	Ugao	Zazor	Debljina korena	Ostalo	
[-]	t [mm]	[-]	[-]	[-]	[-]	α, β [°]	b, R [mm]	c [mm]	– [mm]	[-]
3.10 A	–	Ravno čelo				$\alpha \approx 90^\circ$	$b \leq 2$	–	–	141 131
3.10 B	–	Ravno čelo				$\alpha \approx 90^\circ$	$b \leq 2$	–	–	141 131
3.4 A	–	T-šav sa nesimetričnim V-šavom				$\beta \geq 50^\circ$	$b \leq 2$	$c \leq 2$	$t_2 \geq 5$	141 131
3.4.4 B	–	K-šav				$\beta \geq 50^\circ$	$b \leq 2$	$c \leq 2$	$t_2 \geq 8$	141 131

^a Na osnovu ISO 2553:1992; ^b Saglasno sa ISO 2553 kasnijeg od 1992; ^c Referentni broj saglasan sa ISO 4063.

Parametri zavarivanja

U prilogu su prikazani parametri zavarivanja za gasni postupak zavarivanja, TIG postupak zavarivanja, MIG/MAG postupke zavarivanja, REL postupak zavarivanja i EPP postupak zavarivanja.

Parametri zavarivanja gasnim postupkom

Tabela 14.16 Parametri zavarivanja gasnim postupkom [28]

Osnovni materijal	Tehnika zavarivanja vrsta spoja, položaj	Debljina lima	Protok gasne mešavine	Brzina zavarivanja	Vreme zavarivanja po dužnom metru	Prečnik žice	Protok, maseni protok		
		s [mm]	Q [ℓ/h]	v [m/h]	t [min/m]	d [mm]	$Q_{\min}$ [ℓ/m]	$Q_{\max}$ [ℓ/m]	Q [g/m]
Konstrukcioni ugljenični čelik	u levo	≤ 6	100·s	12/s	5·s	s/2+1	8,5	10	10
	u levo, naviše	4-10	100·s	12/s	5·s	s/2+1	8,5	10	10
	naviše, dvostrano	10-18	100·s	12/s	5·s	s/2	8,5	10	9
	u desno	5-15	100·s	15/s	4·s	s/2	6,7	8	10
	T-spoj	1-10	75·s	15/s	4·s	s/2+1	5	6	6,3
	Koritasti položaj	1-10	125·s	12/s	5·s	s/2+1	10	12	12
	Vertikalno	2-10	60·s	10/s	6·s	s/2+1	6	7,2	7,5
	Vertikalno	3-12	30·s	25/s	2·s	s/2	2,4	3	5
	Vertikalno	13-30	25·s	20/s	3·s	s/4	2,5	3	4
	preklopni	5-12	75·s	10/s	6·s	s/2	7,5	9	8
	nadglavno	5-10	75·s	8/s	7·s	s/2	9,5	11,5	10
Nerđajući čelik	U levo		75·s	10/s	6·s	3·s/4	7,5	9	8
	VertikalnoB		20·s	20/s	3·s	s/2	2	2,4	5
Sivi liv			150·s	10/s	6·s	3·s/4	14	1	10
Bakar	U levo	2-5	30·s ² +40·s	24/s	2,5·s	s	12	14	
	Vertikalno	5-12	120·s	24/s	2,5·s	s/2	10	12	14
Mesing	U levo		100·s	12/s	5·s	s	6	12	13
Aluminijum i njegove legure	U levo	1-10	12·s ² +40·s	30/s	2·s	s/2	3,3	4	3,5
	Vertikalno	13-30	30·s	24/s	2,5·s	s/2	2,4	2,8	1,4
	Vertikalno	6-12	25·s	24/s	2,5·s	s/2	2	2,5	1,3

Parametri zavarivanja TIG postupkom

Tabela 14.17. Parametri zavarivanja ugljeničnih čelika TIG postupkom

Debljina komada	Prečnik elektrode	Prečnik žice	Brzina zavarivanja	Jačina struje	Protok Ar
t [mm]	d_e [mm]	d_{ξ} [mm]	v_{ξ} [cm/min]	I [A]	Q [l/min]
0,5	1,6	-	15-25	15-30	4
0,8	1,6	-	30-40	35-50	4
1,0	1,6	0,8	30-50	35-60	4
1,2	1,6	1,2	40-80	50-80	4
1,5	1,6	1,2	50-100	70-100	5
2,0	3,2	1,2	70-120	80-120	5

