

Tehnologija zavarivanja

2

Tehnologija zavarivanja

2

Prvo izdanje

Miroslav M. Mijajlović

**Niš
jul, 2021**

Miroslav M. Mijajlović
TEHNOLOGIJA ZAVARIVANJA 2
I izdanje

Recenzenti:

Dr Vencislav Grabulov, naučni savetnik, Institut IMS, Beograd
docent dr Mišo Bjelić, Fakultet za mašinstvo i građevinarstvo, Kraljevo

Tehnička priprema:

prof. dr Miroslav M. Mijajlović, dipl. inž. maš, IWE

Korice:

prof. dr Miroslav M. Mijajlović, dipl. inž. maš, IWE
Lena M. Mijajlović

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

621.791(075.8)

МИЈАЈЛОВИЋ, Мирослав М., 1979-

Tehnologija zavarivanja 2 / Miroslav M. Mijajlović. - 1. izd. - Niš :
Univerzitet, Mašinski fakultet, 2021 (Niš : Unigraf X-Copy). - 206, [10] str.
: ilustr. ; 30 cm

Tiraž 150. - Tekst štampan dvostubačno. - Prilozi: str. [1-8]. - Napomene i
bibliografske reference uz tekst. - Bibliografija uz svako poglavlje.

ISBN 978-86-6055-148-3

a) Заваривање

COBISS.SR-ID 42403593

Odlukom Nastavno-naučnog veća Mašinskog fakulteta u Nišu br 612-316-4-1/2021 od 22.06.2021, ova knjiga je dobila status univerzitetskog udžbenika i odobreno je njeno štampanje.

Tiraž štampe: **150 primeraka**

Štampa: **Unigraf X-Copy, Aleksandra Medvedeva 14, Niš, Srbija.**

Zabranjeni su svi oblici umnožavanja ovog udžbenika bez pisanog odobrenja autora. Prekršioci ove zabrane snosiće posledice saglasno Zakonu o autorskom i srodnim pravima („Sl. glasnik RS”, br. 104/2009, 99/2011, 119/2012, 29/2016 – odluka US i 66/2019).

Predgovor

Knjiga „Tehnologija zavarivanja 2” je logični nastavak knjige „Tehnologija zavarivanja 1” (iz 2017. godine), i ona prikazuje i opisuje veliki broj „ostalih” postupaka zavarivanja i postupke lemljenja koji nisu prikazani u „Tehnologiji zavarivanja 1”. „Ostalim” ili „egzotičnim” postupcima zavarivanja smatraju se svi postupci koji nisu uobičajeni niti često primenjivani postupci spajanja u tipičnoj zavarivačkoj radionici Srbije: elektrootporni postupci zavarivanja, postupci zavarivanja trenjem, postupci zavarivanja snopom, aluminotermijski postupak zavarivanja, postupci zavarivanja difuzijom i tako dalje. Zajedno sa knjigom „Tehnologija zavarivanja 1”, „Tehnologija zavarivanja 2” zaokružuje celinu gotovo svih postupaka zavarivanja današnjice.

Kao i „Tehnologija zavarivanja 1”, knjiga „Tehnologija zavarivanja 2” je namenjena studentima mašinstva koji imaju mala ili nikakva znanja o zavarivanju, lemljenju i srodnim postupcima. Samim tim, u knjizi su date samo „osnove” ovih postupaka. Svakako, ove osnove nisu dovoljne za potpuno poznavanje tehnologije zavarivanja. Zato svojim studentima dajem sugestiju: detaljnije informacije nađite čitajući, učeći, studirajući.

Početkom 2021. godine objavljena je nova verzija standarda ISO/DIS 4063: *Welding, brazing, soldering, cutting, mechanical joining and adhesive bonding – Nomenclature of processes and reference numbers*. Ovaj standard je delimično promenio postojeći sistem obeležavanja postupaka zavarivanja i uveo je novu osnovnu grupu postupaka zavarivanja delova od plastike (ISO 4063 – 6). Takođe, standard je uveo novi sistem obeležavanja mehanički ostvarenih spojeva. „Tehnologija zavarivanja 2” se značajno oslanja na ovaj standard: uvodi izmene, novu grupu ISO 4063 – 6 u „ostale” postupke zavarivanja, ali se ne bavi „mehaničkim” postupcima spajanja delova niti postupcima sečenja i rezanja (osnovna grupa ISO 4063 – 8).

Knjiga „Tehnologija zavarivanja 2” ima devet poglavlja pri čemu je prvih osam posvećeno osnovnim grupama postupaka zavarivanja i lemljenja (ISO 4063 – 1, ISO 4063 – 2, ISO 4063 – 3, ISO 4063 – 4, ISO 4063 – 5, ISO 4063 – 6, ISO 4063 – 7 i ISO 4063 – 9) a deveto poglavlje prikazuje sve važeće nacionalne i međunarodne standarde vezane za tehnologiju zavarivanja i postupke zavarivanja. Deseti deo knjige čine razni prilozi.

Iskrenu zahvalnost dugujem recenzentima dr Vencislavu Grabulovu, naučnom savetniku sa Instituta IMS iz Beograda i dr Miši Bjeliću, docentu Fakulteta za mašinstvo i građevinarstvo iz Kraljeva. Njihovo znanje i iskustvo u oblasti tehnologije zavarivanja, pretočeni u iskrene i korisne sugestije koje su mi uputili, podigli su kvalitet ove knjige. Veliku zahvalnost dugujem Dušanu Ćiriću, diplomiranom inženjeru mašinstva, kao i svojim studentima, koji su ovaj rukopis više puta pročitali i ukazali mi na propuste, slovne i gramatičke greške. Odgovornost za sve preostale greške, propuste i neistine navedene u knjizi, snosim samo ja.

Svakako, svi dobronamerni komentari i sugestije su dobrodošli.

Nastajanje ove knjige pratili su pandemija, izolacija, „socijalna distanca”, nerazum, apsurd, prerani odlazak dragih ljudi, kaos... i nada.

U Nišu, juna 2021. godine.

Miroslav M. Mijajlović



Хвала!

Sadržaj

1	POSTUPCI ZAVARIVANJA ELEKTRIČNIM LUKOM	1
1.1	Elektrolučni postupci zavarivanja topivom elektrodom bez zaštitnog gasa	1
1.1.1	Ručni elektrolučni postupak zavarivanja obloženom topivom elektrodom	2
1.1.2	Gravitacioni elektrolučni postupak zavarivanja obloženom topivom elektrodom	2
1.1.3	Elektrolučni postupak zavarivanja golom metalnom žicom*	4
1.1.4	Elektrolučni postupak zavarivanja samozaštitnom punjenom žicom	4
1.1.5	Elektrolučni postupak zavarivanja spiralno namotanom i obloženom žicom*	5
1.1.6	Elektrolučni postupak zavarivanja prskalicom (položenom elektrodom)	7
1.2	Elektrolučni postupci zavarivanja pod praškom	8
1.2.1	Elektrolučni postupak zavarivanja pod praškom punom žičanom elektrodom uz dodatak metalnog praha	9
1.3	Elektrolučni postupci zavarivanja topivom elektrodom žicom u atmosferi zaštitnog gasa	10
1.4	Elektrolučni postupci zavarivanja netopivom volframovom elektrodom u atmosferi zaštitnog gasa	11
1.4.1	Autogeni TIG postupak zavarivanja	12
1.4.2	TIG postupak zavarivanja punjenom žicom	13
1.4.3	TIG postupak zavarivanja u atmosferi redukujućeg gasa primenom pune elektrodne žice	13
1.4.4	TIG postupak zavarivanja u atmosferi redukujućeg gasa primenom punjene elektrodne žice	13
1.4.5	Elektrolučni postupak zavarivanja netopivom volframovom elektrodom u atmosferi aktivnog zaštitnog gasa	13
1.4.6	Elektrolučni postupak zavarivanja netopivom volframovom elektrodom u atmosferi atomskog vodonika	14
1.5	Elektrolučni postupci zavarivanja plazmom	15
1.6	Ostali elektrolučni postupci zavarivanja	25
1.6.1	Postupak magnetno-elektrolučnog zavarivanja sa rotirajućim lukom	26
1.6.2	Postupak zavarivanja ugljeničnom elektrodom	27
	Literatura	28
2	POSTUPCI ZAVARIVANJA ELEKTRIČNIM OTPOROM	31
2.1	Postupci tačkastog elektrootpornog zavarivanja	37
2.1.1	Postupak direktnog tačkastog elektrootpornog zavarivanja	38
2.1.2	Postupak indirektnog tačkastog elektrootpornog zavarivanja	38
2.2	Postupci šavnog elektrootpornog zavarivanja	39
2.2.1	Postupak preklopnog šavnog elektrootpornog zavarivanja	39
2.2.2	Postupak preklopnog šavnog elektrootpornog zavarivanja sa deformisanjem	41
2.2.3	Postupak preklopnog šavnog elektrootpornog zavarivanja sa pripremljenom ivicom	41
2.2.4	Postupak preklopnog šavnog elektrootpornog zavarivanja uz dodatak žice	42

2.2.5	Postupak sučeonog šavnog elektrootpornog zavarivanja uz dodatak folije za zavarivanje	42
2.2.6	Postupak preklopnog šavnog elektrootpornog zavarivanja uz dodatak trake za zavarivanje	43
2.3	Postupci bradavičastog elektrootpornog zavarivanja	44
2.3.1	Postupak indirektnog bradavičastog elektrootpornog zavarivanja	44
2.3.2	Postupak direktnog bradavičastog elektrootpornog zavarivanja	45
2.4	Postupak zavarivanja varničanjem	45
2.5	Postupak sučeonog elektrootpornog zavarivanja	47
2.6	Postupak sučeonog elektrootpornog zavarivanja vitkih delova na ploču	48
2.7	Postupak visokofrekventnog elektrootpornog zavarivanja	49
2.8	Pribor i oprema za zavarivanje	49
2.8.1	Izvori električne struje i provodnici	50
2.8.2	Elektrode za elektrootporno zavarivanje	51
2.9	Parametri zavarivanja	54
2.1	Zavarivost	58
2.11	Priprema spoja	59
2.12	Veza između parametara zavarivanja i osobina zavarene tačke	59
2.12.1	Peltijerov efekat	60
2.12.2	Šant efekat	61
2.13	Tipične greške u zavarenom spoju	62
2.14	Sistemi kontrole i merenja parametara	63
2.15	Zdravlje i bezbednost	63
2.16	Nestandardni i novi postupci zavarivanja električnim otporom	64
	Literatura	65
3	POSTUPCI ZAVARIVANJA SAGOREVANJEM GORIVIH GASOVA	67
3.1	Postupci zavarivanja sagorevanjem gorivog gasa uz dodatak kiseonika	67
3.2	Postupci zavarivanja sagorevanjem gorivog gasa na vazduhu	68
	Literatura	69
4	POSTUPCI ZAVARIVANJA PRITISKOM	71
4.1	Postupci zavarivanja ultrazvukom	71
4.1.1	Postupak toplog zavarivanja ultrazvukom	74
4.1.2	Postupak tačkastog zavarivanja ultrazvukom	74
4.1.3	Postupak šavnog zavarivanja ultrazvukom	74
4.2	Postupci zavarivanja trenjem	75
4.2.1	Postupak zavarivanja trenjem sa direktnim pogonom	79
4.2.2	Postupak zavarivanja trenjem sa zamajcem	79
4.2.3	Postupak zavarivanja vitkih delova na ploču trenjem	80
4.2.4	Postupak linearnog zavarivanja trenjem	81
4.2.5	Postupak radijalnog zavarivanja trenjem	82
4.2.6	Postupak orbitalnog zavarivanja trenjem	83
4.3	Postupci zavarivanja trenjem sa mešanjem	83
4.3.1	Postupak tačkastog zavarivanja trenjem sa mešanjem	89
4.3.2	Postupak tačkastog zavarivanja trenjem sa mešanjem sa popunom tehnološke rupe	89

4.3.3	Postupak tačkastog zavarivanja trenjem sa mešanjem kretanjem alata po pravoj liniji	90
4.3.4	Postupak tačkastog zavarivanja trenjem sa mešanjem kretanjem alata po konturi	91
4.3.5	Postupak tačkastog zavarivanja trenjem ljuljanjem alata	92
4.4	Postupci zavarivanja velikom količinom mehaničke energije	92
4.4.1	Postupak zavarivanja eksplozijom	92
4.4.2	Postupak zavarivanja magnetnim pulsom	94
4.5	Postupak zavarivanja difuzijom	95
4.6	Postupak gasno-pritisnog zavarivanja	97
4.7	Postupci hladnog zavarivanja pritiskom	99
4.8	Postupci toplog zavarivanja pritiskom	100
4.8.1	Postupak zavarivanja toplim alatom	100
4.8.2	Postupak termo-pritisnog zavarivanja	100
4.8.3	Postupak koekstruzionog zavarivanja	101
4.9	Kovačko zavarivanje	102
	Literatura	103
5	POSTUPCI ZAVARIVANJA SNOPOM ČESTICA	107
5.1	Postupci zavarivanja elektronskim snopom	107
5.2	Postupci zavarivanja laserskim snopom	111
	Literatura	116
6	POSTUPCI ZAVARIVANJA PLASTIKE	119
6.1	Postupci zavarivanja električnim otporom primenom grejača koji ostaje u šavu	121
6.1.1	Postupak elektrofuzionog zavarivanja	121
6.2	Postupak radio-frekventnog zavarivanja	122
6.3	Postupci zavarivanja rastvaranjem	123
6.4	Postupci zavarivanja zagrejanim gasom	123
6.4.1	Postupak brzog zavarivanja zagrejanim gasom	125
6.4.2	Postupak zavarivanja zagrejanim gasom primenom okrugle mlaznice	125
6.4.3	Postupak ručnog zavarivanja zagrejanim gasom bez dodatnog materijala	126
6.4.4	Postupak mašinskog zavarivanja zagrejanim gasom bez dodatnog materijala	126
6.4.5	Postupak mašinskog zavarivanja zagrejanim gasom sa dodatnim materijalom	126
6.4.6	Postupak konvekcionog zavarivanja zagrejanim gasom	126
6.4.7	Postupak ekstruzionog zavarivanja	127
6.5	Postupci termičkog zaptivanja	127
6.5.1	Postupak impulsnog zavarivanja	128
6.5.2	Postupak zavarivanja toplom polugom	128
6.6	Postupci zavarivanja toplim alatom	128
6.6.1	Postupak zavarivanja toplim alatom u obliku ogledala	129
6.6.2	Postupak zavarivanja zagrejanim klinom	130
6.6.3	Postupak zavarivanja plastičnih fittinga zagrejanim alatom	131
6.6.4	Postupak zavarivanja cevnih (sedlastih) uboda zagrejanim alatom	131
6.7	Postupci zavarivanja bez svetlucanja/varničenja	132

6.7.1	Postupak protočnog/livačkog zavarivanja	132
6.8	Ostali postupci zavarivanja plastike	133
6.8.1	Postupak mikrotalasnog zavarivanja	133
	Literatura	134
7	OSTALI POSTUPCI ZAVARIVANJA	135
7.1	Postupak aluminotermijskog zavarivanja	135
7.2	Postupak zavarivanja pod troskom	139
7.3	Elektrogasni postupak zavarivanja	143
7.4	Postupci indukcionog zavarivanja	144
7.5	Postupak zavarivanja svetlosnim snopom	147
7.6	Postupci elektrolučnog zavarivanja vitkih delova	148
	Literatura	151
8	POSTUPCI LEMLJENJA	153
8.1	Postupci visokotemperaturnog lemljenja sa lokalnim izvorom toplote	155
8.1.1	Postupak visokotemperaturnog lemljenja infracrvenom svetlošću	156
8.1.2	Postupak visokotemperaturnog lemljenja plamenom	156
8.1.3	Postupak visokotemperaturnog lemljenja laserskim snopom	157
8.1.4	Postupak visokotemperaturnog lemljenja elektronskim snopom	157
8.1.5	Postupak indukcionog visokotemperaturnog lemljenja	157
8.1.6	Postupak elektrootpornog visokotemperaturnog lemljenja	157
8.1.7	Postupak difuzionog visokotemperaturnog lemljenja	158
8.2	Postupci visokotemperaturnog lemljenja sa globalnim izvorom toplote	158
8.2.1	Postupak visokotemperaturnog lemljenja u peći	159
8.2.2	Postupak visokotemperaturnog lemljenja u vakuumu	159
8.2.3	Postupak visokotemperaturnog lemljenja potapanjem u rastopljeni metal	159
8.2.4	Postupak visokotemperaturnog lemljenja u sonom kupatilu	160
8.2.5	Postupak visokotemperaturnog lemljenja u kupatilu sa topiteljem	160
8.2.6	Postupak visokotemperaturnog lemljenja potapanjem	161
8.3	Ostali postupci visokotemperaturnog lemljenja	161
8.4	Postupci niskotemperaturnog lemljenja sa lokalnim izvorom toplote	161
8.4.1	Postupak niskotemperaturnog lemljenja infracrvenom svetlošću	161
8.4.2	Postupak niskotemperaturnog lemljenja plamenom	162
8.4.3	Postupak niskotemperaturnog lemljenja ručnom lemilicom	162
8.4.4	Postupak niskotemperaturnog lemljenja vučenjem	162
8.4.5	Postupak niskotemperaturnog lemljenja laserskim snopom	163
8.4.6	Postupak niskotemperaturnog indukcionog lemljenja	163
8.4.7	Postupak niskotemperaturnog lemljenja ultrazvukom	163
8.4.8	Postupak niskotemperaturnog elektrootpornog lemljenja	163
8.4.9	Postupak niskotemperaturnog difuzionog lemljenja	163
8.5	Postupci niskotemperaturnog lemljenja sa globalnim izvorom toplote	163
8.5.1	Postupak niskotemperaturnog talasnog lemljenja	163
8.5.2	Postupak niskotemperaturnog lemljenja u peći	164
8.5.3	Postupak niskotemperaturnog lemljenja u vakuumu	164
8.5.4	Postupak niskotemperaturnog lemljenja potapanjem u rastopljeni metal	164
8.5.5	Postupak niskotemperaturnog lemljenja u sonom kupatilu	164
8.6	Ostali postupci niskotemperaturnog lemljenja	164

8.7	Postupci zavarivačkog lemljenja	164
8.7.1	Postupak gasnog zavarivačkog lemljenja	165
8.7.2	Postupak elektrolučnog zavarivačkog lemljenja	165
8.7.3	Postupak elektrolučnog zavarivačkog lemljenja u atmosferi zaštitnog gasa	165
8.7.4	Postupak elektrolučnog zavarivačkog lemljenja netopivom volframovom elektrodom u atmosferi zaštitnog gasa	165
8.7.5	Postupak zavarivačkog lemljenja plazmom	165
8.7.6	Postupak zavarivačkog lemljenja u laserskim snopom	165
8.7.7	Postupak zavarivačkog lemljenja elektronskim snopom	166
	Literatura	167
9	PREGLED STANDARDA	169
10	PRILOZI	207

1 POSTUPCI ZAVARIVANJA ELEKTRIČNIM LUKOM

Standard EN ISO 4063:2020¹ [1] definiše osnovnu grupu ISO 4063 – 1 „električnih” postupaka zavarivanja topljenjem, koji koriste toplotu kao energiju aktivacije procesa spajanja tela u neraskidivu vezu. Ovoj osnovnoj grupi pripadaju postupci zavarivanja električnim lukom.

Svi postupci iz ove grupe toplotu dobijaju kao posledicu gorenja intenzivnog električnog luka koji je uspostavljen između dva metalna tela koja se nalaze u neposrednoj blizini mesta zavarivanja. Električni luk se, najčešće, uspostavlja između elektrode i radnih komada, ali su moguće i druge varijante uspostavljanja luka.

Prema ISO 4063, postupci iz osnovne grupe 1 su dalje klasifikovani u grupe postupaka sličnih osobina:

- Elektrolučni postupci zavarivanja topivom elektrodom bez zaštitnog gasa, klasifikovani kao ISO 4063 – 11,
- Elektrolučni postupci zavarivanja pod (zaštitnim) praškom, klasifikovani kao ISO 4063 – 12,
- Elektrolučni postupci zavarivanja topivom elektrodom žicom u atmosferi zaštitnog gasa, klasifikovani kao ISO 4063 – 13,
- Elektrolučni postupci zavarivanja netopivom volframovom elektrodom u atmosferi zaštitnog gasa, klasifikovani kao ISO 4063 – 14,
- Elektrolučni postupci zavarivanja plazmom, klasifikovani kao ISO 4063 – 15,
- Ostali elektrolučni postupci zavarivanja, klasifikovani kao ISO 4063 – 18².

¹ Odgovarajući srpski standard je SRPS EN ISO 4063:2021 [2].

² Grupa postupaka zavarivanja ISO 4063 – 18 se pojavila u prvoj verziji standarda ISO 4063:1978 [3]. Naknadne revizije ovog dokumenta (iz 1990, 1998. i 2009. godine) ne prikazuju grupu postupaka 18, ali prikazuju postupke 181 i 185, kao samostalne postupke u osnovnoj grupi 1. Najnoviji standard [2] iz 2021. godine ponovo ima grupu ISO 4063 – 18.

Određen broj elektrolučnih postupaka nije standardizovan, ali se primenjuju u industriji. Sa druge strane, neki standardni postupci su zastareli i prevaziđeni pa se više ne primenjuju. Najvažniji (najprimenljiviji) od ovih postupaka su opisani u ovom poglavlju.

1.1 Elektrolučni postupci zavarivanja topivom elektrodom bez zaštitnog gasa

Postupci iz grupe elektrolučnih postupaka zavarivanja topivom elektrodom bez (primene) zaštitnog gasa (grupa ISO 4063 – 11) toplotu dobijaju od električnog luka koji se uspostavlja između topive elektrode (dodatnog materijala) i radnih komada (osnovnog metala). Kod ovih postupaka zavarivanja električni luk postepeno topi elektrodu i deo radnih komada, a rastopljeni materijal se meša i formira tečno kupatilo. Nakon očvršćavanja, materijal tečnog kupatila postaje metal šava, koji objedinjava radne komade u celinu. Metal šava morfološki pripada i jednom i drugom telu – on ih vezuje u monolitnu celinu koja nije razdvojiva bez razaranja materijala.

Kako se zavarivanje postupcima iz grupe 11 vrši u slobodnoj atmosferi (bez primene dodatnog zaštitnog gasa), većina postupaka zaštitu zavarenog šava ostvaruje primenom elektroda koje same obezbeđuju neki vid zaštite šava. Drugi vid zaštite šava ostvaruje se primenom potrošnih materijala čija namena je, pored zaštite, čišćenje i legiranje metala šava (na primer, površinski premazi, praškovi, boraks itd).

Grupi elektrolučnih postupaka zavarivanja topivom elektrodom bez primene zaštitnog gasa, pripadaju:

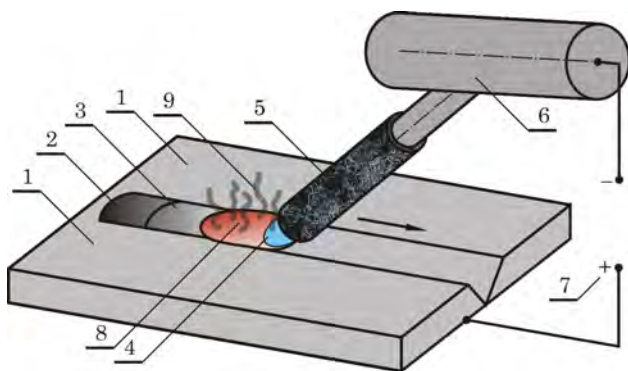
- Ručni elektrolučni postupak zavarivanja obloženom topivom elektrodom, klasifikovan kao ISO 4063 – 111,
- Gravitacioni elektrolučni postupak

zavarivanja obloženom topivom elektrodom, klasifikovan kao ISO 4063 – 112,

- Elektrolučni postupak zavarivanja golom metalnom žicom, klasifikovan kao ISO 4063 – 113*³,
- Elektrolučni postupak zavarivanja samozaštitnom punjenom žicom, klasifikovan kao ISO 4063 – 114,
- Elektrolučni postupak zavarivanja spiralno namotanom i obloženom žicom, klasifikovan kao ISO 4063 – 115*, i
- Elektrolučni postupak zavarivanja prskalicom (položenom elektrodom), klasifikovan kao ISO 4063 – 118*.

1.1.1 Ručni elektrolučni postupak zavarivanja obloženom topivom elektrodom

Najpoznatiji postupak iz grupe elektrolučnih postupaka zavarivanja bez zaštitnih gasova je ručni elektrolučni postupak zavarivanja obloženom topivom elektrodom, klasifikovan kao ISO 4063 – 111. Ovaj postupak je u tehničkoj praksi poznat kao REL postupak zavarivanja.



Slika 1.1 Šematski prikaz ručnog elektrolučnog postupka zavarivanja obloženom topivom elektrodom, 1 – radni komadi, 2 – šav, 3 – troska, 4 – električni luk, 5 – obložena elektroda, 6 – držalac elektrode, 7 – izvor električne struje, 8 – tečno kupatilo, 9 – produkti sagorevanja (gasovi) [7]

Za zavarivanje radnih komada (slika 1.1, pozicija 1) koristi se obložena elektroda

(slika 1.1, pozicija 5) koja ima metalno jezgro i nemetalnu oblogu. Električni luk (slika 1.1, pozicija 4) se uspostavlja između metalnog dela elektrode i radnih komada. On zagreva i topi metalni deo elektrode i deo radnih komada. Rastopljeni i pomešani materijal elektrode i radnih komada (slika 1.1, pozicija 8) formira metal šava, odnosno, šav (slika 1.1, pozicija 2), nakon ponovnog očvršćavanja i hlađenja. Istovremeno sa topljenjem metala, električni luk zagreva, pali i delimično topi oblogu elektrode. Oslobođeni gasovi (proizvodi sagorevanja obloge, slika 1.1, pozicija 9) se ponašaju kao zaštitna atmosfera oko tečnog kupatila i metala šava. Tečni i čvrsti proizvodi sagorevanja – troska (slika 1.1, pozicija 3) legiraju metal šava i sprečavaju brzo hlađenje tečnog kupatila, te tako poboljšavaju metalurške osobine metala šava.

Izvor struje (slika 1.1, pozicija 7) za REL postupak može da bude i izvor jednosmerne i izvor naizmenične struje. Izvor je, jednim polom, vezan za držalac elektrode (slika 1.1, pozicija 6), a preko njega za elektrodu, a drugim polom je vezan za radne komade.

REL postupak je najzastupljeniji postupak zavarivanja u Srbiji zbog svoje jednostavnosti, primenljivosti, kvaliteta, brzine, produktivnosti i niske cene.

U ovom poglavlju, REL je prikazan samo informativno dok je detaljnije opisan u „Tehnologiji zavarivanja 1” [4].

1.1.2 Gravitacioni elektrolučni postupak zavarivanja obloženom topivom elektrodom

Početkom dvadesetog veka, izrađena je efikasna obložena elektroda za elektrolučne postupke zavarivanja (Oskar Kjellbergova⁴ elektroda) koja sagorevanjem obloge, oslobađa gasove i formira trosku na površini zavarenog šava. Sa takvim otkrićem zavarivanje električnim lukom je postalo jednostavnije a šavovi znatno kvalitetniji.

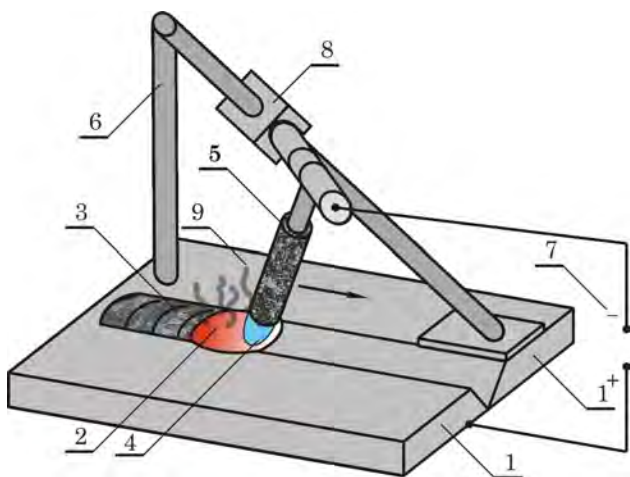
³ Postupci zavarivanja obeleženi * su, prema važećem SRPS EN ISO 4063:2021 [2], klasifikovani, ali su navedeni kao „zastareli” postupci zavarivanja.

⁴ Šve. Oscar Kjellberg (prezime se na švedskom izgovara Šelbarja) (21.09.1870–05.07.1931), izumitelj iz Švedske, osnivač ESAB-a. Godine 1904, Kjellberg je izmislio obloženu elektrodu (švedski patent: 27152, od 29.06.1907) [5].

Sledeći korak u razvoju elektrolučnih postupaka bilo je povećanje produktivnosti zavarivanja i ponovljivosti kvaliteta šava.

Karl Kristian Masden⁵ je marta 1945. godine u Kopenhagenu, pod okriljem firme ESAB, podneo patent za registraciju novog, bržeg, poluautomatskog elektrolučnog postupka zavarivanja obloženom elektrodom. Patent je odobren 17.05.1949⁶ i nazvan je „gravitaciono zavarivanje” [6].

Gravitaciono zavarivanje radnih komada (slika 1.2, pozicija 1) vrši se uvek u horizontalnom položaju – radni komadi se postavljaju u početni položaj, pozicioniraju i učvršćavaju. Obložena elektroda (slika 1.2, pozicija 5) se postavlja u nosač elektrode (slika 1.2, pozicija 6) i cela aparatura se montira na radne komade. Konstrukcija nosača elektrode je kosa – elektroda preko klizača (slika 1.2, pozicija 8) može slobodno da klizi duž nosača.



Slika 1.2 Šematski prikaz gravitacionog elektrolučnog postupka zavarivanja obloženom topivom elektrodom, 1 – radni komadi, 2 – tečno kupatilo, 3 – šav sa troskom na površini, 4 – električni luk, 5 – obložena elektroda, 6 – nosač elektrode, 7 – izvor struje, 8 – klizač, 9 – gasovi [7]

U inicijalnom položaju, elektroda se naslanja na radne komade dok je drugi kraj povezan za nosač. Izvor struje (slika 1.2,

pozicija 7), koji je povezan za elektrodu i radne komade. Po uključenju izvora struje, inicira se električni luk (slika 1.2, pozicija 4) između naslonjene elektrode i radnog komada. Dok luk gori, elektroda se topi i skraćuje, a usled gravitacije, klizač (slika 1.2, pozicija 8) sa elektrodom klizi i povlači elektrodu ka osloncu nosača. Iza elektrode (i električnog luka) ostaje šav (slika 1.2, pozicija 3) na čijem licu ostaje široki sloj troske. Kada se elektroda potroši, isključuje se izvor struje, na nosač se postavlja nova elektroda, nosač se pozicionira na odgovarajuću lokaciju i nastavlja se zavarivanje. Kao i kod postupka ISO 4063 – 111, gasovi iz obloge (slika 1.2, pozicija 9) i troska štite tečno kupatilo (slika 1.2, pozicija 2) i šav od negativnog uticaja gasova iz atmosfere. Gasovi, takođe, sprečavaju brzo hlađenje zagrejanog materijala.

Brzina zavarivanja ovakvim mehanizovanim (poluautomatskim) sistemom je do 10% veća nego brzina zavarivanja kod postupka ISO 4063 – 111. Primenom više elektroda (više klizača) na istom nosaču, postiže se efekat „višeslojnog zavarivanja u jednom prolazu”, odnosno, značajno se povećava produktivnost postupka. Isključenje čoveka iz direktnog uticaja na proces zavarivanja pozitivno utiče na kvalitet šava.

Od otkrića postupka (početak četrdesetih godina dvadesetog veka) pa do kraja sedamdesetih godina dvadesetog veka, ovaj postupak zavarivanja se najviše koristio u Japanu, za izgradnju brodova. Primenjivao se za zavarivanje konstrukcionih čelika, ali i čelika namenjenih za rad u hemijski agresivnim sredinama [8].

Osnovne prednosti postupka, u vreme kada je postupak bio masovno korišćen, bile su: automatizacija, brzina zavarivanja i kvalitet zavarenog šava. Međutim, postupak prate neki nedostaci: zavarivanje je moguće samo u horizontalnom položaju, penetracija električnog luka (dubina uvarivanja) nije direktno upravljiva veličina – kao i dimenzije zavarenog šava, penetracija zavisi od dimenzija primenjene elektrode.

Zbog primene gravitacije, postupak se prvobitno nazivao „gravitacionim

⁵ Nema ličnih podataka o Karlu Masdenu, sem da je u vreme podnošenja patenta živeo u Argentini.

⁶ Neki internet-izvori [8] pominju 1938. godinu kao trenutak prvog pojavljivanja gravitacionog postupka zavarivanja. Međutim, autor nije našao potvrdu tih izvora.

zavarivanjem”. Prema standardu ISO 4063, postupak je klasifikovan kao ISO 4063 – 112, a njegov puni naziv je gravitacioni elektrolučni postupak zavarivanja obloženom topivom elektrodom. Danas se postupak gravitacionog zavarivanja veoma retko primenjuje jer su se u međuvremenu pojavili produktivniji i efikasniji postupci elektrolučnog zavarivanja.

1.1.3 Elektrolučni postupak zavarivanja golom metalnom žicom*

Baron August Demeriten ⁷ je 1881. godine u Francuskoj patentirao prvi elektrolučni postupak zavarivanja olova žicom od gvožđa. Prvi elektrolučni postupak zavarivanja netopivom ugljeničnom elektrodom su 1885. godine javno prikazali inženjeri Nikolaj Bernardos ⁸ i Stanislav Olsceviski⁹, obojica Demeritenovi učenici. Već 1888. godine, Nikolaj Slavjanov ¹⁰ je izveo prvo uspešno elektrolučno zavarivanje čelika primenom topive žice od mekog gvožđa. Međutim, postupak zavarivanja žicom od gvožđa bio je primenljiv samo za zavarivanje livenog gvožđa i „mekih” čelika, i pri tom je žica intenzivno korodirala a šav je bio pun šupljina i uključaka.

Tokom sledećih godina, elektrolučni postupak zavarivanja golom žicom je „poboljšavan”: umesto žice od gvožđa, primenjivana je čelična žica sličnog hemijskog sastava hemijskom sastavu materijala delova koji se zavaruju. Sa takvim marginalnim unapređenjem postupka, početkom dvadesetog veka uspešno su zavarivani samo manganski čelici.

Za elektrolučno zavarivanje „golom žicom” primenjivala se ista oprema kao za zavarivanje postupkom ISO 4063 – 111.

Otkriće obloge elektroda, njena uspešna

i jednostavna primena kod većine čeličnih materijala, potisnula je primenu „gole žice” za zavarivanje. Samim tim, postupak zavarivanja golom žicom je marginalizovan i tridesetih godina dvadesetog veka je prestala njegoova masovna (komercijalna) upotreba.

Postupak je, prema ISO 4063:1978, standardizovan kao ISO 4063 – 113, ali je narednom revizijom standarda postupak definisan kao „zastareo, van komercijalne upotrebe” i izbačen je iz liste standardnih postupaka.

1.1.4 Elektrolučni postupak zavarivanja samozaštitnom punjenom žicom

Nakon otkrića elektrolučnih postupaka zavarivanja, zaštitnih gasova i obložene elektrode, sledeći korak razvoja tehnologije zavarivanja bilo je povećanje produktivnosti. Svi tadašnji postupci elektrolučnog zavarivanja bili su prekidnog karaktera – zavarivanje se vršilo elektrodama koje su se brzo topile a radnik je morao da prekida rad, uzima drugu elektrodu i nastavlja rad na mestu gde je prekinuo rad. Takav režim rada, pored umanjenja produktivnosti, svakako, utiče na kvalitet dobijenog šava.

Sa ciljem da se zadrže dobre osobine REL-a, a poveća produktivnost zavarivanja i stepen zaštite šava gasovima, razvijena je „obložena” žica, koja je namotana na kotur i koristi se za „kontinualno REL zavarivanje”.

Dodatni materijal – žica, izrađena je kao cev od metala i ispunjena je sinterovanim prahom različitog hemijskog sastava. Prah je sastavljen od metala i nemetala – metali imaju legirajuća i redukujuća svojstva na metal šava, dok nemetali imaju zadatak da stvaraju dim (zaštitni gas), vrše dezoksidaciju i redukciju nečistoća u metalu šava. Oni učestvuju u stvaranju troske (koja pokriva lice zavarenog šava, a dodatno ga štiti od brzog hlađenja i prodora neželjenih gasova u tečno kupatilo). Primena ovakve žice smanjuje cenu zavarivanja (koje se vrši bez dovedenih zaštitnih gasova) i povećava produktivnost (veća brzina zavarivanja i/ili veći depozit materijala po jednom prolazu). Ovu žicu zavarivači nazivaju „punjena REL žica”.

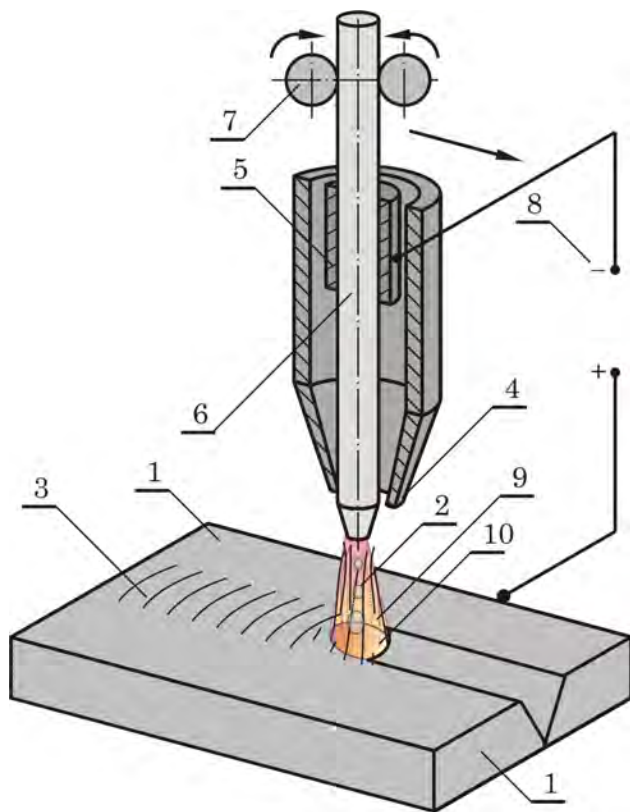
⁷ Fra. Baron Auguste de Méritens (06.03.1834–27.10.1898), inženjer, električar, izumitelj iz Francuske [10].

⁸ Rus. Никола́й Никола́евич Берна́рдос (26.07.1842–21.09.1905), izumitelj iz Rusije [11].

⁹ Polj. Stanislav Olszewski (06.01.1852–15.07.1898), inženjer i izumitelj iz Poljske [12].

¹⁰ Rus. Никола́й Гаври́лович Славя́нов (05.05.1854–17.10.1897), izumitelj iz Rusije [13].

Jedini postupak zavarivanja iz grupe ISO 4063 – 11 koji koristi kontinualan dotur dodatnog materijala za zavarivanje je elektrolučni postupak zavarivanja samozaštitnom punjenom žicom (slika 1.3), klasifikovan kao ISO 4063 – 114.



Slika 1.3 Šematski prikaz elektrolučnog postupka zavarivanja samozaštitnom punjenom žicom, 1- radni komadi, 2 – prenos metala, 3 – šav, 4 – mlaznica, 5 – vodica/držač, 6 – elektrodna žica, 7 – sistem za dotur elektrode, 8 – izvor struje, 9 – električni luk, 10 – tečno kupatilo [7]

Ovaj postupak zavarivanja podseća na MIG/MAG postupke zavarivanja, ali bez primene zaštitnih gasova. Radni komadi (slika 1.3, pozicija 1) se pozicioniraju i fiksiraju kao kod svih ostalih postupaka a žleb se priprema saglasno preporukama. Električni luk (slika 1.3, pozicija 9) se uspostavlja između radnih komada i žice za zavarivanje (slika 1.3, pozicija 6) – što znači da je izvor struje (slika 1.3, pozicija 8) povezan na žicu i radne komade. Izvor struje može da bude i „naizmjenični” i „jednosmerni”, ali je još uvek više u upotrebi jednosmerna struja direktne polarnosti (minus pol na žici za zavarivanje).

Mlaznica (slika 1.3, pozicija 4) je istog

oblika kao kod postupaka iz grupe 13, ali nema funkciju dovoda gasova. Kroz mlaznicu prolazi žica za zavarivanje, vođena držačem (slika 1.3, pozicija 5), a pogonjena je sistemom valjaka (slika 1.3, pozicija 7).

Produktivnost postupka 114 je visoka zbog brzog prenosa rastopljenog metala elektrodne žice (slika 1.3, pozicija 2) u tečno kupatilo.

Šav dobijen postupkom 114 (slika 1.3, pozicija 3) je uvek pokriven troskom a tečno kupatilo (slika 1.3, pozicija 10) i električni luk (slika 1.3, pozicija 9) se nalaze u atmosferi gasova koji su nastali sagorevanjem ispune elektrode.

Postupak zavarivanja 114 je primenljiv za većinu materijala koji se zavaruju REL, MIG/MAG postupcima, kao i za sve položaje zavarivanja.

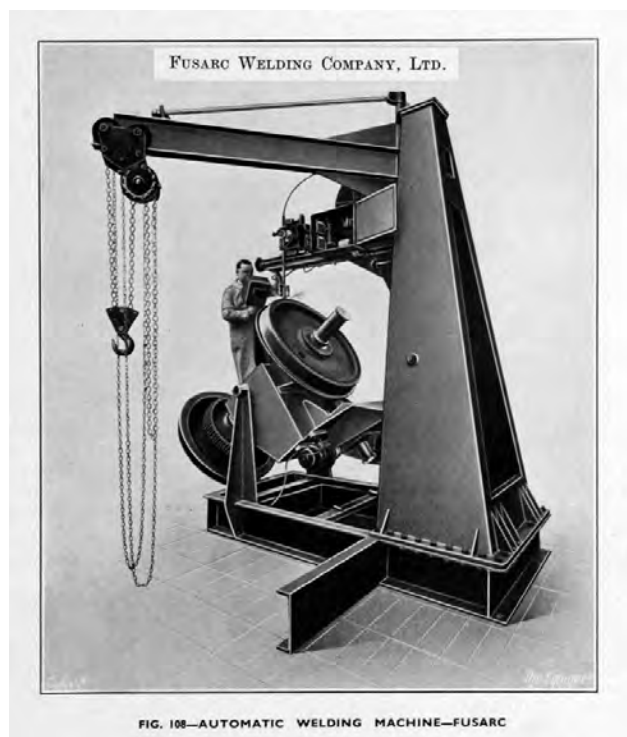
1.1.5 Elektrolučni postupak zavarivanja spiralno namotanom i obloženom žicom*

Nekoliko godina nakon završetka Prvog svetskog rata, britanska kompanija „Fusarc” prikazala je novi visokoproduktivni, elektrolučni postupak zavarivanja obloženom elektrodom. U prvoj verziji postupka, primenjivane su debelozidne Kjelbergove elektrode kojim su zavarivani masivni čelični delovi železničkih kola. Postupak se, u tehnološkom smislu, nije značajno razlikovao od ostalih elektrolučnih „savremenika” – primenjuje se masivni izvor struje, velika je potrošnja energije, stepen iskorišćenja je ispod 50% [14].

Početak tridesetih godina dvadesetog veka, Fusark je promenio koncept rada – umesto prekidnog rada obloženom elektrodom, zavarivanje se vršilo kontinualno, obloženom žicom, automatski, uz vizualni nadzor operatera zavarivanja. Na slici 1.4 prikazana je mašina za zavarivanja Fusark postupkom iz 1939. godine.

Ovakav koncept zavarivanja bio je prvi elektrolučni postupak zavarivanja samozaštitnom punom žicom.

Sa ciljem da smanji potrošnju struje (angažovanu snagu izvora struje), Fusark je razvio novi tip obložene žice (slika 1.5).



Slika 1.4 Fusark mašina za zavarivanje [14]

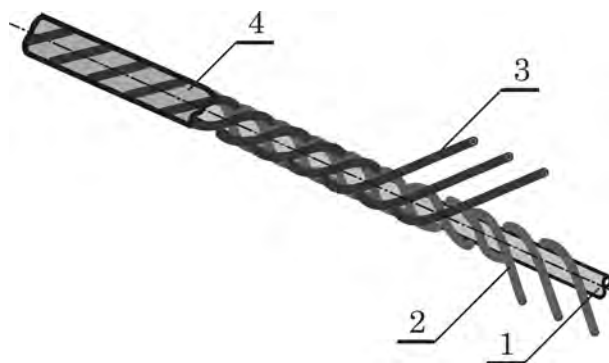
Osnovna žica (slika 1.5, pozicija 1) je izrađena od punog materijala, sličnih hemijskih osobina kao radni komadi. Prečnik žice iznosio je do maksimalnih 7 mm. Oko osnovne žice, spiralno je namotan prvi sloj tanke dodatne žice (slika 1.5, pozicija 2), a preko njega, pod uglom od 90° u odnosu na već namotanu žicu, namotan je drugi sloj žice (slika 1.5, pozicija 3). Žica koja se namotava oko osnovne žice je manjeg prečnika i napravljena je od materijala koji dobro provodi električnu struju (čelik sa velikim procentom bakra¹¹ ili srebra).

Ovako obmotane žice predstavljaju elektrodnu žicu za zavarivanje koja je, na kraju procesa proizvodnje, obložena (slika 1.5, pozicija 4) i namotana na kalem.

Kako je centralna (osnovna) žica znatno masivnija u odnosu na upredene žice, ona je dominantni dodatni metal.

Obmotavanjem centralne (osnovne) žice tankim i veoma (elektro)provodnim žicama,

obežbeđuje se bolji transport električne struje, a samim tim, dobija se efikasniji električni luk, ujednačenije topljenje materijala i veća produktivnost postupka. Takođe, manja je potrošnja električne struje i znatno je smanjena angažovana snaga izvora. Istovremeno, centralna žica u blizini električnog luka se ponaša kao slabi otpornik u električnom kolu, zagreva se i tako pomaže sagorevanje i topljenje obloge.