Tabela 14.18. Parametri zavarivanja niskolegiranih čelika TIG postupkom

Debljina komada	Prečnik elektrode	Prečnik žice	Brzina zavarivanja	Prečnik mlaznice	Jačina struje	Protok Ar
t [mm]	d_e [mm]	d_{ξ} [mm]	v_{ξ} [cm/min]	D_m [mm]	I [A]	Q [l/min]
3,0	1,6; 2,0; 2,4	3,0	25-30	6	120-150	5
4,0	2,4	3,0-4,0	25	9	140-180	5
5,0	2,4; 2,5; 3,0; 3,2	3,0-4,0	20-24	11	180-250	5-6
6,0	3,2	4,0-5,40	18-20	11-13	180-340	6
8,0	3,2	5,0	15	13-15	250-340	7
10,0	4,0	5,0-6,0	13	13	260-350	7

Tabela 14.19. Parametri zavarivanja visokolegiranih čelika TIG postupkom

Debljina komada [mm]	Prečnik elektrode [mm]	Prečnik žice [mm]	Jačina struje [A]	Protok gasa [l/min]	Broj prolaza	Brzina zavarivanja [m/min]
0,6	1,0	bez	15-25	3	1	30-40
1,0	1,0-1,6	1,0-1,5	25-80	4	1	25-30
2,0	1,6	1,5-	80-110	4	1	25-30
3,0	2,4	2-3	100-150	4	1	25-30
4,0	2,4	3	120-200	5	1	25
5	3,2	3-4	200-250	5	1	25
6	3,2	4	200-250	6	2	25

Tabela 14.20 Parametri zavarivanja aluminijuma i legura TIG postupkom

Debljina komada	Broj prolaza	Prečnik žice	Protok Ar	Jačina struje [A]			Temperatura predgrevanja
[mm]	[-]	[mm]	[l/min]	Horizont.	Vertikal.	Nadglavno	[°C]
1	1	2	7	60	50	40	-
2	1	2-3	7	80	80	75	-
3	1	3	8	140	135	130	-
4	1-2	3-4	9	180	170	160	-
6	2	3-4	10	280	240	230	-
8	2	4-5	12	320	270	260	150
10	2-3	5	14	360	280	270	200
12	3	6	16	420	330	280	200
15	5	6	16	450	-	-	250
20	7	6-8	20-25	450	-	-	350
30	9	8	20-25	450	-	-	350

Tabela 14.21 Primenjivost pojedinih zaštitnih gasova na čelicima pri zavarivanju TIG postupkom

Zaštitni gas	Osnovni metal									
	Ugljenični čelici	Niskolegirani čelici	Austenitni nerđajući čelici	Dupleks nerđajući čelici	Super dupleks nerđajući čelici	Feritni nerđajući čelici	Visokolegirani nerđajući čelici	Al	Cu	Ni
Ar	x	x	x	x	x	x	x	x	x	-
Ar+He			x	x	x	x	x	x	x	x
Ar+(2-5)% H ₂			x	-	-	-	x			x
Ar+(1-2)% N ₂			-	x	x	-	-			-
Ar+30%He+(1-2)%N ₂			-	x	x	-	-			-

Parametri zavarivanja MIG/MAG postupcima

Tabela 14.22 Parametri MAG zavarivanja mekog čelika, sušioni spoj, PA, debljina žice za zavarivanje 0,8 mm

Debljina OM	Zazor OM	Brzina dotura žice	Napon	Jačina struje
[mm]	[mm]	[m/min]	[V]	[A]
1	0	2,8-3,8	16-17	65-80
1,2	0	3,2-4,0	18-19	70-85
1,6	0,5	4,0-4,8	19-20	85-95
2,0	0,8	5,8-7,0	19-20	110-125
2,5	0,8	7,0-8,4	20-21	125-140
3,0	1,5	7,0-8,4	20-21	125-140

Tabela 14.23 Jačine struje zavarivanja MIG/MAG postupcima zavarivanja pri kojima se ostvaruje prenos metala u mlažu

Tip dodatnog materijala	Prečnik elektrodne žice [mm]	Zaštitni gas	Jačina struje [A]
Ugljenični i niskolegirani čelici	0,8	90% Ar, 10%CO ₂	155-165
	0,9		175-185
	1,2		215-225
	1,3		265-275
	1,6		280-290
	0,9	98% Ar, 2%O ₂	13-140
	1,2		205-215
	1,3		240-250
Ugljenični i niskolegirani kompozitni čelici	1,6		265-275
	1,0	90% Ar, 10%CO ₂	140-15
	1,2		160-170
	1,3		17-180
	1,6		220-230
Nerđajući čelici	0,8	98% Ar, 2%O ₂	120-130
	0,9		140-150
	1,2		185-195
	1,6		250-260
	0,8	90% Ar, 10%CO ₂	130-140
	0,9		200-210
	1,2		145-155
	1,6		255-265

Tabela 14.24 Preporuke za zavarivanje ugljeničnih i niskolegiranih čelika MAG postupkom

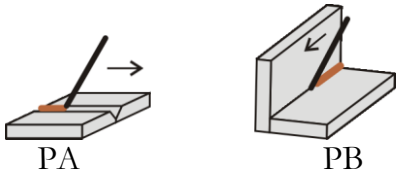
Zaštitni gas: 100%CO ₂ Rastojanje mlaznice od OM: 13 mm Protok gasa: 12-17 l/min Kratkospojeni prenos metala															
Debljina OM [mm]	0,6	0,6	0,9	0,9	1,5	1,5	2,0	2,0	3,0	3,0	4,0	4,0	4,0	5,0	6,0
Prečnik elektrodne žice [mm]	0,6	0,8	0,8	0,9	0,8	0,9	0,8	0,9	0,8	0,9	0,8	0,9	1,1	1,1	1,1
Brzina dodavanja žice [m/min]	2,5	1,9	3,2	2,5	4,4	3,8	5,7	4,4	7,0	5,7	7,6	6,4	3,2	3,8	5,0
Brzina zavarivanja [m/min]	0,25	0,25	0,35	0,33	0,33	0,5	0,45	0,45	0,5	0,5	0,43	0,5	0,45	0,38	0,33
Jačina struje [A]	35	35	55	80	80	120	100	130	115	160	130	175	145	165	200
Napon JSIP [V]	17	17	18	18	19	19	20	20	21	21	22	22	18-20	19-21	20-22

Tabela 14.25 Preporuke za zavarivanje ugljeničnih i niskolegiranih čelika MAG postupkom

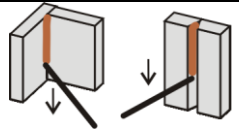
Zaštitni gas: 100%CO ₂ Rastojanje mlaznice od OM: 13 mm Protok gasa: 12-17 l/min Kratkospojeni prenos metala												
Debljina OM [mm]	0,6	0,6	1	1	2	2	4	4	4	5	5	
Prečnik elektrodne žice [mm]	0,6	0,8	0,8	0,9	0,8	0,9	0,8	0,9	1,1	1,1	1,1	
Brzina dodavanja žice [m/min]	2,5	1,9	3,8	3,2	5,7	4,4	7,6	6,4	3,2	3,8	5,0	
Brzina zavarivanja [m/min]	0,25	0,25	0,38	0,48	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,43	0,43	
Jačina struje [A]	35	35	70	100	100	130	130	175	145	165	200	
Napon JSIP [V]	17	17	18	18	20	20	22	22	19	20	21	

Tabela 14.26 Preporuke za zavarivanje ugljeničnih i niskolegiranih čelika MIG/MAG postupkom – ugaoni šav

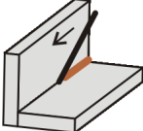
Prečnik elektrodne žice: 1,1 mm Rastojanje mlaznice od OM: 16-19 mm Protok gasa: 17-19 l/min Pulsni prenos metala		 PA		 PB	
Debljina OM [mm]		6	8	10	
Brzina dodavanja žice [m/min]		7,6	8,3	9,5	
Brzina zavarivanja c		0,33-0,36	0,35-0,38	0,25-0,28	
Brzina deponovanja [kg/h]		3,6	4,0	4,5	
Napon JSIP [V]	95% Ar, 5% CO ₂	23-24	24-25	27-28	
	90% Ar, 10% CO ₂	24,5-25,5	25,5-26,5	28-29	
	75-80% Ar, 25-20% CO ₂	28-29	28,5-30	30-31	