Slika 1.5 Fusarkova spiralno upredena i obložena žica, 1 – osnovna žica, 2 – prvi sloj metalnog prediva, 3 – drugi sloj metalnog prediva, 4 – obloga žice [15]

Zbog efikasnijeg električnog luka, primenjiva je obloga velike debljine pa je količina oslobođene/istopljene troske (i gasovitih proizvoda sagorevanja) u okolini zavarenog šava velika.

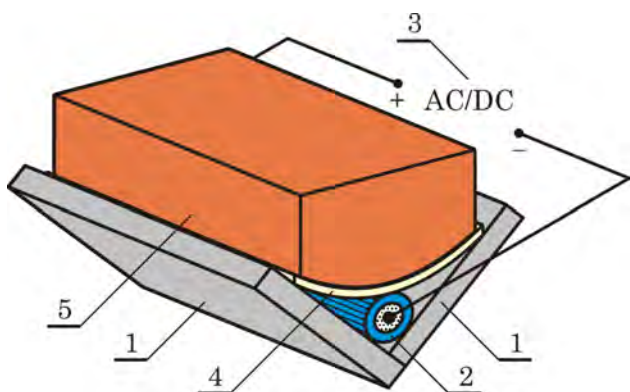
Fusark postupak ili elektrolučni postupak zavarivanja spiralno namotanom i obloženom žicom je bio dominantni elektrolučni postupak zavarivanja masivnih delova od čelika sve do pojave produktivnijeg, jednostavnijeg i jeftinijeg elektrolučnog postupka zavarivanja topljivom žicom pod praškom (grupa postupaka klasifikovana kao ISO 4063 – 12). Od sredine šezdesetih godina dvadesetog veka, Fusark postupak zavarivanja se sve ređe primenjuje.

Elektrolučni postupak zavarivanja spiralno namotanom i obloženom žicom je, prema ISO 4063:1978 [3], standardizovan kao ISO 4063 – 115, ali je, prema novijim verzijama standarda, njegov status: „zastareo, van komercijalne upotrebe, zamenjen”.

¹¹ Tako je nastao izraz „pobakarena žica” koji se i danas koristi, ali, bez opravdanog razloga. Današnje žice za postupke zavarivanja iz grupe ISO 4063 – 13 nisu obložene samo bakrom, već čitavim spektrom metala i nemetala, a njihova žuta/braon boja nije primarna posledica prisustva bakra.

1.1.6 Elektrolučni postupak zavarivanja prskalicom (položenom elektrodom)

Austrijanac Džordž Hafegurt ¹² je, tokom 1938-1939, izmislio elektrolučni postupak zavarivanja obloženom elektrodom žicom, koji je u potpunosti uklonio čoveka iz procesa zavarivanja a istovremeno povećao brzinu zavarivanja [16]. Postupak je prijavljen za SAD patent 17.07.1939. a patent je odobren 06.01.1942. na ime Hafegut, ispred kompanije „Elin” iz Beča [16, 17].



Slika 1.6 Šematski postupak elektrolučnog postupka zavarivanja prskalicom (položenom elektrodom), 1 – radni komadi, 2 – obložena elektroda, 3 – izvor struje, 4 – papir, 5 – bakarni teg/pritiskač

Radni komadi (slika 1.6, pozicija 1) se postavljaju u položaj za zavarivanje i učvršćuju. U žleb, duž linije spajanja, se postavlja specijalna punjena elektrodna žica (slika 1.6, pozicija 2) – prskalica, čija je dužina jednaka dužini zavarivanja – radnih komada. Primjenjivane su elektrode duge do 2 m [18].

Punjena žica je izrađena od metala i praha. Metalni deo žice je izrađen od materijala koji je po mehaničkim i hemijskim osobinama vrlo blizak osnovnom metalu, dok je praškasti deo žice sačinjen od različitih minerala koji gore, dime, tope se, a samim tim, štite, legiraju, prečišćavaju metal šava i stabilizuju gorenje električnog luka. Zbog intenzivnog gorenja žice – prskalice, postupak je nazvan „prskalica postupak zavarivanja”, odnosno, elektrolučni postupak zavarivanja prskalicom (položenom elektrodom).

Postupak zavarivanja prskalicom je u nemačkom govornom području poznat kao Elin-Hafegut postupak.

Prskalica je svojim krajevima povezana sa oba kraja izvora struje (slika 1.6, pozicija 3) a leži na radnim komadima. Sa uključenjem izvora struje uspostavlja se električni luk. Luk počinje da gori od jednog kraja žice ka drugom kraju. Pri tom, luk pali i topi žicu, a ona „gori i prska”. Električni luk gori od negativnog pola ka pozitivnom polu i primetno je skretanje električnog luka u smeru gorenja (efekat „duvanja luka”).

Pozicioniranje i učvršćivanje prskalice u žlebu vrši se papirom (slika 1.6, pozicija 4) i tegom od bakra (slika 1.6, pozicija 5). Ovakvom konstrukcijom obezbeđuju se zatvoreni žleb, ravnomernije gorenje luka, ravnomernija je raspodela troske, bolje je uvarivanje i postiže se dobro stapanje osnovnog i dodatnog metala.

Postupak odlikuje nekoliko prednosti:

- postupak zavarivanja je poluautomatski,
- brzina zavarivanja je veća nego kod ostalih ručnih elektrolučnih postupaka zavarivanja obloženom elektrodom / žicom,
- kada se propiše odgovarajuća tehnologija (izabere odgovarajuća žica, parametri zavarivanja itd), operator zavarivanja-zavarivač, nema nikakav uticaj na kvalitet zavarenog šava,
- oprema za zavarivanje je jednostavna i jeftina,
- nastajanje poroznosti, stvaranje uključaka u metalu šava, neujednačena penetracija duž linije spajanja gotovo da nisu moguća pojava.
- postupak zavarivanja prskalicom je primenjiv za sve materijale koji su zavarivi postupkom 111.

Postupak ima nekoliko ozbiljnih nedostataka:

- zavarivanje je moguće samo u horizontalnom položaju,
- uvarivanje jeste ujednačeno, ali je često nedovoljno i nije upravljivo,
- moguće je zavarivanje samo jednim

¹² Nem. Georg Hafegut, autor nije došao do detaljnijih podataka o izumitelju.

slojem/prolazom, a dimenzije poprečnog preseka šava su uslovljene poprečnim presekom žice-prskalice,

- postupak nikada nije doživeo masovnu upotrebu.

Elektrolučni postupak zavarivanja prskalicom je, prema ISO 4063:1978 [3], standardizovan i klasifikovan kao postupak ISO 4063 – 118, ali je kasnijim revizijama standarda obeležen kao „zastareo, van komercijalne upotrebe i/ili zamenjen”.

1.2 Elektrolučni postupci zavarivanja pod praškom

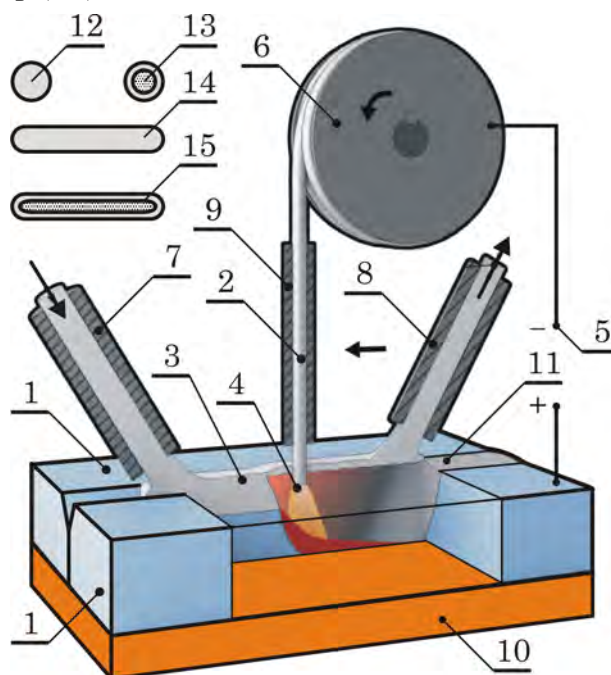
Postupci iz grupe elektrolučnih postupaka zavarivanja (topivim telom) pod (zaštitnim) praškom (ISO 4063 – 12) toplotu dobijaju od električnog luka koji se uspostavlja između topivog tela (dodatnog materijala) i radnih komada (osnovnog metala). Specifičnost svih postupaka iz ove grupe je zavarivanje u prisustvu zaštitnog praška, koji je nasut u žleb i delom preko radnih komada (u blizini žleba). Prašak predstavlja potrošni materijal, jer maseno i zapreminski posmatrano, učestvuje u formiranju metala šava u manjoj meri nego dodatni materijal.

Uspostavljeni električni luk (slika 1.7, pozicija 4) gori unutar praška (slika 1.7, pozicija 3), postepeno topi dodatni materijal (slika 1, pozicija 2) i deo radnih komada (slika 1, pozicija 1). Električni luk pali i topi i deo praška te tako formira rastopljeni metal šava u tečnom kupatilu. Rastopljeni deo praška (troska) pliva na površini tečnog kupatila i pokriva deo očvrslog šava.

Prašak se u zonu zavarivanja dovodi iz bunkera posebnim sistemom cevi (slika 1.7, pozicija 7) a višak praška se, nakon zavarivanja, sličnim sistemom (slika 1.7, pozicija 8) vraća u bunker.

Dodatni materijal je namotan na kalem (slika 1.7, pozicija 6) radi postizanja efekta kontinualnog zavarivanja, i on se posebnom vodičom (slika 1.7, pozicija 9) i sistemom za dotur materijala dovodi u zonu zavarivanja. Ceo sistem za zavarivanje se posebnim

sistemom (traktorom) pomera duž linije spajanja delova.



Slika 1.7 Šematski prikaz elektrolučnog postupka zavarivanja pod praškom punom žičanom elektrodom, 1 – radni komadi, 2 – elektrodna žica, 3 – prašak, 4 – električni luk, 5 – izvor električne struje, 6 – kalem sa namotanom žicom, 7 – sistem za dovođenje praška, 8 – sistem za odvođenje praška, 9 – vodič elektrodne žice, 10 – podložna ploča od bakra, 11 – zavareni šav, 12 – puna žica, 13 – punjena žica, 14 – trakasta elektrodna žica, 15 – punjena trakasta elektrodna žica, retuširana slika [19]

Grupi elektrolučnih postupaka zavarivanja pod praškom pripadaju:

- Elektrolučni postupak zavarivanja pod praškom punom žičanom elektrodom, klasifikovan kao ISO 4063 – 121,
- Elektrolučni postupak zavarivanja pod praškom punom trakastom elektrodom, klasifikovan kao ISO 4063 – 122,
- Elektrolučni postupak zavarivanja pod praškom primenom punih žičanih elektroda, klasifikovan kao ISO 4063 – 123*,
- Elektrolučni postupak zavarivanja pod praškom punom žičanom elektrodom uz dodatak metalnog praha, klasifikovan kao ISO 4063 – 124,
- Elektrolučni postupak zavarivanja pod praškom punjenom žičanom

elektrodom, klasifikovan kao ISO 4063 – 125,

- Elektrolučni postupak zavarivanja pod praškom punjenom trakastom elektrodom, klasifikovan kao ISO 4063 – 126.

Svi postupci iz grupe 12 koriste istu opremu, iste praškove, iste izvore struje, a razlika je u dodatnom materijalu koji se koristi i sistemu za dotur dodatnog materijala. Oni se danas izvode primenom jedne, dve ili više elektrodnih žica, simultano ili primenom jedne žice za drugom¹³. Pobrojani postupci se međusobno razlikuju prema obliku i tipu dodatnog materijala:

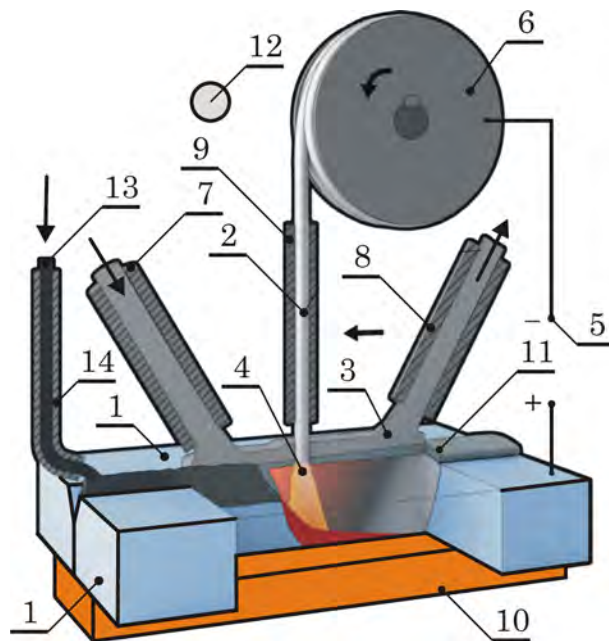
- postupak 121 koristi monolitnu, punu elektrodnu žicu kružnog poprečnog preseka (slika 1.7, pozicija 12),
- postupak 122 koristi punu trakastu elektrodnu žicu (slika 1.7, pozicija 14),
- postupak 124 koristi monolitnu, punu žicu kružnog poprečnog preseka (slika 1.7, pozicija 12) uz dodatak metalnog praha,
- postupak 125 koristi praškom i metalom punjenu elektrodnu žicu kružnog poprečnog preseka (slika 1.7, pozicija 13),
- postupak 126 koristi trakastu praškom punjenu elektrodnu žicu (slika 1.7, pozicija 15).

Navedeni postupci, osim postupka 124, detaljnije su opisani u „Tehnologiji zavarivanja 1” [4].

1.2.1 Elektrolučni postupak zavarivanja pod praškom punom žičanom elektrodom uz dodatak metalnog praha

Postupak je sličan osnovnom elektrolučnom postupku zavarivanja pod

praškom (ISO 4063 – 121) – ista oprema, isti je izvor struje, isti su parametri zavarivanja (detaljnije u „Tehnologiji zavarivanja 1” [4]), jedino se, pored pune elektrodne žice kao dodatnog materijala, za zavarivanje koristi i metalni prah, kao drugi dodatni materijal.



Slika 1.8 Šematski prikaz postupka elektrolučnog zavarivanja pod praškom punom žičanom elektrodom uz dodatak metalnog praha, 1 – radni komadi, 2 – elektrodna žica, 3 – prašak, 4 – električni luk, 5 – izvor električne struje, 6 – kalem sa namotanom žicom, 7 – sistem za dovođenje praška, 8 – sistem za odvođenje praška, 9 – vodica elektrodne žice, 10 – podložna ploča od bakra, 11 – zavareni šav, 12 – puna žica (poprečni presek), 13 – metalni prah, 14 – sistem za dovođenje metalnog praha, retuširana slika [19]

Kao i kod postupka 121, radni komadi (slika 1.8, pozicija 1) moraju da budu u horizontalnom položaju, međusobno učvršćeni i sa pripremljenim žlebom. Ispod njih se postavlja podložna ploča od bakra (slika 1.8, pozicija 10). Za zavarivanje se koriste puna elektrodna žica (slika 1.8, pozicija 2) i zaštitni prašak (slika 1.8, pozicija 3), montirani na traktor. Identičan traktor se primenjuje kod postupka 121.

Pre nasipanja zaštitnog praška (slika 1.8, pozicija 3), u žleb se posebnim sistemom (slika 1.8, pozicija 14) nanosi metalni prah (slika 1.8, pozicija 13). Prah je dobijen

¹³ Do 1998 godine, prema ISO 4063, svi standardni postupci iz grupe 12 su koristili samo jednu elektrodu dok je više-elektrodno zavarivanje bilo rezervisano ekskluzivno za postupak 123. Od 2009. godine, postupak 123 je prestao da postoji, a preostali postupci zavarivanja iz grupe 12 mogu da budu jedno ili više-elektrodni [1].

mlevenjem materijala koji je sličnih hemijskih osobina kao osnovni metal. Kada se uspostavi električni luk (slika 1.8, pozicija 4), njegova toplota topi osnovni metal, elektrodnu žicu, prah koji se nalazi u žlebu, a delimično topi i zaštitni prah. Tako se formira tečno kupatilo, odnosno, formira se metal šava sačinjen od svih rastopljenih materijala. Na površini tečnog kupatila se izdvaja troska sačinjena od nemetalnih uključaka iz zaštitnog praška. Sama troska predstavlja zaštitu zavarenog šava od gasova iz atmosfere i usporava hlađenje metala šava.

Sistem za odvođenje zaštitnog praška (slika 1.8, pozicija 8) uklanja višak metalnog praška i zaštitnog praška i ostaje lice zavarenog šava (slika 1.8, pozicija 11).

Primena metalnog praška umanjuje količinu zaštitnog praška u žlebu, što dovodi do većeg depozita materijala za iste parametre zavarivanja. Prema tome, osnovna prednost elektrolučnog postupka zavarivanja pod praškom punom žičanom elektrodom uz dodatak metalnog praška u odnosu na isti postupak, ali bez primene metalnog praška jesu povećana efikasnost električnog luka i veća proizvodnost.

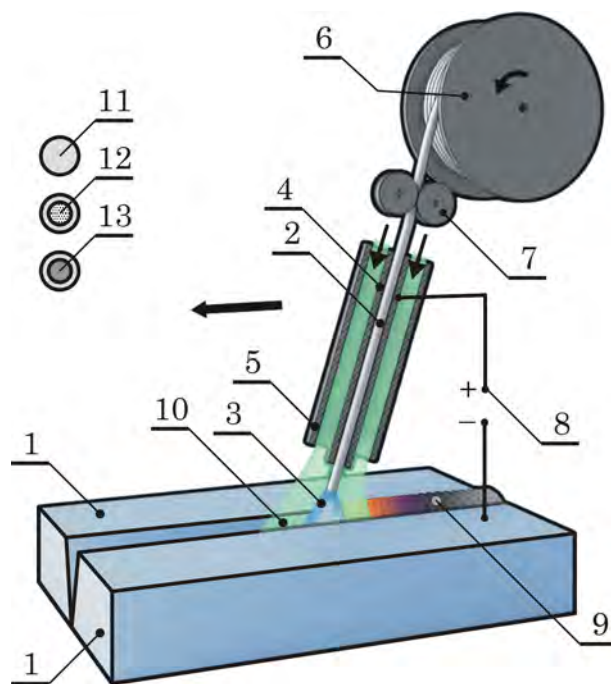
Osnovni nedostatak postupka je neznatno složeniji sistem dovodenja praška i nešto viša cena zavarivanja po metru zavarene dužine nego kod postupka 121.

Elektrolučni postupak zavarivanja pod praškom punom žičanom elektrodom uz dodatak metalnog praška je prema svim verzijama ISO 4063 klasifikovan kao postupak ISO 4063 – 124.

1.3 Elektrolučni postupci zavarivanja topivom elektrodom žicom u atmosferi zaštitnog gasa

Postupci iz grupe elektrolučnih postupaka zavarivanja topivom elektrodom žicom u atmosferi zaštitnog gasa (ISO 4063 – 13) toplotu dobijaju od električnog luka koji se uspostavlja između topive elektrodne žice (koja je dodatni materijal koji se konstantno

dovodi u zonu zavarivanja) i radnih komada (osnovnog metala). Specifičnost svih postupaka iz ove grupe je primena zaštitnog gasa koji se dovodi u zonu zavarivanja da štiti tečno kupatilo i tek zavareni spoj od uticaja negativnih gasova iz atmosfere. Njegova dodatna funkcija je da pomogne gorenje električnog luka.



Slika 1.9 Šematski prikaz elektrolučnog postupka zavarivanja topivom elektrodom žicom u atmosferi zaštitnog gasa, 1 – radni komadi, 2 – elektrodna žica, 3 – električni luk, 4 – vođica elektrodne žice, 5 – mlažnica, 6 – kalema, 7 – sistem za dodavanje elektrodne žice, 8 – izvor električne struje, 9 – šav, 10 – zaštitni gas, 11 – poprečni presek pune elektrodne žice, 12 – poprečni presek elektrodne žice punjene praškom, 13 – poprečni presek elektrodne žice punjene metalnim praškom, retuširana slika [19]

Uspostavljeni električni luk (slika 1.9, pozicija 3), zagreva i topi elektrodnu žicu (slika 1.9, pozicija 2) i deo radnih komada (slika 1.9, pozicija 1). Radni komadi su prethodno pripremljeni za zavarivanje – imaju izrađen žleb, očišćeni su od nečistoća, pozicionirani su i međusobno pripojeni.

Dodatni materijal (elektrodna žica) se sistemom za dodavanje žice (slika 1.9, pozicija 7) dovodi sa kalema (slika 1.9, pozicija 6) do vođice (slika 1.9, pozicija 4) i dalje do zone zavarivanja. Oko vođice i

elektrodne žice je mlaznica (slika 1.9, pozicija 5) kroz koju se u zonu zavarivanja dovodi zaštitni gas (slika 1.9, pozicija 10). Zaštitni gas u potpunosti okružuje električni luk, prekriva tečno kupatilo i deo zavarenog šava (slika 1.9, pozicija 9).

Kod ovih postupaka zavarivanja, od izvora struje (slika 1.9, pozicija 8) se najčešće dovodi jednosmerna struja, pri čemu je pozitivan pol izvora vezan za elektrodnu žicu.

Parametri zavarivanja kao i primena postupaka iz grupe 13 su detaljnije prikazani u „Tehnologiji zavarivanja 1” [4].

Svi postupci zavarivanja iz grupe 13 koriste istu opremu za zavarivanje, dok su jedine razlike vezane za vrstu zaštitnog gasa (inertni ili aktivni) i za vrstu elektrodne žice (puna, punjena praškom, punjena metalnim prahom). Poprečni preseki pune žice, žice punjene praškom i žice punjene metalnim prahom prikazani su na slici 1.9, pozicije 11, 12 i 13, respektivno.

Elektrolučni postupci zavarivanja topivom elektrodnom žicom u atmosferi inertnog zaštitnog gasa imaju skraćenicu MIG (eng. *Metal Inert Gas*) dok se elektrolučni postupci zavarivanja topivom elektrodnom žicom u atmosferi aktivnog zaštitnog gasa označavaju kao MAG (eng. *Metal Active Gas*).

Saglasno specifičnostima postupaka, standardizovani su sledeći elektrolučni postupci zavarivanja topivom elektrodnom žicom u atmosferi zaštitnog gasa:

- MIG postupak zavarivanja punom žičanom elektrodom, klasifikovan kao ISO 4063 – 131,
- MIG postupak zavarivanja elektrodnom žicom punjenom praškom, klasifikovan kao ISO 4063 – 132,
- MIG postupak zavarivanja elektrodnom žicom punjenom metalnim prahom, klasifikovan kao ISO 4063 – 133,
- MAG postupak zavarivanja punom žičanom elektrodom, klasifikovan kao ISO 4063 – 135,
- MAG postupak zavarivanja elektrodnom žicom punjenom praškom, klasifikovan kao ISO 4063 – 136,
- MIG postupak zavarivanja praškom i

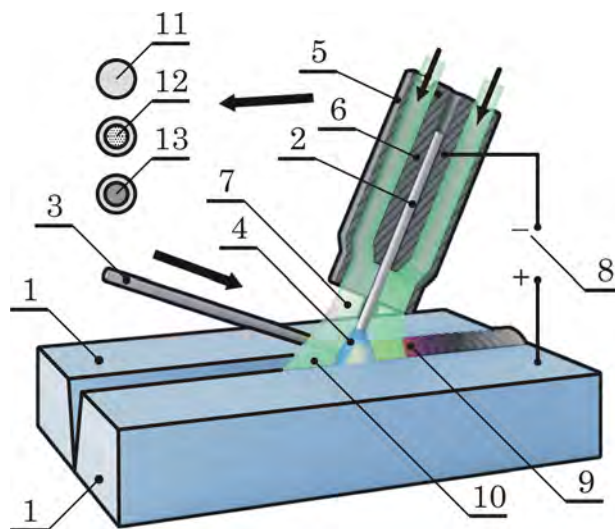
metalom punjenom elektrodnom žicom, klasifikovan kao ISO 4063 – 137*,

- MAG postupak zavarivanja elektrodnom žicom punjenom metalnim prahom, klasifikovan kao ISO 4063 – 138.

Postupci MAG se u Srbiji primenjuju znatno više nego MIG postupci.

1.4 Elektrolučni postupci zavarivanja netopivom volframovom elektrodom u atmosferi zaštitnog gasa

Postupci iz grupe elektrolučnih postupaka zavarivanja netopivom volframovom elektrodom u atmosferi zaštitnog gasa (ISO 4063 – 14) toplotu dobijaju od električnog luka (slika 1.10, pozicija 4) koji se uspostavlja između netopive volframove elektrode (slika 1.10, pozicija 2) i radnih komada (osnovnog metala, slika 1.10, pozicija 1).



Slika 1.10 Šematski prikaz elektrolučnog postupka zavarivanja netopivom volframovom elektrodom u atmosferi zaštitnog gasa, 1 – radni komadi, 2 – netopiva volframova elektroda, 3 – topiva elektrodna žica, 4 – električni luk, 5 – mlaznica, 6 – držač elektrode, 7 – zaštitni gas, 8 – izvor struje, 9 – zavareni šav, 10 – tečno kupatilo, 11 – poprečni presek pune elektrodne žice, 12 – poprečni presek elektrodne žice punjene praškom, 13 – poprečni presek elektrodne žice punjene metalnim prahom, retuširana slika [19]

Zavarivanje postupcima iz grupe 14 se uvek vrši uz primenu zaštitnog gasa (slika 1.10, pozicija 7), koji se dovodi u zonu zavarivanja da štiti (i hladi) volframovu elektrodu, tečno kupatilo (slika 1.10, pozicija 10) i tek zavareni šav (slika 1.10, pozicija 9) od uticaja negativnih gasova iz atmosfere. Dodatna funkcija zaštitnog gasa je da pomogne gorenje električnog luka.

Volframova elektroda nije dodatni materijal koji učestvuje u formiranju zapremine šava – za to se koristi topiva elektrodna žica (slika 1.10, pozicija 3) ili se zavarivanje vrši bez nje. Kako je elektrodna žica „u komadu” (ne na klemu, kao što je to slučaj kod postupaka iz grupe 13), zavarivanje postupcima iz grupe 14 je prekidnog karaktera.

Zaštitni gas se kroz profilisanu mlaznicu (slika 1.10, pozicija 5) dovodi u zonu zavarivanja. Takvom konfiguracijom, zaštitni gas se prisiljava da opstrujava držač elektrode (slika 1.10, pozicija 6), volframovu elektrodu i električni luk.

Izvor struje (slika 1.10, pozicija 8) je svojim polovima povezan na volframovu elektrodu i radne komade. Za zavarivanje postupcima iz grupe 14 primenjuje se i jednosmerna i naizmenična struja (različitih oblika i osobina).

Svi standardni postupci zavarivanja iz grupe 14 koriste istu opremu za zavarivanje, dok su jedine razlike vezane za vrstu zaštitnog gasa (inertni ili aktivni) i za vrstu elektrodne žice (puna, punjena praškom, punjena metalnim prahom). Poprečni preseki pune žice, žice punjene praškom i žice punjene metalnim prahom prikazani su na slici 1.10, pozicije 11, 12 i 13, respektivno.

Elektrolučni postupci zavarivanja netopivom volframovom elektrodom u atmosferi inertnog zaštitnog gasa imaju skraćenicu TIG (eng. *Tungsten Inert Gas*), dok se elektrolučni postupci zavarivanja netopivom volframovom elektrodom u atmosferi aktivnog zaštitnog gasa označavaju kao TAG (eng. *Tungsten Active Gas*).

Saglasno specifičnostima, standardizovani su sledeći elektrolučni postupci zavarivanja netopivom volframovom elektrodom u

atmosferi zaštitnog gasa:

- TIG postupak zavarivanja punom elektrodom žicom, klasifikovan kao ISO 4063 – 141,
- Autogeni TIG, klasifikovan kao ISO 4063 – 142,
- TIG postupak zavarivanja punjenom elektrodom žicom, klasifikovan kao ISO 4063 – 143,
- TIG postupak zavarivanja u atmosferi redukujućeg gasa primenom pune elektrodne žice, klasifikovan kao ISO 4063 – 145,
- TIG postupak zavarivanja u atmosferi redukujućeg gasa primenom punjene elektrodne žice, klasifikovan kao ISO 4063 – 146,
- Elektrolučni postupak zavarivanja netopivom volframovom elektrodom u atmosferi aktivnog zaštitnog gasa (TAG postupak zavarivanja), klasifikovan kao ISO 4063 – 147,
- Elektrolučni postupak zavarivanja netopivom elektrodom u atmosferi atomskog vodonika, klasifikovan kao ISO 4063 – 149*.

TIG postupci zavarivanja punom i punjenom elektrodom žicom u atmosferi inertnog gasa su detaljnije opisani u „Tehnologiji zavarivanja 1” [4].

1.4.1 Autogeni TIG postupak zavarivanja

Skraćenica TIG je, istovremeno, uobičajeni naziv za najpoznatiji postupak zavarivanja iz grupe 14 – elektrolučni postupak zavarivanja netopivom (volframovom) elektrodom u atmosferi (inertnog) zaštitnog gasa primenom pune elektrodne žice (ISO 4063 – 141). Autogeni TIG postupak zavarivanja je varijanta TIG-a ali bez primene dodatnog materijala.

Autogeni TIG ima nekoliko prednosti u odnosu na klasični TIG postupak:

- Moguće je zavarivanje vrlo tankih delova,
- Cena zavarivanja po metru dužine je nešto niža od cene zavarivanja

postupkom 141,

- Postupak je jednostavan za automatizaciju,
- Brzina zavarivanja je nešto veća u odnosu na postupak 141. Postoji i određeni broj nedostataka:
- Potrebno je veliko iskustvo zavarivača kako bi se uspešno zavarili sučeoni spojevi bez dodatnog materijala (ugaoni se lakše izvode),
- Maksimalna debljina materijala koji se zavaruju autogenim TIG-om je oko 3 mm,
- Čvrstoća šava/efikasnost spoja je uvek niža od čvrstoće/efikasnosti osnovnog metala,
- Šavovi su veoma osetljivi na prsline.

Postupak je primenjiv na sve materijale i položaje zavarivanja koji su ostvarivi klasičnim TIG postupkom zavarivanja. Prema ISO 4063, postupak je standardizovan i klasifikovan kao ISO 4063 – 142.

1.4.2 TIG postupak zavarivanja punjenom žicom

Analogno MIG postupku sa punjenom žicom (ISO 4063 – 132), razvijen je TIG postupak zavarivanja (prahom, ne metalom) punjenom žicom. Isto kao kod MIG postupka, TIG postupak zavarivanja punjenom žicom je jedno od rešenja za zavarivanje debljih limova, primenom struja veće jačine, većom brzinom zavarivanja.

Postupak je standardizovan i klasifikovan kao ISO 4063 – 143 i njegov status je „u komercijalnoj upotrebi”.

1.4.3 TIG postupak zavarivanja u atmosferi redukujućeg gasa primenom pune elektrodne žice

Ovaj postupak predstavlja modifikaciju klasičnog TIG postupka zavarivanja (ISO 4063 – 141) gde se, umesto inertnog gasa (ili mešavine inertnih gasova) koristi mešavina inertnog gasa i nekog redukujućeg gasa (vodonika ili azota). Prisustvo redukujućeg gasa dovodi do stabilizacije električnog luka, zagrevanja elektrona

(povišenje stepena jonizacije gasa), a samim tim i povišenja temperature zavarivanja. Dodatno, redukujući gas pomaže čišćenje metala šava od neželjenih materijala, a brzina zavarivanja je veća nego kod klasičnog TIG postupka zavarivanja.

TIG postupak zavarivanja u atmosferi redukujućeg gasa punom žicom je standardizovan i klasifikovan kao ISO 4063 – 145.

1.4.4 TIG postupak zavarivanja u atmosferi redukujućeg gasa primenom punjene elektrodne žice

TIG postupak zavarivanja u atmosferi redukujućeg gasa primenom punjene elektrodne žice je modifikacija postupka ISO 4063 – 145 sa ciljem dodatnog povećanja brzine zavarivanja i produktivnosti, uz primenu neznatno veće jačine struje. Oprema za zavarivanje, sistemi dotura materijala i gasna instalacija su potpuno identični kao kod postupka ISO 4063 – 145. TIG postupak zavarivanja u atmosferi redukujućeg gasa punjenom žicom je standardizovan i klasifikovan kao ISO 4063 – 146.

1.4.5 Elektrolučni postupak zavarivanja netopivom volframovom elektrodom u atmosferi aktivnog zaštitnog gasa

Elektrolučni postupak zavarivanja netopivom volframovom elektrodom u atmosferi aktivnog zaštitnog gasa (TAG) je po opremi, izvoru struje, dodatnom materijalu i primeni identičan elektrolučnom postupku zavarivanja netopivom elektrodom u atmosferi inertnog zaštitnog gasa (TIG, ISO 4063 – 141). TAG postupak se od TIG postupka razlikuje samo u primeni aktivnog zaštitnog gasa. Uglavnom se koriste dvokomponentne ili trokomponentne mešavine inertnih gasova (argon i helijum) sa vodonikom i azotom.

Vodonik i azot, u malim zapreminskim odnosima u odnosu na inertni gas u mešavini, imaju jaka reaktivna svojstva – hemijski vezuju kiseonik, sumpor, ugljenik i tako

smanjuju mogućnost unosa ovih elemenata u zavareni šav. Dodatno, vodonik svojim prisustvom snižava potencijal jonizacije atmosfere u zoni električnog luka te je on intenzivniji kod TAG postupka nego kod odgovarajućeg TIG postupka.

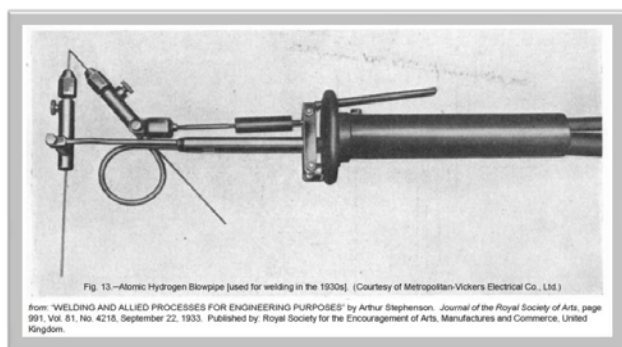
TAG postupak zavarivanja koristi se za zavarivanje čelika sa povećanim sadržajem sumpora, fosfora i silicijuma, kao i za zavarivanje sivog liva i olova.

Najprimenjivaniji aktivni zaštitni gas – ugljendioksid, nema primenu kod TAG postupka: TAG sa ugljendioksidom postaje MAG postupak, ali, zbog prekidnog režima rada, znatno manje efikasan nego što je to klasičan MAG postupak.

Prema ISO 4063, TAG postupak zavarivanja je standardizovan i klasifikovan kao ISO 4063 – 147.

1.4.6 Elektrolučni postupak zavarivanja netopivom volframovom elektrodom u atmosferi atomskog vodonika

Elektrolučni postupak zavarivanja netopivom volframovom elektrodom u atmosferi atomskog vodonika (na engleskom *Atomic Hydrogen Welding*) je postupak zavarivanja gde se električni luk uspostavlja između dve netopive volframove (slika 1.11) elektrode u atmosferi vodonika. Zavarivanje se vrši uz ili bez primene dodatnog materijala.



Slika 1.11 Oprema za elektrolučni postupak zavarivanja volframovom elektrodom u atmosferi atomskog vodonika, 1933. godina [20]

Volframove elektrode su povezane na polove izvora naizmenične struje (radni komadi nisu) tako da ne postoji problem

skretanja električnog luka koji je prisutan kod većine postupaka iz grupe ISO 4063 – 14. Održavanje električnog luka, kao i upravljanje električnim lukom, takođe, ne predstavlja problem, jer su volframove elektrode pozicionirane i upravljivo pokretne jedna u odnosu na drugu.

Električni luk koji gori između volframovih elektroda se koristi za zagrevanje/delimično topljenje osnovnog metala u zoni zavarivanja, ali i za zagrevanje/topljenje dodatnog materijala. Dodatni materijal je elektrodna žica koja se prekidno (ili ređe kontinualno) dovodi u zonu zavarivanja.

Ukoliko se zavarivanje vrši u slobodnoj atmosferi, maksimalna temperatura električnog luka može da dostigne maksimalnu temperaturu od 2800 °C što je dovoljno za obojene metale i „meke” ugljenične čelike. Poređenja radi, temperatura koju dostiže plamen iz acetilenskog gorionika je oko 3300 °C. Međutim, kada se u zonu zavarivanja dovede vodonik, električni luk razara molekule vodonika u atomski vodonik, koji ponovo formiraju molekula vodonika pri udaru o metalnu površinu (npr osnovnih materijala). Pri udaru (formiranju molekula vodonika), atomi vodonika oslobađaju veliku količinu energije koja povišava temperaturu radnih komada čak do 4000 °C. Samim tim, moguće je zavarivanje veće grupe materijala (uz potrošnju iste količine energije) – pojedini nerđajući čelici, vatrostalni i vatrootporni čelici, kao i ostali teškotopivi metali postaju operativno zavarivi [20-22].

Pored funkcije povišenja temperature, vodonik ima funkciju zaštite metala šava, ali i hlađenje volframovih elektroda. Kiseonik, azot, ugljenik se brže vezuju za vodonik nego za metale, i tako se makar delimično, zaustavlja negativno dejstvo ovih elemenata na metal šava (i volframove elektrode) [9, 23].

Vodonik koji opstrujava elektrode se, u zoni električnog luka, delimično jonizuje – prelazi u plazmu. Samim tim, postupak elektrolučnog zavarivanja netopivom volframovom elektrodom u atmosferi

vodonika osmislio je Irving Lengmjur ¹⁴. Lengmjuru se pripisuju otkriće (izolovanje) vodonika u elementarnom obliku (atomski vodonik) i koncept „temperature elektrona” – stepen jonizacije gasa u plazmi, koji je Lengmjur definisao sredinom 1924. godine. Elektrolučni postupak zavarivanja atomskim vodonikom, Lengmjur je izumeo 1928. godine [24]. Postupak je bio u upotrebi tokom četvrte i pete decenije dvadesetog veka, ali je, nakon toga, potisnut ostalim elektrolučnim postupcima zavarivanja u atmosferi zaštitnog gasa (zbog visoke cene vodonika u odnosu na znatno nižu cenu komercijalno upotrebljivih inertnih gasova) [23].

Šavovi dobijeni ovim postupkom su čisti – nema troske, šljake ili oksida na površini. Takođe, nema rasprskavanja materijala ali je zona uticaja toplote široka.

Postupak zavarivanja „atomskim vodonikom” je, prema starijim verzijama ISO 4063, bio standardizovan kao postupak ISO 4063 – 149. Novije verzije standarda ovaj postupak danas klasifikuju kao „zastareli i van komercijalne upotrebe”.

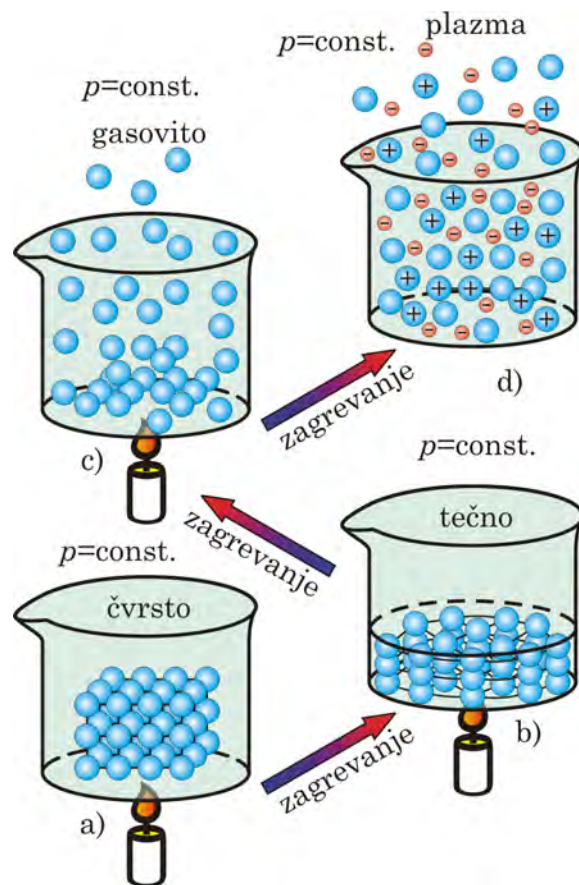
1.5 Elektrolučni postupci zavarivanja plazmom

Za razliku od većine ostalih elektrolučnih postupaka zavarivanja koji toplotu dominantno dobijaju od električnog luka, svi elektrolučni postupci zavarivanja plazmom (ISO 4063 – 15) toplotu, najvećim delom dobijaju od jonizovane gasne plazme dok je udeo toplote dobijen od samog električnog luka nešto manji. Količina toplote dobijena od električnog luka upotrebljiva za zavarivanje, zavisi od komponenti između kojih se uspostavlja električni luk, od tipa primenjene električne struje i nije stabilna vrednost.

Samim tim, osnovni zadatak električnog luka kod „plazma” postupaka zavarivanja je uspostavljanje i jonizovanje gasne plazme.

Pojam i definicija plazma agregatnog stanja. Pojam i definicija gasne plazme.

Plazma ¹⁵ je naziv za četvrto agregatno stanje materije – prva tri stanja su čvrsto, tečno i gasovito stanje ¹⁶ (slika 1.12). Promena agregatnog stanja u zemaljskim uslovima se dešava dominantno usled promene temperature i/ili pritiska [26].



Slika 1.12 Agregatna stanja materije, a – materija u čvrstom agregatnom stanju, b – materija u tečnom agregatnom stanju, c – materija u gasovitom agregatnom stanju, d – materija u plazma agregatnom stanju

Plazma, kao četvrto agregatno stanje, nije stanje/pojava kojom se vrši zavarivanje i vrlo često u komunikaciji pravi se jezička i pojmovna greška. Radi lakšeg definisanja kolokvijalnog pojma „plazma za zavarivanje”,

¹⁵ Starogrčki $\pi\lambda\acute{\alpha}\sigma\mu\alpha$ – stanje supstance [25].

¹⁶ Pored jasno definisanih agregatnih stanja, postoji čitav niz međustanja kroz koje materija može da prođe pri prelasku iz jednog agregatnog stanja u drugo. Na primer, međustanje između tečnog i čvrstog agregatnog stanja, koje se zove „tečni kristal” [26].

¹⁴ Eng Irving Langmuir (31.01.1881–16.08.1957), hemičar, fizičar i inženjer iz Amerike. Dobitnik Nobelove nagrade za hemiju, 1932. godine [22].

posmatračemo promene agregatnog stanja tela koje je, na sobnoj temperaturi, u čvrstom agregatnom stanju.

Materija u čvrstom agregatnom stanju (slika 1.12, a), na sobnoj temperaturi, predstavlja čvrsto telo – njegove čestice (koje mogu da budu molekuli, atomi ili joni) su međusobno povezani, nalaze se na bliskom rastojanju jedna od druge. Takvo telo kao celina, zauzima nepromenljiv oblik i zapreminu u prostoru. Čestice čvrstog tela osciluju oko svojih ravnotežnih položaja, ali, do znatne promene njihovih položaja dolazi samo usled dejstva spoljašnjeg izvora pobude (sila, energija itd). Za ovakvo telo važe zakoni mehanike čvrstog tela.

Ukoliko se telu u čvrstom agregatnom stanju, dovede dovoljna količina energije (promenom temperature i/ili pritiska), atomi/molekuli tela počinju intenzivnije da osciluju i veliki broj međučestičnih veza se tada razara. Telo više nije u čvrstom agregatnom stanju već prelazi u tečno agregatno stanje (slika 1.12, b).

Određeni broj veza među česticama i dalje postoji, ali su one veoma slabe te oblik tela u tečnom stanju zavisi od oblika „posude” u kojoj se ono nalazi. Zapremina tela u tečnom agregatnom stanju zavisi od temperature i pritiska (realna tečnost je gotovo nekompresibilna u odnosu na pritisak). Zapremina tela u tečnom agregatnom stanju je, u opštem slučaju, veća od zapremine istog tela u čvrstom agregatnom stanju¹⁷. Za telo u tečnom agregatnom stanju ne važe zakoni mehanike čvrstog tela već zakoni mehanike fluida a proces prelaska iz čvrstog u tečno agregatno stanje materije naziva se topljenje.

Ukoliko se nastavi dovođenje energije telu u tečnom agregatnom stanju, njegovi atomi/molekuli još intenzivnije osciluju i razaraju se gotovo sve preostale međučestične veze. Tada telo iz tečnog agregatnog stanja prelazi u gasovito stanje (slika 1.12, c). Ovako dobijeni gas je kompresibilan – on nema konstantnu zapreminu i oblik, ali zauzima celokupnu zapreminu „posude” u kojoj se

nalazi. Proces prelaska iz tečnog u čvrsto agregatno stanje se naziva isparavanjem. Za gas važe zakoni mehanike fluida.

Dalje dovođenje energije gasu dodatno intenzivira oscilovanje čestica, ali ovaj put i na nivou sastavnih delova atoma. Elektroni napuštaju svoje orbite i putuju prostorom (kao negativno naelektrisani joni). Atomi koji su otpustili jedan elektron, postaju (jednom) pozitivno naelektrisani joni, i oni, kao i elektroni, lutaju prostorom. Elektroni i joni putuju kroz prostor dok ne stupe u interakciju sa nekom drugom česticom.

Pojava razdvajanja pozitivnih i negativnih jona u gasu naziva se jonizacijom, a posledica jonizacije gasa je prelazak tela iz gasovitog agregatnog stanja u plazma agregatno stanje (slika 1.12, d). Zbog pojave razdvajanja naelektrisanja, telo u plazma agregatnom stanju provodi elektricitet – što nije slučaj sa telom u gasovitom agregatnom stanju [26].