Tabela 14.27 Preporuke za zavarivanje nerđajućeg čelika MIG/MAG postupkom – ugaoni šav

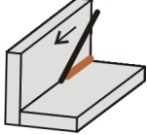
Prečnik elektrodne žice: 1,1 mm Rastojanje mlaznice od OM: 16-19 mm Zaštitni gas: 98% Ar+2% O ₂ Protok gasa: 12-19 l/min Pulsni prenos metala			  PA PB		
Debljina OM [mm]	2,0	3,0	5,0	6,0	8,0
Brzina dodavanja žice [m/min]	3,8	4,6	5,0	7,0	7,6
Brzina deponovanja [kg/h]	1,9	2,3	2,5	3,4	3,8

Tabela 14.28 Preporuke za zavarivanje aluminijuma MIG postupkom – sučioni spoj

OM	Položaj zavarivanja	Žleb	Rastojanje OM	Broj prolaza	Prečnik elektr. žice	Jačina struje DC+	Napon	Protok gasa	Brzina zavarivanja	Približna potrošnja elektrode
[mm]	[-]	[-]	[mm]	[-]	[mm]	[A]	[V]	[l/min]	[m/min]	[g/m]
2	PA	Bez	0	1	0,8	70-110	15-20	12	0,64-1,14	22,32
	PA	Bez	2,4	1	0,8	70-110	15-20	12	0,64-1,14	29,76
2	PA	Bez	0	1	0,8-1,2	90-150	18-22	14	0,64-1,14	1,8
	PA, PC, PE, PF	Bez	3,2	1	0,8	110-130	18-23	14	0,64-0,76	2
3	PA, PC, PE	Bez	0-2,4	1	0,8-1,2	120-150	20-24	14	0,6-0,76	29,76
	PA, PC, PF, PE	Bez	4,8	1	0,8-1,2	110-135	19-23	14	0,46-0,71	44,64
5	PA, PC, PF	I	0-1,6	1+1	0,8-1,2	130-175	22-26	16	0,6-0,76	59,53
	PA, PC, PF	Y	0-1,6	1	1,2	140-180	23-27	16	0,6-0,76	74,41
	PE	Y	0-1,6	2	1,2	140-175	23-27	28	0,6-0,76	74,41
	PA, PC	Y	2,4-4,8	2	1,2-1,6	140-185	23-27	16	0,6-0,76	119,05
	PA, PE	Y	4,8	3	1,2	130-175	23-27	28	0,63-0,69	148,82
6	PA	I	0-2,4	1+1	1,2-1,6	175-200	24-28	19	0,6-0,76	89,29
	PA	Y	0-2,4	2	1,2-1,6	185-225	24-29	19	0,6-0,76	119,05
	PC, PF	Y	0-2,4	3+1	1,2	165-190	25-29	21	0,63-0,89	148,82
	PE	Y	0-2,4	3+1	1,2-1,6	180-200	25-29	28	0,63-0,89	148,82
	PC, PF	Y	3,2-6,4	2-3	1,2-1,6	175-225	25-29	19	0,6-0,76	178,58
	PE, PA	Y	6,4	4-6	1,2-1,6	170-200	25-29	28	0,63-1,02	178,58
10	PA	Y	0-2,4	1+1	1,6	225-290	26-29	24	0,51-0,76	238,11
	PA	Y	0-2,4	2+1	1,6	210-275	26-29	24	0,6-0,89	267,87
	PC, PF	Y	0-2,4	3+1	1,6	190-220	26-29	26	0,6-0,76	297,63
	PE	Y	0-2,4	5+1	1,6	200-250	26-29	38	0,63-1,02	297,63
	PA, PC	Y	6,4-9,5	4	1,6	210-290	26-29	24	0,6-0,76	520,86
	PE, PA	Y	9,5	8-10	1,6	190-260	26-29	38	0,63-1,02	744,08
19	PA	Y	0-2,4	3+1	2,4	340-400	26-31	28	0,36-0,51	744,08
	PA	Y	0-3,2	4+1	2,4	325-375	26-31	28	0,41-0,76	1041,72
	PC, PA, PE	Y	0-1,6	8+1	1,6	240-300	26-31	38	0,6-0,76	1116,12
	PA	Y	0-1,6	3+3	1,6	270-330	26-31	28	0,41-0,61	1041,72
	PC, PA, PE	Y	0-1,6	6+6	1,6	230-280	26-31	38	0,41-0,61	1116,12

Pri zavarivanju 5xxx elektrodama, koristiti maksimalne jačine struje a minimalne napone. Za serije 1xxx, 2xxx i 4xxx koristiti niže jačine struje i više napone.

Parametri zavarivanja REL postupkom

Tabela 14.30 Prečnik elektrode, površina žleba i masa elektrode – sučioni V šav, PA

δ [mm]	s_1 [mm]	d_e koren [mm]	d_e popuna [mm]	A_{nk} [mm ²]	m_e [g/mm]
2,0	1	-	2,0-2,5	4,3	0,04
3,0	1	-	2,5	8,5	0,07
4,0	1	-	2,5-3,2	13,5	0,11
5,0	1	2,5	3,2	19,5	0,07-0,09
6,0	1	3,2	4,0	27	0,10-0,12
7,0	1,5	3,2	4,0	39	0,10-0,21
8,0	1,5	3,2	4,0-5,0	49	0,10-0,29
9,0	1,5	3,2	4,0-5,0	61	0,10-0,38
10,0	2	3,2	4,0-5,0	78	0,10-0,51
12,0	2	3,2	4,0-5,0	108	0,10-0,75
14,0	2	3,2	4,0-5,0	142	0,10-1,02
16,0	2	4,0	5,0-6,0	180	0,12-1,30
18,0	2	4,0	5,0-6,0	223	0,12-1,72
20,0	2	4,0	5,0-6,0	271	0,12-2,01

Tabela 14.31 Prečnik i masa elektrode, površina žleba - ugaoni spoj, horizontalni položaj

δ [mm]	d_e koren [mm]	d_e popuna [mm]	A_{nk} [mm ²]	m_e [g/mm]
2,0	-	2,5	4,0	0,04
3,0	-	3,2-4,0	9,0	0,08
4,0	-	3,2-4,0	16	0,15
5,0	-	3,2-4,0	25	0,23
6,0	-	3,2-4,0	36	0,33
7,0	-	3,2-4,0	49	0,45
8,0	4,0	5,0	64	0,18-0,41
9,0	4,0	5,0	81	0,18-0,56
10,0	4,0	5,0-6,0	100	0,18-0,73
11,0	4,0	5,0-6,0	121	0,18-0,92
12,0	4,0	5,0-6,0	144	0,18-1,14
13,0	4,0	5,0-6,0	169	0,18-1,37
14,0	4,0	5,0-6,0	196	0,18-1,60
15,0	4,0	5,0-6,0	225	0,18-1,89

Tabela 14.32 Jačina struje i napon luka

d_e [mm]	2	2,5	3,2	4	5	6
I_z [A]	60	75	115	160	230	300
U [V]	22	23	25	27	29	32

Tabela 14.33 Broj prolaza za sučioni i ugaoni šav

δ [mm]	2-5	5-8	8-10	10-12	12-14	14-16	16-17	17-18	18-19	19-20
Sučioni	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ugaoni	1	1	2	2	3	3	4	5	6	6