Važno je napomenuti da pojavu „razdvajanja naelektrisanja”, prati suprotnosmerna pojava „spajanja naelektrisanja” koja plazma agregatno stanje materije spontano vraća u gasovito. Vraćanje tela iz gasovitog u tečno agregatno stanje, kao i prelazak tela iz tečnog u čvrsto agregatno stanje, dešava se, takođe, spontano, ukoliko se prestane sa pobuđivanjem promene (dovođenje energije – promena temperature ili pritiska).

Telo u plazma agregatnom stanju zauzima celu zapreminu posude koju je gas zauzeo, ali, ovako (u zemaljskim uslovima) pobuđeni gas nikad nije jonizovan u celosti – uvek postoji neki atom gasa koji je, nakon pobuđivanja ostao elektroneutralan. Zbog toga se zemaljska plazma naziva „delimično jonizovanom”, neravnotežnom ili niskotemperaturnom plazmom. Kako bi se definisala koncentracija plazme u gasu, uvodi se pojam „stepen jonizacije gasa” koji predstavlja odnos broja jonizovanih atoma u odnosu na ukupan broj atoma gasa [26].

Potpuna jonizacija gasa i dobijanje potpuno jonizovane plazme, ostvarivi su ukoliko se svaki atom gasa zagreje

¹⁷ Izuzetak je voda.

do temperature od približno 10^5 K. U tom slučaju, svi atomi gasa, otpuštaju sve elektrone tako intenzivno, da pojava naknadnog spajanja jona u neutralni atom kao da ne postoji. U takvom okruženju (koje je, možda, prisutno na zvezdama), potpuno ogoljena jezgra atoma klize kroz „jato” elektrona i u ovakvom stanju, materija je „potpuno jonizovana”: To je ravnotežna ili visokotemperaturna plazma [26].

Proces prelaska plazme u gasovito agregatno stanje, naziva se dejonizacijom, proces prelaska materije od gasovitog u tečno agregatno stanje naziva se kondenzacijom, a proces prelaska iz tečnog u čvrsto agregatno stanje naziva se očvršćavanjem.

Konačno, izraz „plazma”, u svom najpreciznijem značenju, označava četvrto agregatno stanje bilo koje materije – bez obzira na agregatno stanje te materije na sobnoj temperaturi.

U zemaljskim uslovima, najpovoljniji vid dobijanja plazme je transformacija gasa (materije koja je u svom osnovnom obliku, na sobnoj temperaturi, u gasovitom agregatnom stanju) u plazmu. Veštački izazvan prelaz tela iz čvrstog agregatnog stanja u plazma stanje (na primer, prelazak čelika u plazma agregatno stanje) je skup i tehnički (ne)izvodljiv proces.

Prirodno ili veštački jonizovana materija u gasovitom agregatnom stanju (jonizovani gas, gas koji je iz gasovitog prešao u plazma agregatno stanje) naziva se „gasnom plazmom”. Gasna plazma na Zemlji je uvek nestabilno i privremeno agregatno stanje, te gasna plazma spada u niskotemperaturne (nestabilne) plazme. Svi jonizovani gasovi odlično provode električnu struju i kod njih se dešavaju gotovo svi električni i magnetni procesi koji se javljaju kod metalnih tela u čvrstom agregatnom stanju.

Nastajanje gasne plazme

Gasna plazma nastaje kada elektroneutralni atomi gasa, usled energetske pobude iz okoline, počnu da osciluju još intenzivnije oko svojih ravnotežnih položaja, i tada oslobode jedan ili više elektrona iz svojih orbita. Tada atomi postanu pozitivni joni, a

gas se jonizuje.

Gasna plazma može da se dobije:

- termičkom jonizacijom,
- dejstvom jakog električnog polja,
- fotojonizacijom,
- fisijom jonizacijom (fisijom) ili,
- kombinovanjem navedenih pojava.

Termička jonizacija se događa kada se gas zagreva, te njegovi atomi intenzivno osciluju i oslobađaju elektrone. Zagrevanje mora da bude intenzivno i visokotemperaturno [26].

Kada se gas izloži dejstvu jakog električnog polja (polja sa izraženom razlikom potencijala i/ili pokretnim elektronima), dolazi do dve pojave:

- naelektrisani polovi, uzroci električnog polja, „čupaju” elektrone iz orbita atoma gasa i privlače ih (nakon toga, oni privlače i pozitivne jone),
- pokretni elektroni iz električnog polja se sudaraju sa atomima gasa, narušavaju njihovu elektroneutralnu ravnotežu i jonizuju ih.

Do fotojonizacije gasa dolazi usled sudara fotona svetlosti i molekula/atoma gasa. Foton svetlosti (u određenim uslovima) nosi dovoljnu količinu energije da pobudi elektron u valentnoj orbiti atoma i izbaci ga iz nje.

Do fisijom jonizacije dolazi usled jakog radioaktivnog dejstva γ ili x zraka na valentne elektrone atoma gasa.

Komercijalni način dobijanja gasne plazme u zemaljskim uslovima je, ipak, ograničen samo na jonizaciju gasa u prisustvu jakog električnog polja. Svi ostali postupci su skupi, složeni ili opasni.

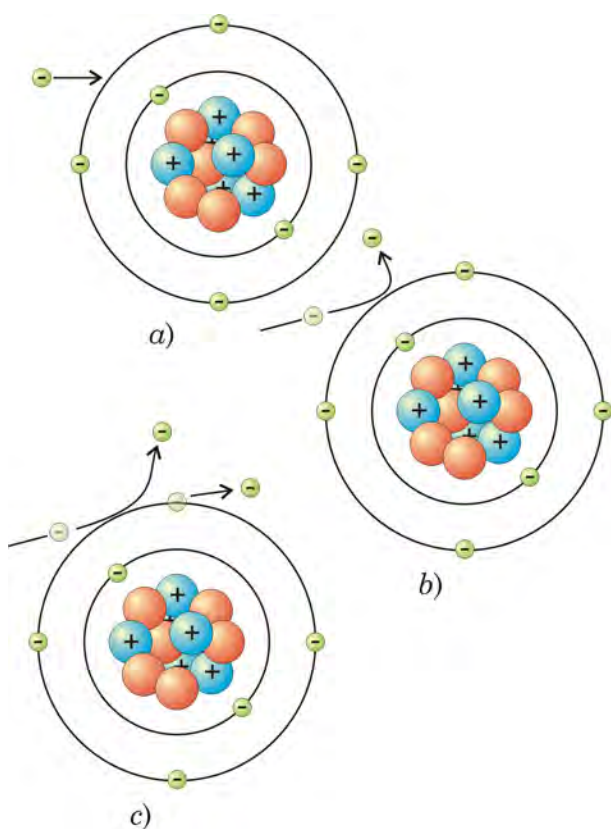
Elementarni procesi u gasnoj plazmi

Prilikom nastajanja gasne plazme, čestice gasa (molekuli, atomi, elektroni, joni, protoni) su pobuđeni i kreću se u nekom pravcu. Prilikom kretanja, oni naleću na druge čestice (ili druge čestice naleću na njih) i dolazi do međusobnih sudara. U zavisnosti od toga šta se dogodi sa česticama tokom sudara, sudari se dele na elastične i neelastične.

Razlika između elastičnog i neelastičnog

sudara čestica u gasnoj plazmi, biće objašnjena na primeru sudara pokretnog (negativno naelektrisanog) elektrona i nepokretnog (elektroneutralnog) atoma (slika 1.13, a).

U slučaju elastičnog sudara elektrona i atoma (slika 1.13, b), elektron skreće sa svoje putanje, a atom se lagano pokreće (kao pri sudaru dve bilijarske kugle). Pri tom ne dolazi do strukturne promene ni elektrona ni atoma: celokupna kinetička energija elektrona se troši na promenu putanje elektrona i pokretanje atoma. Isti princip važi za bilo koje dve čestice koje se „elastično” sudare.



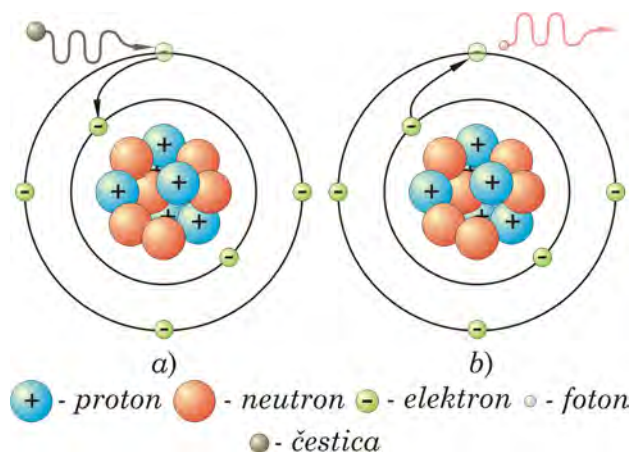
Slika 1.13 Sudar elektrona i atoma, a – inicijalni položaj, b – elastični sudar, c – neelastični sudar

Neelastični sudar elektrona i atoma (slika 1.13, c) dovodi do skretanja udarnog elektrona, pokretanja atoma (isto kao pri elastičnom sudaru) ali dolazi i do strukturnih promena kod neutralnog atoma. U navedenom primeru, pokretni elektron „izbija” valentni elektron iz orbite atoma i on kreće slobodno da leti kroz prostor. Atom koji je ostao bez svog elektrona više nije elektroneutralan – on je sada (elektroneutralni) pozitivno naelektrisani jon.

Ponašanje čestica tokom neelastičnih

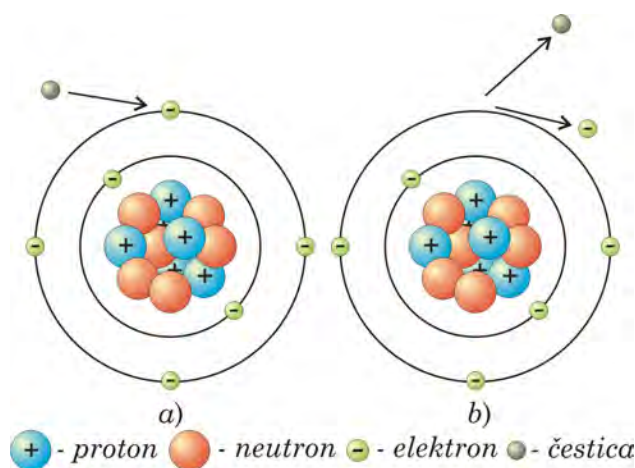
sudara, zavisi od tipa čestica, načina sudara, uslova okoline itd.

Jasno je da usled brojnosti čestica u gasu dolazi do višestrukih (elastičnih i neelastičnih) sudara koje dovode do različitih stepena jonizovanosti gasne plazme. Zbog toga se uticajni „sudari” čestica nazivaju elementarnim procesima u gasnoj plazmi i oni definišu gasnu plazmu. Elementarnih procesa u gasnoj plazmi je mnogo, ali, neki su prisutniji i uticajniji od drugih.



Slika 1.14 Ekscitacija

Ekscitacija (slika 1.14, a) predstavlja elementarni proces kada jedna čestica (foton/elektron/atom) udari valentni elektron neutralnog atoma.



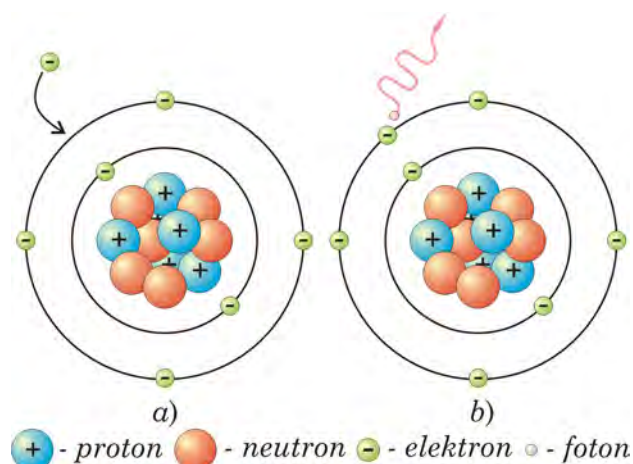
Slika 1.15 Jonizacija

Kinetička energija sudara, koju udareni elektron primi, dovoljna je da elektron napravi „skok” u višu orbitu atoma – ekscitira. Ekscitirano (pobuđeno) stanje atoma je nestabilno stanje atoma u gasnoj plazmi i takav atom ima težnju da izvrši deekscitaciju

(slika 1.14, b) i vrati se u neutralno stanje. Prilikom deekscitacije, elektron koji se vraća u valentnu orbitu oslobađa foton energije/svetlosti, koji nastavlja put kroz prostor i uključuje se u neki novi elementarni proces sa nekom drugom česticom.

Jonizacija je elementarni proces u gasnoj plazmi koji nastaje usled neelastičnog sudara elementarne čestice (molekula, atoma, elektrona, jona ili fotona) i elektroneutralnog atoma (slika 1.15, a).

Prilikom sudara, čestica „izbija” jedan valentni elektron iz atoma. Čestica ne doživljava nikakve strukturne promene dok atom postaje pozitivno naelektrisan jon (slika 1.15, b). Nakon sudara, čestica, elektron i pozitivni jon odlaze svaka u svom pravcu i učestvuju u novim elementarnim procesima sa drugim česticama.



Slika 1.16 Zahvat elektrona

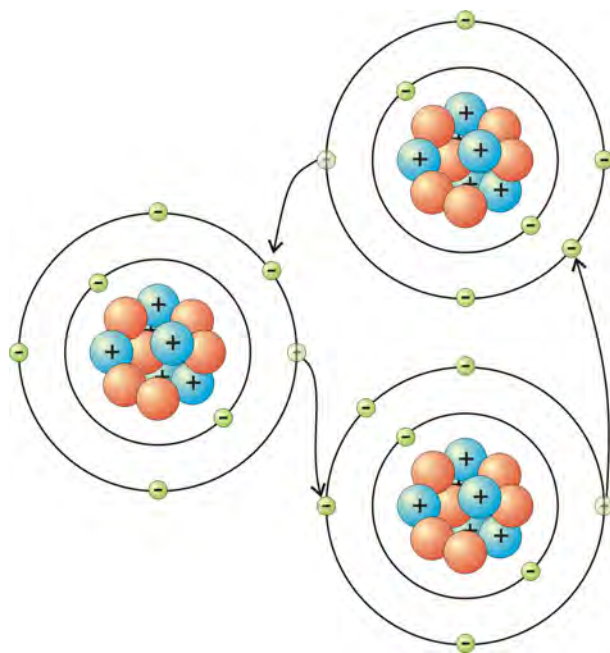
Pojedini gasovi (kiseonik, hlor i slično), iako umireni u električnom smislu, imaju potrebu da vežu jedan elektron više u valentnoj orbiti (slika 1.16, a). Ovi elementi „hvataju” elektron viška u prostoru gde se dešavaju drugi elementarni procesi, odnosno, gde postoje slobodni, pokretni elektroni. Ovaj elementarni proces naziva se „zahvat elektrona”.

Nakon zahvata elektrona, atom postaje negativno naelektrisan jon koji, radi energetskog uravnoteženja, otpušta jedan foton energije koji se dalje uključuje u elementarne procese u gasnoj plazmi.

U slučaju kada se elektroneutralni atomi istog gasa nađu vrlo blizu jedan drugom,

moguća je pojava brzog prelaska valentnih elektrona sa jednog atoma na drugi (slika 1.17). Ovakav elementarni proces naziva se izmenom naelektrisanja i to je osnovni mehanizam prenosa električne struje kroz čvrsto metalno telo.

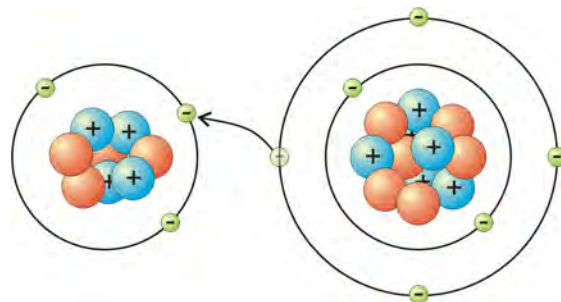
Izmena naelektrisanja kod neutralnih atoma gasa u gasnoj plazmi je vrlo brza i stabilna pojava.



Slika 1.17 Elektroneutralna izmena naelektrisanja

Drugi slučaj izmene naelektrisanja javlja se pri susretu pozitivnog jona i elektroneutralnog atoma (slika 1.18).

Ukoliko pozitivno naelektrisan jon ima manje elektrona u svojoj valentnoj orbiti nego što ih ima atom u blizini, velika je verovatnoća da će atom da preda jedan od svojih elektrona pozitivnom jonu, i sam postane pozitivno naelektrisan jon.



Slika 1.18 Jonska izmena naelektrisanja

Po istom mehanizmu, ali sa još većom verovatnoćom realizacije, pri kontaktu

dvostruko pozitivnog jona (atom kome nedostaju dva elektrona) i neutralnog atoma, atom jonu predaje jedan svoj valentni elektron.

Svaki od navedenih elementarnih procesa među česticama ima svoj povratni elementarni proces koji rekombinuje čestice u gasnoj plazmi.

Ostali elementarni procesi (višečestična ekscitacija, „ljušćenje” atoma, fotofisija) se javljaju znatno ređe i vezuju se samo za pojedine hemijske elemente ili jedinjenja u gasovitom stanju (helijum, metan, isparenja benzina, na primer) čija koncentracija u gasu koji se jonizuje je znatno niža od koncentracije osnovnog gasa.

Istorija postupka

Otkriće plazme ne može da se pripíše nekome – ona je prirodno stanje materije, prisutno svuda, ali, je kao nestabilno i kratkotrajno stanje manje uočljivo u odnosu na ostala tri agregatna stanja materije. Plazma, kao četvrto agregatno stanje materije se prvi put pominje u mitskim dokumentima antičke Grčke – munja je opis pojave gorenja vazduha kada je vrhovni bog Zevs ljut [25].

Prva zabeležena naučna istraživanja koja se odnose na plazmu vezuju se za drugu polovinu devetnaestog veka i fizičare Johana Hitorfa¹⁸ i Vilijama Kruksa¹⁹. U periodu od 1869. do 1879. godine oni su sprovedi eksperiment u Kruks-Hitorfovoj cevi, kada su otkrili „katodne zrake”, odnosno, snop elektrona. Plazma stanje gasa je bila prateća pojava ovog eksperimenta [29].

Pojam „plazma” je prvi upotrebio Irving Lengmjur, kojim je definisao stanje gasa gde se jasno odvajaju negativno i pozitivno naelektrisane čestice [22].

Postupak zavarivanja „atomske vodonikom” je prvi postupak zavarivanja gde se ciljano stvara gasna plazma kako bi se povisila temperatura električnog luka.

Postupak je nastao 1928. godine ali to ipak nije postupak zavarivanja samo plazmom [30].

Svaki električni luk u nekom gasu formira delimično jonizovanu (slabu) plazmu. Međutim, električni luk kod „običnih” elektrolučnih postupaka zavarivanja je dominantnija pojava nego jonizacija gasa. Kako je električni luk kod plazma postupaka zavarivanja „suženi luk” u gasu, formira se jaka, nestabilna gasna plazma.

Prvi (pravi) postupak zavarivanja gasnom plazmom nastao je krajem četrdesetih godina dvadesetog veka. Postupak je nastao namernim modifikovanjem sistema za rezanje (metala) gasnom plazmom koji je nastao u periodu od 1950. do 1953. godine. Dva tima, jedan u Nemačkoj a drugi u Americi, radeći nezavisno jedan od drugog, došli su gotovo istovremeno do otkrića postupka sečenja gasnom plazmom. Prvi (američki, ali i globalni) patent vezan za postupak zavarivanja (gasnom) plazmom (prijavljen 1955. godine, a odobren 1957. godine), potpisuje Amerikanac Robert Gejdz²⁰ pa se on smatra izumiteljom postupka zavarivanja (gasnom) plazmom [31].

Princip rada, parametri zavarivanja i oprema za zavarivanje

Postupak zavarivanja plazmom vrši se primenom posebnog uređaja, koji je, u vreme nastanka postupka, dobio ime plazmatron²¹ (slika 1.19).

Postupci zavarivanja plazmom, u osnovnoj konfiguraciji, izvide se primenom netopive volframove elektrode uz primenu dodatnog materijala ili bez njega (slično kao kod postupaka iz grupe ISO 4063 – 14). Međutim, postoji konfiguracija postupaka zavarivanja plazmom, kada se primenjuje samo elektrodna žica na koturu (slično kao kod postupaka iz grupe ISO 4063 – 13). Samim tim, osnovna oprema za zavarivanje plazmom je vrlo slična opremi za postupke zavarivanja iz grupa 14 i 13.

Kod osnovne konfiguracije postupka zavarivanja plazmom, unutar keramičke ili

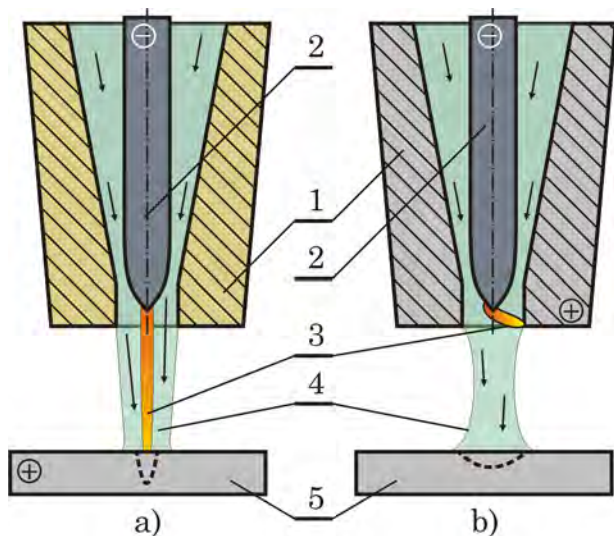
¹⁸ Nem. Johann Wilhelm Hittorf (27.03.1824–28.11.1914), fizičar iz Nemačke [27].

¹⁹ Eng. William Crookes (17.06.1832–04.04.1919), hemičar i fizičar iz Velike Britanije [28].

²⁰ Eng. Dr Robert M. Gage, hemičar iz SAD [32].

²¹ Plazma gorionik, plazma pištolj.

metalne mlaznice (slika 1.19, pozicija 1), nalazi se netopiva volframova elektroda (slika 1.19, pozicija 2) koja služi za uspostavljanje i održavanje električnog luka (novije varijante postupka funkcionišu i sa topivom elektrodnom žicom). U osnovnom izvođenju postupka (slika 1.19, a), izvor električne struje se vezuje za volframovu elektrodu i radne komade (slika 1.19, pozicija 5) sa ciljem da se između njih uspostavi električni luk (slika 1.19, a, pozicija 3). Kroz mlaznicu (oko elektrode) struji gas pod pritiskom. Vrh mlaznice ga usmerava i on napušta mlaznicu veoma brzo. Električni luk, uspostavljen između elektrode i radnih komada (slika 1.19, a, pozicija 3) jonizuje gas usmeren kroz mlaznicu i formira se (gasna) plazma (slika 1.19, pozicija 4) oko električnog luka. Električni luk i plazma istovremeno udaraju u lice radnih komada (slika 1.19, a, pozicija 5) i zagrevaju ga.



Slika 1.19 Šematski prikaz elektrolučnog postupka zavarivanja plazmom, a – sa prenetim lukom, b – sa neprenetim lukom, 1 – mlaznica, 2 – volframova elektroda, 3 – električni luk, 4 – gasna plazma, 5 – radni komadi [9]

U drugom izvođenju plazmatrona (slika 1.19, b), električni luk se uspostavlja između volframove elektrode (slika 1.19, b, pozicija 2) i metalne mlaznice (slika 1.19, b, pozicija 1). Isto kao kod prvog izvođenja, gas pod pritiskom opstrujava elektrodu pri prolasku kroz mlaznicu, jonizuje se u okolini električnog luka udara u lice radnih komada (slika 1.19, b, pozicija 5) i zagreva ga.

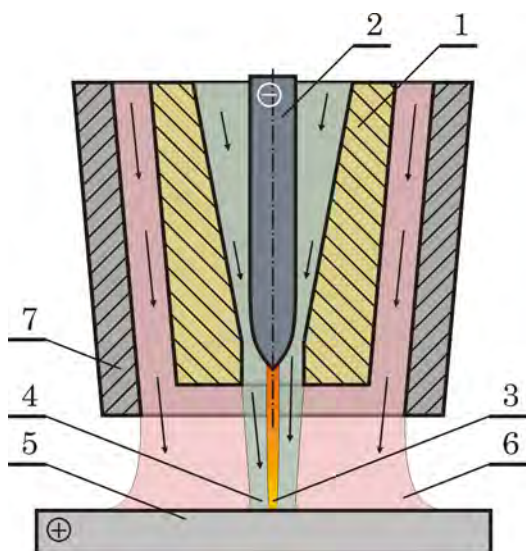
Plazmatron sa keramičkom (ređe metalnom) mlaznicom (slika 1.19, a, pozicija 1), kod koga se električni luk uspostavlja između elektrode i radnih komada, prema ISO 857-1, primenjuje se pri elektrolučnom postupku zavarivanja plazmom sa prenetim lukom²². Plazmatron sa metalnom mlaznicom (slika 1.19, b, pozicija 1), kod koga se električni luk uspostavlja između elektrode i metalne mlaznice, prema ISO 857-1, primenjuje se pri elektrolučnom postupku zavarivanja plazmom sa neprenetim lukom²³.

Moguće izvođenje plazmatrona sa metalnom mlaznicom je kada se izvor struje, jednim polom veže za elektrodu a drugi pol se veže i za radne komade i za mlaznicu. Posebnim elektronskim uređajima (prekidačima, starterima, spliterima), električno kolo se zatvara preko radnih komada ili preko metalne mlaznice. Takvim sistemom se omogućava uspostavljanje električnog luka između elektrode i radnih komada/mlaznice koji „skače” sa mlaznice na radni komad i obrnuto. Takav plazmatron primenjuje se kod postupka elektrolučnog postupka zavarivanja plazmom sa delimično prenetim lukom.

Gasna plazma dobija se jonizovanjem aktivnog ili inertnog gasa, mešavine gasova, ili, vrlo retko, jonizovanjem vazduha koji struji kroz mlaznicu. Pored jonizacije – dobijanja plazme, namena gasa je da hladi mlaznicu i elektrodu. Međutim, bez obzira na inicijalna aktivna/inertna svojstva dovedenog gasa, nakon jonizacije, jonizovani gas nema garantovana zaštitna svojstva na metal šava koja ima kada je elektroneutralan. Zbog toga se u zonu zavarivanja dovodi dodatni mlaz gasa, koji se ne jonizuje a ima funkciju zaštite tečnog kupatila i zavarenog spoja od negativnog uticaja atmosfere. Kako bi to bilo izvodljivo, mlaznica plazmatrona je modifikovana, tako da, je ona, u stvari, mlaznica u mlaznici (slika 1.20).

²² U zavarivačkoj praksi, ovaj postupak se naziva postupkom zavarivanja plazmom sa direktnim lukom.

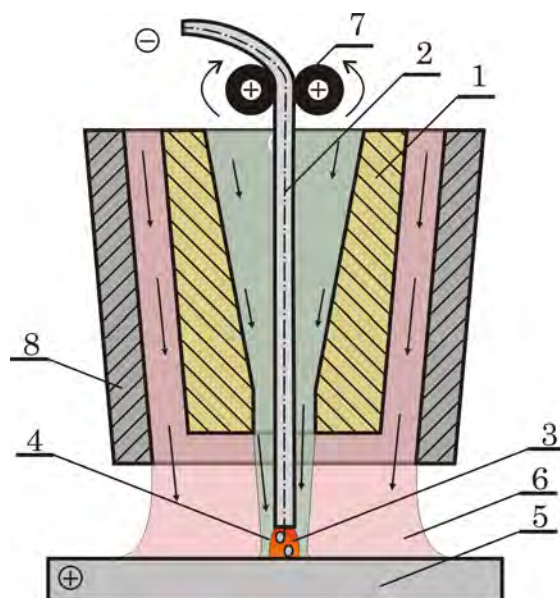
²³ U zavarivačkoj praksi, ovaj postupak se naziva postupkom zavarivanja plazmom sa indirektnim lukom.



Slika 1.20 Šematski prikaz složenog plazmatrona, 1 – plazma (unutrašnja) mlaznica, 2 – volframova elektroda, 3 – preneti električni luk, 4 – plazma, 5 – osnovni metal, 6 – zaštitni gas, 7 – (spoljašnja) mlaznica za zaštitni gas, retuširana slika iz [7]

Prema tome, za uspešno spajanje delova elektrolučnim postupcima zavarivanja plazmom, neophodno je prisustvo gasa koji generiše plazmu i gasa koji se primenjuje kao zaštita. Kao plazma gas za zavarivanje primenjuju se (inertni) argon, helijum, njihove mešavine, kao i mešavine ovih inertnih gasova sa azotom ili vodonikom. Moguća je varijanta da se isti gas (na primer, argon) primenjuje i za dobijanje plazme i kao zaštita zavarenog spoja. Međutim, iako fizički isti gas, on mora odvojeno da se dovede u zonu zavarivanja: deo gasa, doveden unutrašnjom mlaznicom (slika 1.20, pozicija 1), se jonizuje dok se deo gasa, doveden spoljašnjom mlaznicom (slika 1.20, pozicija 7), ne jonizuje ili samo neznatno jonizuje.

Primenom opreme za zavarivanje prikazane na slici 1.20, temperatura regularnog električnog luka (bez namerno inicirane plazme) dostiže maksimalnu temperaturu od oko 5500 °C. Temperatura gasne plazme za zavarivanje, bez primene zaštitnog gasa, dostiže temperature od maksimalno 28000 °C, dok primena zaštitnog gasa snižava ovu temperaturu na maksimalno 25000 °C. Zbog ovako visokih radnih temperatura, mlaznice unutar plazmatrona moraju da se hlade intenzivno.



Slika 1.21 Šematski prikaz postupka elektrolučnog zavarivanja plazmom, sa kontinualno dovedenim dodatnim materijalom, 1 – unutrašnja mlaznica, 2 – elektrodna žica, 3 – preneti električni luk, 4 – plazma, 5 – osnovni metal, 6 – zaštitni gas, 7 – sistem za dovođenje materijala, 8 – spoljašnja mlaznica, retuširana slika iz [7]

Spajanje delova elektrolučnim postupcima zavarivanja plazmom vrši se bez i sa dodatnim materijalom.

Zavarivanje plazmom bez dodatnog materijala primenjuje se za delove manje debljine i uvek se vrši primenom plazmatrona sa volframovom elektrodom, sa prenetim ili neprenetim lukom.

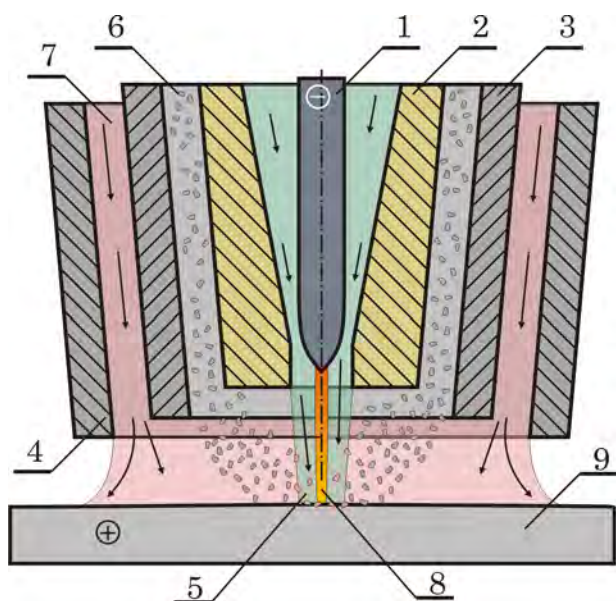
Zavarivanje plazmom sa dodatnim materijalom ima dva različita izvođenja: prekidno i kontinualno.

Kada se zavarivanje vrši primenom netopive elektrode, za dobijanje i održavanje električnog luka, a topiva elektrodna žica se koristi kao dodatni materijal, u pitanju je prekidni tip zavarivanja (slika 1.21). Moguće je izvođenje i sa prenetim i sa neprenetim električnim lukom. Ovakvo izvođenje postupka zavarivanja plazmom je veoma slično postupcima zavarivanja iz grupe 14.

Kontinualni tip zavarivanja plazmom podseća na većinu postupaka iz grupe 13 – električni luk se uspostavlja između topive elektrodne žice i radnih komada, obavezno u atmosferi zaštitnog gasa (slika 1.21). Elektrodna žica se kontinualno dovodi u zonu

zavarivanja (sa namotanog kotura), topi se i formira metal šava. Ovakvo izvođenje plazma zavarivanja je najproduktivnije od svih postupaka zavarivanja plazmom.

Drugo način kontinualnog izvođenja elektrolučnog postupka zavarivanja plazmom vrši se netopivom elektrodom, sa prenetim ili neprenetim električnim lukom, uz dodatak metalnog praha (slika 1.22).



Slika 1.22 Šematski prikaz postupka elektrolučnog zavarivanja plazmom, sa kontinualno dovedenim dodatnim materijalom – metalnim prahom, 1 – volframova elektroda, 2 – plazma mlaznica, 3 – mlaznica za zaštitni gas, 4 – mlaznica za metalni prah, 5 – plazma, 6 – metalni prah, 7 – zaštitni gas, 8 – preneti električni luk [7]

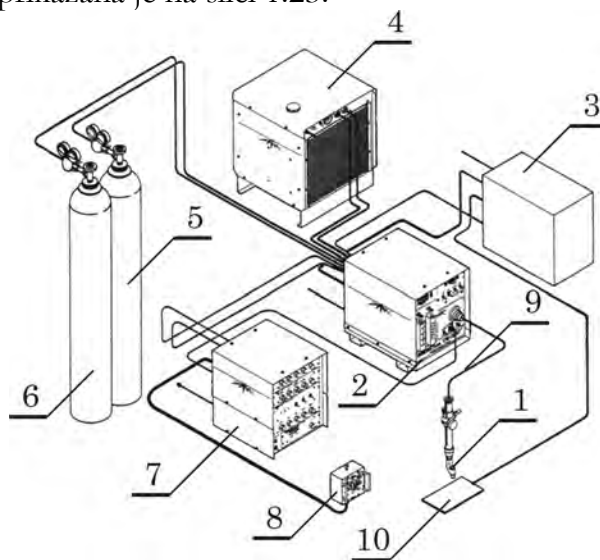
Metalni prah (dodatni materijal) se u zonu zavarivanja dovodi odgovarajućom mlaznicom koja je dodata plazmatronu (po principu: mlaznica u mlaznici). Ovakav postupak zavarivanja je pogodan za vrlo produktivno navarivanje.

Osnovna oprema za elektrolučne postupke zavarivanja plazmom je gotovo identična opremi za TIG postupak zavarivanja i čine je izvor struje (sa displejom, hladnjakom, priključcima za gasove), komanda jedinica (zavarivačka konzola), poliprovodnik, pištolj za zavarivanje (plazmatron) i boce za gasove.

Elektrolučni postupci zavarivanja plazmom uglavnom koriste jednosmernu

struju a izvor ima padajuću strujnu karakteristiku. Netopiva volframova elektroda se vezuje na negativan pol izvora struje kako bi se izbeglo njeno preterano zagrevanje. Kada se za uspostavljanje električnog luka primenjuje topiva elektrodna žica, ona se vezuje na pozitivan pol. Naizmenična struja daje relativno stabilan električni luk, ali promena polariteta negativno utiče na formiranje i koncentraciju gasne plazme. Kada je primena naizmenične struje neophodna (zavarivanje materijala sa površinskom zaštitom, na primer), koristi se naizmenična struja kvadratnog oblika i to kod koje je poluperioda kada je volframova elektroda pozitivno naelektrisana, znatno kraća nego kad je elektroda negativno naelektrisana. Sistem za zavarivanje plazmom (sa metalnom mlaznicom) ima poseban visokofrekventni uređaj za pokretanje pilot-električnog luka između elektrode i mlaznice.

Zavarivanje plazmom se najčešće vrši robotizovano (automatizovano) ili mehanizovano, ali postoji i ručno izvođenje. Šema jednog poluautomatskog sistema za elektrolučne postupke zavarivanja plazmom prikazana je na slici 1.23.



Slika 1.23 Šematski prikaz poluautomatskog sistema za zavarivanje plazmom, 1 – plazma pištolj, 2 – zavarivačka konzola, 3 – izvor struje, 4 – hladnjak, 5 – boca za plazma gas, 6 – boca za zaštitni gas, 7 – komandni modul, 8 – daljinski upravljač, 9 – poliprovodnik, 10 – osnovni metal, retuširana slika iz [9]

Displej izvora struje za zavarivanje plazmom je složeniji nego kod TIG uređaja. Pored preklopnika za podešavanje jačine i tipa struje (koje ima TIG inverter), plazma-displej ima preklopnike za podešavanje protoka plazma-gasa, zaštitnog gasa, kao i zaštitnog gasa za koren šava (ako se primenjuje).

Zbog vrlo visokih temperatura gasne plazme, plazmatron, poliprovodnik (u blizini pištolja) i izvor električne struje moraju da se intenzivno hlade. Za hlađenje se koristi dejonizovana voda ili posebno sredstvo za hlađenje, koji se u samom hladnjaku dodatno i neprekidno dejonizuju (elektroneutrališu). Razlog primene ovakvog sistema za hlađenje nalazi se u velikoj osetljivosti opreme za zavarivanje ali i činjenici da je jonizovanje čestica osnova samog postupka zavarivanja – jonizovanje čestica unutar rashladnog fluida nije željeno stanje jer usporava hlađenje opreme a može da dovede i pojave vrtložnih struja unutar rashladnog fluida.

Na osnovu primenjene jačine struje, razlikuju se tri moda plazma zavarivanja [9]:

$I_{\text{z}} < 15 \text{ A}$ – javlja se „stubasti” električni luk, koji je stabilan do dužine od 20 mm. Mod se naziva „mikroplazma” i primenjiv je za zavarivanje tankih delova.

$15 \text{ A} \leq I_{\text{z}} < 200 \text{ A}$ – osobine električnog luka su slične TIG postupku, ali, kako je plazma usmerena, električni luk kod plazme je uži nego kod TIG-a. Povećanjem protoka „plazma-gasa” može da se ostvari veći provar, ali, postoji mogućnost pojave turbulencije zaštitnog gasa i narušenja kontinuiteta plazme. Ovaj mod se naziva „srednja plazma”.

$I_{\text{z}} \geq 200 \text{ A}$ – primenom veće jačine struje i većeg protoka plazma gasa, dobija se plazma-luk snage/prodornosti uporedive sa laserskim ili elektronskim snopom. U takvom režimu rada, javlja se efekat „ključaonice” – rastopljeni metal cirkuliše/kruži oko ose plazma gasa. Samim tim, metal se lakše zagreva, rastopljeni metal bolje meša i moguće je zavarivanje većih debljina materijala (na primer, do 10 mm nerđajućeg čelika). Ovaj mod se naziva „plazma sa ključaonicom”.

Sva tri moda plazma zavarivanja imaju svoju primenu u industriji.

Prednosti i nedostaci

Elektrolučni postupci zavarivanja plazmom imaju nekoliko prednosti u odnosu na ostale elektrolučne postupke zavarivanja:

- Pištolj za zavarivanje plazmom – plazmatron, zbog svoje specifične konstrukcije, omogućava bolju kontrolu električnog luka u odnosu na uporedivi TIG postupak zavarivanja,
- Zavarivač ima bolji pregled zone zavarivanja u odnosu na druge elektrolučne postupke,
- Dobra koncentracija toplote i visoka temperatura zavarivanja, omogućavaju veću brzinu zavarivanja,
- Prisutan je efekat ključaonice što omogućava dobru penetraciju i zavarivanje u različitim položajima,
- Zona uticaja toplote je znatno manja nego kod TIG postupka zavarivanja. Nedostaci postupka nisu beznačajni:
- Cena opreme za zavarivanje, kao i operativni troškovi primene plazme za zavarivanja su znatno viši nego kod TIG postupka,
- Pištolj za zavarivanje je masivan i težak što može da predstavlja problem određenom broju zavarivača,
- Zavarivači, odnosno, operateri zavarivanja, moraju da budu dobro obučeni za rad sa plazma opremom. Ovakva obuka je, uglavnom, vrlo skupa,
- Prilikom zavarivanja plazmom, prisutni su jako ultraljubičasto i srednje jako infracrveno zračenje pa je neophodna kvalitetna lična zaštitna oprema za zavarivača,
- Oprema za zavarivanje, kao i sam električni/plazma luk, dovode do elektromagnetnih smetnji koje mogu uticati na rad mobilnih telefona, računara, pejsmejкера i slično,
- Zavarivanje plazmom proizvodi buku koja prelazi 100 dB²⁴.

²⁴ Smatra se da je 120 dB prag povrede sluha kod dece, dok je kod odraslih to 140 dB [33].

Primena postupka

Elektrolučni postupci zavarivanja plazmom primenjuju se za zavarivanje različitih vrsta čelika (uključujući nerđajuće), titanijuma, nikla i aluminijuma. Najveća primena postupka je za zavarivanje delova u brodogradnji i avioindustriji, a mikroplazma se primenjuje za spajanje komponenti u elektronskoj industriji. Posebna oblast primene postupka je reparacija – navarivanje i korekcije grešaka koje su nastale primenom drugih postupaka zavarivanja.

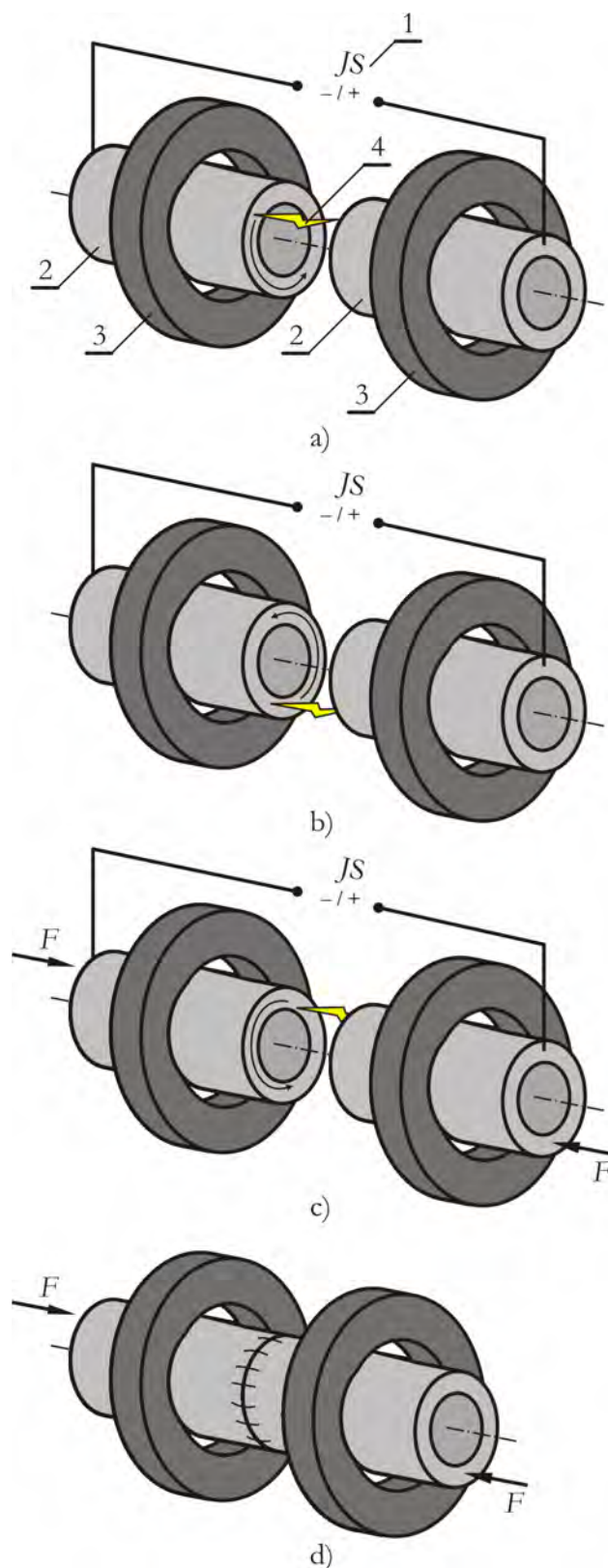
Podela, klasifikacija i standardizacija postupka

Postupci elektrolučnog zavarivanja plazmom su standardizovani i prema SRPS EN ISO 4063:2021 [2] klasifikovani kao grupa ISO 4063 – 15 koju čine:

- Plazma MIG postupak zavarivanja, označen kao ISO 4063 – 151,
- Postupak zavarivanja plazmom uz dodatak metalnog praha, označen kao ISO 4063 – 152,
- Elektrolučni postupak zavarivanja plazmom sa prenetim lukom, označen kao ISO 4063 – 153,
- Elektrolučni postupak zavarivanja plazmom sa neprenetim lukom, označen kao ISO 4063 – 154,
- Elektrolučni postupak zavarivanja plazmom sa delimično prenetim lukom, označen kao ISO 4063 – 155.

1.6 Ostali elektrolučni postupci zavarivanja

Standard ISO 4063 definiše posebnu grupu elektrolučnih postupaka kao ISO 4063 – 18. Toj grupi sada pripada samo jedan postupak ISO 4063 – 185. Drugi elektrolučni postupak, koji je bio standardizovan kao ISO 4063 – 181*, je u stvari, prvi ikada razvijeni elektrolučni postupak zavarivanja – elektrolučno zavarivanje ugljeničnom elektrodom.



Slika 1.24 Šematski prikaz postupka magnetno-elektrolučnog zavarivanja sa rotirajućim lukom, a – početak zavarivanja, b – rotacija električnog luka, c – rotacija električnog luka uz dejstvo sile pritiska F , d – iskivanje šava, 1 – izvor struje, 2 – radni komadi, 3 – magneti, 4 – električni luk

1.6.1 Postupak magnetno-elektrolučnog zavarivanja sa rotirajućim lukom

Postupak magnetno-elektrolučnog zavarivanja sa rotirajućim (električnim) lukom je postupak zavarivanja bez dodatnog materijala gde se, kao primarni izvor energije aktivacije zavarivanja koristi električni luk, ali uz primenu sile pritiska za završno iskivanje šava. Postupak se, gotovo ekskluzivno, primenjuje za sučeono zavarivanje čeličnih cevi [34].

Cevi (slika 1.24, pozicija 2) se postavljaju u uređaj za zavarivanje u saosni položaj tako da stoje sučeono jedna drugoj ali se ne dodiruju. Sistem za pozicioniranje cevi ima mogućnost aksijalnog kretanja (duž ose cevi). Oko cevi se postavljaju elektromagneti ili stalni magneti (slika 1.24, pozicija 3) a nakon toga, cevi se povezuju na izvor jednosmerne struje (slika 1.24, pozicija 1). Struja zavarivanja mora da bude jednosmerna (ili pulsna) kako bi električni luk bio stabilan. Primena naizmenične struje bi dovodila do paljenja/gašenja luka tako da bi rotacija električnog luka izostala.

U inicijalnom položaju (slika 1.24, a), nakon uključenja izvora struje, uspostavlja se električni luk između čela cevi (električni luk se uspostavlja nekom od metoda – brzim kontaktom, pilot-lukom itd).

Magnetno polje (od magneta) i električno polje (oko električnog luka) međusobno reaguju – javlja se Lorencova sila koja deluje na naelektrisanе čestice u električnom luku. Ova sila je dovoljno velika da dodatno pokrene „naelektrisanja” u cirkularnom pravcu te električni luk počinje da rotira oko ose cevi (slika 1.24, b). Tangencijalna brzina električnog luka (upravna na rotaciju luka) može da dostigne brzinu od 200 m/s. Električni luk zagreva (i topi) čela cevi a njegova rotacija oko ose cevi dovodi do ujednačenijeg zagrevanja cevi.

Nakon određenog vremena, na cevi počinje da deluje aksijalna sila F .

Samim tim, počinje približavanje cevi jedne ka drugoj (slika 1.24, c) i kada se cevi dodirnu čelom o čelo, električni luk se gasi.

Tako započinje poslednja faza zavarivanja – iskivanje šava (slika 1.24, d).

Prva istraživanja postupka magnetno-elektrolučnog zavarivanja sa rotirajućim lukom započeta su tokom pedesetih godina dvadesetog veka u Institutu za zavarivanje Paton, u Kijevu [36].

Nakon toga, Kuka AG je doradila postupak magnetno-elektrolučnog zavarivanja sa rotirajućim lukom: uveden je zaštitni gas, primenjuju se elektromagneti promenljivog karaktera i snage, izvori struje su i naizmenični i jednosmerni, postupak je robotizovan itd. Kuka je 1972. godine proizvela prvu mašinu za postupak elektrolučnog zavarivanja rotirajućim lukom [35].

Ovako inovirani postupak se danas naziva „magnetark” (na engleskom *magnetarc*) i primenjuje se za zavarivanje čeličnih cevi i šupljih profila debljine zida do 10 mm. Kako je institut „Paton” vlasnik više nacionalnih i međunarodnih patenata vezanih za postupak magnetno-elektrolučnog zavarivanja sa rotirajućim lukom bez zaštitnog gasa [36-37], a Kuka polaže pravo na „magnetark” postupak koji je sa zaštitnim gasom, suštinski je to jedan isti postupak, ali, birokratski posmatrano – ovo su dva različita postupka zavarivanja.

Postupak magnetno-elektrolučnog zavarivanja sa rotirajućim lukom je veoma specifičan te je malo kompanija koje se usuđuju da ga komercijalno primenjuju. Uglavnom su to kompanije iz Ukrajine, Nemačke, Rusije, a od 2001. godine Sjedinjene Američke Države i Kina.

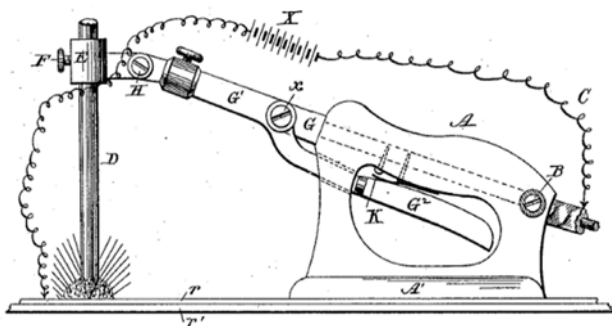
Sam postupak zavarivanja je veoma brz, efikasan i produktivan. Međutim, kvalitet šava zavisi od rada i efikasnosti sistema za upravljanje i kontrolisanje parametara zavarivanja (električni luk, brzina rotacije luka, sila pritiska, trajanje ciklusa zavarivanja), koji je veoma složen i skup. Samim tim, zavarivanje je ograničeno samo na radionički prostor.

Postupak je, prema najnovijoj verziji standarda EN SRPS ISO 4063:2021 klasifikovan kao ISO 4063 – 185. Postupak se još uvek ne primenjuje u Srbiji.

1.6.2 Postupak zavarivanja ugljeničnom elektrodom

Postupak zavarivanja ugljeničnom elektrodom je prvi elektrolučni postupak zavarivanja. Postupak su izumeli učenici Augusta Demeritena – Nikolaj Bernardos i Stanislav Olsceviski, krajem 1881. godine i patentirali ga u Francuskoj, Velikoj Britaniji i Americi do kraja 1890. godine.

Postupak zavarivanja ugljeničnom elektrodom se, u vreme nastanka, nazivao „Elektrogefest” postupkom (slika 1.25).



Slika 1.25 Elektrogefest postupak zavarivanja [38]

Zavarivanje Elektrogefest postupkom vršilo se alatom/držačem (slika 1.25, A), na kome se nalazi ručica za uključivanje izvora struje (slika 1.25, B). Na držaču je postavljena ugljenična elektroda (slika 1.25, C) kojom se zatvara strujno kolo i vrši zavarivanje. Između elektrode i radnih komada se uspostavlja intenzivan električni luk koji zagreva/topi radne komade. Elektroda nije dodatni materijal (već potrošni) – njena funkcija je aktiviranje i održanje električnog luka, tako da se zavarivanje vrši bez dodatnog materijala.

Međutim, elektroda trpi značajno elektro-termičko opterećenje jer električni luk „odnosi” materijal sa elektrode tako da se elektroda značajno degradira tokom zavarivanja. Materijal sa elektrode (ugljenik) završava u tečnom kupatilu, pa samim tim, otežava zavarivanje i pogoršava osobine zavarenog spoja. Kako se zavarivanje događa u slobodnoj atmosferi, gasovi iz atmosfere nesmetano prodiru u metal šava. Na slici je prikazana autentična slika primene

Bernardosovog elektrolučnog postupka zavarivanja iz 1909. godine.



Slika 1.26 Operator zavarivanja Bernardosovim elektrolučnim postupkom (proceedings of the Engineering Society of western Pennsylvania, May, 1909, C. B. Auel.)[39]

Ovim postupkom je moguće zavarivanje mekih čelika i livenog gvožđa do debljine od 10 mm.

Kao primitivan i veoma limitiran postupak, postupak zavarivanja ugljeničnom elektrodom je primenjivan do početka Prvog svetskog rata, ali je potisnut efikasnijim postupcima zavarivanja električnim lukom. Danas se ovaj postupak zavarivanja izvodi samo u laboratorijskim uslovima radi istraživanja.

Postupak zavarivanja ugljeničnom elektrodom je prema verziji ISO 4063:78 bio standardizovan i klasifikovan kao postupak ISO 4063 – 181. Novije verzije standarda ovaj postupak klasifikuju kao „zastareli i van komercijalne upotrebe”.

LITERATURA

- [1] EN ISO 4063:2020: Welding, brazing, soldering, cutting, mechanical joining and adhesive bonding – Nomenclature of processes and reference numbers, objavljen: 12/2020;
- [2] SRPS EN ISO 4063:2021: Welding, brazing, soldering, cutting, mechanical joining and adhesive bonding – Nomenclature of processes and reference numbers (EN ISO 4063:2020), naziv na sprskom: Zavarivanje, tvrdo lemljenje, meko lemljenje, rezanje, mehaničko spajanje i adheziono spajanje – Lista postupaka i njihovo označavanje, objavljen: 17.12.2020;
- [3] ISO 4063:1978: Welding, brazing, braze welding and soldering of metals – List of processes, for symbolic representation on drawings, objavljen: 04/1978, povučen: 01/1990;
- [4] Mijajlović Miroslav: Tehnologija zavarivanja 1, Univerzitet u Nišu, Mašinski fakultet Niš, ISBN 978-86-6055-089-9, 2017;
- [5] ESAB History: <https://www.esab.co.uk/gb/en/about/history/bio.cfm>, (dokument pregledan 03.03.2021);
- [6] Patent: USA 2,470,178, Semiautomatic Arc Welding Apparatus and Method, K.K Masden, ESAB, 17.05.1949;
- [7] ISO 857-1:1998: Welding and allied processes – Vocabulary – Part 1: Metal welding processes, povučen iz upotrebe, objavljen 12/1998;
- [8] Gravity Welding: <https://www.yourarticlelibrary.com/welding/top-3-innovative-methods-of-welding-metallurgy/97901>, (dokument pregledan 03.03.2021);
- [9] Autorizovana predavanja na kursu za međunarodne inženjere zavarivanja IWE, Mašinski fakultet Niš, 2009-2021;
- [10] AWS: <https://awo.aws.org/glossary/auguste-de-meritens/>, (dokument pregledan 03.03.2021);
- [11] Nikolaj Bernardos: <https://tech.wikireading.ru/13394>, (dokument pregledan 03.03.2021);
- [12] Stanislaw Olszewski: http://starepowazki.sowa.website.pl/Pochowani/OlszewskiStanislaw_I.html, (dokument pregledan 03.03.2021);
- [13] Nikolaj Slavjanov: <https://nashural.ru/culture/ural-characters/slavyanov/>, (dokument pregledan 03.03.2021);
- [14] Fusarc Welding: https://www.gracesguide.co.uk/Fusarc_Welding, (dokument pregledan 03.03.2021);
- [15] Patent: H.J. Stretton, USA 2,432,048, Welding Electrode, 02.12.1947;
- [16] AluStir: <https://www.alustir.com/deutsch/schon-gewusst/elin-hafergut-verfahren/>, (dokument pregledan 03.03.2021);
- [17] Patent: G. Hafergut, USA 2,269,369, Process and Device for Electric Arc Welding, 06.01.1942;
- [18] Elin: <https://www.elin.com/>, (dokument pregledan 03.03.2021);
- [19] Manufacturing Guide: <https://www.manufacturingguide.com/en>, (dokument pregledan 03.03.2021);
- [20] Atomic Hydrogen Welding: https://en.wikipedia.org/wiki/Atomic_hydrogen_welding, (dokument pregledan 04.03.2021);
- [21] Smallman Tew, R. (1941), „Atomic Hydrogen Welding in Aircraft Production”, Aircraft Engineering and Aerospace Technology, Vol. 13 No. 8, pp. 227-230. <https://doi.org/10.1108/eb030812>,

- [22] Nobel Prize Organisation: <https://www.nobelprize.org/prizes/chemistry/1932/langmuir/biographical/>, (dokument pregledan 04.03.2021);
- [23] Howard B. Cary: Modern Welding Technology, 5th edition, Prentice Hall, USA, 2002;
- [24] Irving Langmuir: https://en.wikipedia.org/wiki/Irving_Langmuir, (dokument pregledan 04.03.2021);
- [25] Wikipedia: [https://el.wikipedia.org/wiki/Πλάσμα_\(φυσική\)](https://el.wikipedia.org/wiki/Πλάσμα_(φυσική)), (dokument pregledan 04.03.2021);
- [26] Božidar S. Milić: Osnove fizike gasne plazme, 2. Izdanje, Građevinska knjiga, ISBN 86-395-0129-7, 1989;
- [27] Johann Wilhelm Hittorf: https://en.wikipedia.org/wiki/Johann_Wilhelm_Hittorf, (dokument pregledan 04.03.2021);
- [28] William Crookes: https://en.wikipedia.org/wiki/William_Crookes, (dokument pregledan 04.03.2021);
- [29] Crookes–Hittorf tube: https://en.wikipedia.org/wiki/Crookes_tube, (dokument pregledan 04.03.2021);
- [30] M. Suban, J. Tušek, M. Uran, Use of hydrogen in welding engineering in former times and today, Journal of Materials Processing Technology, Volume 119, Issues 1–3, 2001, Pages 193-198, ISSN 0924-0136, [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(01\)00956-6](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(01)00956-6).
- [31] Patent: R.M. Gage, USA 2,806,124, Arc Torch and Process, 10.09.1957;
- [32] Robert M. Gage: https://en.wikipedia.org/wiki/Plasma_arc_welding, (dokument pregledan 04.03.2021);
- [33] Birgitta Berglund, Thomas Lindvall, Dietrich H Schwela: Guidelines For Community Noise, World Health Organization, Geneva, 1995-2020;
- [34] The James F. Lincoln Arc Welding: The Procedure Handbook of Arc Welding, 14th Edition, ASIN: B000FBCQ4M, 2015;
- [35] KUKA Magnetarc- Schweißen: https://www.kuka.com/-/media/kuka-downloads/imported/9cb8e311bfd744b4b0eab25ca883f6d3/kuka_broschuere_magnetarc_schweissen.pdf?rev=ce582753bc6c44b2906ea2f856d0315d, (dokument pregledan 05.03.2021);
- [36] Гаген Ю.Г., Таран В.Д.: Сварка магнитоуправляемой дугой. In: Машиностроение. 1970;
- [37] <https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/021617394/publication/EP0409990A1?q=pn%3DEP0409990A1>
- [38] Patent: USA 363,120, Process of and Apparatus for Working Metals by the Direct Application of the Electric Current, N. DE. Beranrdos & S. Olsyewsky, St. Petersburg, Russia, 17.05.1887;
- [39] Bernardos Elektrofesht: <https://chestofbooks.com/crafts/metal/Welding-Practice/The-Bernardos-Arc-Welding-Process.html>, (dokument pregledan 05.03.2021).

2 POSTUPCI ZAVARIVANJA ELEKTRIČNIM OTPOROM

Često korišćeni pojam „elektrootporno zavarivanje” se odnosi na grupu postupaka zavarivanja električnim otporom čija je osnovna odlika da je primarni izvor energije zavarivanja električna struja koja se transformiše u toplotu. Za razliku od elektrolučnih postupaka zavarivanja gde se električna energija električnim lukom transformiše u toplotu, kod postupaka zavarivanja električnim otporom toplota se dobija usled (električnog) otpora osnovnog materijala i kontakta proticanju električne struje, uz neznatnu pojavu ili bez pojave električnog luka. Ovako dobijena toplota nije dovoljan uslov za uspešno zavarivanje – osnovni materijal se lokalno intenzivno zagreva, ali, se tek uz dejstvo sile pritiska na osnovni metal dobija šav u ograničenoj zapremini osnovnog materijala. Prema tome, energija aktivacije kod postupaka zavarivanja električnim otporom je uvek kombinovanog tipa – dominantna je toplotna energija ali je za zavarivanje neophodna i mehanička energija.

Postupci zavarivanja električnim otporom imaju široku primenu (posebno u automobilske industriji) jer je većina postupaka pogodna za spajanje tankih čeličnih limova. Osnovne prednosti postupaka elektrootpornog zavarivanja u odnosu na druge postupke zavarivanja su: malo tečno kupatilo, mala zona uticaja toplote, velika proizvodnost, mogućnost mehanizacije, automatizacije i robotizacije, uz odličan kvalitet zavarenog spoja. Moguća je primena i jednosmerne i naizmenične struje. Osnovni nedostaci postupaka su vezani za geometriju i dimenzije delova koji se zavaruju – uspešna primena je moguća uglavnom kod relativno tankih delova, pločastog oblika. Elektrootporno zavarivanje zahteva dobru čistoću površina i postoje problemi pri zavarivanju delova koji imaju prevlake ili su obojeni. Poseban nedostatak svih postupaka zavarivanja električnim otporom je skupa i složena oprema za zavarivanje.

Istorija postupka

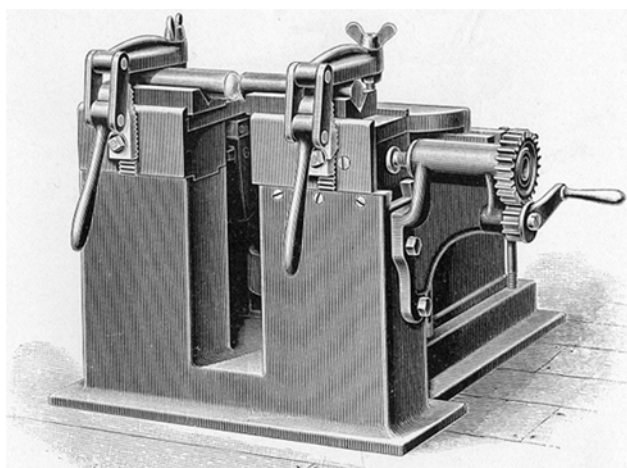
Fizičar iz Engleske Džejms Džul¹ je početkom devetnaestog veka istraživao provođenje električne struje kroz materijalna tela, odnosno, istraživao je električni otpor koji pruža materijal protoku električne struje. Tokom 1841. godine Džul je definisao zakon o „omskom zagrevanju” (danas poznat kao *prvi Džulov zakon*) ali je tek 1857. godine objavio prvi naučni rad u kome je opisao mogućnost primene zagrevanja električnim otporom za zavarivanje tankih metalnih delova [2]. Međutim, Džul se nikada nije bavio primenom „omskog zagrevanja” za spajanje metala.

Nekoliko različitih istorijskih izvora [3-5], pripisuje otkriće prvog postupka zavarivanja električnim otporom američkom inženjeru Elihu Tomsonu². On je 1885. godine uspešno izveo tačkasto zavarivanje limova od ugljeničnog čelika koristeći elektrode od bakra kroz koje je kratkotrajno propuštao struju velike jačine. Kao izvor struje koristio je masivni transformator. Interesantno je da je do otkrića elektrootpornog tačkastog zavarivanja Tomson došao slučajno još 1876. godine kada je prilikom jednog neuspešnog eksperimenta „električnog zavarivanja limova”, zavario bakarne elektrode za limove, ali ne i limove [6]. Tada je shvatio da je potencijal zagrevanja metala usled proticanja električne struje kroz njega veliki i svoje interesovanje usmerio je na primenu „električnog zagrevanja” metala na kontaktnim površinama. Već 1886 godine, Tomson je patentirao opremu za postupak električnog zavarivanja [7]. Postupak je odmah primenjivan za zavarivanje šupljih čeličnih profila kod ramova za bicikle – Tomsonovim

¹ Eng. James Prescott Joule (24.12.1818–11.10.1889), fizičar, matematičar i proizvođač piva iz Engleske. [1].

² Eng. Elihu Thomson (29.03.1853–13.03.1937), inženjer i izumitelj iz Amerike. Između ostalog, bio je v.d. Dekan MIT-a od 1920. do 1923 [4].

uređajem za „električno kovanje” ili uređajem za „bezplameno zavarivanje” (slika 2.1).



Slika 2.1 Tomsonov uređaj za elektrootporno zavarivanje iz 1885. godine [8]

Do prve decenije dvadesetog veka, Tomson je patentirao postupak i opremu za električno tačkasto zavarivanje limova, a 11.11.1913. godine ³ je patentirao električni postupak tačkastog zavarivanja limova alatom u obliku lanca. Lanac ima funkciju da koncentriše električnu struju u određenim tačkama na limovima [10, 11].

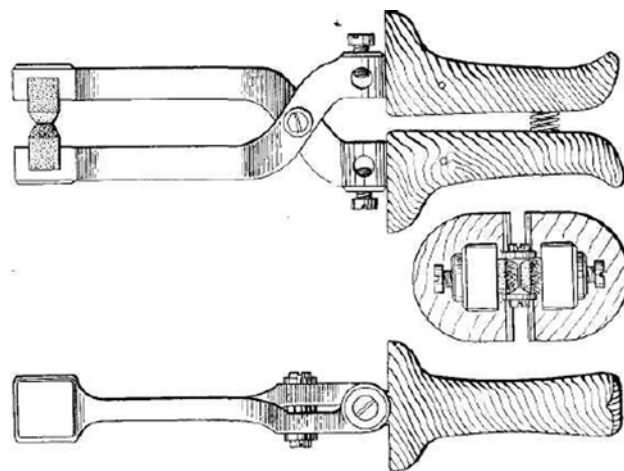
Takođe, Tomson je 1886. godine napravio uređaj za kontaktno zavarivanje tankih čeličnih limova (slika 2.2).



Slika 2.2 Tomsonov uređaj za elektrootporno zavarivanje iz 1886. godine [9]

Paralelno sa radom i istraživanjima Tomsona, na drugom kraju sveta – u Rusiji,

inženjer Nikolaj Bernardos ⁴ je krajem 1877. godine objavio slike držača elektroda/klešta za elektrootporno zavarivanje (slika 2.3).



Slika 2.3 Bernardosova klešta za elektrootporno zavarivanje iz 1877. godine [12, 13]

Bernardos je kasnije je i nastavio rad na postupku elektrootpornog šavnog zavarivanja limova od čelika [13].

Izveštaji Dmitrija Lačinova ⁵ iz 1887. godine napominju da Bernardos već više od 10 godina radi na istraživanju „kontaktnih postupaka električnog zavarivanja” [15].

Prema tome, elektrootporno zavarivanje je istraživano, istovremeno, i na Istoku, i na Zapadu, ali, prvi patenti nedvosmisleno pripadaju Zapadu [16].

Već 1903. godine, u AEG ⁶ u Nemačkoj, izrađena je prva komercijalna mašina za sučeono elektrootporno zavarivanje delova, i to prema Tomsonovim nacrtima [17]. U Americi je 1906. započela proizvodnja mašina za preklopno elektrootporno zavarivanje. Do 1910. godine, u Americi je postojalo 367 mašina koje su električnim otporom, tačkasto ili šavno, zavarivale šasije automobila [6].

Amerikancu Edvardu Badu ⁷ se pripisuje prvo komercijalno, tačkasto

⁴ Rus. Никола́й Никола́евич Берна́рдос (08.07.1842–21.09.1905) izumitelj iz Rusije [12].

⁵ Rus. Дми́трий Алекса́ндрович Ла́чинов (10.05.1842–15.10.1902) izumitelj, fizičar, elektroinženjer i klimatolog iz Rusije [14].

⁶ Nem. Allgemeine Elektrizitäts-Gesellschaft AG.

⁷ Eng. Edward Gowen Budd (28.12.1870–30.11.1946), izumitelj i biznismen iz Amerike [18].

³ Patent je prijavljen 21.10.1909. godine [10].

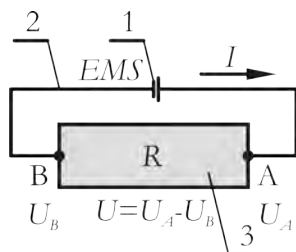
elektrootporno zavarivanje na šasiji automobila. Ovo zavarivanje izvedeno je 1913. godine na limovima od konstrukcionog čelika [18]. Tokom godina je ovaj postupak usavršavan, pa je 1932. godine u Badovoj kompaniji izvršeno prvo elektrootporno zavarivanje limova od nerđajućeg čelika [18]. Postupak je nazvan „šotveld” (eng. *shotweld*) a izumitelj je Earl J. Ragsdejl [19]. Bio je ovo veliki korak napred za postupke elektrootpornog zavarivanja. Naredni iskorak bio je usavršavanje uređaja za uključivanje-isključivanje električne struje – takozvani „Ignitron” uređaj [20]. Ignitron je proizvod američke korporacije Vestinghaus⁸.

Tokom 1939. godine kompanija „Sciaki”⁹ je izvela prvo elektrootporno tačkasto zavarivanje aluminijuma. „Sciaki” je 1943. godine započela prodaju trofaznih uređaja za elektrootporno zavarivanje [21].

Brzi razvoj postupaka zavarivanja električnim otporom je, svakako, započeo sa završetkom Prvog svetskog rata i traje do današnjih dana. Trenutno postoji oko 20 različitih (ili manje različitih) efikasnih postupaka zavarivanja električnim otporom.

Džulov efekat

Džulov efekat, u naučnom svetu poznat kao prvi Džulov zakon, Džul-Lencov zakon ili zakon omskog zagrevanja, je osnovna fizička pojava na kojoj se baziraju svi postupci zavarivanja električnim otporom. On definiše količinu toplote, koja nastaje pri protoku električne struje određene jačine, kroz tela koja imaju određenu električnu otpornost.



Slika 2.4 Šematski prikaz prostog električnog kola:
1 – izvor električne struje, 2 – idealni provodnik, 3 – idealni potrošač

Radi objašnjenja Džulovog zakona, posmatraćemo jedno prosto električno kolo, koje se sastoji od idealnog izvora električne struje (slika 2.4, pozicija 1), idealnog provodnika (slika 2.4, pozicija 2) i idealnog potrošača (slika 2.4, pozicija 3).

Kroz strujno kolo protiče električna struja jačine I dok je napon na potrošaču U . Potrošač ima idealni (totalni) električni otpor R i celokupnu energiju izvora (EMS) pretvara u toplotu. U ovom slučaju, osnovni oblik Džulovog zakona je:

$$P = I \cdot U \quad (2.1)$$

gde je: P – snaga (količina energije u trenutku vremena), količina električne energije prevedena u toplotu [W], I – jačina električne struje [A], U – pad napona od tačke A do tačke B kod posmatranog potrošača [V].

Kako je, prema Omovom zakonu, napon jednak:

$$U = I \cdot R \quad (2.2)$$

gde je: R – električni otpor potrošača [Ω], kombinovanjem jednačina 2.1 i 2.2, dobija se:

$$P = I^2 \cdot R. \quad (2.3)$$

Jednačina 2.3 predstavlja osnovni oblik prvog Džulovog zakona, odnosno, predstavlja energetske osnovu postupaka elektrootpornog zavarivanja.

Količina generisane toplote

Količina generisane toplote Q [J] na potrošaču dobija se množenjem snage P iz izraza 2.3 vremenom trajanja zagrevanja t [s]:

$$Q = I^2 \cdot R \cdot t. \quad (2.4)$$

U slučaju kada su struja i otpor promenljive veličine (što je realna situacija), količina generisane toplote jednaka je:

$$Q = \int_0^t I^2(t) R(t) dt. \quad (2.5)$$

Kako je realno električno kolo sastavljeno od više potrošača (elektrode, radni komadi) koji nisu idealni, i pri tom postoje veze (kontakti) između potrošača koje, takođe, nisu idealne, određivanje realne količine toplote nije jednostavno.

⁸ Eng. Westinghouse Electric Corporation.

⁹ Eng. Sciaky, Inc.

Generisanje toplote je složena fizička pojava, a količina generisane toplote je linearno zavisna od električnog otpora i dužine trajanja ciklusa zavarivanja, i kvadratno zavisna od jačine primenjene struje. Zbog toga se jačina struje kod elektrootpornog zavarivanja uvek razmatra kao „najvažniji” parametar omskog zagrevanja.

Jačina električne struje

Jačina električne struje je kontrolisano promenljiva veličina tokom vremena. Ona direktno zavisi od izvora električne struje a njena promenljivost (i održavanje u tolerisanim granicama, propisanim tehnologijom zavarivanja) je kontrolisana upravljačkim sistemom na uređaju za zavarivanje. Ona je poznata ulazna veličina.

Električni otpor

Električni otpor je veličina koja nije direktno upravljiva, niti je konstantna. Ona je zavisna veličina koja najviše zavisi od materijala elektroda i osnovnog metala, vremena, temperature, sile pritiska, stanja kontaktnih površina (čistoća, hrapavost, površinska zaštita itd), kao i tipa električne struje koju izvor struje daje (jednosmerna ili naizmenična).

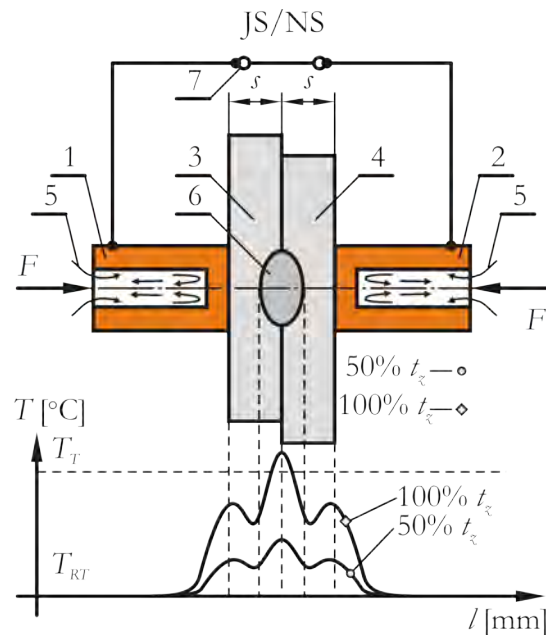
Na slici 2.5 prikazana je šema prostog, tačkastog elektrootpornog postupka zavarivanja. Za zavarivanje se koriste dve cilindrične elektrode od bakra (slika 2.5, pozicije 1 i 2), površine poprečnog preseka A_n , a radni komadi su limovi (slika 2.5, pozicije 3 i 4). Elektrode se intenzivno hlade rashladnom tečnošću/dejonizovanom vodom (slika 2.5, pozicija 5) koja struji kroz centralni deo elektroda. Radi pojednostavljenja, uzeto je da su obe elektrode potpuno identične i izrađene od istog materijala. Takođe, oba lima su istih dimenzija i izrađeni su od istog materijala. Izvor električne struje (slika 2.5, pozicija 7) napaja elektrode strujom i , u ovom slučaju, nije bitno da li je izvor jednosmerne ili naizmenične struje.

Ukupni električni otpor ovakvog sistema predstavlja sumu parcijalnih otpora

elektroda, radnih komada i električni otpor kontaktnih parova:

$$R(t) = R_{E1}(t) + R_{E1-M1}(t) + R_{M1}(t) + R_{M1-M2}(t) + R_{M2}(t) + R_{E2-M2}(t) + R_{E2}(t) \quad (2.6)$$

Elektrode se uvek izrađuju od bakra ili legura bakra koje dobro provode električnu struju. Samim tim, električni otpor elektroda je znatno manji u odnosu na sve ostale električne otpore u sistemu. Zbog toga se električni otpori elektroda, pri proračunu aktivne količine generisane toplote, zanemaruju $R_{E1}(t) = R_{E2}(t) \approx 0 \Omega$.



Slika 2.5 Šematski prikaz postupka elektrootpornog zavarivanja 212: 1 – elektroda E1, 2 – elektroda E2, 3 – radni komad M1, 4 – radni komad M2, 5 – rashladna tečnost RT, 6 – zavarena tačka, 7 – izvor električne struje

Električni otpori radnih komada $R_{M1}(t)$ i $R_{M2}(t)$ zavise od materijala i njihovih dimenzija. Kako je napomenuto da su radni komadi istovetni, njihov električni otpor je isti i jednak:

$$R_{M1}(t) = R_{M2}(t) = \rho_{M1}(T) \cdot \frac{s}{A_s} \quad (2.7)$$

gde su: $\rho_{M1}(T)$ – specifični električni otpor (električna otpornost) materijala radnog komada 1, u zavisnosti od temperature T [Ωm], s – debljina radnih komada [m], A_s – površina poprečnog preseka radnog komada kroz koji protiče električna struja [m^2].

U slučaju električnog otpora radnog komada, veličine s i A_s takođe zavise od temperature, ali je njihova promena veoma mala te se uticaj temperature na promenu dimenzija radnih komada zanemaruje.

Električni otpor kontakta (ili: kontakti električni otpor) je veličina koja je specifična za svaki od ostvarenih kontakata, nelinearno je promenljiva i zavisna je od velikog broja drugih pojava i parametara.

Osnovni izraz za određivanje električnog otpora kontakta je istog oblika kao izraz za određivanje električnog otpora radnog komada. Ukoliko imamo kontakt dva tela, preko dve površine, nazvane i i j , kontakti električni otpor $R_{i-j}(t)$ je jednak:

$$R_{i-j}(t) = \rho_{i-j}(t) \cdot \frac{\delta_{i-j}(t)}{A_{i-j}(t)} \quad (2.8)$$

gde je: $\rho_{i-j}(t)$ – specifični električni otpor kontaktnog para $i-j$, zavistan od vremena t [Ωm], $\delta_{i-j}(t)$ – debljina filma koji učestvuje u kontaktu i generiše toplotu, zavistan od vremena t [m], $A_{i-j}(t)$ – aktivna površina kontakta kroz koji protiče električna struja, zavisna od vremena t [m²].

Aktivna površina kontakta $A_{i-j}(t)$, u inicijalnom trenutku je svega 25% do 40% od nominalne površine kontakta (A_n) zbog hrapavosti, zakrivljenja i geometrijskih nesavršenosti tela u kontaktu. Usled dejstva sile pritiska i povišene temperature, površina kontakta se povećava, ali, u najboljem slučaju, dostiže vrednost od 85% nominalne površine kontakta [22].

Debljina filma materijala $\delta_{i-j}(t)$ koji aktivno učestvuje u kontaktu i generisanju toplote je veličina koja je teško određiva analitičkim postupcima. Ona zavisi od mnogo parametara – hemijske strukture materijala u kontaktu, visine neravnina površina u kontaktu, primenjene površinske zaštite, stanja zaprljanosti površina, kontaktnog pritiska, temperature itd. Debljina filma se najčešće određuje eksperimentalno a za praktične proračune se uzima kao 10% srednjeg aritmetičko odstupanja profila R_a (parametar hrapavosti) [22].

Specifični električni otpor je važna

termomehanička karakteristika jer najviše od nje zavisi transformacija izvora toplote od površinskog (u početnoj fazi zavarivanja) u zapreminski, kada dolazi do topljenja materijala, odnosno, kada dolazi do zavarivanja radnih komada na mestu dejstva elektroda.

Specifični električni otpor materijala je definisan hemijskim sastavom materijala (otpor je veći kod legura nego kod čistih metala), termomehaničkom obradom (na primer, kaljeni materijali se teže zavaruju), a u manjoj meri, definisan je i mikrostrukturom materijala. Specifični električni otpor materijala se određuje eksperimentalno i prikazuje se najčešće u funkciji temperature (jer od nje najviše zavisi).

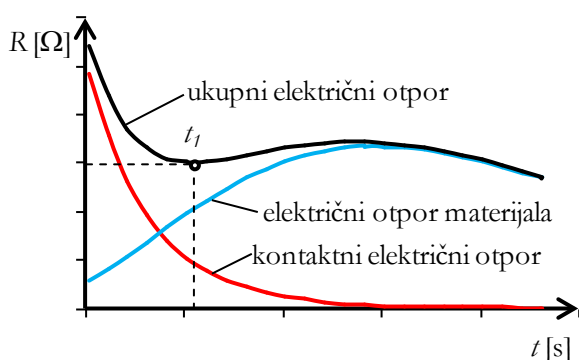
Specifični električni otpor kontakta je veličina dominantno zavisna od specifičnih električnih otpora materijala u kontaktu, ali je zavisna i od temperature, sile pritiska, površine kontakta, stanja površina, hrapavosti, relativnog kretanja površina u kontaktu i tako dalje. Precizno se određuje samo eksperimentalno ali postoje brojni matematički modeli koji daju dovoljno precizne rezultate za tehničke proračune. Jedan od modela za određivanje otpora kontakta u obzir uzima normalne napone kao dominantne veličine:

$$\rho_{i-j}(t) = 3 \cdot \frac{\sigma_m(t)}{\sigma_n(t)} \cdot \frac{\rho_i(t) + \rho_j(t)}{2} + \rho_c(t) \quad (2.9)$$

gde je: $\rho_i(t)$ – specifični električni otpor materijala radnog komada na kome je površina i , zavistan od vremena t [Ωm], $\rho_j(t)$ – specifični električni otpor materijala radnog komada na kome je površina j , zavistan od vremena t [Ωm], $\rho_c(t)$ – specifični električni otpor kontaminanta između površina i i j (ako postoji), zavistan od vremena t [Ωm], $\sigma_m(t)$ – normalni napon mekšeg materijala unutar plastično deformisanog filma materijala na kontaktu, zavistan od vremena t [N/m²], $\sigma_n(t) = F(t)/A_n(t)$ – nominalni napon na kontaktu, zavistan od vremena t [N/m²], $F(t)$ – sila pritiska na elektrodama, zavisna od vremena t [N], $A_n(t)$ – nominalna površina kontakta, zavisna od vremena t [m²].

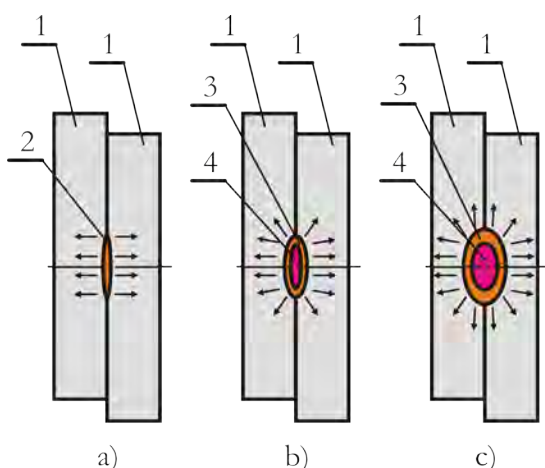
Termofizički proces nastajanja zavarene tačke

U početnom trenutku zavarivanja, kontaktni otpor je višestruko veći od otpora materijala radnih komada (približno je 30 puta veći, slika 2.6) i dolazi do brzog zagrevanja kontaktnih površina. Kako vreme prolazi, kontaktni otpor brzo opada, dok otpor u materijalima, usled povišenja temperature, raste, ali znatno sporije nego što kontaktni otpor pada. Zagrevanje radnih komada je lokalnog karaktera i ograničeno je samo na kontaktne parove/površine.



Slika 2.6 Promena električnog otpora tokom trajanja ciklusa elektrotopnog zavarivanja

Na slici 2.6 prikazana je promena električnog otpora tokom jednog ciklusa zavarivanja.



Slika 2.7 Izvor generisanja toplote: a) površinski, b) prelazni oblik (delimično zapreminski), c) potpuno zapreminski, 1 – radni komadi, 2 – površinski izvor, 3 – zapreminski izvor, 4 – zavareno mesto

Ukupni otpor brzo opada do trenutka t_1 , kada je električni otpor materijala najmanje

dvostruko veći od kontaktnog električnog otpora. Do vremena t_1 , izvor generisanja toplote je dominantno površinski (na kontaktima, slika 2.7, a), a nakon trenutka t_1 , izvor toplote postaje zapreminski (na kontaktu radnih komada i po dubini radnih komada, slika 2.7, b). Od tog trenutka nadalje, električna energija se transformiše u toplotu dominantno unutar zapremine materijala. Površinski izvor generisanja toplote je oblikom i dimenzijama identičan slici kontakata dok zapreminski izvor generisanja toplote na kraju definiše/uzima oblik i dimenzije zavarene tačke koja nastaje na mestu kontakta (slika 2.7, c).

Sa početkom transformacije površinskog izvora u zapreminski, započinje formiranje jezgra zavarenog mesta (slika 2.7, c, pozicija 4). Usled povišenja temperature, otpor u materijalu raste do svoje maksimalne vrednosti. Istovremeno je kontaktni otpor pao na zanemarljivu vrednost te je ukupni električni otpor jednak električnom otporu materijala. U trenutku dostizanja maksimalne vrednosti električnog otpora materijala, „tačka” od rastopljenog materijala je potpuno formirana i nakon toga sledi faza hlađenja i formiranje zavarene tačke. Kontaktni električni otpor tada ima beznačajnu vrednost, a otpor materijala, odnosno, ukupni otpor, opada sa hlađenjem materijala.

Sila pritiska elektroda na radnim komadima je neophodna da spreči ekspanziju rastopljenog metala i razdvajanje radnih komada. Takođe, ova sila je neophodna za pravilno iskivanje rastopljenog metala u zavarenu tačku.

Temperaturno polje u osnovnom metalu

Na slici 2.5 prikazana je raspodela (maksimalne) temperature u preseku zavarene tačke duž linije radnih komada za 50% i 100% vremena (sekvence) zavarivanja. Primetni su specifični „špicevi” temperature na mestima kontakata – to su globalni i apsolutni temperaturni maksimumi koji se javljaju tokom zavarivanja. Vidljivi su i lokalni temperaturni minimumi na mestima prelaska

jezgra u osnovni metal, odnosno, na granici zone uticaja toplote.

Postupci zavarivanja električnim otporom odlikuju se brzim promenama pojedinih parametara i veličina. To je očekivana pojava s obzirom da čitav ciklus zavarivanja traje veoma kratko (red veličina $t_c=0,1$ s). Sa druge strane, merenje i praćenje takvih kratkotrajnih pojava je veoma otežano i često neprecizno.

Merenje temperature zavarenih tačaka kod elektrootpornih postupaka je složeno iz dva razloga: 1) mesto formiranja zavarene tačke dostiže temperature više od temperature topljenja metala koji se zavaruju i 2) lokacija zavarenih tačaka je nepristupačna za beskontaktnu uređaje za merenje temperature, dok je velika verovatnoća da uređaji za merenje temperature kontaktom budu uništeni prilikom merenja. Zbog toga se primenjuju postupci posrednog merenja (na bezbednoj udaljenosti, ali vrlo blizu mesta nastajanja zavarene tačke) a potom se vrši ekstrapolacija vrednosti radi dobijanja temperature (jezgra) zavarene tačke. Analitički ili numerički modeli za određivanje temperaturnog polja zavarenog spoja su, još uvek, veoma složeni, spori i oslanjaju se na rešavanje diferencijalnih jednačina koje su često analitički nerešive. Uz pomoć savremenih računara, dolazi se do rešenja koja veoma verno oslikavaju realna temperaturna polja u zoni zavarene tačke.

Temperaturno polje zavarenih limova se dobija rešavanjem difuzione jednačine (numerički ili analitički):

$$\rho_v \cdot c_p \cdot \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla \cdot (k \cdot \nabla T) = \dot{q}_v \quad (2.10)$$

gde je: ρ_v – gustina materijala [kg/m^3], c_p – specifična toplota [$\text{J}/\text{kg}/^\circ\text{C}$], k – termička provodnost [$\text{W}/\text{m}/^\circ\text{C}$], ∇ – Laplasov operator [-], $\dot{q}_v$ – zapreminski izvor toplote, zapreminski fluks [W/m^3].

Rešenje jednačine 2.10 dobija se samo uz odgovarajuće početne i granične uslove posmatranog sistema, što ponekad dodatno komplikuje postupak i proceduru rešavanja.

Klasifikacija i podela postupaka

Postupci zavarivanja električnim otporom (ili postupci elektrootpornog zavarivanja) su, prema SRPS EN ISO 4063:2021¹⁰, klasifikovani kao grupa 2 (ISO 4063 – 2), pri čemu su oznake pojedinih postupaka i zavarivanja električnim otporom:

- Postupci tačkastog elektrootpornog zavarivanja, klasifikovani kao grupa ISO 4063 – 21,
- Postupci šavnog elektrootpornog zavarivanja, klasifikovani kao grupa ISO 4063 – 22,
- Postupci bradavičastog elektrootpornog zavarivanja, klasifikovani kao grupa ISO 4063 – 23,
- Postupci elektrootpornog zavarivanja varničanjem klasifikovani kao grupa ISO 4063 – 24,
- Postupci sučeonog elektrootpornog zavarivanja, klasifikovani kao grupa ISO 4063 – 25,
- Postupci elektrootpornog zavarivanja vitkih delova, klasifikovani kao grupa ISO 4063 – 26,
- Postupci visokofrekventnog elektrootpornog zavarivanja, klasifikovani kao grupa ISO 4063 – 27,
- Ostali postupci elektrootpornog zavarivanja, klasifikovani kao grupa ISO 4063 – 29.

Termini, definicije i pojmovi, vezani za postupke tačkastog, bradavičastog i šavnog elektrootpornog zavarivanja d t i a su u standardu SRPS EN ISO 17677-1:2019: Elektrootporno zavarivanje – Rečnik – Deo 1: Tačkasto, bradavičasto i šavno zavarivanje¹¹.

2.1 Postupci tačkastog elektrootpornog zavarivanja

Postupci tačkastog elektrootpornog zavarivanja su osnova iz koje su proistekli svi ostali postupci elektrootpornog zavarivanja.

¹⁰ Identičan sa: EN ISO 4063:2020 [23].

¹¹ Identičan sa: EN ISO 17677-1:2019 CEN/TC 121 [24].

Razlog tome je njihova jednostavnost u odnosu na druge postupke. Većina postupaka iz ove grupe je u svakodnevnoj upotrebi i to najviše za spajanje čeličnih limova.

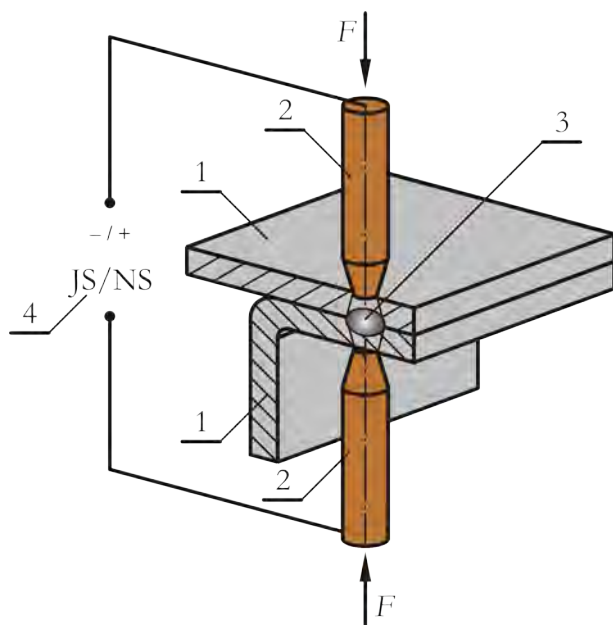
Prema SRPS EN ISO 4063:2021, postupci tačkastog elektrootpornog zavarivanja definisani su kao grupa ISO 4063 – 21, a dalje su postupci klasifikovani kao:

- Postupak indirektnog tačkastog elektrootpornog zavarivanja, klasifikovan kao ISO 4063 – 211,
- Postupak direktnog tačkastog elektrootpornog zavarivanja, klasifikovan kao ISO 4063 – 212.