Tabela 14.34 Potreban broj elektroda

Masa	Prečnik/dužina elektrode [mm/mm]									
[kg/m]	1,5/250	2/250	2,5/250	2,5/250	3,2/350	3,2/450	4/350	4/450	5/450	6/450
0,01	3,6	2,0	1,3	0,9	0,5	0,4	0,4	0,3	0,2	0,1
0,02	7,3	4,1	2,6	1,8	1,1	0,8	0,7	0,5	0,3	0,2
0,03	10,9	6,1	3,9	2,7	1,6	1,2	1,1	0,8	0,5	0,4
0,04	14,5	8,2	5,3	3,6	2,1	1,6	1,4	1,1	0,7	0,5
0,05	18,2	10,2	6,5	4,5	2,7	2,0	1,8	1,3	0,9	0,6
0,06	21,8	12,3	7,9	5,4	3,2	2,4	2,1	1,6	1,0	0,7
0,07	25,4	14,3	9,2	6,3	3,7	2,9	2,5	1,9	1,2	0,9
0,08	29,1	16,4	10,5	7,2	4,3	3,3	2,8	2,2	1,4	1,0
0,09	32,7	18,4	11,8	8,1	4,8	3,7	3,2	2,4	1,5	1,1
0,10	36,4	20,4	13,1	9,0	5,3	4,1	3,5	2,7	1,7	1,2
0,15	54,5	30,7	19,7	13,5	8,	6,1	5,3	4,0	2,6	1,8
0,20	72,8	40,9	26,2	18,1	10,7	8,1	7,0	5,4	3,4	2,4
0,25	91,0	51,1	32,8	22,6	13,3	10,2	8,8	6,7	4,3	3,0
0,30	109	61,3	39,4	27,1	16,0	12,2	10,6	8,1	5,2	3,6
0,35	127	71,5	46,0	31,6	18,7	14,2	12,3	9,4	6,0	4,2
0,40	145	81,8	52,2	36,2	21,4	16,3	14,1	10,8	6,9	4,8
0,45	164	92,0	59,1	40,7	24,0	18,3	15,8	12,1	7,7	5,4
0,50	182	102	65,6	45,2	26,7	20,3	17,6	13,4	8,6	6,0
0,55	200	113	72,2	49,7	29,4	22,4	19,4	14,8	9,4	6,6
0,60	218	123	78,8	54,3	32,0	24,4	21,1	16,1	10,3	7,2
0,65	236	133	85,4	58,8	34,7	26,4	22,9	17,5	11,1	7,7
0,70	254	143	92,0	63,3	37,4	28,5	24,6	18,8	12,0	8,3
0,75	273	153	98,5	67,8	40,0	30,5	26,4	20,2	12,9	8,9
0,80	291	164	105	72,2	42,7	32,5	28,2	21,5	13,7	9,5
0,85	309	174	112	76,9	45,4	34,6	30	22,8	14,6	10,1
0,90	327	184	118	81,4	48,	36,6	31,7	24,2	15,4	10,7
0,95	346	194	125	85,9	50,7	38,6	33,5	25,6	16,3	11,3
1,00	364	204	131	90,4	53,4	40,7	35,2	26,9	17,2	11,9
2,00	728	409	262	181	107	61,3	70,4	53,8	34,3	23,8
3,00	1090	613	394	271	160	122	106	80,7	51,5	35,7
4,00	1450	818	460	362	214	162	141	108	68,6	47,6
5,00	1820	1020	525	452	267	203	176	134	85,7	59,5
6,00	2180	1230	788	543	320	244	211	161	103	71,5
7,00	2540	1430	920	633	374	285	246	188	120	83,4
8,00	2910	1640	1050	723	427	325	282	215	137	95,3
9,00	3270	1840	1180	814	480	366	317	242	154	107
10,00	3640	2040	1310	904	534	407	352	269	172	119

Parametri zavarivanja EPP postupkom

Tabela 14.35 Parametri zavarivanja (I spoj sa čeličnom podloškom, JSIP)

Debljina lima	Koreni zazor	Struja	Napon	Brzina zavarivanja	Prečnik elektrode	Potrošnja elektrode	Čelična podloška	
							Debljina	Širina
[mm]	[mm]	[A]	[V]	[mm/s]	[mm]	[g/mm]	mm	mm
3,6	1,6	650	28	20	3,2	0,104	3,2	15,9
4,8	1,6	850	32	15	4,8	0,194	4,8	19,0
6,4	3,2	900	33	11	4,8	0,248	6,4	25,4
9,5	3,2	950	33	10	5,6	0,357	6,4	25,4
12,7	4,8	1100	34	8	5,6	0,685	9,5	25,4

Tabela 14.36 Parametri zavarivanja (I spoj, dva prolaza, JSIP, poluautomatsko zavarivanje)

Debljina lima	Donji prolaz				Gornji prolaz				Potrošnja elektrode
	Struja	Napon	Brzina zavarivanja	Prečnik elektrode	Struja	Napon	Brzina zavarivanja	Prečnik elektrode	
[mm]	[A]	[V]	[mm/s]	[mm]	[A]	[V]	[mm/s]	[mm]	[g/mm]
3,6	325	27	21	1,6	250	25	21	1,6	0,104
4,8	350	32	19	1,6	300	29	19	1,6	0,131
6,4	375	33	18	1,6	325	34	18	1,6	0,158
9,5	475	35	12	2,0	425	33	12	2,0	0,268
12,7	500	36	9	2,0	475	34	9	2,0	0,417
15,9	500	37	7	2,0	500	35	7	2,0	0,640