Oprema za postupke tačkastog zavarivanja električnim otporom je najjednostavnija i najjeftinija u odnosu na sve ostale postupke elektrootpornog zavarivanja.

2.1.1 Postupak direktnog tačkastog elektrootpornog zavarivanja

Ovo je najstariji od svih postupaka elektrootpornog zavarivanja i standardizovan pod brojem ISO 4063 – 212. Istovremeno, ovo je i najjednostavniji postupak zavarivanja električnim otporom.



Slika 2.8 Šematski prikaz postupka direktnog tačkastog elektrootpornog zavarivanja: 1 – radni komadi, 2 – elektrode, 3 – zavarena tačka, 4 – izvor električne struje [25]

Radni komadi (limovi, slika 2.8, pozicija 1) se postavljaju jedan na drugi, pozicioniraju i fiksiraju, tako da ostanu priljubljeni jedan uz drugi. Postoji izvođenje gde limovi nisu priljubljeni jedan uz drugi već se naknadno, tokom izvođenja zavarivanja, priljubljuju. Spajanje limova najčešće se vrši vretenastim elektrodama (slika 2.8, pozicija 2) koje se (saosno) postavljaju uz limove. Po definisanoj proceduri (specifikaciji, tehnologiji) zavarivanja, elektrode se približavaju ili udaljavaju od elektroda, i pritiskaju limove (promenljivom ili konstantnom silom F) dok kroz njih protiče električna struja. Na mestu preseka ose elektroda i linije spajanja limova, a usled zagrevanja materijala pri protoku električne struje, formira se zavarena zapremina materijala limova (slika 2.8, pozicija 3) koja se žargonski naziva „tačkom“ iako ta zapremina ima svoje konačne dimenzije i oblik u prostoru.

Po završetku ciklusa zavarivanja, elektrode oslobađaju radne komade pritiska, odvajaju se od njih i premeštaju na novu poziciju gde vrše zavarivanje nove tačke.

Elektrode su povezane sa izvorom naizmenične ili jednosmerne struje (slika 2.8, pozicija 4) preko odgovarajućeg nosača elektroda.

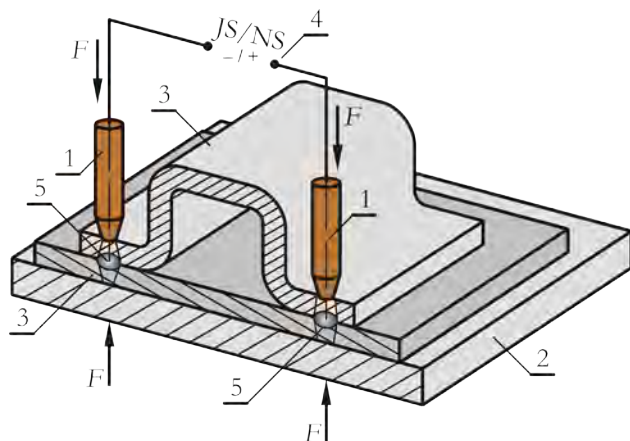
Kako je već napomenuto, postupak se naziva direktnim zbog činjenice da se sila pritiska bez posrednika, direktno preko elektroda, prenosi na radne komade.

2.1.2 Postupak indirektnog tačkastog elektrootpornog zavarivanja

Kod indirektnog tačkastog elektrootpornog zavarivanja (ISO 4063 – 211) se, kao i kod direktnog, koriste dve vretenaste elektrode koje pritiskaju radne komade (slika 2.9). Međutim, u ovom slučaju se koristi podložna ploča (slika 2.9, pozicija 2) na koju se postavljaju radni komadi koji se zavaruju (slika 2.9, pozicija 3). Podložna ploča je izrađena od bakra ili nekog drugog materijala koji dobro provodi električnu struju.

Elektrode (slika 2.9 pozicija 1) pritiskaju radne komade ka podložnoj ploči i

obe su povezane na izvor struje (slika 2.9, pozicija 4). I u ovom slučaju se strujno kolo zatvara najkraćim pogodnim putem kroz radne komade. Međutim, putanja protoka električne struje je duža nego kod direktnog tačkastog elektrootpornog zavarivanja pa je i rasipanje struje veće (efikasnost postupka je niža). Ukoliko su parametri zavarivanja dobri, u preseku osa elektroda sa linijom spajanja radnih komada formiraju se dve zavarene tačke (slika 2.9, pozicija 5) u jednom ciklusu zavarivanja (za razliku kod direktnog postupka, gde se formira samo jedna tačka).



Slika 2.9 Šematski prikaz postupka indirektnog tačkastog elektrootpornog zavarivanja: 1 – elektrode, 2 – podložna ploča, 3 – radni komadi, 4 – izvor električne struje, 5 – zavarena tačka [25]

Po završetku ciklusa, elektrode oslobađaju radne komade pritiska, odvajaju se od njih i premeštaju na novu poziciju. Nakon toga se procedura formiranja novog para zavarenih tačaka ponavlja.

Postupak se naziva indirektnim zbog indirektnog dejstva sile pritiska F na radne komade – sila se prenosi na radne komade preko elektroda i podložne ploče.

2.2 Postupci šavnog elektrootpornog zavarivanja

Jedna od karakteristika svih postupaka elektrootpornog zavarivanja je da se, kao proizvod sprovođenja procedure zavarivanja, dobija diskretna zavarena tačka. Međutim, ukoliko se zavarene tačke stvaraju dovoljno blizu jedna drugoj, dobija se niz zavarenih

tačaka koji predstavlja neki vid, manje ili više, kontinualnog šava. Ukoliko se obezbedi da se tačke delimično ili potpuno preklapaju, dobijeni šav može da bude nepropustan i onda je to zaista kontinualan šav.

Elektrode koje se koriste za šavno elektrootporno zavarivanje su cilindrični diskovi (točkovi) od bakra i oni su, za razliku od elektroda za tačkasto zavarivanje, uvek u kontaktu sa radnim komadima – diskovi se kotrljaju po radnim komadima, odnosno, nema prekida kontakta.

Podela i klasifikacija šavnih postupaka elektrootpornog zavarivanja izvršena je prema pojedinim specifičnostima samih postupaka, ali su svi šavni postupci međusobno slični. Prema SRPS EN ISO 4063:2021, šavni postupci elektrootpornog zavarivanja klasifikovani su kao grupa ISO 4063 – 22, a dalje su definisani kao:

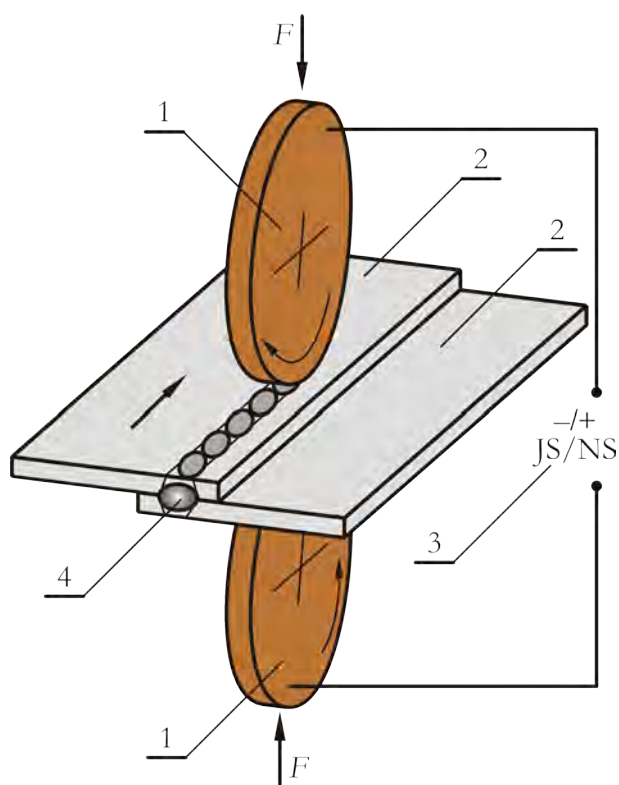
- Postupak preklonog šavnog elektrootpornog zavarivanja, klasifikovan kao ISO 4063 – 221,
- Postupak preklonog šavnog elektrootpornog zavarivanja sa deformisanjem, klasifikovan kao ISO 4063 – 222,
- Postupak preklonog šavnog elektrootpornog zavarivanja sa pripremljenom ivicom, klasifikovan kao ISO 4063 – 223,
- Postupak šavnog elektrootpornog zavarivanja uz dodatak žice za zavarivanje, klasifikovan kao ISO 4063 – 224,
- Postupak sučeonog šavnog elektrootpornog zavarivanja uz dodatak folije za zavarivanje, klasifikovan kao ISO 4063 – 225,
- Postupak šavnog elektrootpornog zavarivanja uz dodatak trake za zavarivanje, klasifikovan kao ISO 4063 – 226.

2.2.1 Postupak preklonog šavnog elektrootpornog zavarivanja

Postupak preklonog šavnog elektrootpornog zavarivanja (ISO 4063 – 221) primenjuje se samo za zavarivanje preklapljenih tankih limova (slika 2.10). Zavarivanje se vrši neprofilisanim ili

profilisanim diskovima (slika 2.10, pozicija 1). Kako bi se izvelo kvalitetno zavarivanje, neophodno je da dužina preklopljenog dela limova bude veća od širine elektroda.

Kod ovog postupka zavarivanja, kontinualni šav se dobija formiranjem delimično preklopljenih zavarenih tačaka, sukcesivno, formiranjem jedne za drugom. Takav koncept zahteva usaglašavanje izvora struje za zavarivanje (slika 2.10, pozicija 3) i mehanizma za obezbeđivanje sile pritiska F sa sekvencom formiranja svake pojedine tačke.

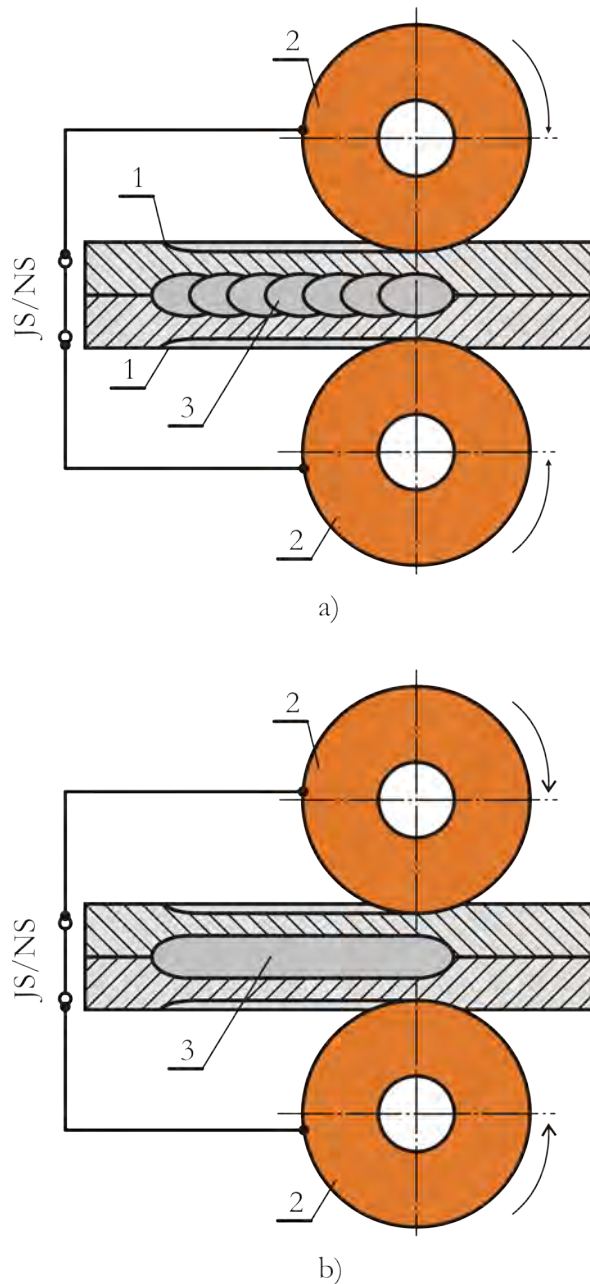


Slika 2.10 Šematski prikaz postupka preklopnog šavnog elektrootpornog zavarivanja: 1 – elektrode, 2 – radni komadi, 3 – izvor električne struje, 4 – zavarena tačka [25]

Elektrode se pozicioniraju u početni položaj, pritiskaju radne komade (slika 2.10, pozicija 2) i započinje se složena, ali kratkotrajna sekvenca zavarivanja jedne tačke (slika 2.10, pozicija 4). Nakon toga se elektrode zaokreću (preko limova) i pozicioniraju se na mesto gde treba da se zavari nova tačka. Nakon toga se ponavlja sekvenca zavarivanja, i tako sve do kraja zavarivanja planirane dužine spoja.

Ovo je, sa aspekta upravljanja procesom, jednostavnija varijanta zavarivanja

(tzv. prekidno, odnosno, sekvencijalno elektrootporno zavarivanje). U drugoj varijanti se elektrode ne zaustavljaju radi zavarivanja već se one kontinuirano, lagano, okreću i kreću duž linije spajanja (tzv. kontinualno zavarivanje). U ovoj varijanti zavarivanja je upravljanje sekvencom zavarivanja znatno složenije – da bi se formirala „zdrava“ zavarena tačka, neophodno je praćenje i, po potrebi, korigovanje parametara zavarivanja tokom samog trajanja sekvence.



Slika 2.11 Šematski prikaz postupka preklopnog šavnog elektrootpornog zavarivanja sa deformisanjem: a) sekvencijalni šav, b) kontinualni šav; 1 – radni komadi, 2 – elektrode, 3 – zavareni šav

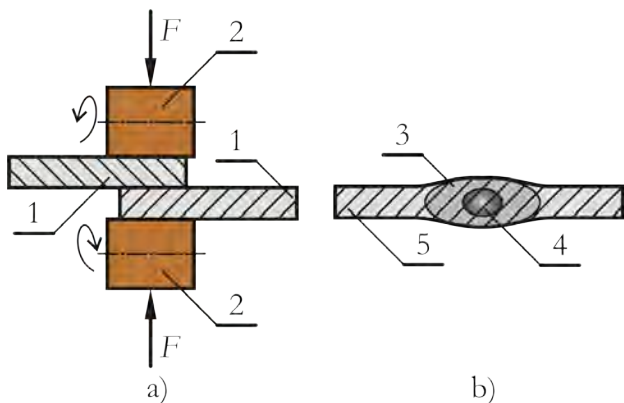
Ovako ostvareni šav je kvalitetniji, uniforman je i zaista je kontinualan (slika 2.11, b) – dok je kod sekvencijalnog zavarivanja šav gotovo kontinualan, ali sa jasno vidljivom granicom razdvajanja zavarenih tačaka (slika 2.11, a).

Obe varijante se primenjuju u praksi, ali je cena opreme za kontinualno zavarivanje znatno složenija i skuplja nego oprema za sekvencijalno zavarivanje.

2.2.2 Postupak preklapnog šavnog elektrotopnog zavarivanja sa deformisanjem

Postupak preklapnog šavnog elektrotopnog zavarivanja sa deformisanjem (ISO 4063 – 222, slika 2.12) je varijacija postupka ISO 4063 – 221 u odnosu na koju se razlikuje po dva osnova:

- dužina preklopa limova mora da bude manja nego što je širina elektroda i
- sila pritiska na elektrodama F mora da bude dovoljno velika (znatno veća nego kod ISO 4063 – 221) kako bi izvršila plastično deformisanje radnih komada.



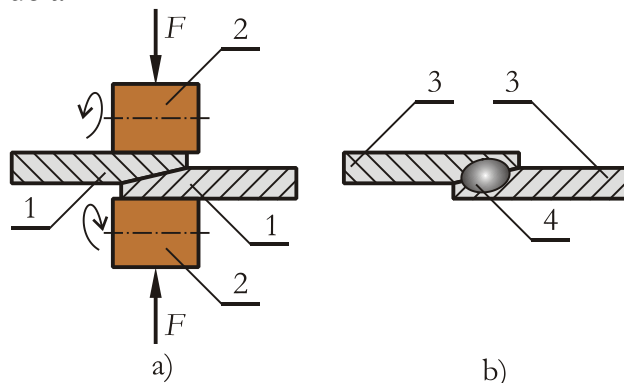
Slika 2.12 Šematski prikaz postupka preklapnog šavnog elektrotopnog zavarivanja sa deformisanjem: a) zavarivanje, b) završeni delovi; 1 – radni komadi, 2 – elektrode, 3 – zona deformisanog materijala, 4 – zavarena tačka, 5 – zavareni deo

Parametri zavarivanja, sekvenca zavarivanja, dužina preklopa i sila pritiska na elektrodama moraju da budu usaglašene kako bi se uspešno izvelo zavarivanje tačke i iskivanje radnih komada. Nakon zavarivanja, radni komadi leže u istoj ravni (preklap više ne postoji, slika 2.12, b). Zona deformisanog

materijala (zona iskivanja, slika 2.12, pozicija 3) je višestruko veća od zapremine koju obuhvata zavarena tačka. Elektrode za zavarivanje su, najčešće, blago profilisane, kako bi što bolje oblikovale (otkovale) šav tokom trajanja sekvence zavarivanja.

2.2.3 Postupak preklapnog šavnog elektrotopnog zavarivanja sa pripremljenom ivicom

Postupak preklapnog šavnog elektrotopnog zavarivanja sa pripremljenom ivicom (ISO 4063 – 223, slika 2.13) je, takođe, varijacija postupka ISO 4063 – 221. Ovaj postupak zahteva da je, kao i kod postupka ISO 4063 – 222, dužina preklopa limova manja od širine elektroda za zavarivanje, ali je sila pritiska na elektrodama F višestruko manja nego kod postupka ISO 4063 – 222 jer do značajnije deformacije radnih komada ne dolazi.



Slika 2.13 Šematski prikaz preklapnog šavnog elektrotopnog zavarivanja sa pripremljenom ivicom: 1 – radni komadi, 2 – elektrode, 3 – završeni delovi, 4 – zavarena tačka

Deformacija radnih komada je prisutna u zoni zavarivanja (zoni nastajanja zavarene tačke, slika 2.13, pozicija 4).

Razlike postupka ISO 4063 – 223 u odnosu na postupak ISO 4063 – 221 su neznatne, ali ipak postoje:

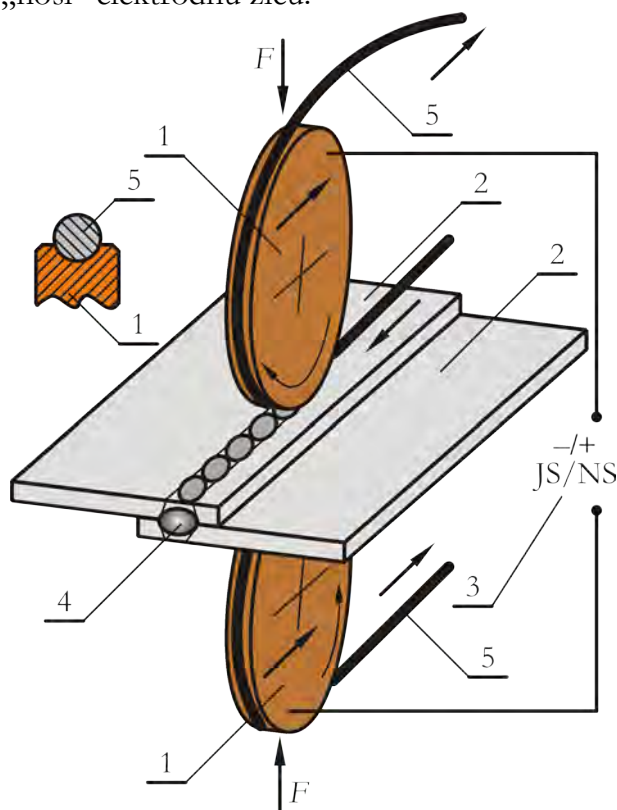
- realna linija kontakta radnih komada kod ISO 4063 – 223 je veća od širine elektroda ali je znatno manja nego što je kod ISO 4063 – 221 – istovremeno je i dužina preklopa limova manja,
- nakon zavarivanja postupkom ISO 4063 – 223, radni komadi skoro da u

potpunosti naležu jedan na drugi i visina preklopa radnih komada (nadvišenje) je minimalna, ali preklap ipak postoji.

Postupak se primenjuje za zavarivanje limova od ugljeničnih čelika. Zavarivanje raznorodnih materijala se, još uvek, izbegava.

2.2.4 Postupak preklonog šavnog elektrootpornog zavarivanja uz dodatak žice

Postupak preklonog šavnog elektrootpornog zavarivanja uz dodatak žice (ISO 4063 – 224, slika 2.14) je najbliži postupku ISO 4063 – 221. Jedine razlike kod postupka ISO 4063 – 224 su primena potrošne elektrodne žice za zavarivanje i primena elektroda sa izrađenim žlebom, koji „nosi” elektrodnu žicu.



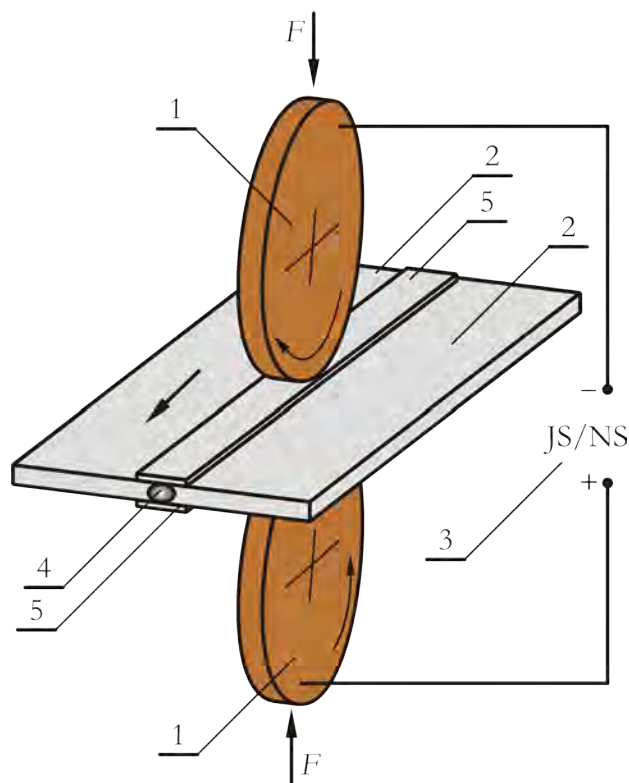
Slika 2.14 Šematski prikaz postupka preklonog šavnog elektrootpornog zavarivanja uz dodatak žice:
1 – elektrode, 2 – radni komadi, 3 – izvor struje,
4 – zavarjena tačka, 5 – žica za zavarivanje

Potrošna metalna žica je obmotana oko elektroda i nalazi se u žlebu, slično kao što kaiš naleže u kaišniku. Žleb u elektrodama oblikom odgovara žici za zavarivanje ali je plitak – elektrodna žica viri najmanje 50%

izvan žleba (slika 2.14, pozicija 5). Zbog ovakve konstrukcije, inicijalni kontakt elektroda i radnih komada se ostvaruje posredno preko žice. Ukoliko se primeni dovoljno velika pritisna sila F , kontakt se prenosi i na slobodno lice elektroda. Međutim, takvo izvođenje se izbegava.

Elektrodna žica je potrošni/pomoćni materijal – nakon zavarivanja, deo žice koji je izvršio zavarivanje izlazi iz zone zavarivanja. Ona ne učestvuje u stvaranju metala šava svojom zapreminom te nije dodatni materijal.

Postupak se primenjuje za zavarivanje materijala koji imaju specijalne prevlake, koje zahtevaju povišeni nivo čistoće i ne trpe nalepljivanje materijala, što je vrlo česta pojava kod zagrejanih bakarnih elektroda.



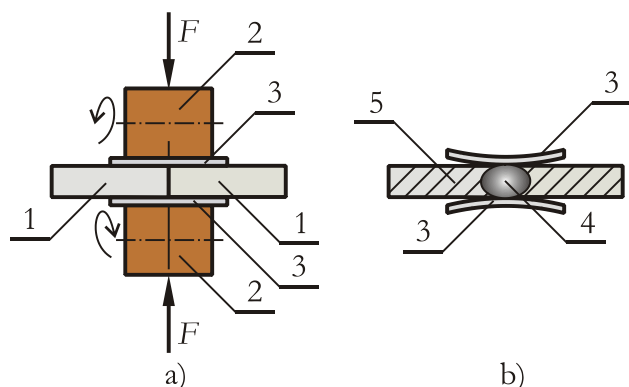
Slika 2.15 Šematski prikaz postupka sučeonog šavnog elektrootpornog zavarivanja uz dodatak folije za zavarivanje:
1 – elektrode, 2 – radni komadi,
3 – izvor struje, 4 – zavarjena tačka, 5 – folija

2.2.5 Postupak sučeonog šavnog elektrootpornog zavarivanja uz dodatak folije za zavarivanje

Za razliku od prethodno opisanih postupaka šavnog elektrootpornog zavarivanja, postupak sučeonog šavnog

elektrootpornog zavarivanja uz dodatak folije za zavarivanje (ISO 4063 – 225, slika 2.15) ne zahteva preklapanje radnih komada.

Limovi se postavljaju jedan uz drugi (sučeljavaju se) a duž njihove linije spajanja postavlja se metalna folija za zavarivanje (slika 2.16, a, pozicija 3). Elektrode za zavarivanje (slika 2.16, a, pozicija 2) se postavljaju tako da prilikom zavarivanja pritiskaju folije a samim tim, posredno pritiskaju i radne komade (slika 2.16, a, pozicija 1). Funkcija folije je trojaka: ona imitira „preklop” koji je neophodan za formiranje zavarenog mesta, sprečava lepljenje elektroda za radne komade (folija je šira nego elektrode tako da elektrode uvek „gaze” po foliji) i obezbeđuje čistoću zavarenog spoja. Zavarena tačka, odnosno, zavareno mesto (slika 2.16, b, pozicija 4), formira se između folija i radnih komada, samo delimično (ili nimalo) stapajući folije u metal šava. Nakon zavarivanja, ostatak folije se uklanja.



Slika 2.16 Šematski prikaz postupka sučeonog šavnog elektrootpornog zavarivanja uz dodatak folije za zavarivanje: a) tokom zavarivanja, b) po završetku zavarivanja, 1 – radni komadi, 2 – elektrode, 3 – folija, 4 – zavarena tačka, 5 – zavareni delovi

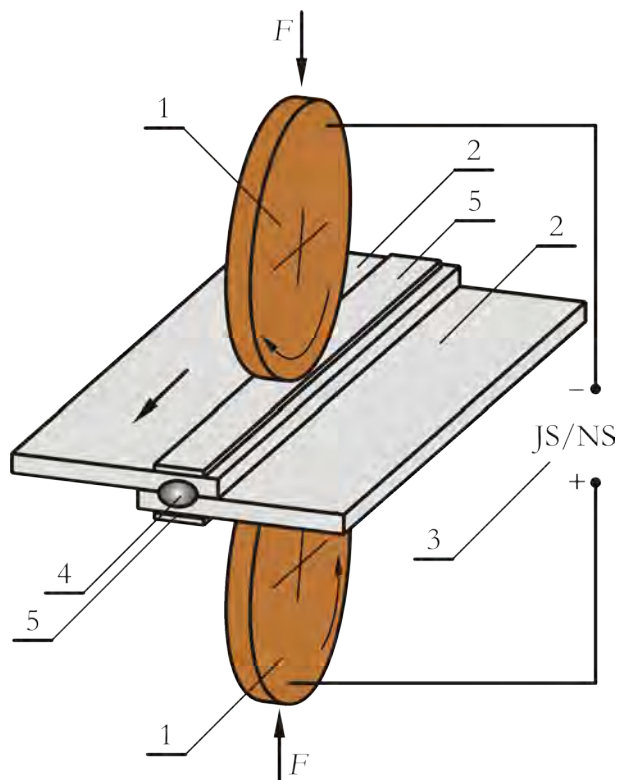
I ovaj postupak spada u „higijenske” postupke šavnog elektrootpornog zavarivanja jer se primenjuje za zavarivanje plakiranih čelika i ostalih legura koje na svojoj površini imaju osetljive prevlake.

2.2.6 Postupak preklapnog šavnog elektrootpornog zavarivanja uz dodatak trake za zavarivanje

Postupak preklapnog šavnog elektrootpornog zavarivanja uz dodatak trake

za zavarivanje (ISO 4063 – 226, slika 2.17) je, takođe „higijenski” postupak elektrootpornog zavarivanja koji je, prema parametrima zavarivanja, identičan postupku 221.

Za razliku od folije kod postupka ISO 4063 – 225, traka koja se dodaje prilikom zavarivanja postupkom ISO 4063 – 226 je dodatni materijal koji se delimično ili (retko) u potpunosti topi. Svakako, i delimično rastopljen, materijal trake aktivno učestvuje u stvaranju metala šava.

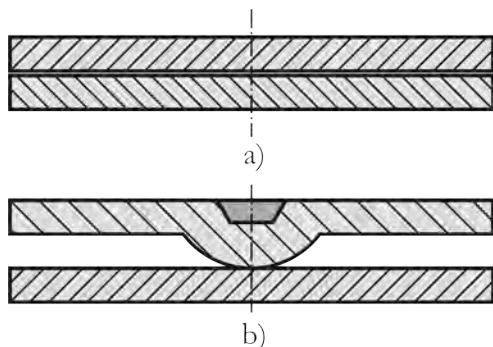


Slika 2.17 Šematski prikaz postupka šavnog elektrootpornog zavarivanja uz dodatak trake za zavarivanje: 1 – elektrode, 2 – radni komadi, 3 – izvor struje, 4 – zavarena tačka, 5 – traka za zavarivanje

Traka za zavarivanje (slika 2.17, pozicija 5) je iste ili neznatno manje širine nego širina elektroda tako da elektroda uvek naleže na traku u celosti. To je osnovni preduslov stapanja trake sa radnim komadima. Debljina trake se uzima maksimalno 50% od minimalne debljine radnih komada koji se zavaruju. Vrlo često se materijal trake za zavarivanje bira tako da je kvalitetniji nego materijal radnih komada. Takvim izborom se svesno popravljja kvalitet zavarenog šava uz minimalna ulaganja.

2.3 Postupci bradavičastog elektrootpornog zavarivanja

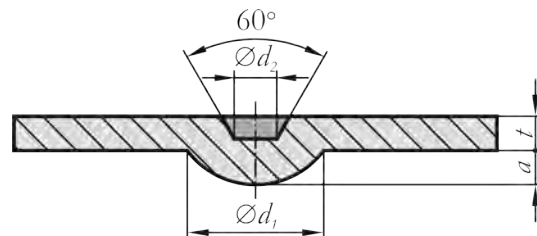
Postupci bradavičastog elektrootpornog zavarivanja se suštinski ne razlikuju od postupaka tačkastog elektrootpornog zavarivanja (grupa ISO 4063 – 21): kombinovanim pritisko-električnim dejstvom elektroda na radne komade, tokom kratkog vremenskog ciklusa, formira se zavarena tačka. Razlika bradavičastih postupaka elektrootpornog zavarivanja u odnosu na ostale elektrootporne postupke je u aktivnoj površini kontakta limova tokom zavarivanja – kod limova bez bradavica (slika 2.18, a), površina kontakta limova na početku zavarivanja je velika, što zahteva primenu struje velike jačina nego kod limova sa bradavicama (slika 2.18, b). Bradavičastim postupcima zavarivanja je moguće zavarivati deblje materijale u odnosu na šavne i tačkaste postupke zavarivanja.



Slika 2.18 Kontaktne površine limova: a) bez bradavica, b) sa bradavicama

Limovi koji se zavaruju se pripremaju pre zavarivanja – na limovima (ili makar samo na jednom limu) se pre zavarivanja izrađuju izbočine (bradavice) na koje se naslanja drugi lim. Tako se kontakt limova definiše na ograničenu površinu (manju nego kod postupaka ISO 4063 – 21), te se lakše ostvaruje potrebna gustina struje za zavarivanje. Ukoliko je broj bradavica veći (pri čemu je mesto svake bradavice mesto nastajanja zavarene tačke), uz primenu veće sile pritiska, moguće je u jednom ciklusu zavarivanja, ostvariti više zavarenih tačaka. Normalno, u tom slučaju je potrebna struja zavarivanja veća pa je neophodan izvor struje

veće snage. Ali, jedna od najvećih prednosti bradavičastih postupaka zavarivanja je smanjeni gubitak struje (tzv. šant-efekat) te se angažovanje snažnijeg izvora struje kompenzuje manjim utroškom električne struje pri zavarivanju. Oblik i dimenzije bradavica (slika 2.19) su definisani standardom SRPS EN 28167:2017: Bradavice za elektrootporno zavarivanje¹².



Slika 2.19 Standardni oblik i dimenzije bradavica

Veličina bradavica je standardom [26] definisana kao tip A – male, predviđene za kompaktne spojeve, tip B – normalne, predviđene za najveći broj primena i tip C – velike, predviđene za visoko opterećene spojeve, najčešće kod čelika visoke čvrstoće. Dimenzije bradavica su zavisne od debljine lima koji se zavaruje – veličina t (slika 2.19).

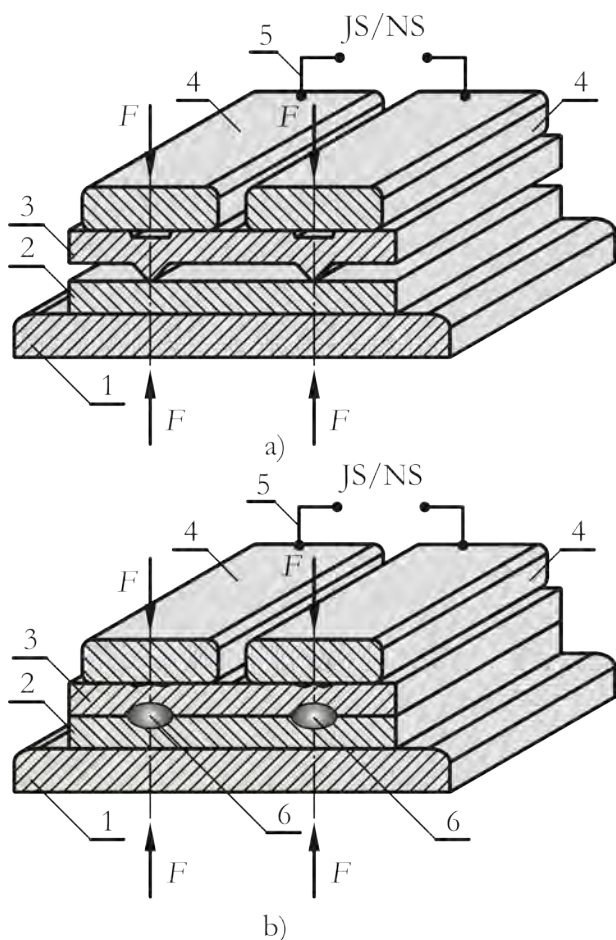
Podela i klasifikacija bradavičastih postupaka elektrootpornog zavarivanja izvršena je prema dejstvu sile pritiska tokom zavarivanja. Prema ISO 4063, bradavičasti postupci elektrootpornog zavarivanja definisani su kao grupa ISO 4063 – 23, a dalje su klasifikovani kao:

- ISO 4063 – 231 – postupak indirektnog bradavičastog elektrootpornog zavarivanja i
- ISO 4063 – 232 – postupak direktnog bradavičastog elektrootpornog zavarivanja.

2.3.1 Postupak indirektnog bradavičastog elektrootpornog zavarivanja

Saglasno postupku tačkastog indirektnog elektrootpornog zavarivanja ISO 4063 – 211, postupak indirektnog bradavičastog elektrootpornog zavarivanja ISO 4063 – 231 (slika 2.20) vrši tačkasto zavarivanje radnih komada na mestima gde se nalaze bradavice.

¹² Identičan sa: EN 28167:1992 CEN/TC 121 [26].



Slika 2.20 Šematski prikaz postupka indirektnog bradavičastog elektrootpornog zavarivanja: a) tokom zavarivanja, b) po završetku zavarivanja, 1 – podložna ploča, 2 – lim bez bradavica, 3 – lim sa bradavicama, 4 – elektrode, 5 – izvor struje, 6 – zavarjena tačka

Kao kod postupka ISO 4063 – 211, i kod ovog postupka postoji podložna ploča (slika 2.20, a i b, pozicija 1), na koju su postavljeni ravni radni komad (slika 2.20, a i b, pozicija 2) i radni komad sa bradavicama (slika 2.20, a i b, pozicija 3). Elektrode kojima se vrši zavarivanje (slika 2.20, a i b, pozicija 4) su pločaste i postavljene su sa gornje strane radnog komada sa bradavicama. Svaka elektroda je povezana na jedan kraj izvora struje (slika 2.20, a i b, pozicija 5) i strujno kolo je zatvoreno na kontaktu bradavica sa drugim radnim komadom. Vrlo često je podložna ploča obložena izolatorom kako bi se sprečilo odvođenje struje kroz nju. Obe elektrode prenose silu pritiska F na radne komade a podložna ploča je oslonac koji drži radne komade u željenom položaju. Položaj

elektroda u istoj ravni i prisustvo podložne ploče su dva parametra koji postupak definišu kao indirektni.

Nakon zavarivanja, usled kombinovanog dejstva toplote i sile pritiska, bradavice se deformišu, radni komadi se priljubljuju jedan uz drugi i formiraju se zavarene tačke na mestima bradavica (slika 2.20, b, pozicija 6).

Podložna ploča mora da bude od materijala koji najslabije provodi električnu struju – slabije nego limovi koji se zavaruju i kontakti između limova. Tada je šant-efekt najmanje izražen.

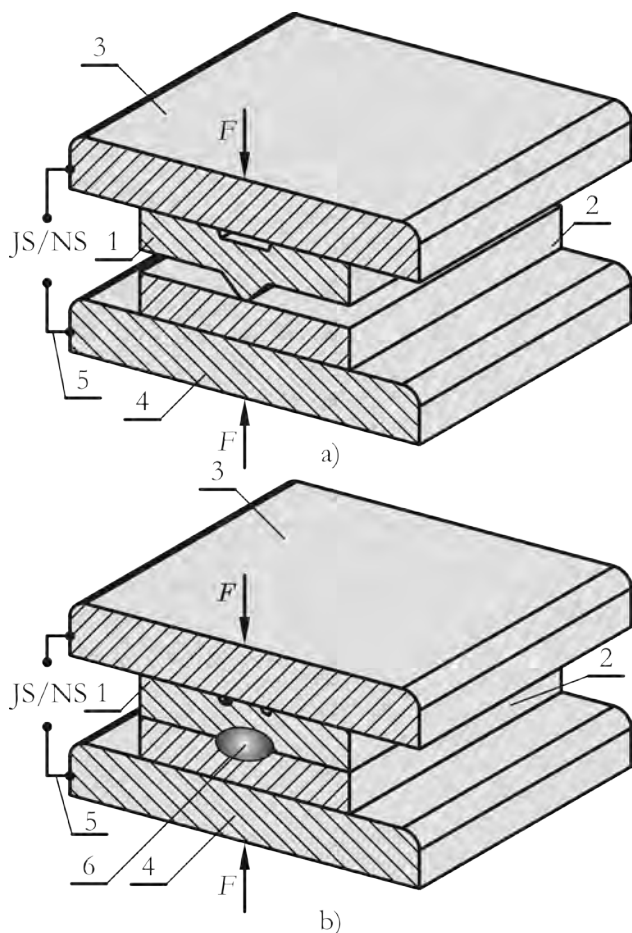
2.3.2 Postupak direktnog bradavičastog elektrootpornog zavarivanja

Kod postupka direktnog bradavičastog elektrootpornog zavarivanja (ISO 4063 – 232, slika 2.21) se isto kao i kod ISO 4063 – 231 postupka jedan lim priprema (izrađuju se bradavice) dok drugi ostaje kakav jeste. U ovom slučaju ne postoji podložna ploča već se radni komadi (slika 2.21, a i b, pozicije 1 i 2) pritiskaju, direktno, pločastim elektrodama (slika 2.21, a i b, pozicije 3 i 4).

I u ovom slučaju se elektrode povezuju pojedinačno, svaka na jedan pol izvora struje (slika 2.21, a i b, pozicija 5) a električno kolo se zatvara na mestu dodira bradavica sa ravnom stranom drugog radnog komada. Električna struja koja protiče kroz elektrode i radne komade lokalno zagreva radne komade (u zoni kontakta) i uz dejstvo sile pritiska nastaje zavarjena tačka (slika 2.21, b, pozicija 6). Sila pritiska mora da bude dovoljno velika da po završetku sekvence zavarivanja bradavice budu poravnate a radni komadi leže jedan na drugome u ravni.

2.4 Postupak zavarivanja varničanjem

Za razliku od ostalih elektrootpornih postupaka, kod postupka (elektrootpornog) zavarivanja varničanjem dolazi do burne i kratkotrajne pojave električnog luka prilikom zavarivanja.

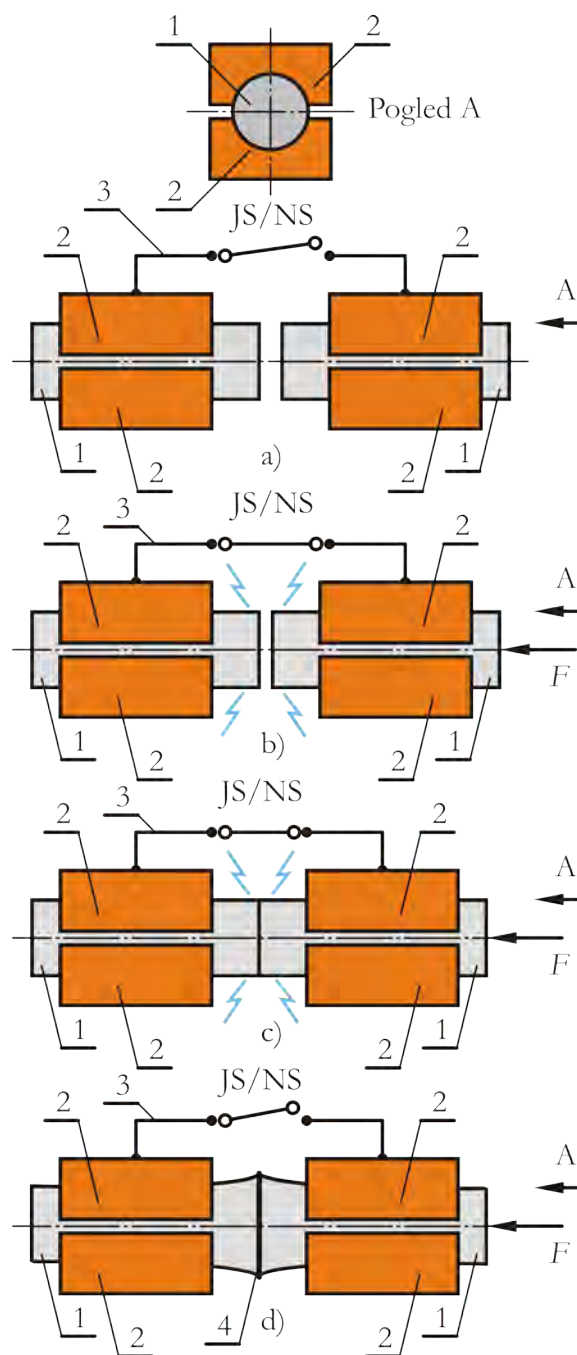


Slika 2.21 Šematski prikaz direktnog bradavičastog elektrotopnog zavarivanja: a) tokom zavarivanja, b) po završetku zavarivanja, 1 – radni komad sa bradavicama, 2 – ravni radni komad, 3 – gornja elektroda sa bradavicom, 4 – donja elektroda bez bradavice, 5 – izvor struje, 6 – zavarena tačka

Postupak se primenjuje za zavarivanje vitkih delova (šipke, profili, šine i slično) izrađenih od čelika. Krajevi delova koji se zavaruju (slika 2.22, a, pozicija 1) se postavljaju u čeljusti koje su istovremeno i elektrode od bakra (slika 2.22, a, pozicija 2). Svaki od parova elektroda se povezuje na jedan od polova izvora struje (slika 2.22, a, pozicija 3). U početnom položaju (slika 2.22, a) izvor struje je isključen a šipke koje se zavaruju su postavljene u saosni položaj. Nakon toga se izvor struje uključuje i započinje se primicanje sklopova šipki jedan ka drugom (slika 2.22, b). Izvor struje ima ugrađen starter električnog luka (visokofrekventni uređaj – VF), i kada se lica šipki približe jedna drugoj, uspostavlja se električni luk između njih. Ukoliko nema VF uređaja, onda se lica šipki priljubljuju jedna

uz drugu, a potom brzo odmiču, te se tako uspostavi električni luk.

Ovako uspostavljeni električni luk je intenzivan i nestabilan – „varniči”, a njegova osnovna namena je brzo zagrevanje lica šipki. Nakon nekog vremena, lica šipki se priljubljuju jedno na drugo (silom pritiska F), električni luk se gasi, a električna struja nesmetano teče kroz šipke (slika 2.22, c).



Slika 2.22 Šematski prikaz postupka zavarivanja varničenjem: a) početni položaj, b) primicanje, c) uspostavljanje električnog luka, d) isključivanje zavarenog spoja, 1 – radni komadi, 2 – elektrode, 3 – izvor struje, 4 – zavareni šav

Prethodno toplotno dejstvo električnog luka zagreva radne komade u zoni dejstva luka. Nakon uspostavljanja kontakta, zagrevanje delova se nastavlja samo usled električnog otpora na kontaktu i u materijalu (kao i kod svih ostalih elektrootpornih postupaka zavarivanja).

U poslednjoj fazi zavarivanja (slika 2.22, c), izvor struje prestaje sa radom a usled dejstva pritiskne sile F vrši se iskivanje zavarenog spoja između šipki (slika 2.22, d, pozicija 4).

Kako je prilikom zavarivanja prisutno znatno tečenje rastopljenog materijala ka spoljašnjem obimu šipki, prisutan je efekat samočišćenja zavarenog spoja – nečistoće sa lica šipki su istisnute na obod zavarenog šava i vrlo lako se uklanjaju naknadnom mehaničkom obradom.

Radi poboljšanja zavarivosti materijala, šipke mogu da se predgrevaju pre zavarivanja. U tom slučaju se može upotrebiti izvor struje manje snage.

Postupak zavarivanja varničanjem je klasifikovan kao posebna grupa postupaka elektrootpornog zavarivanja kao ISO 4063 – 24. Saglasno potrebi za predgrevanjem, razlikuju se dva postupka:

- ISO 4063 – 241 – postupak zavarivanja varničanjem sa predgrevanjem i
- ISO 4063 – 242 – postupak zavarivanja varničanjem bez predgrevanja.

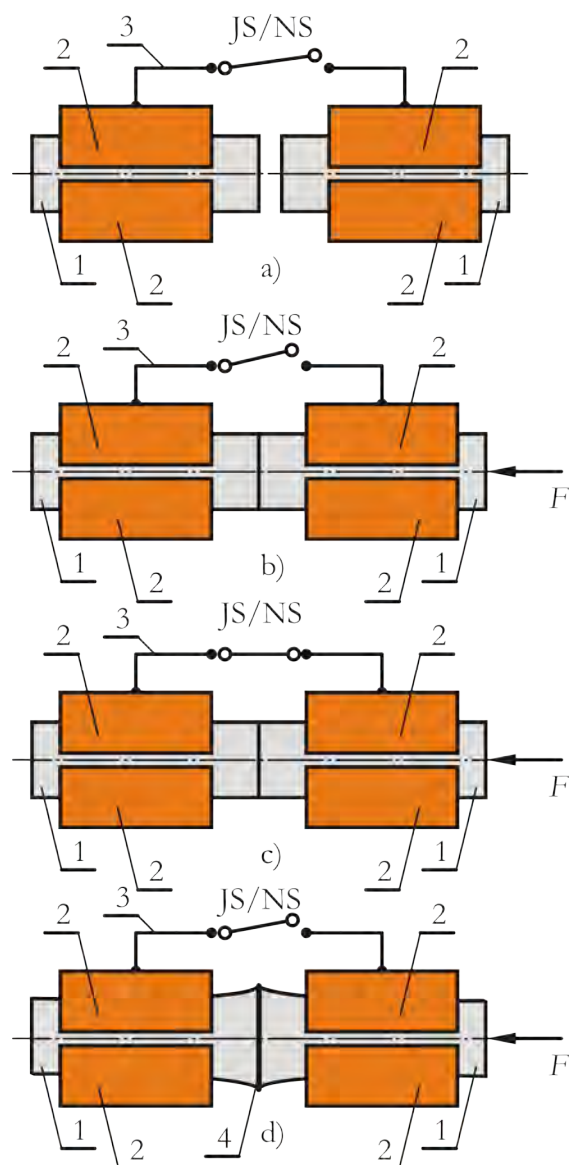
Oprema i procedura zavarivanja je kod oba postupka istovetna, osim u delu opreme koji se odnosi na predgrevanje.

2.5 Postupak sučeonog elektrootpornog zavarivanja

Postupak sučeonog elektrootpornog zavarivanja (šipki) je, po opremi i proceduri zavarivanja, veoma sličan postupcima iz grupe ISO 4063 – 24. Jedina razlika je u činjenici da nema pojave električnog luka već se zagrevanje radnih komada u potpunosti dešava na osnovu električnog otpora.

Kao i kod postupaka iz grupe ISO 4063 – 24, šipke (slika 2.23, a, pozicija 1)

se postavljaju u stezne glave – elektrode (slika 2.23, a, pozicija 2), potom se pozicioniraju a izvor struje je isključen (slika 2.23, a, pozicija 3). Nakon toga, šipke se dovode u kontakt (slika 2.23, b) preko svojih čela, pa se, nakon toga, uključuje izvor električne struje (slika 2.23, c, pozicija 3). Usled proticanja električne struje, čela šipki se zagrevaju. Sila pritiska F konstantno deluje na šipke i u završnoj fazi zavarivanja (slika 2.23, d), kada je izvor električne struje isključen, vrši završno iskivanje šava (slika 2.23, d, pozicija 4).



Slika 2.23 Šematski prikaz postupka sučeonog elektrootpornog zavarivanja: a) početni položaj, b) primicanje, c) uspostavljanje električnog kola, d) iskivanje zavarenog šava, 1 – radni komadi, 2 – elektrode, 3 – izvor struje, 4 – zavareni šav

Postupak ima izražen efekat samočišćenja kao i postupci ISO 4063 – 24, efikasan je, ali je ipak ograničenih mogućnosti. Na primer, komercijalno zavarivanje šipki od ugljeničnih čelika je izvodljivo samo do prečnika šipki $\varnothing 16$ mm i to strujama jačine 20 kA. Za zavarivanje šipki većeg prečnika neophodni su izvori struje veoma velikih snaga i jačina struje (na primer, za $\varnothing 20$ mm potrebna je struja jačine 40 kA).

Postupak sučeonog elektrootpornog zavarivanja je klasifikovan kao ISO 4063 – 25.

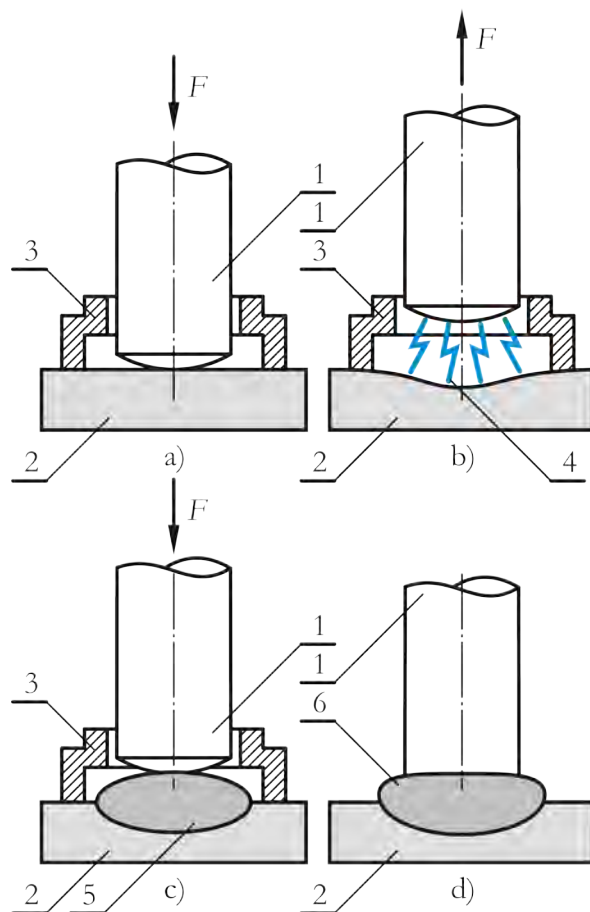
2.6 Postupak sučeonog elektrootpornog zavarivanja vitkih delova na ploču

Postupak sučeonog elektrootpornog zavarivanja vitkih delova na ploču je, po svojoj realizaciji, veoma sličan postupcima iz grupe ISO 4063 – 24, ali, postoje i određene specifičnosti. Kako se, najčešće, primenjuje za zavarivanje osnosimetričnih, vitkih delova (podupirača, nosača, klinova, osovinica, zavrtnjeva), svoju primenu ovaj postupak je našao u građevinarstvu (na primer, za izradu ankera i čvorišta veza).

Vitki radni komad (slika 2.24, pozicija 1) se licem zavaruje za ploču koja je često znatno većih dimenzija nego poprečni presek radnog komada (slika 2.24, pozicija 2). Ploča je nepokretna a kretanje tokom zavarivanja vrši samo radni komad. On se postavlja u specijalnu glavu izvora struje za zavarivanje i povezuje se na jedan pol izvora. Drugi pol izvora se povezuje za ploču za koju se zavaruje zavrtnj. Radi bolje kontrole električnog luka i tečenja rastopljenog materijala, pri zavarivanju se koristi poseban keramički oblikač (slika 2.24, pozicija 3) koji se postavlja na ploču ili je sastavni deo „pištolja” za zavarivanje i uvek stoji oko radnog komada.

Izvor struje se uključuje pre zavarivanja i nakon toga glava sa radnim komadom započinje inicijalno prilaženje vitkog dela ploči (slika 2.24, a). Radni komad svojim čelom dodirne ploču i lagano se povlači nazad.

Takvim postupkom se inicira električni luk (slika 2.24, b). Električni luk je oblikačem ograničen na jako usku zonu materijala pa je zagrevanje vitkog dela i ploče vrlo intenzivno. Posle određenog vremena vitki deo se ponovo približava ploči dok ne dođe u kontakt sa njom (slika 2.24, c). Tada se električni luk gasi, ali, struja i dalje nesmetano teče i dalje zagreva radne komade. Vitki deo u kontakt sa pločom dolazi preko rastopljenog metala. U jednom trenutku se isključuje izvor struje ali sila pritiska na vitkom delu F nastavlja da ga pritiska na ploču. Takvim dejstvom vitkog dela vrši se iskivanje šava – rastopljeni materijal popunjava prostor unutar oblikača i lagano se hladi. Po završetku zavarivanja, uklanjaju se pištolj za zavarivanje i oblikač, a delovi ostaju zavareni.



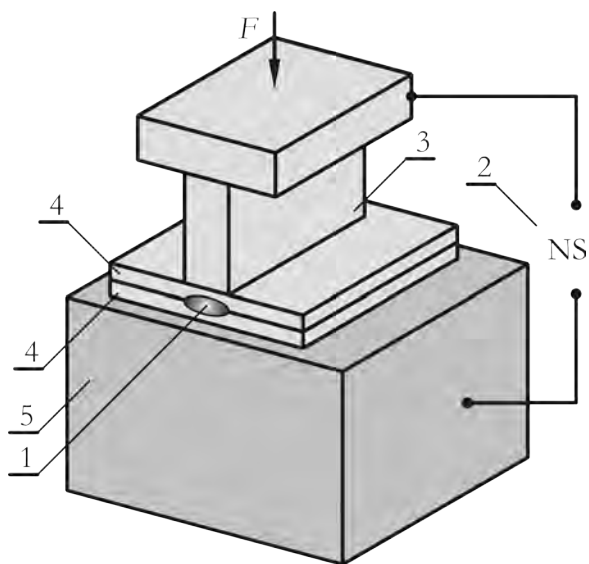
Slika 2.24 Šematski prikaz postupka sučeonog elektrootpornog zavarivanja vitkih delova na ploču: a) pozicioniranje, b) odmicanje, c) primicanje, d) kraj zavarivanja, 1 – vitki radni komad, 2 – ploča (radni komad), 3 – oblikač, 4 – električni luk, 5 – rastopljeni metal, 6 – zavareni (očvršli) šav

Postupak elektrootpornog zavarivanja vitkih delova je, suštinski, sučeonni postupak zavarivanja manjeg radnog komada na veći. Sam postupak je vrlo lako primenjiv za zavarivanje raznorodnih materijala – na primer, zavrtnaj od ugljeničnog čelika se dobro zavaruje za ploču od legiranog nerđajućeg čelika. Postupak je standardizovan i klasifikovan kao ISO 4063 – 26.

2.7 Postupak visokofrekventnog elektrootpornog zavarivanja

Postupak visokofrekventnog elektrootpornog zavarivanja je jedan od najmlađih postupaka elektrootpornog zavarivanja. On se, u odnosu na ostale elektrootporne postupke, razlikuje što koristi isključivo naizmeničnu struju visoke frekvencije (preko 20 kHz). Postupak je veoma produktivan/efikasan.

Izvor struje za zavarivanje mora da bude robustan ali sa brzim odzivom svojih elektronskih komponenti (mala inercija).



Slika 2.25 Šematski prikaz postupka visokofrekventnog elektrootpornog zavarivanja:
a) tokom zavarivanja, b) po završetku zavarivanja,
 1 – zavarena tačka, 2 – izvor struje, 3 – elektroda pritiskač, 4 – radni komadi, 5 – elektroda radni sto

Postupak se primenjuje samo za zavarivanje limova male debljine (do 10 mm). Zavarivanje se vrši primenom dve bakarne

elektrode – donja elektroda je masivna i istovremeno ona predstavlja podložnu ploču/radni sto (slika 2.25, pozicija 5). Gornja elektroda (slika 2.25, pozicija 3) je manja i ona vrši aktivno pritiskanje radnih komada, a njene dimenzije definišu veličinu zone zavarivanja. Gornja elektroda je direktno povezana sa izvorom struje (slika 2.25, pozicija 2) kako bi se smanjilo njeno zagrevanje. Zbog velike količine generisane toplote, obe elektrode se intenzivno hlade prilikom zavarivanja kako bi se sprečilo njihovo intenzivno habanje.

Radni komadi (slika 2.25, pozicija 4) se pozicioniraju između elektroda, odmah se primenjuje sila pritiska F i uključuje se izvor električne struje (slika 2.25, pozicija 2). Zbog velike angažovane snage (velika jačina struje), zavarivanje je kratkotrajno i vrlo intenzivno.

U zavisnosti od dimenzija i oblika gornje elektrode, u jednom ciklusu dobija se jedna zavarena tačka ili niz zavarenih tačaka koje predstavljaju jednu veliku zavarenu tačku. Normalno, dimenzije gornje elektrode moraju da budu usaglašene sa mogućnostima izvora električne struje.

Postupak je, prema ISO 4063, standardizovan i klasifikovan kao ISO 4063 – 27.

2.8 Pribor i oprema za zavarivanje

Uslovno posmatrano, svi postupci elektrootpornog zavarivanja zahtevaju istu opremu za zavarivanje: izvor električne struje, provodnike, elektrode, pribor i opremu za pozicioniranje, stezanje i manipulaciju radnih komada.

Svaki postupak zavarivanja električnim otporom ima svoje specifičnosti i često je neka komponenta za jedan postupak neophodna, dok je za drugi postupak neupotrebljiva (na primer, elektrode za šavne postupke zavarivanja).

Pribor i oprema za postupke zavarivanja električnim otporom su, u velikoj meri standardizovani.

2.8.1 Izvori električne struje i provodnici

Gotovo svi postupci elektrootpornog zavarivanja su znatno manje fleksibilni u odnosu na „konvencionalne” postupke zavarivanja kakvi su REL, TIG, MIG ili MAG. Zavarivanje elektrootpornim postupcima je teško izvodljivo na terenu (osim elektrootpornog zavarivanja vitkih delova, na primer) i najčešće se vrši u radionicama ili fabričkim pogonima. Osnovni razlozi male pokretljivosti i fleksibilnosti pribora i opreme za zavarivanje jesu gabariti uređaja za zavarivanje i sistema za snabdevanje energijom potrebnom za zavarivanje.

Napajanje energijom se, najčešće, vrši iz električne mreže razvedene u fabričkom pogonu. Zbog velike potrošnje električne struje u relativno kratkim periodima vremena, električna instalacija mora da bude masivna i robusna – provodnici moraju da budu velikog poprečnog preseka, po mogućstvu od punog materijala a ne od upredenih žica. Svi provodnici moraju na sebi da nose odgovarajuću višeslojnu zaštitnu oblogu koja je otporna na atmosferska, mehanička i termička opterećenja. Izolovani priključci moraju da budu keramički, sa ozbiljno izvedenim uzemljenjima i zaštitom od nenamenske upotrebe (specifični priključci u koje nije moguće uključiti druge električne uređaje, poklopci koji se zaključavaju i slično).

Izvori struje za elektrootporno zavarivanje novijeg datuma¹³ proizvodnje su kombinovanog tipa: koriste masivne transformatore, delimično pretvarače i uvek imaju invertorsku jedinicu. Rad izvora struje, kao i kontrolu izlaznih parametara struje i napona, nadgleda digitalni računar. Kombinovani tip izvora struje pretvara naizmeničnu struju mreže (u Srbiji je to 220/380 V, 50 Hz) u jednosmernu ili u naizmeničnu struju drugih karakteristika.

Elektrode su kod svih postupaka elektrootpornog zavarivanja izrađene od

legura bakra i otporne su na visoke temperature, habanje i površinski pritisak. One su različitih oblika, dimenzija, saglasno proceduri i postupku zavarivanja.

Sila pritiska je neophodna kod svih postupaka elektrootpornog zavarivanja i ona može da ima velike vrednosti (čak i 50 kN). Za ostvarenje takvih sila koriste se specijalni uređaji – pritiskači, koji mogu da budu mehanički, pneumatski ili hidraulički. Pritiskači silu prenose na radne komade preko elektroda, te su oni istovremeno i nosači elektroda.

Ukoliko je potrebno, sistemu za zavarivanje se dodaju radni stolovi sa odgovarajućim podložnim pločama, držačima, hvatačima i pozicionerima.



Slika 2.26 Tipičan uređaj za tačkasto zavarivanje električnim otporom [27]

Na slici 2.26 prikazan je tipičan sistem za direktno tačkasto elektrootporno zavarivanje tankih limova. Ovaj sistem je stacionarni – limovi moraju da se pozicioniraju između elektroda a elektrode se primiču i odmiču, pre i posle zavarivanja. Postoje i mobilni sistemi – kod njih limovi miruju a sistem za zavarivanje se pozicionira na odgovarajuće mesto kod limova (npr. mobilni robotizovani sistem).

¹³ Stariji izvori struje su gotovo svi transformatori sa ispravljačima – izvori jednosmerne struje.

2.8.2 Elektrode za elektrootporno zavarivanje

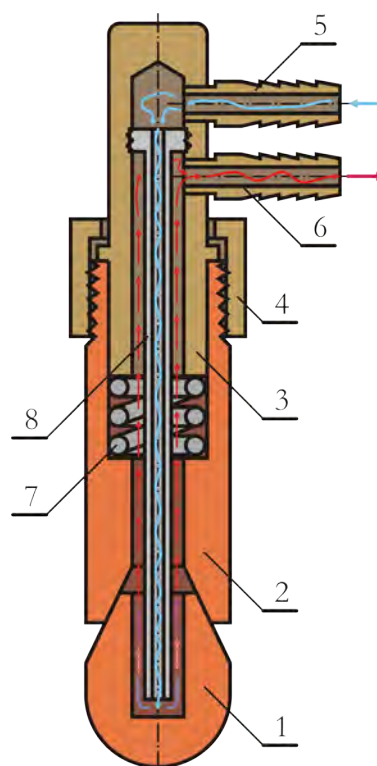
Elektrode za elektrootporno zavarivanje nisu monolitni delovi već sklopovi koji se, za većinu postupaka zavarivanja, sastoje od vrha elektrode, tela elektrode, sistema za hlađenje i dodatnih delova za stezanje i pozicioniranje. Na slici 2.27, prikazan je sklop elektrode za tačkasto zavarivanje sa aktivnim sistemom za hlađenje. Vrh elektrode (slika 2.27, pozicija 1) naleže na radne komade a zavrtnajskom vezom ili presovanim spojem povezan je sa telom elektrode (slika 2.27, pozicija 2). I vrh elektrode i telo elektrode su šuplji – kroz njih je provučena cev za dovod rashladne tečnosti (slika 2.27, pozicija 8). Rashladna tečnost se pod pritiskom, od priključka rashladne tečnosti (slika 2.27, pozicija 5), kroz cev, vodi u sam vrh elektrode. U vrhu elektrode, rashladna tečnost se zagreva, a samim tim hladi elektrodu. Zagrejana rashladna tečnost se, kroz nosač (slika 2.27, pozicija 3) pa kroz šuplinu u telu elektrode (oko spoljašnje površine cevi) vraća do odvoda (slika 2.27, pozicija 6).

Nosač (slika 2.27, pozicija 3) je centralni deo elektrode i on povezuje sve ostale delove u funkcionalnu celinu. Povezivanje se vrši navrtkom (slika 2.27, pozicija 4) a pozicioniranje i kompenzaciju udara vrši opruga (slika 2.27, pozicija 7) između nosača i tela elektrode. Nosači elektroda za tačkaste postupke zavarivanja definisani su standardima SRPS EN ISO 8430-1:2017: Elektrootporno tačkasto zavarivanje – Držači elektroda – Deo 1: Fiksiranje konusa 1:10¹⁴, SRPS EN ISO 8430-2:2017: Elektrootporno tačkasto zavarivanje – Držači elektroda – Deo 2: Fiksiranje Morzeovog konusa¹⁵, SRPS EN ISO 8430-3:2017: Elektrootporno tačkasto zavarivanje – Držači elektroda – Deo 3: Fiksiranje paralelnih držača i krajeva pod pritiskom¹⁶.

Telo elektrode se, preko odgovarajućih

steznih čeljusti, povezuje na mašinu te je neophodno da vrh elektrode i nosač elektrode budu od materijala koji dobro provode električnu struju.

Pored provodnosti, vrh elektrode mora da ima veliku otpornost na habanje, pri radu na povišenim temperaturama. Od metala koji se koriste u industriji, prvi zahtev najbolje ispunjava čist bakar. Međutim, bakar ima veoma nisku tvrdoću i nikakvu otpornost na habanje. Stoga se, zbog boljih habajućih osobina, za vrh elektrode i nosač elektrode koriste legure bakra sa boljim habajućim osobinama.



Slika 2.27 Sklop elektrode za tačkasto zavarivanje:
1 – vrh elektrode, 2 – telo elektrode, 3 – nosač,
4 – navrtka, 5 – dovod rashladne tečnosti (hladno),
6 – odvod rashladne tečnosti (toplo), 7 – opruga, 8 –
cev za dovod rashladne tečnosti

Standard SRPS EN ISO 5182:2017 Elektrootporno zavarivanje – Materijali za elektrode i pomoćnu opremu¹⁷ daje klasifikaciju i pregled materijala koji se primenjuju za izradu elektroda.

Materijali elektroda su klasifikovani u tri grupe [31]:

¹⁴ Identičan sa: ISO 8430-1:2016 ISO/TC 44/SC 6 [28].

¹⁵ Identičan sa: ISO 8430-2:2016 ISO/TC 44/SC 6 [29].

¹⁶ Identičan sa: ISO 8430-3:2016 ISO/TC 44/SC 6 [30].

¹⁷ Identičan sa: ISO 5182:2016 ISO/TC 44/SC 6 [31].

- A – bakar i njegove legure,
- B – sinterovani metali i
- C – legure bakra ojačane disperzijom.

Grupi A pripadaju četiri različita tipa materijala:

- Tip 1 predstavljaju legure koje se termički ne obrađuju, imaju visoku električnu provodnost i osrednju tvrdoću. Od njih se izrađuju otkovci koji ojačavaju tokom proizvodnje – obradom na hladno.
- Tip 2 čine legure koje se odlikuju većom tvrdoćom nego legure tipa 1. Dobre mehaničke osobine ovih legura dobijene su kombinacijom termičke obrade nakon obrade na hladno.
- Tip 3 su termoobradive legure koje imaju znatno bolje mehaničke osobine nego legure iz tipa 2, ali imaju mnogo manju električnu provodnost nego legure tipa 1 ili tipa 2.
- Tip 4 čine specijalizovane legure čije se mehaničke osobine dobijaju kombinovanjem obrade na hladno i termičke obrade. Legure ovog tipa ne odlikuje zamenjivost – moguća je pojava da se istim postupkom obrade na dva obratka, istog hemijskog sastava, dobiju potpuno različite mehaničke osobine.

Grupa B obuhvata šest tipova sinterovanih materijala.

- Tipovi 10 i 11 obuhvataju sinterovane delove od bakra i volframa,
- Tip 12 obuhvata sinterovane delove od bakra i volfram-karbida,
- Tip 13 obuhvata sinterovane i obrađene proizvode od molibdena,
- Tip 14 obuhvata sinterovane i obrađene proizvode od volframa i
- Tip 15 obuhvata sinterovane proizvode od volframa i srebra.

Grupi C pripadaju dva tipa legura:

- legure proizvedene unutrašnjom oksidacijom (oznake legura: C20/1, C20/2, C20/3) i
- legure dobijene obradom u mlinovima sa čeličnim kuglama ili dobijene mehaničkim legiranjem (oznake legura: C20/4, C20/5, C20/6).

Legure, sa osnovnim mehaničkim

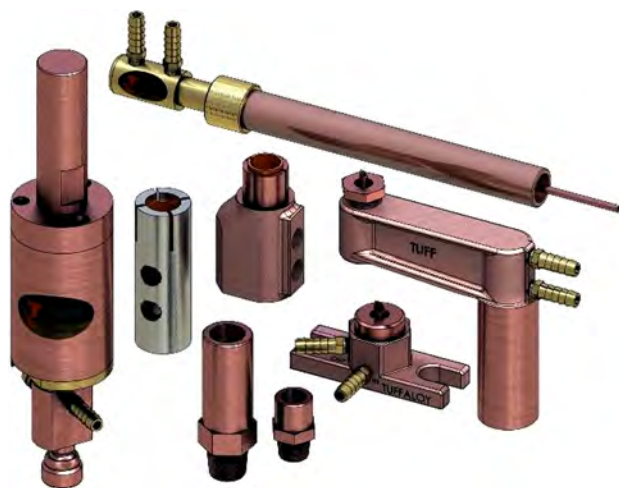
osobinama, koje odgovaraju navedenim grupama i tipovima, prikazane su u odgovarajućem standardu.

Standard ISO 5182 definiše univerzalni način obeležavanja materijala za proizvodnju elektroda. Oznaka koristi grupu, tip i redni broj. Na primer, legura ranije navedene oznake:

ISO 5182 C20/4

je legura iz grupe C, tip 20, nalazi se pod rednim brojem 4. To je legura bakra i aluminijuma CuAl_2O_3 .

Na slici 2.28 prikazani su osnovni oblici sklopova elektroda koji se danas koriste. Neki od njih su primenljivi samo za direktne postupke zavarivanja, neki su primenljivi za pokretne sisteme zavarivanja, a neki čak nemaju sisteme za hlađenje pa su predviđeni za kratkotrajne postupke – jedna do dve zavarene tačke na svakih 10 sekundi.

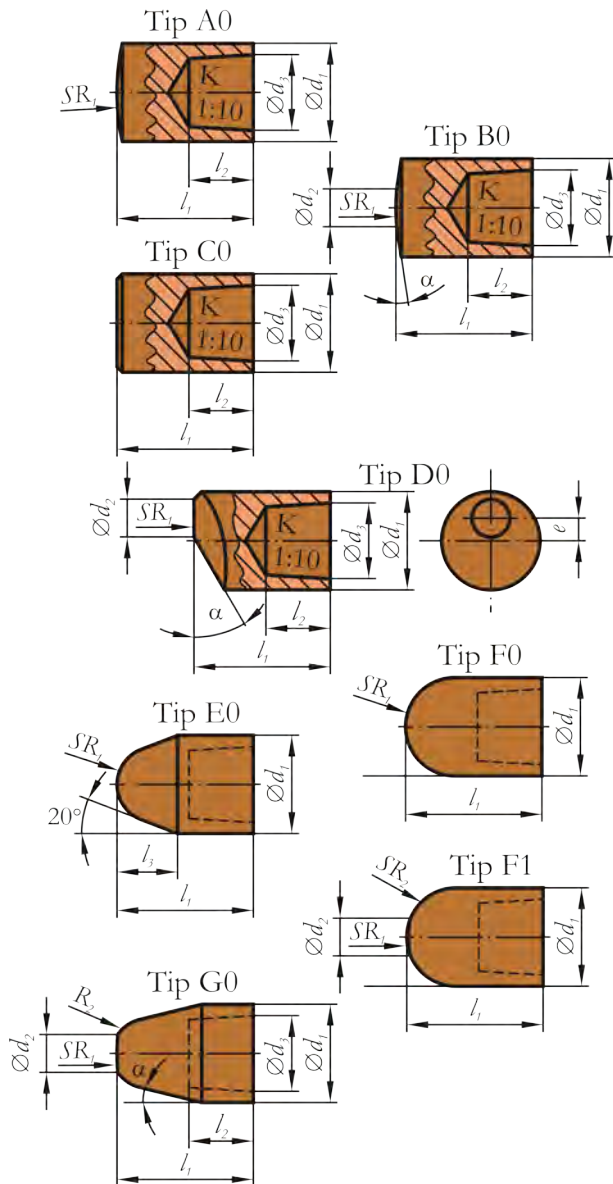


Slika 2.28 Sklop elektrode i nosača – različita izvođenja [32]

Vrhovi elektroda su delovi sklopa elektroda koji direktno utiču na formiranje zavarene tačke, njen oblik, dimenzije i kvalitet. Oblici vrhova elektroda koje se najčešće koriste za tačkasto elektrootporno zavarivanje definisani su standardom SRPS EN ISO 5821:2011: Elektrootporno zavarivanje – Vrhovi elektrode za tačkasto zavarivanje¹⁸. Standard definiše različite oblike i dimenzije vrhova elektroda (slika 2.29) – od ravnih (C0), ravno-sferičnih (A0 i B0) do složenih, sa radijusima i iskošenjima (D0 do G0).

¹⁸ Identičan sa: EN ISO 5821:2009 CEN/TC 121 [33].

Standard SRPS EN 25184:2015: Ravne elektrode za elektrootporno tačkasto zavarivanje¹⁹ daje dimenzije i tolerancije dimenzija elektroda za tačkaste postupke elektrootpornog zavarivanja. Standard je povezan sa standardom SRPS EN ISO 5821:2011. Dimenzije vrhova elektroda (slika 2.29) se takođe nalaze u standardu.



Slika 2.29 Standardni vrhovi elektroda [33]

Svi oblici vrhova elektroda, sa ledne strane imaju izrađene konusne otvore preko kojih se povezuju sa telom elektroda.

Dimenzije i oblici vrhova tela elektroda („fitinga” za povezivanje sa vrhovima elektroda), definisani su standardima SRPS EN 21089:2015: Konusne elektrode za

tačkasto zavarivanje – Mere²⁰, SRPS EN ISO 5183-1:2012: Elektrootporno zavarivanje – Adapteri elektroda, muški konusi 1:10 - Deo 1: Konično fiksiranje, konus 1:10²¹ i SRPS EN ISO 5183-2:2012: Elektrootporno tačkasto zavarivanje – Adapteri elektroda, muški konus 1:10 – Deo 2: Paralelni držač za fiksiranje krajnjeg uboda elektrode²². Dimenzije vrhova elektroda su prikazane u standardu.

Prečnik vrha elektrode d_1 [mm] se određuje računski (pa usvaja kao prva bliža standardna vrednost prema SRPS EN ISO 5821) prema minimalnoj debljini radnih komada koji se spajaju δ [mm] i iznosi:

$$d_1 = k \cdot \sqrt{\delta} \quad (2.11)$$

Koeficijent k zavisi od materijala koji se zavaruju. Na primer, za zavarivanje mekih čelika vrednost $k=5$, za zavarivanje aluminijuma ima vrednost $k=4$ itd [33].



Slika 2.30 Točkovi za šavno elektrootporno zavarivanje [39]

Cevčice za hlađenje mogu da budu krute ili fleksibilne. Izrađuju se od bronzе ili od bakra i uvek moraju da imaju ukoso zasečen vrh pod uglom od 60°. Njihovi standardizovani prečnici su 5 mm ili 6 mm a debljina zida cevi mora da bude minimalno 0.5 mm. Dužina cevčice se bira saglasno dužini tela elektrode i nosača. Cevčice su obuhvaćene standardom SRPS EN 29313:2016: Oprema za tačkasto elektrootporno zavarivanje – Rashladni vodovi²³.

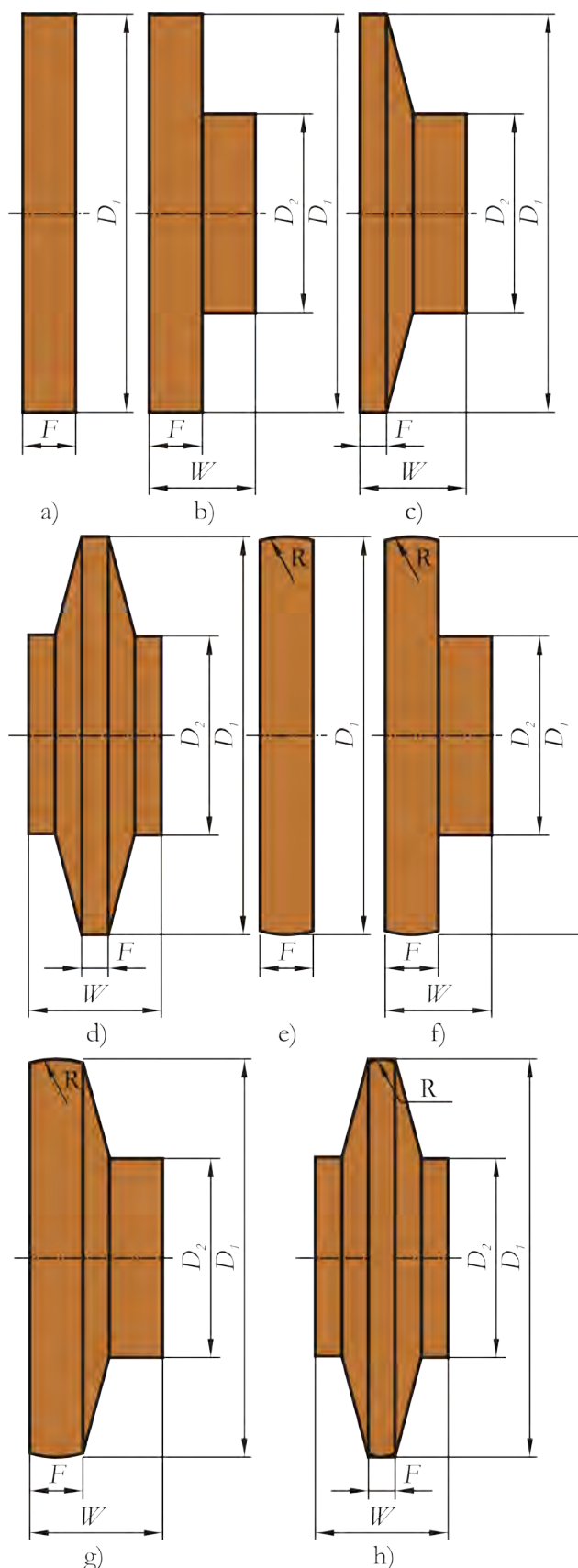
²⁰ Identičan sa: EN 21089:1991 CEN/TC 121 [35].

²¹ Identičan sa: EN ISO 5183-1:2000 CEN/TC 121 [36].

²² Identičan sa: EN ISO 5183-2:2001 CEN/TC 121 [37].

²³ Identičan sa: EN 29313:1992 CEN/TC 121 [38].

¹⁹ Identičan sa: EN 25184:1994 CEN/TC 121 [34].



Slika 2.31 Standardni oblici točkova za šavno elektrootporno zavarivanje

Elektrode za šavno elektrootporno zavarivanje se nazivaju točkovima zbog svog specifičnog cilindričnog oblika (slika 2.30).

Točkovi za šavno elektrootporno zavarivanje su masivniji od vrhova elektroda za tačkasto zavarivanje ali se proizvode od istih materijala i namenjeni su za zavarivanje istih materijala kao vrhovi za tačkasto zavarivanje.

Standardom SRPS EN 20693:2009: Mere zavarenih praznih kalemova ²⁴ (!) definisani su standardni prečnici i debljine točkova za zavarivanje (slika 2.31).

Standardni prečnici su: $d_t=100, 112, 125, 140, 160, 180, 200, 224, 250, 280$ i 315 mm. Standard ne obavezuje korisnika na primenu samo ovih prečnika i preporučuje primenu standardnih brojeva prema ISO 3 [41]. Preporučene debljine točkova su $l_t=6,3; 8; 10; 12,5; 16; 20$ i 25 mm.

Točkovi za šavno elektrootporno zavarivanje se označavaju tako da su definisane dimenzije i materijal od koga je proizveden točak:

ISO 693-112×8 – C 20/4.

Prečnik 112 mm, debljina točka 8 mm i materijal točka CuAl2O3 prema ISO 5182 C 20/4.

Ostale dimenzije točka, kao i oblik gazećeg dela točka, nisu standardizovani.

2.9 Parametri zavarivanja

Parametri zavarivanja kod svih elektrootpornih postupaka zavarivanja su brojni, međusobno zavisni i sa različitim uticajem na zavareni spoj. Opšta podela parametara ih razdvaja na unutrašnje i spoljašnje parametre zavarivanja. Unutrašnji parametri zavarivanja se odnose na materijal koji se zavaruje, stanje njegovih površina, kao i na oblik, dimenzije i materijal elektroda. Stanje i veličina kontakta između radnih

²⁴ Identičan sa: EN 20693:1991 CEN/TC 121 i ISO 693:1982 [40]. Naziv standarda je katastrofalni prevod naslova na engleskom: *Dimensions of seam welding wheel blanks*. Autor predlaže prevod: Dimenzije točkova za elektrootporno šavno zavarivanje. Autor se 10.10.2019. god. obratio Institutu za standardizaciju Srbije sa komentarom vezanim za naslov. Do trenutka štampanja udžbenika odgovor nadležnih službi nije stigao, niti je naslov standarda izmenjen.

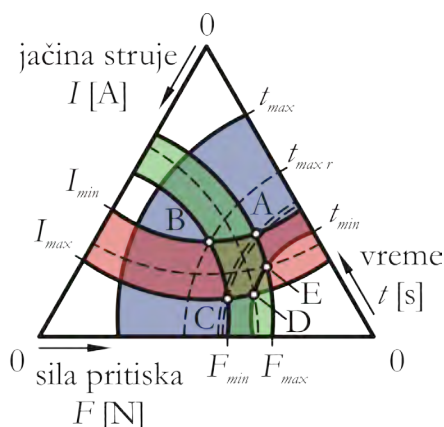
komada, međusobno, kao i između radnih komada i elektroda, može se posmatrati kao unutrašnji parametar. Međutim, spoljašnji parametri su oni koji aktiviraju nastajanje spoja i definišu njegov oblik i dimenzije. Ispravan izbor spoljašnjih parametara, iako je neki od unutrašnjih parametara pogrešan ili teško ostvariv, može da dovede do dobrog zavarenog spoja, dok je obrnuta situacija nemoguća.

Stoga se spoljašnji parametri zovu „parametrima zavarivanja” i to su:

- jačina električne struje,
- intenzitet sile pritiska i
- vreme (sekvenca, trajanje) zavarivanja.

Sva tri parametra su međusobno zavisna, a jačina i sila pritiska mogu da budu promenljivi tokom vremena (a neretko su konstantni).

Parametri zavarivanja u realnosti imaju svoje minimalne i maksimalne vrednosti koje daju upotrebljive zavarene spojeve. Na primer, prilikom zavarivanja (svih materijala), postoji granica jačine struje ispod koje je nemoguće zavarivanje, koliko god bila velika sila pritiska i koliko god dugo da traje ciklus zavarivanja.



Slika 2.32 Parametri zavarivanja i njihova zavisnost

Zatim, postoji i maksimalno vreme trajanja zavarivanja – to je maksimalno vreme tokom koga izvor struje može da bude uključen i pod zadatim strujno-naponskim opterećenjem. Takođe, postoji maksimalna sila pritiska koju uređaj za zavarivanje može da isporuči radnim komadima.

Prema tome, zavarivanje je izvodljivo

ukoliko se parametri zavarivanja izaberu tako da svaki od njih tokom zavarivanja ima vrednost u okviru ostvarivog opsega. Na slici 2.32, dat je grafički prikaz parametara zavarivanja, sa minimalnim i maksimalnim vrednostima svakog parametra. Optimalni parametri predstavljaju presek ostvarivih vrednosti parametara i u ovom slučaju, to je površina oivičena tačkama ABCDE²⁵.

U zavisnosti od izabrane jačine struje zavarivanja i vremena trajanja ciklusa zavarivanja, razlikuju se meki i oštri režimi zavarivanja.

Meki režimi zavarivanja podrazumevaju primenu male jačine struje za zavarivanje (bliske I_{min}) i dugačak ciklus zavarivanja. U tom slučaju, zavarena tačka je pravilnog oblika, srednjih dimenzija, ujednačenih mehaničkih osobina i srednje efikasnosti spoja.

Oštri režimi zavarivanja podrazumevaju primenu maksimalno dopuštene jačine struje zavarivanja i kratkotrajan ciklus zavarivanja. Zavarena tačka je nepravilnog oblika, većih dimenzija, ima manje ujednačenu strukturu i mehaničke osobine, ali se ostvaruju maksimalna efikasnost spoja i produktivnost. U primeni su oba režima zavarivanja.

Očigledno je da prosti izbor nekog parametra, u okviru min-max vrednosti, ne mora automatski da bude i dobar izbor. Primer je parametar t – vreme: maksimalna vrednost vremena zavarivanja t_{max} nije ostvariva u slučaju prikazanom na slici 2.32. Maksimalna ostvariva vrednost vremena zavarivanja je realno vreme zavarivanja $t_{max\ r}$ koje je znatno kraće od t_{max} .

Izbor parametara zavarivanja uvek se vrši u odnosu na materijale koji se zavaruju, primenom nekog od sledećih metoda:

- Usvajanjem postojećih preporuka, primera dobre prakse ili standardnih veličina,
- Istraživanjem parametara zavarivanja (eksperimentalno, statistički, numerički, analitički i sl).

²⁵ Važno je skrenuti pažnju da je crtanje realne zavisnosti parametara vrlo komplikovano. Primer na slici 2.32 je samo ilustracija jedne moguće situacije.

U zavarivačkoj praksi je uobičajeno da se vreme trajanja sekvence elektrootpornog zavarivanja meri ciklusima (a ne sekundama) uz frekvenciju primenjene struje. Na primer: jedna sekvenca zavarivanja traje 10 ciklusa/50 Hz, a neka druga neka sekvenca traje, na primer, 11 ciklusa/60 Hz.

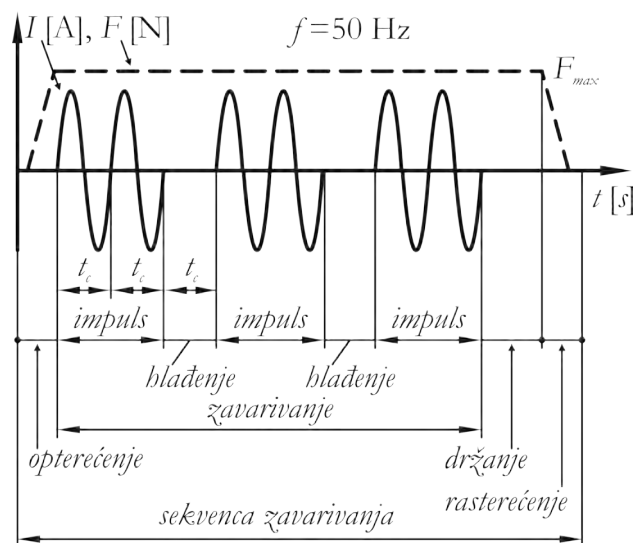
Jednoimpulsna sekvenca zavarivanja, sa jednosmernom ili (znatno češće) naizmeničnom strujom, primenjuje se kod približno 80% slučajeva zavarivanja zbog svoje jednostavne strukture i lake izvodljivosti u radionici – nije potreban programator ili digitalni upravljački računar. Ovakva sekvenca zavarivanja primenjuje se za zavarivanje mekih čelika, legura metala sa velikim procentom bakra u sebi i niki-hrom nerđajućih čelika, kao i legura nikla. Primena ovakve sekvence je ograničeno uspešna kod visoko ugljeničnih čelika, aluminijuma, legura aluminijuma i čelika sa prevlakama i premazima [43].

Višeimpulsna sekvenca zavarivanja podrazumeva postojanje vremenskog perioda kada je jačina električne struje jednaka nuli ili kada je sila pritiska jednaka nuli (što je znatno ređa situacija). U slučaju kada se menja samo jačina električne struje tokom sekvence zavarivanja, jedan impuls čini najmanje jedan ciklus zavarivanja (kada je $I \neq 0$ A) i najmanje jedan ciklus hlađenja (kada je $I = 0$ A) radnih komada.

Višeimpulsna sekvenca zavarivanja (slika 2.35) je, po strukturi, znatno složenija od jednoimpulsne, ali je i znatno fleksibilnija od nje. Kombinovanjem više ciklusa grejanja/hlađenja zone zavarivanja, moguće je ostvarenje povoljnijih osobina zavarenih spojeva nego što je to slučaj kod jednoimpulsne sekvence zavarivanja. Dobrim kombinovanjem ciklusa zagrevanja i hlađenja postižu se niže temperature zavarivanja i što je još važnije – željene temperature zavarivanja se ostvaruju u trenucima kada je to zaista potrebno. Stoga je česta primena sistema 3-1 (3 ciklusa zagrevanja, 1 ciklus hlađenja) ili sistema 3-2 (3 ciklusa zagrevanja, 2 ciklusa hlađenja), primenom 2 ili 3 impulsa.

Ovakvim višeimpulsnim sekvencama zavarivanja se uspešno zavaruju aluminijum i

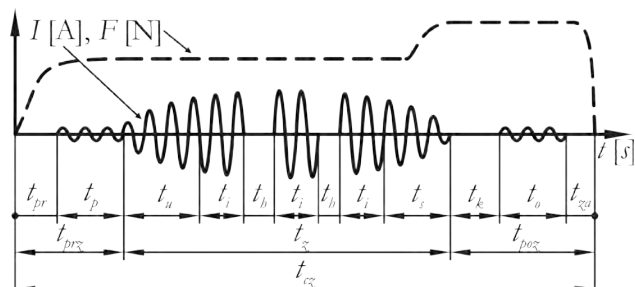
njegove legure, gotovo sve vrste čelika i legure nikla. Zavarivanje materijala, koji na svojim površinama imaju boje, lakove ili premaze, se veoma lako zavaruju ovakvim sekvencama.



Slika 2.35 Šema sekvence zavarivanja – višeimpulsno tačkasto zavarivanje naizmeničnom strujom frekvencije 50 Hz

Prethodno navedene sekvence zavarivanja podrazumevaju konstantnost pojedinih parametara – trajanje ciklusa, maksimum/minimum struje zavarivanja, konstantnu silu itd. Međutim, ako se želi potpuna kontrola celog ciklusa zavarivanja, primenjuje se adaptivna sekvenca zavarivanja. Ona je strukturalno slična višeimpulsnoj sekvenci – i sama je višeimpulsna, ali ima više ciklusa.