Tabela 14.37 Parametri zavarivanja (I spoj, dva prolaza, JSIP, automatsko zavarivanje)

Debljina lima	Donji prolaz				Gornji prolaz				Potrošnja elektrode
	Struja	Napon	Brzina zavarivanja	Prečnik elektrode	Struja	Napon	Brzina zavarivanja	Prečnik elektrode	
[mm]	[A]	[V]	[mm/s]	[mm]	[A]	[V]	[mm/s]	[mm]	[g/mm]
6,4	575	32	20	4,0	475	29	20	4,0	0,164
9,5	850	35	14	4,0	500	33	14	4,0	0,343
12,7	950	36	11	4,8	700	35	11	4,8	0,506
15,9	950	36	9	4,8	900	36	9	4,8	0,745

Tabela 14.38 Parametri zavarivanja (T spoj, položaj u koritu, JSIP, JSIP)

Dužina katete (debljina)	Struja	Napon	Brzina zavarivanja	Prečnik elektrode	Potrošnja elektrode
[mm]	[A]	[V]	[mm/s]	[mm]	[g/mm]
4,8	360	30	21	1,6	0,070
6,4	425	45	14	2,0	0,209
7,9	450	47	10	2,0	0,328
9,5	450	47	7	2,0	0,477
12,7	450	47	4	2,0	0,849

Tabela. 14.39 Parametri zavarivanja (T spoj, položaj u koritu, JSIP)

Dužina katete (debljina)	Struja	Napon	Brzina zavarivanja	Prečnik elektrode	Potrošnja elektrode
[mm]	[A]	[V]	[mm/s]	[mm]	[g/mm]
3,2	400	24	27	3,2	0,045
4,8	500	26	18	4,0	0,089
6,4	650	30	14	4,0	0,164
7,9	700	33	10	4,0	0,253