Šema jedne adaptivne sekvence prikazana je na slici 2.36.



Slika 2.36 Šema sekvence zavarivanja – tačkasto zavarivanje naizmeničnom strujom, adaptivna sekvenca

Elektrode, tokom vremena pritezanja t_{pr} lagano povećavaju silu pritiska na radnim komadima do dostizanja optimalne vrednosti.

Tada počinje predgrevanje radnih komada naizmeničnom strujom male jačine (tokom perioda t_p). Predgrevanje ima za cilj povećanje zavarivosti radnih komada u zoni formiranja tačke. Nakon toga sledi period laganog pojačanja struje (period t_n) do dostizanja stacionarne struje zavarivanja. Sa pojačanjem jačine struje počinje faza zavarivanja (t_z). Nakon ustaljenja struje, smenjuju se periodi zagrevanja (t_i) i hlađenja (t_h). Na kraju faze zavarivanja se struja, lagano, tokom vremena t_s , smanjuje do nulte vrednosti. Istovremeno se povećava sila pritiska kako bi se izvršilo završno iskivanje zavarene tačke. Zatim sledi faza kaljenja (zakaljivanja) – radni komadi su se zagrejali tokom faze zavarivanja a po isključenju struje se brzo hlade (tokom vremena t_k). Zakaljivanje je izrazito nepovoljna pojava jer najčešće dolazi do povećanja tvrdoće i krtosti metala šava. Stoga se radi otpuštanja materijala, tokom perioda t_o , kroz elektrode propušta struja slabijeg intenziteta koja blago zagreva zavareni spoj. Posle toga sledi period završetka sekvence zavarivanja t_{za} – izvor struje je u potpunosti isključen i smanjuje se sila pritiska na elektrodama do potpunog rasterećenja, sada već zavarenih delova.

Prema tome, kod ovakve adaptivne sekvence zavarivanja, promenljivi su (po više osnova) i jačina struje, i sila pritiska, i sami impulsi zavarivanja.

Za realizaciju ovakve sekvence zavarivanja neophodna je primena složenih merno-kontrolnih sistema, čiji rad kontroliše procesor. Takođe, za zavarivanje je neophodan transformator, kao primarni izvor struje, koji mora da bude uparen sa invertorom. Za realizaciju promenljive sile pritiska neophodan je precizan i upravljiv pneumatski ili hidro sistem. Celokupni sistem mora da bude brz i sposoban da reaguje trenutno na promene parametara zavarivanja.

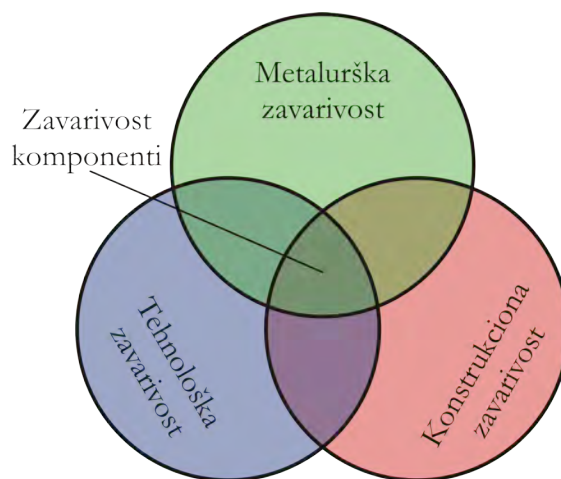
Najsavremeniji adaptivni sistemi zavarivanja imaju ugrađenu i „veštačku inteligenciju” u sebi – na osnovu izmerenih parametara postupka (temperatura, na primer) sistem donosi trenutne odluke o korekciji parametara zavarivanja, tokom samog trajanja

ciklusa, a sa ciljem poboljšanja kvaliteta zavarene tačke. Normalno, cene ovakvih sistema za zavarivanje su ogromne, ali je kvalitet zavarenih tačaka odličan.

2.10 Zavarivost

Razmatranje zavarivosti komponenti (radnih komada), kod elektrootpornih postupaka zavarivanja obuhvata tri različita nivoa zavarivosti: metaluršku, tehnološku i konstrukcionu zavarivost (slika 2.37).

Osnovno pravilo zavarivosti oslanja se na broj uticajnih faktora: što je manji broj faktora, koje treba uzeti u obzir pri definisanju procedure zavarivanja određene konstrukcije, to je bolja njena zavarivost [42].



Slika 2.37 Dijagram zavarivosti

Metalurška zavarivost kod elektrootpornih postupaka opisuje se jednostavnošću sa kojom se zavarivanje vrši.

Tehnološka zavarivost odnosi se na izvodljivost izabrane tehnologije i procedure elektrootpornog zavarivanja posmatranih radnih komada.

Konstrukciona zavarivost se odnosi na mogućnost funkcionisanja zavarene konstrukcije, u okvirima projektovane funkcije – zavarivanje ne narušava funkcionalnost konstrukcije.

Zavarivost kod elektrootpornih postupaka podrazumeva i sposobnost da se uspešno zavari prva tačka, zatim sve ostale, a pri tom prethodno zavareni spoj uspešno izdrži novonastalo, termomehaničko

naprezanje u materijalu [42].

Procena zavarivosti je vrlo složen postupak. Standard SRPS EN ISO 18278-1:2017: Elektrootporno zavarivanje – Zavarljivost – Deo 1: Opšti zahtevi za vrednovanje zavarljivosti za elektrootporno tačkasto, šavno i bradavičasto zavarivanje metalnih materijala ²⁷ definiše osnovne kriterijume na osnovu kojih se vrši procena zavarivosti definisanih delova:

- Opseg jačine struje zavarivanja koji definiše mogućnost zavarivanja.
- Radni vek i habanje elektroda koji definišu mogućnost nastavka zavarivanja.
- Čvrstoću zavarenog spoja pri različitim opterećenjima.
- Promena tvrdoće materijala.
- Prisustvo, broj i veličina spoljašnjih i unutrašnjih prslina, pora i ostalih nesavršenosti zavarivanja.
- Ponašanje preloma usled opterećenja u raznim pravcima.
- Otpornost ka uticaju iz radne sredine, kao što su korozija, vlažnost, niska, povišena i promenljiva temperatura i sl.

Jasno je, na osnovu kriterijuma, da je procena zavarivosti empirijska i da podrazumeva probno zavarivanje, pod kontrolisanim uslovima, uz primenu standardnih materijala, oblika i dimenzija a nakon toga sledi ispitivanje (testiranje) osobina zavarenog spoja.

Metalurška zavarivost elektrootpornim postupcima zavarivanja se procenjuje drugačije nego kod ostalih (elektrolučnih) postupaka zavarivanja. Zavarivost je, u ovom slučaju, uslovljena električnom otpornošću materijala, termičkom provodnošću i temperaturom topljenja. Metali sa visokom električnom otpornošću, malom termičkom provodnošću i relativno niskom temperaturom topljenja su veoma lako zavarivi. Ovakve osobine imaju fero-metali. Metali koji imaju nižu električnu otpornost, ali imaju višu termičku provodnost su teže zavarivi. U ovu grupu spadaju aluminijum, legure aluminijuma, magnezijum i legure sa

velikim procentom magnezijuma. Metali koje odlikuje velika termička provodnost (srebro, zlato, bakar), kao i metali koje odlikuje veoma visoka temperatura topljenja (plemeniti metali) su izrazito teško zavarivi elektrootpornim postupcima.

2.11 Priprema spoja

Gotovo svi postupci zavarivanja električnim otporom su veoma osetljivi na sve tipove nečistoća, koroziju, neravnine, prsline, nepravilnosti oblika i položaja radnih komada. Dodatna otežavajuća okolnost mogu da budu prevlake ili premazi na površinama koje se zavaruju. Zbog toga je „higijena” radnih komada neophodna.

Nečistoće se otklanjaju mehanički, upotrebom četki ili krpa, sa ili bez dodatnog hemijskog/biološkog sredstva za čišćenje. Mehanička priprema radnih komada podrazumeva ispravljanje delova, pripremu/izvlačenje bradavica za zavarivanje, obaranje ivica, prethodno pritezanje delova, pozicioniranje, povezivanje izvora struje itd.

Ukoliko tehnologija zavarivanja zahteva uklanjanje zaštitnog sloja/prevlake samo na lokacijama gde se vrši zavarivanje, neophodno je propisano mehaničko ili hemijsko dejstvo na radne komade kako bi se ostatak materijala zaštitio od neželjenog dejstva primenjene mere.

2.12 Veza između parametara zavarivanja i osobina zavarene tačke

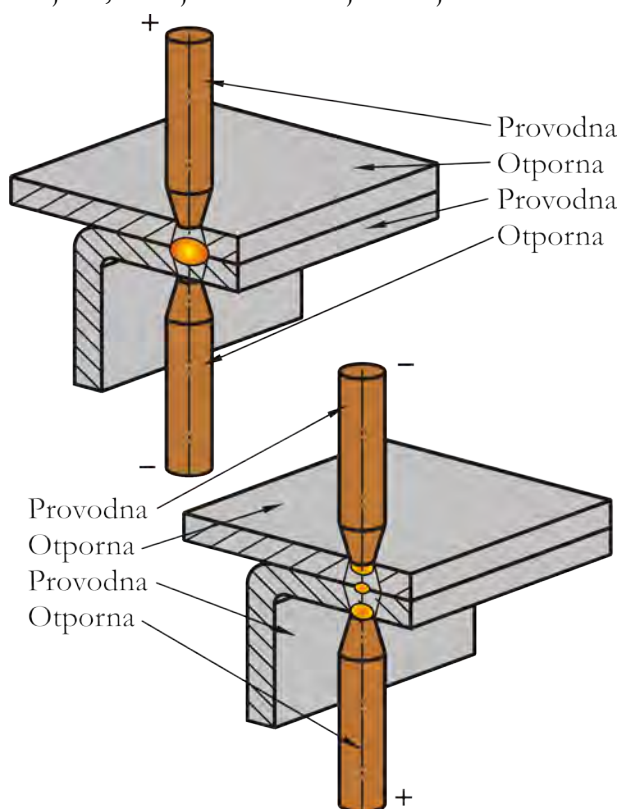
Kvalitet zavarene tačke je veoma zavistan od primenjenih parametara zavarivanja ali i od stanja delova koji se zavaruju (na primer, temperature radnih komada, površine realnog kontakta i sl). Zbog toga je neophodno dobro kalibrisanje parametara zavarivanja, kao i njihovo rekalkibrisanje prilikom zavarivanja kako bi se ostvario optimalni kvalitet zavarene tačke i povoljni uslovi za zavarivanje sledeće tačke.

²⁷ Identičan sa: ISO 18278-1:2015 ISO/TC 44/SC 6 [44].

Za vezu parametara zavarivanja-kvalitet zavarene tačke, dominantne su odgovorne dve pojave: Peltijerov²⁸ efekat i šant efekat.

2.12.1 Peltijerov efekat

Kod postupaka elektrootpornog zavarivanja elektrodama, količina toplote i veličina zavarene tačke su zavisne od polariteta i jačine struje koja protiče kroz radne komade. Ova pojava je uzrokovana tzv. Peltijerovim efektom i veoma je izražena kod sistema gde električna struja protiče uvek u istom smeru – zavarivanje jednosmernom strujom. Pri zavarivanju naizmeničnom strujom, Peltijerov efekat je manje izražen.



Slika 2.38 Peltijerov efekat – uticaj polariteta

Peltijerov efekat je suprotan efektu termopara. Kod termopara, koji čine dva raznorodna materijala u kontaktu, dolazi do pojave napona (potencijala) kada se promeni temperatura kontakta. Kod Peltijerovog efekta je obrnuta situacija – ako se primeni strujni potencijal (električni napon) na kontakt dva materijala, sam kontakt se zagreva (ili hladi) saglasno polaritetu primenjene struje i veličini

napona kojem je kontakt izložen. Važno je naznačiti da ovo zagrevanje/hlađenje kontakta nema nikakve veze sa zagrevanjem usled Džulovog efekta (proticanje struje kroz kontakt koji pruža otpor) – oba efekta funkcionišu nezavisno jedan od drugog.

Kod tipičnog tačkastog postupka elektrootpornog zavarivanja, postoji tri para kontakata: elektroda 1 – radni komad 1, radni komad 1 – radni komad 2 i radni komad 2 – elektroda 2 (slika 2.5). Najčešće se primenjuju provodne elektrode na radnim komadima manje provodnosti, tako da je pojava raznorodnih kontakata pri zavarivanju neminovna [45].

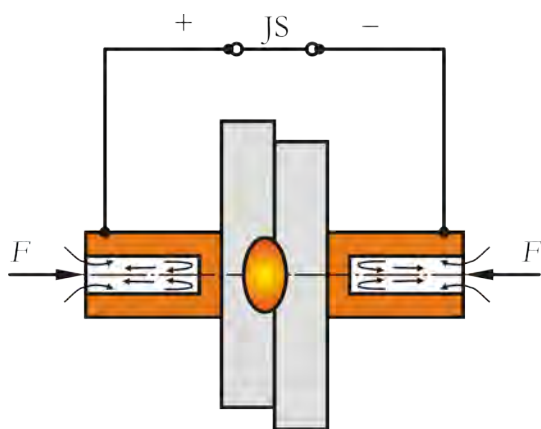
Posmatraćemo slučaj kada su materijali potpuno raznorodni: jedna elektroda je manje „provodna” od druge, ali su obe „provodnije” od radnih komada, pri čemu je jedna ploča „provodnija” od druge. Sistem kontakata je postavljen tako da su u kontaktu uvek provodno i manje provodno telo (slika 2.38).

Kako bi se iskoristila prednost polariteta struje, negativno naelektrisana elektroda bi trebala da bude u kontaktu sa manje provodnim radnim komadom, dok pozitivno provodna elektroda treba da bude u kontaktu sa provodnijim radnim komadom. Tada se toplota uglavnom generiše na kontaktu radnih komada i nema lepljenja elektroda za radne komade. U suprotnom slučaju, kada je negativno naelektrisana elektroda u kontaktu sa provodnijim radnim komadom, toplota se dominantno generiše na kontaktima elektroda i negativna elektroda se lepi za radni komad. Kontakt radnih komada ostaje hladniji u odnosu na kontakte elektroda-radni komad i zavarena tačka je malih dimenzija, bez obzira na jačinu primenjene struje.

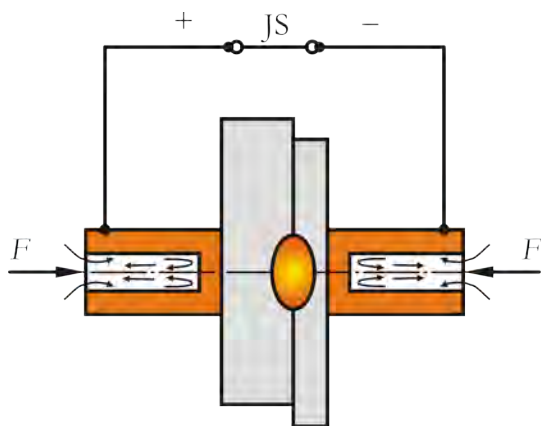
Prilikom zavarivanja dva manje provodna komada znatno provodnijim elektrodama, Peltijerov efekat ogleda se i u izmeštanju zavarene tačke iz linije kontakta – zavarena tačka je „povučena” ka pozitivno naelektrisanoj elektrodi (slika 2.39). Zbog toga je neophodno ujednačenje provodnosti radnih komada i elektroda pravilnim izborom materijala elektroda.

²⁸ Fra. Jean Charles Athanase Peltier (22.02.1785–27.10.1845), fizičar iz Francuske [49].

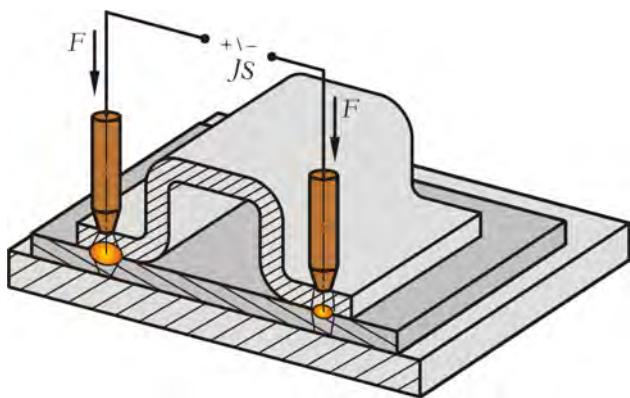
Kada se zavaruju dva dela različite debljine, bez obzira na provodnost materijala koji se zavaruju, važno je da negativno naelektrisana elektroda pritiska radni komad manje debljine (slika 2.40).



Slika 2.39 Peltijerov efekat – uticaj polariteta



Slika 2.40 Peltijerov efekat – uticaj polariteta



Slika 2.41 Peltijerov efekat – uticaj polariteta i sile pritiska

U takvoj situaciji se zavarena tačka formira na kontaktu radnih komada dok bi se u drugoj kompoziciji delova formirala približno na sredini ukupne debljine radnih komada.

U slučaju tačkastog indirektnog elektrootpornog zavarivanja (slika 2.9) formiraju se dve zavarene tačke tokom trajanja jednog ciklusa. U ovom slučaju, Peltijerov efekat može da dovede do pojave tačaka različitih dimenzija – tačka koja se formira na mestu dejstva pozitivno naelektrisane elektrode je veća nego tačka koja se formira ispod negativno naelektrisane elektrode (slika 2.41). Da bi se izbegla ova pojava, najlakše rešenje je povećanje sile pritiska na pozitivno naelektrisanu elektrodu ($F+\Delta F$) ili umanjenoje sile pritiska na negativno naelektrisanu elektrodu ($F-\Delta F$).

Univerzalno rešenje problema, koji mogu da budu uzrokovani Peltijerovim efektom, je primena simetričnih oblika naizmenične struje.

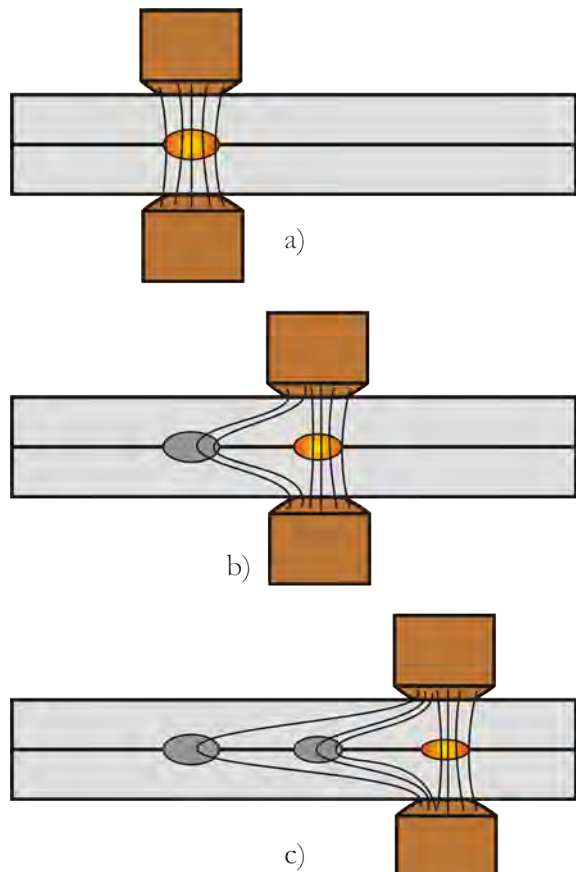
2.12.2 Šant efekat

Rasipanje i skretanje električne struje, ili tzv. šant efekat, može da bude ozbiljan problem kod tačkastih postupaka zavarivanja električnim otporom. Mehanizam šant efekta je sasvim jednostavan: električna struja uvek pronalazi najkraći put svog toka, odnosno, pronalazi putanju sa najmanjim električnim otporom. Kao posledica rasipanja struje, dobijaju se zavarene tačke manjih dimenzija, neujednačenih mehaničkih osobina, dominantno usled niže temperature zavarivanja.

Šant efekat biće ilustrovan na primeru direktnog zavarivanja više tačaka jedne do druge (slika 2.42). U inicijalnom položaju zavarivanja, limovi naležu jedan na drugi, pa je teorijska površina njihovog kontakta veoma velika. Međutim, praksa pokazuje da nečistoće, oksidi i neravnine na kontaktnim površinama predstavljaju ozbiljnu prepreku – otpornost – protoku električne struje te se prolazak električne struje lokalizuje na zonu oko elektroda, odnosno, na zonu gde nastaje zavarena tačka (slika 2.42, a). Pri zavarivanju prve tačke u nizu, pojava rasipanja i skretanja električne struje je minimalna.

Prilikom zavarivanja druge tačke (slika 2.42, b), najveći deo strujnica – električne

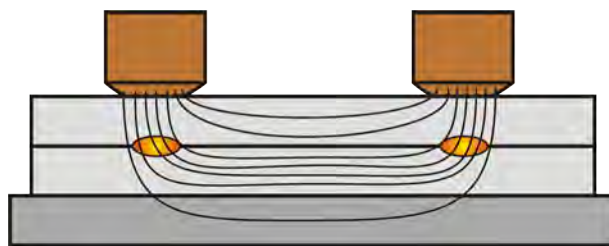
struje, nagomilava se oko elektroda, u zoni nastajanja druge zavarene tačke. Međutim, jedan deo električne struje „skreće” i protiče kroz zapreminu prve zavarene tačke. Kao posledica, druga zavarena tačka je manja od prve i temperatura zavarivanja je niža.



Slika 2.42 Šant efekat kod direktnog tačkastog elektrootpornog postupka, a – zavarivanje prve tačka, b – zavarivanje druge tačke, c – zavarivanje treće tačke

Pri zavarivanju treće tačke (slika 2.42, c), struja zavarivanja se „gomila” oko elektroda, ali, znatan deo struje protiče kroz prethodno zavarene dve tačke. Treća zavarena tačka je najmanja i nastala je u najhladnijim uslovima te su i njene mehaničke karakteristike drugačije/lošije nego kod ostalih zavarenih tačaka.

Značajan šant efekat prisutan je kod indirektnih postupaka elektrootpornog zavarivanja (slika 2.43). Dobar deo električne struje protiče samo kroz gornju ploču koja se zavaruje, jedan deo protiče preko kontakata – na mestima gde se i očekuje formiranje zavarenih tačaka, a jedan manji deo struje protiče kroz podložnu ploču.



Slika 2.43 Šant efekat kod indirektnog tačkastog elektrootpornog postupka

Ne postoji aktivnost, koja može da se sprovede pre i tokom zavarivanja, i da kao rezultat te aktivnosti, nestane šant efekat. Ublažavanje šant efekta može da se izvede nadoknadom izgubljene struje – zavarivanje svake naredne tačke vrši se strujom veće jačine kako bi se formirala zavarena tačka željenih osobina kod direktnih postupaka ili se planski odmah upotrebi struja veće jačine kod indirektnih postupaka. Međutim, metoda ublažavanja šant efekta je limitirana uređajem za zavarivanje (maksimalna jačina električne struje) i tehnološkom granicom zavarivosti tačke.

2.13 Tipične greške u zavarenom spoju

Kako su postupci zavarivanja električnim otporom, hibridna vrsta postupaka – energija aktivacije zavarivanja je kombinacija toplote i sile pritiska, u zavarenom spoju je moguća pojava svih grešaka koje su definisane standardima SRPS EN ISO 6520-1:2013: Zavarivanje i srodni postupci – Klasifikacija geometrijskih nepravilnosti u metalnim materijalima – Deo 1: Zavarivanje topljenjem²⁹ i SRPS EN ISO 6520-2:2014: Zavarivanje i srodni postupci – Klasifikacija geometrijskih nepravilnosti u metalnim materijalima – Deo 2: Zavarivanje pritiskom³⁰.

Međutim, tipične greške koje nastaju u šavovima dobijenim postupcima zavarivanja električnim otporom su rasprskavanje, ulegnuće, prsline, nesimetrična zavarena tačka

²⁹ Identičan sa: EN ISO 6520-1:2007 [46].

³⁰ Identičan sa: EN ISO 6520-2:2013 [47].

i istiskivanje rastopljenog materijala.

Rasprskavanje je pojava koja se vezuje za postupke zavarivanja topljenjem sa dodatnim materijalom, koji se u rastopljenom stanju, rasprskava usled dejstva električne struje/električnog luka. Ukoliko se elektrootporno zavarivanje vrši „prejakom” strujom, moguća je pojava rasprskavanja rastopljenog materijala, u zoni tačke. Samim tim, ne dobija se kvalitetna zavarena tačka.

Ulegnuće na mestu zavarene tačke je siguran znak da je primenjena prevelika sila pritiska tokom zavarivanja. Prevelika sila je uzrok deformisanih tačaka koje nikako ne mogu biti konzistentnih mehaničkih osobina.

Prsline u zoni zavarivanja ili unutar same tačke mogu da nastanu iz više razloga: prevelika jačina struje, prevelika sila pritiska, loša kombinacija materijala elektroda, polariteta, sklonost materijala koji se zavaruje ka pucanju itd.

Nesimetrična zavarena tačka je pojava koja nastaje ukoliko je sila pritiska prevelika i došlo je do ulegnuća. Međutim, ukoliko ulegnuća nema, a tačka je nesimetrična, razlozi pojave ove greške mogu da budu: loš izbor elektroda – neusklađene elektrode, loše izabran polaritet ili prisustvo nečistoća unutar zavarene tačke.

Istiskivanje rastopljenog materijala je greška prouzrokovana kombinacijom prevelike sile pritiska, prejake struje, predugog trajanja zavarivanja i prisustva nečistoća u rastopljenom materijalu.

2.14 Sistemi kontrole i merenja parametara

Praćenje parametara zavarivanja, odziva sistema i pojedinih osobina zavarenih tački kod većine postupaka zavarivanja električnim otporom su osnova ostvarenja visokog i ponovljivog kvaliteta zavarenih spojeva. Iako su cene sistema za praćenje parametara veoma visoke, još su skuplji škartovi i aktivnosti za sanaciju škartova.

Sistemi za praćenje parametara su uređaji koji mere sve elektro-mehaničke

pojave koje su važne za zavarivanje, a menjaju se tokom trajanja ciklusa zavarivanja. Merenje se odnosi na jačinu struje, pad napona duž elektroda, termičko širenje i deformacije radnih komada, intenzitet sile na elektrodama, pomeranje elektroda, merenje realne površine kontakta na elektrodama, merenje temperature itd. Izmereni podaci se prikazuju operateru zavarivanja i memorišu radi kasnijih analiza. Najsavremeniji sistemi poseduju „pametne” sisteme zaključivanja koji, na osnovu izmerenih parametara, proaktivno reaguju, koriguju određene parametre zavarivanja kako bi poboljšali ili zadržali ostvareni kvalitet zavarenih tački.

Sistem za merenje i praćenje parametara mora da bude brz i da reaguje gotovo trenutno na promene koje se javljaju prilikom zavarivanja. Zbog toga postoji sekundarni sistem koji kontroliše odziv sistema za merenje i upravlja sistemom za merenje.

Merenje osobina zavarenih spojeva (tvrdoća, čvrstoća i sl) mere se po završetku zavarivanja.

2.15 Zdravlje i bezbednost

Svi postupci zavarivanja električnim otporom rade sa malim naponima (ispod maksimalno dozvoljenog kontaktnog napona) i visokim strujama. Iz tog razloga, direktan kontakt sa delovima koji provode struju zavarivanja i radnim predmetima pod naponom, tokom zavarivanja, je uglavnom bezopasan.

Ipak, postoje brojne opasnosti pri zavarivanju elektrootpornim postupcima:

- Rasprskavanje metala: rastopljeni metal izbačen iz zavara,
- Efekat sile: mogućnost lomljenja udova u predelu dejstva elektroda i nosača elektroda,
- Buka: sistemi za zavarivanje su uglavnom bučni i neophodni su sistemi za zaštitu čula sluha.

Iz zone zavarivanja dopiru dim i razna isparenja. Zato je, radi zaštite ljudi, propisana obavezna zaštita respiratornih organa

(primena uređaji za usisavanje gasova ili respirator), zaštita očiju (zaštitne naočare ili zaštitni ekran) i, ako je potrebno, zaštita ruku.

Nakon isključivanja izvora struje za zavarivanje iz mreže, instalacija je još uvek pod visokim naponom. U zavisnosti od vrste i konstrukcije sistema, vreme pražnjenja može biti i do nekoliko minuta,

Prilikom otvaranja sistema za zavarivanje postoji rizik od strujnog udara opasnog po život ako se kondenzatori tokom postupka zavarivanja ne isprazne ili samo delimično isprazne. Ukoliko nisu integrisani odgovarajući zaštitni mehanizmi, ovaj rizik postoji i kada je izvor struje za zavarivanje isključen.

U neposrednoj blizini opreme za elektrootporno zavarivanje, tokom zavarivanja, nastaju jaka magnetna polja. Radna mesta na objektima za otporno zavarivanje su uglavnom obeležena zabranom „Zabrana za osobe sa pejsmejkerima“ (slika 2.44, a) i znakom upozorenja „Upozorenje na magnetno polje“ (slika 2.44, b).



a)



b)

Slika 2.44 a) Zabrana za osobe sa pejsmejkerima, b) Upozorenje na magnetno polje [48]

Nije dokazano da izvori struje zaista mogu da poremete rad pejsmejкера ili sličnih uređaja. Ipak, označavanje radnog mesta za postupke zavarivanja električnim otporom ovim znacima se radi iz predostrožnosti.

2.16 Nestandardni i novi postupci zavarivanja električnim otporom

Postupci zavarivanja električnim otporom su i dalje tema brojnih istraživanja. Veliki problem i dalje predstavljaju zavarivanje raznorodnih materijala, kao i zavarivanje elektro-provodnih materijala.

Novi postupci elektrootpornog zavarivanja koriste inserte (umetke) kojima se menja kontaktna struktura elemenata, zatim, koriste otporne elemente koji ostaju zarobljeni u šavu (oni kreiraju zavarenu tačku), a sve češće se primenjuje laser za predgrevanje materijala pre formiranja zavarene tačke.

Osnovni korisnik elektrootpornih postupaka zavarivanja je autoindustrija, pa se, napredak postupaka zavarivanja električnim otporom direktno vezuje za potrebe ove snažne grane industrije.

LITERATURA

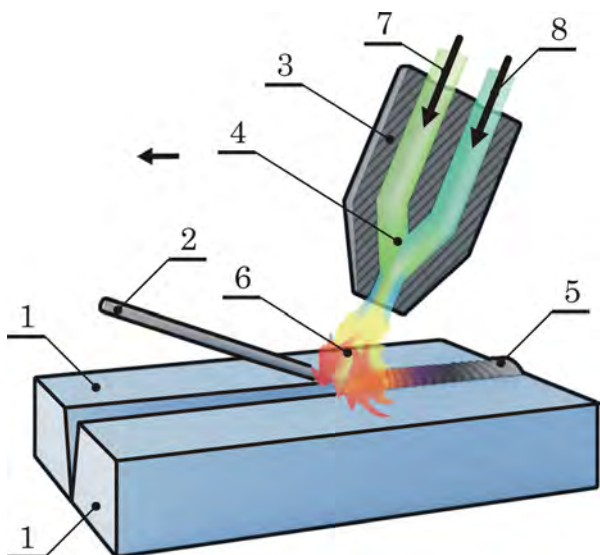
- [1] Britannica Biography: <https://www.britannica.com/biography/James-Prescott-Joule> (dokument pregledan 21.10.2020.);
- [2] James Prescott Joule: https://en.wikipedia.org/wiki/James_Prescott_Joule, (dokument pregledan 21.10.2020.);
- [3] <https://welderportal.com/the-history-of-welding/>, (dokument pregledan 22.10.2020.);
- [4] Elihu Thomson: https://en.wikipedia.org/wiki/Elihu_Thomson, (dokument pregledan 22.10.2020.);
- [5] Institute of Electrical and Electronics Engineers, <https://www.ieee.org/>, (dokument pregledan 22.10.2020.);
- [6] Welding History, <http://www.weldinghistory.org/whfolder/biography/bio-thomson.html>, (dokument pregledan 22.10.2020.);
- [7] Patent USA 347,140, Elihu Thompson: Apparatus for Electric Welding, 10,08,1886;
- [8] https://ru.wikipedia.org/wiki/Контактная_сварка, (dokument pregledan 22.10.2020.);
- [9] National Museum of American History, <https://americanhistory.si.edu/object-project/bicycles/electric-welder>, (dokument pregledan 22.10.2020.);
- [10] Patent USA 1,078,225, Elihu Thompson: Electrical Welding of Sheet Metal, 11.11.1913;
- [11] Patent USA 1,122,665, Elihu Thompson: Spot Welding Machine, 29.12.1914;
- [12] https://ru.wikipedia.org/wiki/Николай_Николаевич_Бенардос, (dokument pregledan 22.10.2020.);
- [13] Autorizovana predavanja: Разработка процесса контактной электросварки, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск. Теслева Е.П. –12с. 2017г.;
- [14] https://ru.wikipedia.org/wiki/Лачинов,_Дмитрий_Александрович, (dokument pregledan 22.10.2020.);
- [15] Ржонсницкий Б.Н. Дмитрий Александрович Лачинов: Жизнь и труды./ М.-Л.: Госэнергоиздат, 1955.;
- [16] https://en.wikipedia.org/wiki/Charles_L._Coffin, (dokument pregledan 22.10.2020.);
- [17] Kurt Jäger, Friedrich Heilbronner: Lexikon der Elektrotechniker. 2. Auflage. VDE-Verlag, 2010, ISBN 978-3-8007-2903-6;
- [18] Edward Budd: https://en.wikipedia.org/wiki/Edward_G._Budd, (dokument pregledan 22.10.2020.);
- [19] Shot Welding - A Forward Step in Resistance Welding”, The Welding Engineer, 17 (8), August 1932;
- [20] <https://en.wikipedia.org/wiki/Ignitron>, (dokument pregledan 22.10.2020.);
- [21] <https://www.sciaky.com>, (dokument pregledan 22.10.2020.);
- [22] H. Zhang, J. Senkara, Resistance, Welding: Fundamentals and Application, CRC Press, 2005;
- [23] SRPS EN ISO 4063:2021: Welding, brazing, soldering, cutting, mechanical joining and adhesive bonding – Nomenclature of processes and reference numbers (EN ISO 4063:2020), naziv na sprskom: Zavarivanje, tvrdo lemljenje, meko lemljenje, rezanje, mehaničko spajanje i adheziono spajanje — Lista postupaka i njihovo označavanje, objavljen: 17.12.2020;
- [24] SRPS EN ISO 17677-1:2019: Elektrootporno zavarivanje – Rečnik – Deo 1: Tačkasto, bradavičasto i šavno zavarivanje, 2019;
- [25] ISO 857-1:1998: Welding and allied processes – Vocabulary – Part 1: Metal welding

- processes, 1998;
- [26] SRPS EN 28167:2017: Bradavice za elektrootporno zavarivanje, 2017;
 - [27] <https://i0.wp.com/blogmech.com/wp-content/uploads/2019/07/5d0d4-01-resistance-welding-machine-what-is-resistive-welding.jpg>, (dokument pregledan 05.11.2020.);
 - [28] SRPS EN ISO 8430-1:2017: Elektrootporno tačkasto zavarivanje – Držači elektroda – Deo 1: Fiksiranje konusa 1:10, 2017;
 - [29] SRPS EN ISO 8430-2:2017: Elektrootporno tačkasto zavarivanje – Držači elektroda – Deo 2: Fiksiranje Morzeovog konusa, 2017;
 - [30] SRPS EN ISO 8430-3:2017: Elektrootporno tačkasto zavarivanje – Držači elektroda – Deo 3: Fiksiranje paralelnih držača i krajeva pod pritiskom, 2017;
 - [31] SRPS EN ISO 5182:2017 Elektrootporno zavarivanje – Materijali za elektrode i pomoćnu opremu, 2017;
 - [32] https://www.tuffaloy.com/images/moduleimages/electrode_holders.jpg, (dokument pregledan 05.11.2020.);
 - [33] SRPS EN ISO 5821:2011: Elektrootporno zavarivanje – Vrhovi elektrode za tačkasto zavarivanje, 2011;
 - [34] SRPS EN 25184:2015: Ravne elektrode za elektrootporno tačkasto zavarivanje, 2015;
 - [35] SRPS EN 21089:2015: Konusne elektrode za tačkasto zavarivanje – Mere, 2015;
 - [36] SRPS EN ISO 5183-1:2012: Elektrootporno zavarivanje – Adapteri elektroda, muški konusi 1:10 - Deo 1: Konično fiksiranje, konus 1:10, 2012;
 - [37] SRPS EN ISO 5183-2:2012: Elektrootporno tačkasto zavarivanje – Adapteri elektroda, muški konus 1:10 – Deo 2: Paralelni držač za fiksiranje krajnjeg uboda elektrode, 2012;
 - [38] SRPS EN 29313:2016: Oprema za tačkasto elektrootporno zavarivanje – Rashladni vodovi, 2016;
 - [39] <https://www.tuffaloy.com/products/custom-parts>, (dokument pregledan 05.11.2020.);
 - [40] SRPS EN 20693:2009: Mere zavarenih praznih kalemova, 2009;
 - [41] ISO 3:1973: Preferred numbers – Series of preferred numbers, 1974;
 - [42] SRPS EN ISO 15609-5:2009: Specifikacija i kvalifikacija tehnologije zavarivanja metalnih materijala - Specifikacija tehnologije zavarivanja - Deo 5: Elektrootporno zavarivanje, 2009;
 - [43] Više autora: Autorizovana predavanja na kursu za međunarodne inženjere zavarivanja IWE, Mašinski fakultet Niš, 2009-2021;
 - [44] SRPS EN ISO 18278-1:2017: Elektrootporno zavarivanje – Zavarljivost – Deo 1: Opšti zahtevi za vrednovanje zavarljivosti za elektrootporno tačkasto, šavno i bradavičasto zavarivanje metalnih materijala, 2017;
 - [45] The Effects of Polarity on the Resistance Welding Process, Technical Application Brief, Amada Weld Tech Inc, 2020;
 - [46] SRPS EN ISO 6520-1:2013: Zavarivanje i srodni postupci – Klasifikacija geometrijskih nepravilnosti u metalnim materijalima – Deo 1: Zavarivanje topljenjem, 2013;
 - [47] SRPS EN ISO 6520-2:2014: Zavarivanje i srodni postupci – Klasifikacija geometrijskih nepravilnosti u metalnim materijalima – Deo 2: Zavarivanje pritiskom, 2014;
 - [48] <https://de.wikipedia.org/wiki/Widerstandsschwei%C3%9Fen>, (dokument pregledan 05.11.2020.);
 - [49] Jean Charles Athanase Peltier:
https://en.wikipedia.org/wiki/Jean_Charles_Athanase_Peltier, (dokument pregledan 05.11.2020.).

3 POSTUPCI ZAVARIVANJA SAGOREVANJEM GORIVIH GASOVA

Standard SRPS EN ISO 4063:2021 [1] definiše osnovnu grupu postupaka zavarivanja topljenjem koji koriste toplotu plamena kao energiju aktivacije procesa spajanja tela. Grupa je označena kao ISO 4063 – 3 [1] i čine je postupci koji se nazivaju postupci zavarivanja sagorevanjem gorivih gasova, gasno-plameni postupci zavarivanja ili, jednostavno, gasni postupci zavarivanja.

Radni komadi (slika 3.1, pozicija 1), sa pripremljenim žlebom se pozicioniraju i fiksiraju jedan u odnosu na drugi.



Slika 3.1 Šematski prikaz gasnog postupka zavarivanja, 1 – osnovni metal, 2 – žica za zavarivanje (dodatni materijal), 3 – mlaznica, 4 – goriva smeša, 5 – zavareni šav, 6 – plamen, 7 – dovod gorivog gasa, 8 – dovod kiseonika/vazduha, retuširana slika [3]

Zavarivanje se vrši topljenjem samo osnovnog metala (kod tankih delova) ili topljenjem osnovnog metala i dodatnog metala (slika 3.1, pozicija 2). Toplota potiče od plamena (slika 3.1, pozicija 6) koji se dobija sagorevanjem gorive smeše (slika 3.1, pozicija 4). Goriva smeša se dobija u mlaznici sa mešaćkom kutijom (slika 3.1, pozicija 3) gde se, u odgovarajućem odnosu, mešaju gorivi gas (slika 3.1, pozicija 7) i vazduh, odnosno,

kiseonik (slika 3.1, pozicija 8).

Pomešani rastopljeni osnovni metal i, ukoliko postoji, rastopljeni dodatni materijal, formiraju metal šava, koji po očvršćavanju, formira zavareni šav (slika 3.1, pozicija 5).

Postupci iz osnovne grupe 3 su klasifikovani prema gasu koji se dodaje gorivom gasu kao:

- Postupci zavarivanja sagorevanjem gorivog gasa uz dodatak kiseonika, označeni kao ISO 4063 – 31,
- Postupci zavarivanja sagorevanjem gorivog gasa na vazduhu, označeni kao ISO 4063 – 32*¹.

Oprema, način rada sa opremom, kao i tehnika i tehnologija zavarivanja, isti su za sve gasne postupke zavarivanja. Jedina razlika među postupcima jesu gasovi koji se koriste za zavarivanje. Zbog relativno male toplotne moći plamena, gasni postupci zavarivanja se koriste za zavarivanje obojenih metala i niskougleničnih čelika [4-6].

3.1 Postupci zavarivanja sagorevanjem gorivog gasa uz dodatak kiseonika

Postupci iz grupe ISO 4063 – 31 toplotu dobijaju delimičnim ili potpunim sagorevanjem gorivog gasa uz dodatak kiseonika koji potpomaže gorenje plamena.

Saglasno gorivim gasovima koji se primenjuju, razlikuju se:

- Gasni postupak zavarivanja acetilenom, označen kao ISO 4063 – 311,
- Gasni postupak zavarivanja propanom, označen kao ISO 4063 – 312 i
- Gasni postupak zavarivanja vodonikom, označen kao ISO 4063 – 313.

¹ Postupci zavarivanja obeleženi * su, prema važećem SRPS EN ISO 4063:2021 [1], klasifikovani kao „zamenjeni ili zastareli” postupci zavarivanja.

Pored navedenih gasova za zavarivanje postupcima sagorevanja gorivim gasom se koriste butan, metan, propilen, metilaceten-propadijen, (trgovački naziv: MAPP gas). Međutim, postupci zavarivanja ovim gorivim gasovima nisu standardizovani jer nisu ekonomski isplativi.

Najpoznatiji i najprimenjiviji postupak zavarivanja iz grupe 31 je gasni postupak zavarivanja acetilenom (311). On je svojom primenjivošću, niskom cenom acetilena, ali i dobrom proizvodnošću, znatno potisnuo ostale pomenute gorive gasove i oni se danas primenjuju samo za zavarivanje specifičnih materijala delova.

Postupak zavarivanja 311, kao i gorivi gasovi koji se koriste pri radu (acetilen), detaljnije su opisani u „Tehnologiji zavarivanja 1” [6].

3.2 Postupci zavarivanja sagorevanjem gorivog gasa na vazduhu

Svi postupci zavarivanja sagorevanjem gorivog gasa na vazduhu (grupa ISO 4063-32*) su zastareli postupci zavarivanja i najnovija verzija ISO 4063:2020 [2] ih više ne definiše kao standardne postupke zavarivanja. Ovoj grupi pripadali su:

- Gasni postupak zavarivanja acetilenom na vazduhu, označen kao ISO 4063 – 321*,
- Gasni postupak zavarivanja propanom na vazduhu, označen kao ISO 4063 – 322*.

Zavarivanje ovim postupcima vršeno je sagorevanjem acetilena ili propana na mirnom vazduhu, što je za posledicu imalo nepotpuno sagorevanje, nisku temperaturu plamena, veliku potrošnju gorivog gasa. Međutim, zavarivanje postupcima 321 i 322 uspešno je sprovedeno na tanjim delovima od niskougljeničnih čelika i svih obojenih metala (osim aluminijuma) [7].

LITERATURA

- [1] SRPS EN ISO 4063:2021: Welding, brazing, soldering, cutting, mechanical joining and adhesive bonding – Nomenclature of processes and reference numbers (EN ISO 4063:2020), naziv na sprskom: Zavarivanje, tvrdo lemljenje, meko lemljenje, rezanje, mehaničko spajanje i adheziono spajanje — Lista postupaka i njihovo označavanje, objavljen: 17.12.2020;
- [2] EN ISO 4063:2020: Welding, brazing, soldering, cutting, mechanical joining and adhesive bonding – Nomenclature of processes and reference numbers, objavljen: 12/2020;
- [3] Manufacturing Guide: <https://www.manufacturingguide.com/en>, (dokument pregledan 03.03.2021);
- [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] Mijajlović Miroslav: Tehnologija zavarivanja 1, Univerzitet u Nišu, Mašinski fakultet Niš, ISBN 978-86-6055-089-9, 2017;
- [7] Autorizovana predavanja na kursu za međunarodne inženjere zavarivanja IWE, Mašinski fakultet Niš, 2009-2021.

4 POSTUPCI ZAVARIVANJA PRITISKOM

Pojam „postupci zavarivanja pritiskom” odnosi se na grupu postupaka zavarivanja istorodnih ili raznorodnih delova u nerazdvojive (monolitne) celine, primarno usled dejstva mehaničke energije (mehaničke sile, odnosno, sile pritiska). Prilikom zavarivanja moguća je primena još nekog vida „pomoćne” energije (npr. toplotna energija), ali se zavarivanje dominantno vrši dejstvom mehaničke energije.

Mehanička energija za zavarivanje se dobija transformacijom nekog drugog vida energije: električne energije, hemijske energije ili, čak, toplotne energije.

Postupci iz ove grupe su međusobno različiti, ali, zajedničko za sve postupke zavarivanja pritiskom je da ne dolazi do značajnijeg topljenja osnovnog metala i ne koriste se dodatni materijali (osim u nekim specijalnim slučajevima).