LITERATURA

- [1] SRPS EN ISO 4063:2013: Zavarivanje i srodni postupci – Lista postupaka i njihovo označavanje, 28.01.2013;
- [2] ISO 857-1:1998: Welding and allied processes – Vocabulary – Part 1: Metal welding processes, 12/1998 (povučen iz upotrebe);
- [3] ISO/TR 25901-3:2016: Welding and allied processes – Vocabulary – Part 3: Welding processes, 03/2016;
- [4] SRPS EN ISO 2560:2011: Potrošni materijali za zavarivanje – Obložene elektrode za ručno elektrolučno zavarivanje nelegiranih i finozrnih čelika – Klasifikacija, 30.09.2011;
- [5] SRPS EN ISO 18275:2013: Potrošni materijali za zavarivanje – Obložene elektrode za ručno elektrolučno zavarivanje čelika povišene čvrstoće – Klasifikacija, 29.11.2013;
- [6] SRPS EN ISO 3580:2012: Potrošni materijali za zavarivanje – Obložene elektrode za ručno elektrolučno zavarivanje vatropostojanih čelika – Klasifikacija, 21.06.2012;
- [7] SRPS EN ISO 3581:2017: Potrošni materijali za zavarivanje – Obložene elektrode za ručno elektrolučno zavarivanje nerđajućih i vatrootpornih čelika – Klasifikacija, 31.01.2017;
- [8] SRPS EN ISO 14172:2017: Potrošni materijali za zavarivanje – Obložene elektrode za ručno elektrolučno zavarivanje nikla i njegovih legura – Klasifikacija, 31.01.2017;
- [9] SRPS EN ISO 17777:2017: Potrošni materijali za zavarivanje – Obložene elektrode za ručno elektrolučno zavarivanje bakra i legura bakra – Klasifikacija, 31.01.2017;
- [10] SRPS EN ISO 14341:2012: Potrošni materijali za zavarivanje – Žičane elektrode i depoziti za zavarivanje u zaštiti gasa nelegiranih i finozrnih čelika – Klasifikacija, 23.05.2012;
- [11] SRPS EN ISO 16834:2013: Potrošni materijali za zavarivanje – Žičane elektrode, žice, šipke i depoziti za elektrolučno zavarivanje čelika povišene čvrstoće pod zaštitom gasa, 29.11.2013;
- [12] SRPS EN ISO 21952:2013: Potrošni materijali za zavarivanje – Žičane elektrode, žice, šipke i depoziti za elektrolučno zavarivanje pod zaštitom gasa čelika otpornih na puzanje – Klasifikacija, 29.11.2013;
- [13] SRPS EN ISO 14343:2011: Potrošni materijali za zavarivanje – Elektrodne žice, elektrodne trake, žice i šipke za elektrolučno zavarivanje nerđajućih i vatrootpornih čelika – Klasifikacija, 30.09.2011;
- [14] SRPS EN ISO 18274:2012: Potrošni materijali za zavarivanje – Pune žičane i pune trakaste elektrode, pune žice i pune šipke za zavarivanje topljenjem nikla i legura nikla – Klasifikacija, 21.06.2012;
- [15] SRPS EN ISO 24373:2012: Dodatni materijali za zavarivanje – Pune žice i šipke za zavarivanje topljenjem bakra i legura bakra – Klasifikacija, 21.06.2012;
- [16] SRPS EN ISO 18273:2017: Potrošni materijali za zavarivanje – Žičane elektrode, žice i šipke za zavarivanje aluminijuma i legura aluminijuma – Klasifikacija, 31.01.2017;
- [17] SRPS EN ISO 1071:2017: Potrošni materijali za zavarivanje – Obložene elektrode, žice, šipke i punjene žice za zavarivanje topljenjem sivog liva – Klasifikacija, 31.01.2017;
- [18] SRPS EN ISO 24034:2012: Potrošni materijali za zavarivanje – Pune žičane elektrode, pune žice i pune šipke za zavarivanje topljenjem titana i legura titana – Klasifikacija, 21.06.2012;
- [19] SRPS EN ISO 636:2017: Potrošni materijali za zavarivanje – Šipke, žice i depoziti za TIG zavarivanje nelegiranih i finozrnih čelika – Klasifikacija, 31.01.2017;
- [20] SRPS EN ISO 14171:2017: Potrošni materijali za zavarivanje – Pune žičane elektrode,

puna elektrodna žica i kombinacije elektroda/prašak za elektrolučno zavarivanje pod praškom nelegiranih i sitnozrnih čelika – Klasifikacija, 31.01.2017;

- [21] SRPS EN ISO 26304:2013: Potrošni materijali za zavarivanje – Pune elektrodne žice, cevaste punjene žice i kombinacije žica–prašak za EPP zavarivanje čelika povišene čvrstoće – Klasifikacija, 29.11.2013;
- [22] SRPS EN ISO 24598:2013: Potrošni materijali za zavarivanje – Pune žice, punjene žice i kombinacije elektrode/praška za zavarivanje pod praškom čelika otpornih na puzanje – Klasifikacija, 29.11.2013;
- [23] SRPS EN ISO 14175:2009: Potrošni materijali za zavarivanje – Gasovi i gasne mešavine za zavarivanje topljenjem i srodne postupke, 09.07.2009;
- [24] SRPS EN ISO 6848:2017: Elektrolučno zavarivanje i rezanje – Netopive volframove elektrode – Klasifikacija, 31.01.2017;
- [25] SRPS EN ISO 9692-1:2014: Zavarivanje i srodni postupci – Tipovi pripreme spoja – Deo 1: Ručno elektrolučno zavarivanje topivom elektrodom, elektrolučno zavarivanje topivom elektrodom u zaštitnom gasu, gasno zavarivanje, TIG zavarivanje i zavarivanje čelika snopom, 29.08.2014;
- [26] SRPS EN ISO 9692-2:2008: Zavarivanje i srodni postupci – Priprema spoja – Deo 2: Elektrolučno zavarivanje čelika pod praškom, 27.02.2008;
- [27] SRPS EN ISO 9692-3:2017: Zavarivanje i srodni postupci – Tipovi spojeva – Deo 3: Elektrolučno zavarivanje u zaštitnom inertnom gasu i elektrolučno zavarivanje sa volframovom (tungstenovom) elektrodom u zaštitnom inertnom gasu aluminijuma i njegovih legura, 21.01.2017.