Većina postupaka zavarivanja pritiskom nastala je sredinom dvadesetog veka ili kasnije, iako su osnovni principi pojedinih postupaka nastali još u bronzano doba (npr. zavarivanje pritiskom na hladno).

Prema SRPS EN ISO 4063:2021 [1], postupci zavarivanja pritiskom klasifikovani su kao osnovna grupa ISO 4063 – 4 [2] i ovoj grupi pripadaju:

- Postupci zavarivanja ultrazvukom, klasifikovani kao ISO 4063 – 41,
- Postupci zavarivanja trenjem, klasifikovani kao ISO 4063 – 42,
- Postupci zavarivanja trenjem sa mešanjem, klasifikovani kao ISO 4063 – 43,
- Postupci zavarivanja velikom količinom mehaničke energije, klasifikovani kao ISO 4063 – 44,
- Postupci difuzionog zavarivanja, klasifikovani kao ISO 4063 – 45,
- Postupak gasno-pritisnog zavarivanja, klasifikovan kao ISO 4063 – 47,
- Postupci hladnog zavarivanja pritiskom (postupci zavarivanja pritiskom „na hladno”),

klasifikovani kao ISO 4063 – 48, i

- Postupci toplog zavarivanja pritiskom (postupci zavarivanja pritiskom „na toplo”), klasifikovani kao ISO 4063 – 49.

Ovako „mladi” i specifični postupci zavarivanja, svoju primenu su vrlo brzo našli u tehnici i industriji. Po tome prednjače Severna Amerika i Azija. Međutim, u Evropi, a samim tim i u Srbiji, većina ovih postupaka se smatra „egzotičnim” postupcima zavarivanja i samo marginalno se primenjuju.

Većina postupaka zavarivanja iz grupe 4 se uspešno primenjuje za zavarivanje metala, polimera, kompozitnih materijala i keramike.

4.1 Postupci zavarivanja ultrazvukom

Postupci zavarivanja ultrazvukom (sonično ili ultrazvučno zavarivanje) su grupa postupaka spajanja delova sa delimičnim topljenjem osnovnog materijala (zavarivanje u čvrstom stanju). Energija neophodna za zavarivanje potiče od (visokofrekventnih, ultrazvučnih) akustičnih vibracija koje se primenjuju lokalno na delovima koji se drže priljubljeni čvrsto jedan uz drugi.

Ultrazvuk predstavlja zvučni talas, odnosno, zvuk sa frekvencijama koje premašuju gornji prag sluha kod čoveka. Granica čulnosti čoveka se razlikuje od osobe do osobe, ali, opšte prihvaćeni gornji prag ljudskog sluha je 20 kHz pa se i ultrazvuk definiše kao zvučni talas frekvencije 20 kHz ili više. Za razliku od čoveka koji ne može da registruje ultrazvuk, neke životinje to mogu.

Ultrazvučno zavarivanje se dominantno primenjuje za zavarivanje delova izrađenih od polimera (plastike i najlona), ali se postupak primenjuje i za zavarivanje tankih čeličnih limova, kao i pinova na električnim kolima.

Osnovne prednosti postupaka zavarivanja ultrazvukom su minimalni uticaj na osnovni materijal, dobar je kvalitet šava,

nema zone uticaja toplote, ali je uspešna primena moguća samo na tankim delovima.

Istorija postupka

Prva istraživanja ultrazvuka pripisuju se Pitagori¹ koji je dao matematički opis vibracija kod gudačkih instrumenata, pominjući da lira „...pored lepih zvukova, u kojima se uživa, proizvodi zvuke koje čovek ne može da čuje” [3]. Međutim, prvi uređaj koji namenski proizvodi ultrazvuk, nastao je tek 1893. godine. To je Galtonova pištaljka, uređaj kojim se meri prag čulnosti. Fransis Galton² je ovaj uređaj inicijalno koristio da dokaže da mnoge životinje čuju „bolje” nego ljudi. Godine 1917, Pol Lengevin³ je pokušao da primeni ultrazvuk za otkrivanje nemačkih podmornica pod vodom. Iako je taj pokušaj bio neuspešan nešto kasnije je, saglasno Lengevinovim idejama, razvijen prvi sonar [6]. Bio je to prvi složeniji tehnički uređaj koji koristi ultrazvuk.

Sa istraživanjem mogućnosti primene ultrazvuka za zavarivanje počelo se tek nakon Drugog svetskog rata. Sa pedesetim godinama dvadesetog veka započinje se ozbiljnija primena plastičnih materijala pa je započelo istraživanje metoda za spajanje različitih plastičnih delova. Tako su prva uspešna zavarivanja plastike ultrazvukom sprovedena početkom šezdesetih godina dvadesetog veka. Amerikanci Robert Solof⁴ i Sejmur Linzli⁵ su 1963. godine prijavili prvi patent koji se odnosi na „metodu soničnog zavarivanja termoplastičnih (krutih) materijala”. Patent je odobren 21.12.1965. godine [10].

Do otkrića ultrazvučnog zavarivanja, došlo je slučajno: ultrazvučnim uređajem

ispitivani su tanki plastični filmovi pre pakovanja u kutije. Prilikom slučajnog dodira dva filma sa uređajem došlo je do trenutnog spajanja filмова. Uvidevši potencijal ovog slučajnog događaja, Solof je ubrzo započeo istraživanja. Za samo godinu dana, razvijena je prva presa za zavarivanje, a postupak je patentiran za dve godine. Ubrzo je započela proizvodnja komercijalnih uređaja za sonično zavarivanje plastike [11]. Nakon toga, primena ultrazvučnog zavarivanja masovno se primenjuje za proizvodnju igračaka, automobila, medicinske opreme itd. Trenutno najpoznatiji primer primene postupka zavarivanja ultrazvukom je kod tačkastih ivičnih spojeva (preklopa) hirurških i običnih maski (slika 4.1).



Slika 4.1 Tačkasti preklopni spojevi maske izrađeni su ultrazvučnim zavarivanjem [7]

Princip rada, parametri zavarivanja i oprema za zavarivanje

Kako se ultrazvučnim zavarivanjem najčešće spajaju mali/tanki termoplastični delovi, sam uređaj, pribor i oprema za zavarivanje su specijalizovani za takve uslove zavarivanja – otporni su na toplotu, lagani su, vrlo precizni i pouzdani.

Ultrazvukom se najčešće zavaruju pločasti delovi, u preklopljenom položaju, tačkasto ili šavno, i uvek bez dodatnog materijala [12].

Izvor vibracija je kod svih postupaka ultrazvučnog zavarivanja isti – električna energija se, pomoću energetskog pretvarača i sonotrode (vibratora) pretvara u vibracije.

¹ Grč. Πυθαγόρας (~570. p.n.e – ~495. p.n.e), grčki filozof [3].

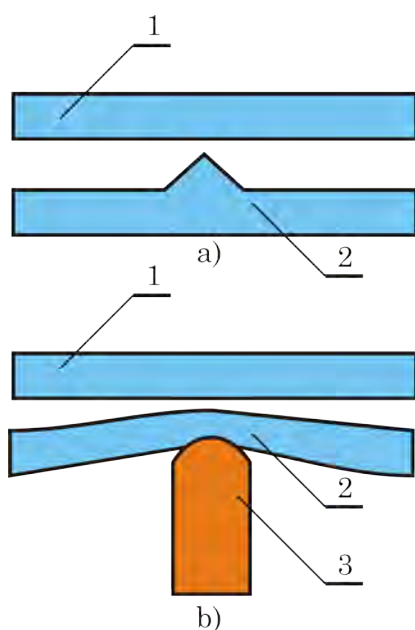
² Eng. Francis Galton (16.02.1822–17.01.1911.), izumitelj i naučnik iz Engleske [4].

³ Fra. Paul Langevin (23.01.1872–16.12.1946.), fizičar iz Francuske [5].

⁴ Eng. Robert Soloff, osnivač kompanije „Sonics and Materials Inc.” koja se bavi proizvodnjom ultrazvučnih uređaja od 1969. godine [8].

⁵ Eng. Seymour Linsley, kolega Roberta Solofa u kompaniji „Branson Instruments” [9].

Osnovni parametri zavarivanja ultrazvukom su brzina zavarivanja, sila pritiska kojom alat deluje na radne komade, frekvencija i amplituda primenjenog zvučnog talasa, kao i vreme iskivanja šava. Tipične frekvencije zvuka koje emituje sonotroda su 15 kHz, 20 kHz, 30 kHz, 35 kHz, 40 kHz, 70 kHz i 100 kHz, pri čemu se frekvencija zvuka bira saglasno debljini materijala koji se zavaruje (za veće debljine materijala potrebna je viša frekvenca zvuka). Maksimalne debljine koje se komercijalno zavaruju ultrazvukom su 1 mm za aluminijum i druge obojene metale, odnosno, 2,5 mm za polimere [15].



*Slika 4.2 Inicijalni kontakt radnih komada:
1 – nedeformisani radni komad, 2 – deformisani
radni komad, 3 – profilisani valjak; a – varijanta sa
pripremljenom izbočinom, b – varijanta sa
profilisanim valjkom [15]*

Do zavarivanja radnih komada dolazi usled lokalnog omekšavanja i delimičnog topljenja radnih komada, uz dejstvo sile pritiska F . Energija koju nose ultrazvučne vibracije se dalje prenosi na čestice (atome, molekule) u radnim komadima. One je apsorbuju i počinju intenzivnije da osciluju oko svojih ravnotežnih položaja, što za rezultat ima zagrevanje radnih komada. Zagrevanje je intenzivno, ali je veoma lokalno i ograničeno je samo na materijal radnih komada obuhvaćen alatom. Za vrlo kratko vreme ($\sim 0,1$ s) materijal radnih komada se

zagreje, lokalno istopi, zavari i ohladi do početne temperature.

Vrlo važan detalj vezan za postupak zavarivanja ultrazvukom je postojanje vrlo malog inicijalnog kontakta između radnih komada kako bi se izvelo brzo zavarivanje. Ovakav kontakt se ostvaruje izradom izbočina (slika 4.2, a), na jednom ili na oba radna komada, ili profilisanjem donjeg valjka i zatezanjem donjeg radnog komada preko njega (slika 4.2, b), što je znatno ređe izvođenje.

Prednosti i nedostaci

Osnovne prednosti postupka zavarivanja ultrazvukom jesu brzina zavarivanja i nikakav uticaj na osnovni materijal van mesta zavarivanja (nema zone uticaja toplote, nema slabljenja/ojačavanja materijala u okolini šava, nema promene tvrdoće, čvrstoće i slično). Takođe, postupak je vrlo lako upravljiv i pogodan je za automatizaciju.

Nedostaci postupka nisu brojni, ali nisu zanemarivi:

- Ograničena je primena postupka sa aspekta materijala, dimenzija radnih komada, međusobnog položaja radnih komada,
- Neophodna je visoka čistoća površina radnih komada i alata,
- Visoka je cena pribora i opreme za zavarivanje.

Primena postupka

Šavovi dobijeni ultrazvučnim zavarivanjem su, po svojim osnovnim osobinama, uporedivi sa spojevima koji su zalepljeni. Njihova prednost u odnosu na zalepljene spojeve je mogućnost primene u veoma agresivnim i sterilnim sredinama, kao što su medicinske sale, kisele sredine itd. Postupak se osim za zavarivanje „plastike”, primenjuje za zavarivanje tankih metalnih provodnika (pinova) na procesorima ili matičnim pločama računara i slično.

Postupci ultrazvučnog zavarivanja svoju primenu nalaze i u industriji malih i preciznih komponenti, u avioindustriji, ali najveća

primena je ipak u industriji pakovanja (zavarivanje kesa i ambalaže).

Podela, klasifikacija i standardizacija postupka

Postoji suštinska podela postupaka zavarivanja ultrazvukom na šavni i tačkasti postupak, zatim podela na postupke zavarivanja metala, termoplasta, nekih duroplasta, i podela postupaka na tople i hladne.

Prema standardu EN ISO 4063:2020 [2], postupci zavarivanja ultrazvukom su klasifikovani kao grupa ISO 4063 – 41 kojoj pripadaju sledeći postupci:

- Postupak toplog zavarivanja ultrazvukom (ISO 4063 – 411),
- Postupak tačkastog zavarivanja ultrazvukom (ISO 4063 – 412),
- Postupak šavnog zavarivanja ultrazvukom (ISO 4063 – 413).

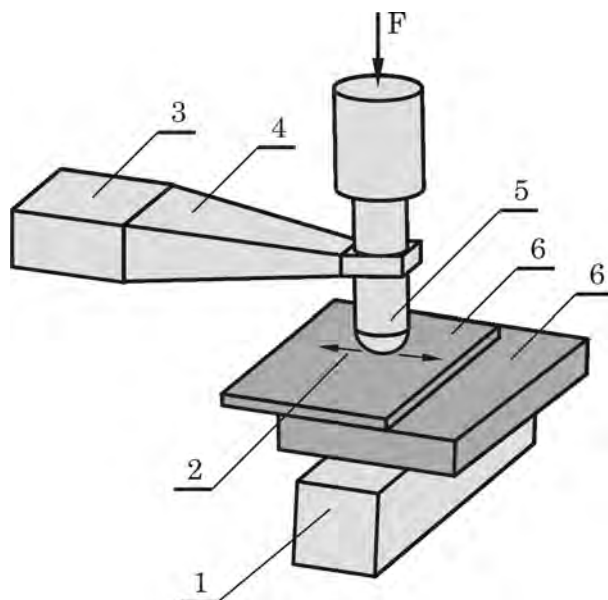
4.1.1 Postupak toplog zavarivanja ultrazvukom

Ovaj postupak zavarivanja odlikuju zavarivanje tanjeg za deblji deo pri čemu je deblji deo zagrejan i/ili se greje tokom zavarivanja.

Preklopljeni radni komadi (slika 4.3, pozicija 6), postavljaju se između podložne ploče (slika 4.3, pozicija 1) i alata (slika 4.3, pozicija 5). Podložna ploča je topla (ona je grejno telo) i kondukcijom zagreva deblji radni komad.

Alat prenosi ultrazvučnu vibraciju (slika 4.3, pozicija 2) sa sonotrode (slika 4.3, pozicija 3) na radne komade (slika 4.3, pozicija 6). Sonotroda generiše akustičnu vibraciju pod dejstvom jednog ili više piezoelektričnih pretvarača (slika 4.3, pozicija 3) koji električnu energiju izvora struje pretvaraju u mikro oscilacije (mehaničku energiju), koje sonotroda superponira i prenosi alatu za zavarivanje.

Atomi radnih komada ispod alata osciluju vrlo intenzivno i usled toga dolazi do omekšavanja radnih komada. Dejstvo sile pritiska F dovodi do iskivanja šava.



Slika 4.3 Postupak toplog zavarivanja ultrazvukom: 1 – topla podložna ploča, 2 – ultrazvučna vibracija, 3 – pretvarač, 4 – sonotroda, 5 – vibracioni alat, 6 – radni komadi [13, 14]

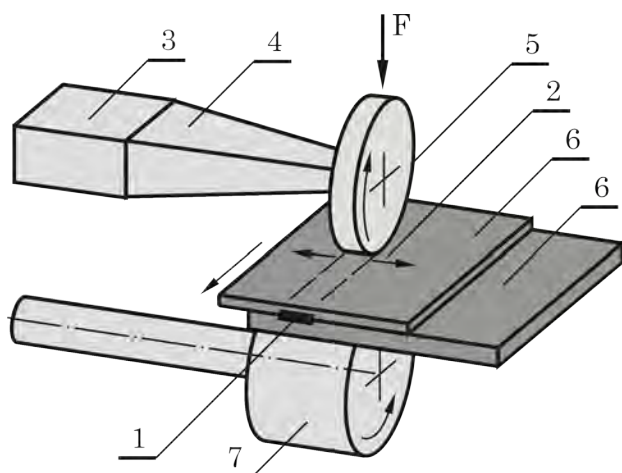
Postupak toplog zavarivanja ultrazvukom (ISO 4063 – 411) je dominantno tačkasti postupak zavarivanja (analogno tačkastom postupku zavarivanja električnim otporu), ali je u, specijalnom izvođenju, moguća izrada kvazi-kontinualnih šavova (zavarivanjem velikog broja tačaka jednu do druge).

4.1.2 Postupak tačkastog zavarivanja ultrazvukom

Iako je postupak 411 tačkasti, standard EN ISO 4063:2020 [2] predviđa poseban postupak tačkastog zavarivanja ultrazvukom (ISO 4063 – 412). Razlike postupka 412 u odnosu na postupak 411 su: veća produktivnost (veća brzina zavarivanja), zavarivanje bez zagrevanja (nema grejača), i zavarivanje se izvodi samo na tankim, preklopljenim pločastim delovima.

4.1.3 Postupak šavnog zavarivanja ultrazvukom

Alatom, prikazanim na slici 4.4, primarno se vrši šavno zavarivanje ultrazvukom (ISO 4063 – 413) ali je izvodljivo i tačkasto ultrazvučno zavarivanje (ISO 4063 – 412).



Slika 4.4 Postupak šavnog zavarivanja ultrazvukom: 1 – završeni šav, 2 – ultrazvučna vibracija, 3 – pretvarač, 4 – sonotroda, 5 – vibracioni alat, 6 – radni komadi, 7 – osloni valjak; retuširana slika preuzeta iz standarda [13, 14]

Princip rada uređaja za zavarivanje je istovetan kao kod postupka 411. Preklopljeni radni komadi (slika 4.4, pozicija 6), postavljaju se između valjaka koji vrše zavarivanje). Donji valjak (slika 4.4, pozicija 7) je osloni (podložni) valjak dok je gornji valjak (slika 4.4, pozicija 5) pritisni valjak. On je, istovremeno, alat koji pokreće radne komade i vrši zavarivanje. Gornji valjak prenosi ultrazvučnu vibraciju (slika 4.4, pozicija 2), koju emituje sonotroda (slika 4.4, pozicija 3), na radne komade (slika 4.4, pozicija 6). Sonotroda generiše akustičnu vibraciju pod dejstvom jednog ili više piezoelektričnih pretvarača (slika 4.4, pozicija 3) koji električnu energiju izvora struje pretvaraju u mikro oscilacije, koje sonotroda superponira i prenosi alatu za zavarivanje.

Postupak se primenjuje za zavarivanje tankih plastičnih delova, folija i slično.

Za kontinualno zavarivanje (formiranje kontinualnog šava) je neophodan sinhronizovan rad sonotrode i sistema za pokretanje alata i radnih komada. Samim tim se postiže veća upošljenost i habanje alata, veće je angažovanje sonotrode, pa je povećana potrošnja energije tokom zavarivanja. U odnosu na postupak tačkastog zavarivanja (ISO 4063 – 412), deformacije radnih komada i šava su veće (ali su i dalje zanemarive).

Postupak šavnog ultrazvučnog zavarivanja se masovno primenjuje u industriji

pakovanja (za izradu plastičnih kesa, vakuum folija i slično).

4.2 Postupci zavarivanja trenjem

Postupci zavarivanja trenjem predstavljaju grupu postupaka koji kao energiju aktivacije procesa zavarivanja koriste mehaničku energiju, koja se na kontaktu dva tela (usled trenja) pretvara u toplotu (kontakt generiše toplotu). Tako generisana toplota omekšava osnovni materijal, ali nije dovoljna da ga topi (makar ne u značajnijoj meri) i tek u sadržaju sa silom pritiska, omekšali materijal oba tela u kontaktu se oblikuje u šav.

Osnovni postupci zavarivanja trenjem se najčešće primenjuju za sučeono zavarivanje osnosimetričnih, vitkih delova, ali postoje i postupci zavarivanja trenjem koji se koriste za preklopno spajanje limova.

Istorija postupka

Prvi patent vezan za rotaciono zavarivanje delova (cevi) trenjem prijavio je Džejms H. Bevington, 08.04.1890. godine u Sjedinjenim Američkim Državama [16].

Prema tome, istraživanja zavarivanja trenjem vršena su pre i tokom 1890. godine, (Bevingtonov postupak zavarivanja rotirajućih cevi trenjem je patentiran 13.01.1891. godine). Do masovnije primene ovog patenta (i zavarivanja trenjem uopšte) nije došlo do početka dvadesetog veka.

U periodu od 1924. do 1941. godine u Velikoj Britaniji, Nemačkoj i Rusiji je nekoliko autora patentiralo (na nacionalnom nivou) postupak linearnog zavarivanja trenjem [17]. Iako postoje neke razlike kod navedenih postupaka, suština je kod svih izvođenja ista.

Prvi zvanični zapis (patent) o komercijalno primenjenom rotacionom postupku zavarivanja trenjem u Rusiji, pripisuje se A. I. Čudikovu, strugaru-inovatoru iz Sovjetskog Saveza (SSSR). Čudikov je 1956. godine na strugu sučeono zavarivao šipku od poboljšanog ugljeničnog čelika za šipku od običnog konstrukcionog čelika. Međutim, ne može da se potvrdi da je

Čudikov zaista prvi izveo zavarivanje trenjem [18]. Postoji tvrdnja da je prvo zavarivanje trenjem u Rusiji izvedeno još 1899. godine [18], ali autor knjige nije došao do drugog pisanog traga o tome.

Od 1959. godine, neke zemlje Zapadne Evrope, Sjedinjene Američke Države i Rusija aktivno istražuju mogućnosti primene trenja u tehnologiji zavarivanja. Iste godine je „KUKA AG” u Nemačkoj proizvela prvu rotacionu mašinu za zavarivanje trenjem, čuvenu „RS300” [19].

„Fabrika reznog alata” iz Čačka je već 1962. godine uspešno zavarila trenjem telo burgije (izrađeno od konstrukcionog čelika) za rezni deo burgije (izrađen od brzoreznog, alatnog čelika) [20]. Prednost ovakve konstrukcije je žilavo telo burgije a vrlo tvrd rezni deo burgije (što je teško izvodivo ako je burgija izrađena od samo jednog materijala). Spajanje drške i reznog dela se izvodi za manje od 20 s, a spojevi su 100% bez grešaka. Čačani su sa dobrom praksom proizvodnje ovakvih alata nastavili do današnjih dana.

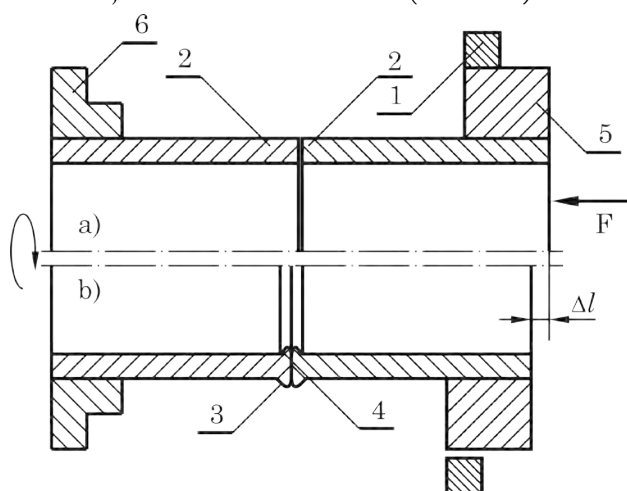
Princip rada, parametri zavarivanja i oprema za zavarivanje

Zavarivanje trenjem podrazumeva tri činjenice: postojanje kontakta dva tela, relativno kretanje tela jedno u odnosu na drugo i određeno vreme trajanja kontakta pod dejstvom sile pritiska.

Jedan tipičan (sučeoni) postupak zavarivanja cevi trenjem prikazan je na slici 4.5. Mašina na kojoj se vrši zavarivanje (na primer, strug) ima saosno postavljenu pogonsku steznu glavu (slika 4.5, pozicija 6) sa držačem cevi (slika 4.5, pozicija 5). Leva cev (slika 4.5, pozicija 2) je postavljena u steznu glavu i može slobodno da rotira (obrotni moment M , broj obrtaja n) ali ne može da se kreće duž svoje ose. Desna cev je pričvršćena u držaču (slika 4.5, pozicija 5). Sklop cevi i držača je fiksiran kočnicom (slika 4.5, pozicija 1), ali je, po potrebi, pokretan i po osi i oko ose rotacije. Cevi koje se zavaruju moraju da budu dovoljno krute kako se ne bi izvijale tokom zavarivanja [21].

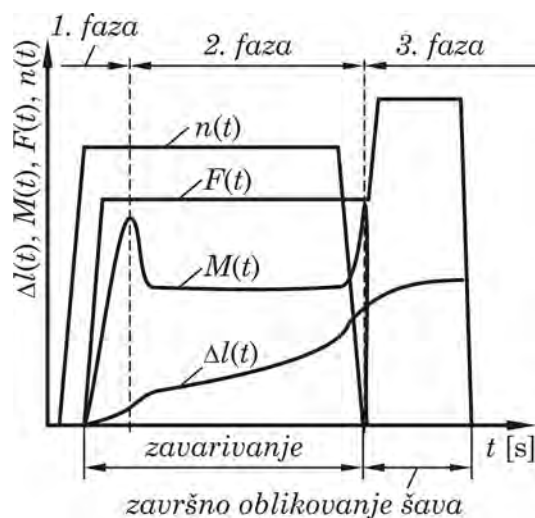
U početnom položaju (slika 4.5, a),

stezna glava sa levom cevi rotira oko svoje ose. Desna cev je fiksirana u držaču i ne može da rotira oko svoje ose, ali, usled dejstva sile pritiska F , svojim čelom naleže na čelo leve cevi. Prema tome, cevi se dodiruju samo preko svojih čela, i pri tom se leva cev kreće dok desna cev miruje. Zbog trenja, čela cevi počinju da se zagrevaju, te materijal u zoni kontakta omekšava. Sa omekšavanjem materijala, sila pritiska F pomera desnu cev ka levoj a omekšani materijal cevi se istiskuje i formira venac mekog materijala po obodu – okovratnik (slika 4.5, pozicije 3 i 4). Nakon određenog vremena, kočnica se isključuje i desna cev, uhvaćena okovratnikom, nastavlja da rotira zajedno sa levom cevi, ali se sila pritiska F na cevi drži još neko vreme. Okovratnik i čela cevi se hlade, i cevi ostaju zavarene (slika 4.5, b). Nakon zavarivanja, okovratnik se uklanja nekom od metoda obrade metala, a cevi ostaju zavarene „čelom na čelo”. Važno je napomenuti da formiranje okovratnika/zavarivanje cevi podrazumeva skraćivanje cevi za vrednost Δl (slika 4.5).



Slika 4.5 Tipičan postupak zavarivanja cevi trenjem, a – početak zavarivanja, b – kraj zavarivanja, 1 – kočnica, 2 – cevi, 3 – istisnuti materijal ka spolja, 4 – istisnuti materijal ka unutra, 5 – držač desne cevi, 6 – stezna glava – pogon [21]

Osnovni parametri zavarivanja kod tipičnog postupka zavarivanja trenjem su: broj obrtaja alata, sila pritiska, obrtni moment, skraćivanje cevi i vreme trajanja zavarivanja. Primer parametara zavarivanja i njihov karakter tokom vremena prikazani su na slici 4.6.



Slika 4.6 Primer parametara zavarivanja trenjem tokom zavarivanja

U zavisnosti od materijala koji se zavaruju, broj obrtaja varira od 2 min^{-1} (kod mekih materijala) do 60 min^{-1} (kod tvrdih materijala). Sila pritiska treba da bude dovoljna kako bi se ostvario kontaktni pritisak od 20 MPa do 250 MPa, saglasno tvrdoći i čvrstoći materijala koji se zavaruju. Vreme trajanja zavarivanja iznosi do 50 s za prečnike cevi od 200 mm, što se smatra granicom tehnološki i ekonomski isplativog prečnika zavarivanja (obično se komercijalno zavaruju čelične šipke punog preseka do 50 mm). Skraćenje cevi tokom zavarivanja nije upravljivi parametar zavarivanja (zavistan je od vremena zagrevanja i sile pritiska), a vrednost skraćjenja cevi bi trebala da bude od 20% do 50% prečnika cevi [21].

Generisanje toplote i faze zagrevanja materijala trenjem

Do zagrevanja radnih komada dolazi usled dejstva trenja na kontaktu lica cevi koje se kreću jedna u odnosu na drugu⁶. Tom prilikom dolazi do promena triboloških parametara kontakta: menja se hrapavost, veličina realnog kontakta, kontaktni pritisak, koeficijent trenja, pojačava se (ili slabi) uticaj adhezije i kohezije, dolazi do pojačanog klizanja materijala, ali i do smicanja slojeva

materijala. U takvoj situaciji, u inicijalnom trenutku, mehanička energija dovedena cevi koja rotira se od 80% do 85% pretvara u toplotu. Generisanje toplote na kontaktu se događa usled pojave trenja i deformisanja materijala, gde je trenje dominantan vid transformacije energije u toplotu [22].

Generisanje toplote trenjem je intenzivno i brzo, međutim, količina generisane toplote i maksimalna temperatura koju tela u kontaktu mogu da dostignu su ograničeni principom samoregulacije „frikcionih pojava” [23].

U početnom trenutku, delovi koji se zavaruju su „hladni”, koeficijent trenja kontakta je maksimalan i delovi su čvrsti. Sa pokretanjem jednog ili oba dela, mehanička energija se transformiše u toplotu a tela zagrevaju. Sa zagrevanjem, tela omekšavaju, pa se i stanje kontakta menja – to nije više kontakt dva čvrsta-tvrda tela već kontakt dva mekša tela, te je koeficijent trenja niži. Samim tim, niži koeficijent trenja dovodi do stanja da se manje mehaničke energije pretvara u toplotu, delovi se manje greju (uslovno rečeno – hlade se), pa se njihove površine vraćaju u prvobitno stanje – očvršćavaju. Koeficijent trenja na kontaktu opet raste, više mehaničke energije se pretvara u toplotu i ciklus se nastavlja.

Ovakvim vidom samoregulacije procesa, maksimalno se dostiže do 75%-85% temperature topljenja materijala u kontaktu sa nižom tačkom topljenja [18]. Parametri zavarivanja nemaju nikakav uticaj na vrednost maksimalno ostvarive temperature – do te temperature se podešavanjem parametara zavarivanja dolazi brže ili sporije, ali, ona nikad ne prelazi granicu samoregulacije [24].

Razlikuju se tri faze zagrevanja, odnosno, zavarivanja trenjem (slika 4.5).

Prva faza je vezana za sam početak – tada hrapavost ima značajan uticaj na veličinu kontaktne površine, postoje mikro i makro nečistoće na kontaktu i delovi su hladni. Moment trenja je tada jednak obrtnom momentu stezne glave. Nakon uspostavljanja kontakta, on brzo pada na svoj minimum. Tada započinje intenzivno zagrevanje kontakta (radnih komada).

⁶ Eksperimentalna istraživanja pokazuju da se generisanje toplote na kontaktu čelik-čelik dešava u zoni kontakta, na površini i ispod nje, do dubine materijala od maksimalno 0,7 mm [22].

Druga faza je vezana za početak stvaranja okovratnika – po obodu delova koji se spajaju se izlučuju nečistoće i najmekši deo materijala sa kontakta. Moment trenja raste ka svom lokalnom maksimumu, ali prestaje intenzivno zagrevanje delova.

Tokom treće faze sila trenja na kontaktu gotovo da ne postoji – postignut je maksimum ostvarive temperature i metal na kontaktu je omekšao. Metal se nije otopio, ali je moguća pojava malih ostrva istopljenog metala duž poprečnog preseka (usled prisustva nečistoća koje se tope na višim temperaturama nego metal, na mestu kontakta nečistoća, naglo, ali vrlo kratkotrajno, dolazi do povišenja temperature preko temperature samoregulacije metala). Temperatura poprečnog preseka je prilično ujednačena te omekšani istisnuti materijal formira lep okovratnik i to je optimalan trenutak za završetak zavarivanja (tada je poželjno deaktivirati kočnicu).

Prednosti i nedostaci

Osnovne prednosti postupaka zavarivanja trenjem su:

- Postupci zavarivanja trenjem su grupa postupaka zavarivanja u čvrstom stanju – ne dolazi do značajnijeg topljenja osnovnog materijala. Ova prednost, u kombinaciji sa kratkotrajnim ciklusom zavarivanja, dovodi do male zone uticaja toplote i ne dolazi do nekontrolisanog rasta zrna u metalu šava. Zbog svega toga, postupci su primenjivi za zavarivanje finostrukturnih čelika, koji su visoke čvrstoće i namenjeni posebnim namenama.
- Izraženi efekat samoregulacije omogućava zavarivanje raznorodnih materijala koji imaju različite temperature topljenja (npr. aluminijum i legirani čelik). Ovako dobijeni šavovi su strukturni (prenose opterećenje).
- Zbog masivnog tečenja omekšalog materijala ka obodu spoja, izraženo je samočišćenje materijala te su nečistoće, šljaka, korozija i slično potisnuti u okovratnik koji nije važan za nosivost zavarenog spoja.
- U odnosu na druge postupke zavarivanja, zavarivanje trenjem troši manje

energije po zapremini šava, ne proizvodi štetna isparenja i srednje je produktivan.

Međutim, postupak prate i brojni nedostaci.

- Kako je ranije napomenuto, trenjem se sučeono zavaruju osnosimetrični delovi u radioničkim uslovima. Samim tim, zavarivanje je uslovljeno statičnom mašinom na kojoj se sprovodi zavarivanje.
- Cena opreme i pribora za zavarivanje je visoka. Za zavarivanje su neophodni jaki pogonski sistemi, stezači, vođice, pritiskači i slično, što značajno komplikuje postupak zavarivanja.
- Postupak zavarivanja trenjem, primenjen na određeni materijal, operativan je u relativno uskom opsegu parametara zavarivanja. Samim tim, zavarivanje novih materijala zahteva opsežna i dugotrajna istraživanja optimalnih parametara zavarivanja.

Podela, klasifikacija i standardizacija postupka

Postupci zavarivanja trenjem su, prema SRPS ISO 4063:2021 [1], klasifikovani kao ISO 4063 – 42. Zavisno od pojedinih osobenosti, postupci zavarivanja trenjem se dele na:

- Postupak zavarivanja trenjem sa direktnim pogonom, klasifikovan kao ISO 4063 – 421,
- Postupak zavarivanja trenjem sa zamajcem, klasifikovan kao ISO 4063 – 422,
- Postupak zavarivanja vitkih delova na ploču trenjem, klasifikovan kao ISO 4063 – 423,
- Postupak linearnog zavarivanja trenjem, klasifikovan kao ISO 4063 – 424,
- Postupak radijalnog zavarivanja trenjem, klasifikovan kao ISO 4063 – 425, i
- Postupak orbitalnog zavarivanja trenjem klasifikovan kao ISO 4063 – 426.

Postupak linearnog zavarivanja je jedini predstavnik translatornih postupaka zavarivanja trenjem dok su svi ostali postupci rotacionih postupaka zavarivanja trenjem.

4.2.1 Postupak zavarivanja trenjem sa direktnim pogonom

Postupak zavarivanja trenjem sa direktnim pogonom (ISO 4063 – 421) je osnovni postupak zavarivanja trenjem (nastao je prvi). Šema ovog postupka prikazana je na slici 4.5 a princip rada je objašnjen u uvodnom poglavlju o zavarivanju trenjem.

Kod ovog postupka zavarivanja trenjem, pogon je konstantan, direktan a energija pogona je 100% usmerena na radne komade.

Prekidanje zavarivanja vrši se deaktiviranjem kočnice/pogona – po isključenju, radni komadi nastavljaju da se slobodno okreću do isključenja pogonskog sistema radne mašine.

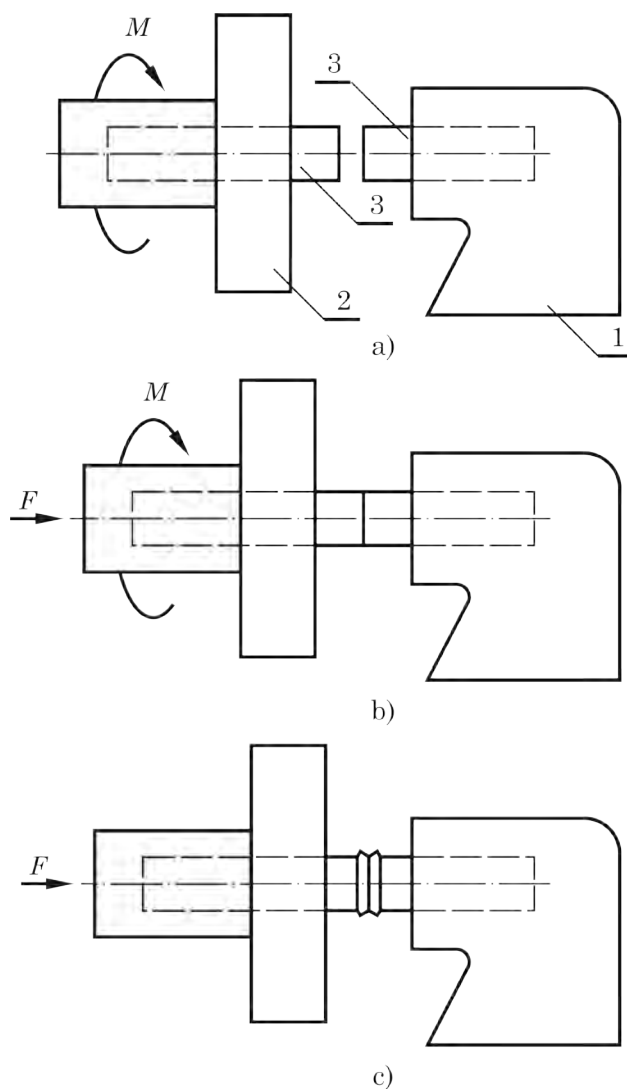
Ovakva direktna i kruta veza pogona i radnih komada nosi određeni rizik od prekoračenja trajanja ciklusa zavarivanja usled sporog odziva kočnice.

4.2.2 Postupak zavarivanja trenjem sa zamajcem

Postupak zavarivanja trenjem sa zamajcem (ISO 4063 – 422) ili inercioni postupak zavarivanja trenjem, je suštinski istovetan postupku ISO 4063 – 421. Jedina razlika je postojanje zamajca na pokretnom radnom komadu kao akumulatora energije.

Kao i kod postupka 421, jedna šipka je pokretna dok je druga nepokretna (slika 4.7, pozicija 3). Nepokretna šipka postavlja se u steznu glavu (slika 4.7, pozicija 1), dok se pokretna šipka postavlja u pokretnu steznu glavu sa zamajcem (slika 4.7, pozicija 2).

Stezna glava sa zamajcem se u inicijalnom položaju (slika 4.7, a) povezuje na motor koji „zaleće” zamajac. Motor zamajcu predaje energiju (definisano brojem obrtaja n i obrtnim momentom M). Kada zamajac akumulira maksimalnu količinu energije, motor se odvaja od zamajca, a pod dejstvom sile pritiska F , stezna glava sa zamajcem se pomera ka nepokretnom radnom komadu i započinje frikcionni kontakt radnih komada. Tada počinje zagrevanje i zavarivanje radnih komada (slika 4.7, b). Sila pritiska F može da bude konstantnog ili promenljivog intenziteta.



Slika 4.7 Postupak zavarivanja trenjem sa zamajcem: a – zalećanje zamajca, b – zavarivanje, c – iskivavanje zavarenog spoja; 1 – nepokretna stezna glava, 2 – pokretni zamajac, 3 – radni komadi [21]

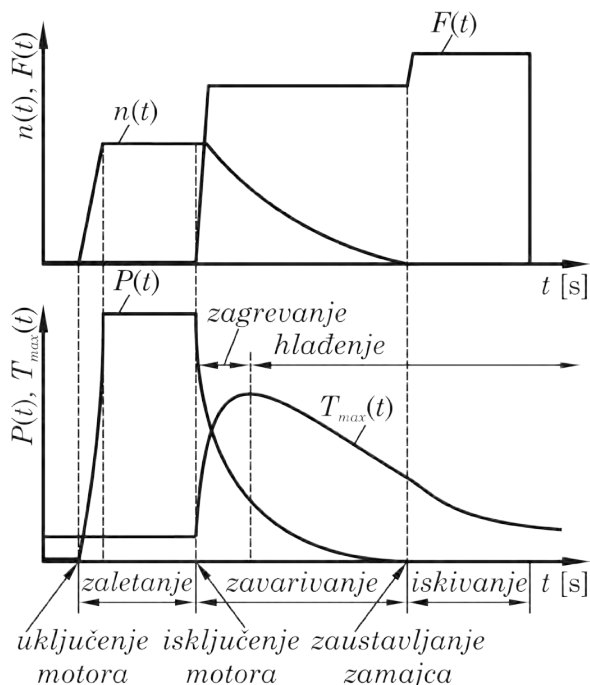
Mehanička energija akumulirana u zamajcu (snaga P) se usled dejstva trenja „troši” i pretvara u toplotu koja zagreva radne komade. Zagrejani i omekšali materijal se usled dejstva sile pritiska istiskuje na obod šipki, formira se okovratnik i vrši zavarivanje. Trošenje energije dovodi do postepenog usporjenja zamajca i posle izvesnog vremena zamajac staje.

Kod ispravno definisanih parametara zavarivanja, energija „sačuvana” u zamajcu je dovoljna da se na kontaktu generiše dovoljno toplote kako bi se radni komadi zagrevali do stanja kada je zavarivanje moguće. Posle nekog vremena, zamajac je „potrošio” gotovu svu energiju i radni komadi tada počinju da se hlade (iako se zamajac još uvek lagano kreće).

Po zaustavljanju zamajca, radni komadi su pritisnuti još neko vreme kako bi se izvršilo iskivanje šava (slika 4.7, c).

Na slici 4.8 prikazan je primer parametara inercijalnog zavarivanja trenjem, kao i količina akumulirane snage zamajca pri maksimalnoj temperaturi zavarenog spoja.

Inercijalni postupak zavarivanja funkcioniše po „mekšim” režimima u odnosu na postupak zavarivanja trenjem sa direktnim pogonom. Praktično gledano, postupak zavarivanja trenjem sa zamajcem funkcioniše bez prinude koju konstantni (direktni) pogon nosi, te je zavareni šav manje zagrejan, a samim tim ima mogućnost postizanja boljih mehaničkih osobina.



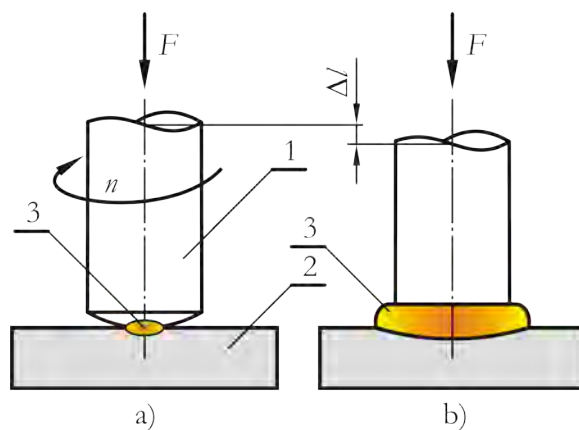
Slika 4.8 Primer parametara zavarivanja, akumulirana snaga i maksimalna temperatura šava kod postupka inercijalnog zavarivanja trenjem

Postupak 422 je primenjiv za sve materijale kao i postupak 421, ali je pre zavarivanja neophodno sprovesti proračun dimenzija i broja obrtaja zamajca (proračun zamajca) kako bi se zavarivanje uopšte izvelo.

4.2.3 Postupak zavarivanja vitkih delova na ploču trenjem

Postupak zavarivanja vitkih delova na ploču trenjem (ISO 4063 – 423) ima istu namenu kao postupak ISO 4063 – 26 iz grupe

elektrootpornih postupaka zavarivanja. Vitki deo (slika 4.9, pozicija 1, a) – zavrtanj, anker, osovinica itd, postavlja se u čeljusti radne mašine i rotira oko svoje ose brojem obrtaja n . Vitki deo se, zatim, pritiska silom F na ploču (slika 4.9, pozicija 2) i kontakt počinje da se zagreva (usled trenja). Zagrejani i omekšali materijal oba tela u kontaktu počinje formiranje metala šava (slika 4.9, pozicija 3). Kako vreme protiče, sve više materijala omekšava, i biva istisnuto na obim rotirajućeg tela pa formira okovratnik. Sa prestankom okretanja stezne glave, prestaje aktivno zavarivanje (slika 4.9, b), ali, vitki element ostaje pritisnut silom F još neko vreme kako bi se izvršilo iskivanje šava. Tokom zavarivanja, vitki deo se skraćuje za rastojanje Δl i ono mora da bude planirano pre zavarivanja [25].



Slika 4.9 Šema postupka zavarivanja trenjem vitkih delova na ploču: a – početak zavarivanja, b – završetak zavarivanja, 1 – vitki deo, 2 – ploča, 3 – metal šava

Postupak zavarivanja vitkih delova trenjem je znatno skuplji nego njegov parnjak iz grupe postupaka zavarivanja električnim otporom. Međutim, on svoju primenu nalazi u agresivnim sredinama gde je elektrootporno zavarivanje nemoguće ili je opasno: pod vodom, u eksplozivnim sredinama, ili za zavarivanje anodnih delova (na koritu brodovima, kao zaštita od korozije) [26].

Prednosti postupka zavarivanja vitkih delova trenjem su: velika brzina zavarivanja, nema unosa vodonika u metal šava, zavarivanje se događa na niskim temperaturama, mala je zona uticaja toplote i dobijaju se šavovi odličnog kvaliteta. Osnovni

nedostaci su primena samo na malim, osnosimetričnim delovima (maksimalnog prečnika 25 mm, dužine do 200 mm) i neophodna je skupa oprema koja može da obezbedi veliki broj obrtaja i veliku silu pritiska.

Poseban problem predstavlja operater zavarivanja – operater mora da bude obučen da vizuelno prepozna (prema boji metala šava) kada je zavarivanje završeno i da tada prekine postupak zavarivanja. Prema tome, za zavarivanje trenjem, neophodan je veoma iskusan zavarivač/operater zavarivanja.

Kod ovog postupka ne postoji ograničenje zavarivosti po materijalu – svi metali, u gotovo svim kombinacijama, mogu da se uspešno zavare postupkom ISO 4063 – 423 (uz napomenu da uspešno zavarivanje nije garancija visoko efikasnog šava).

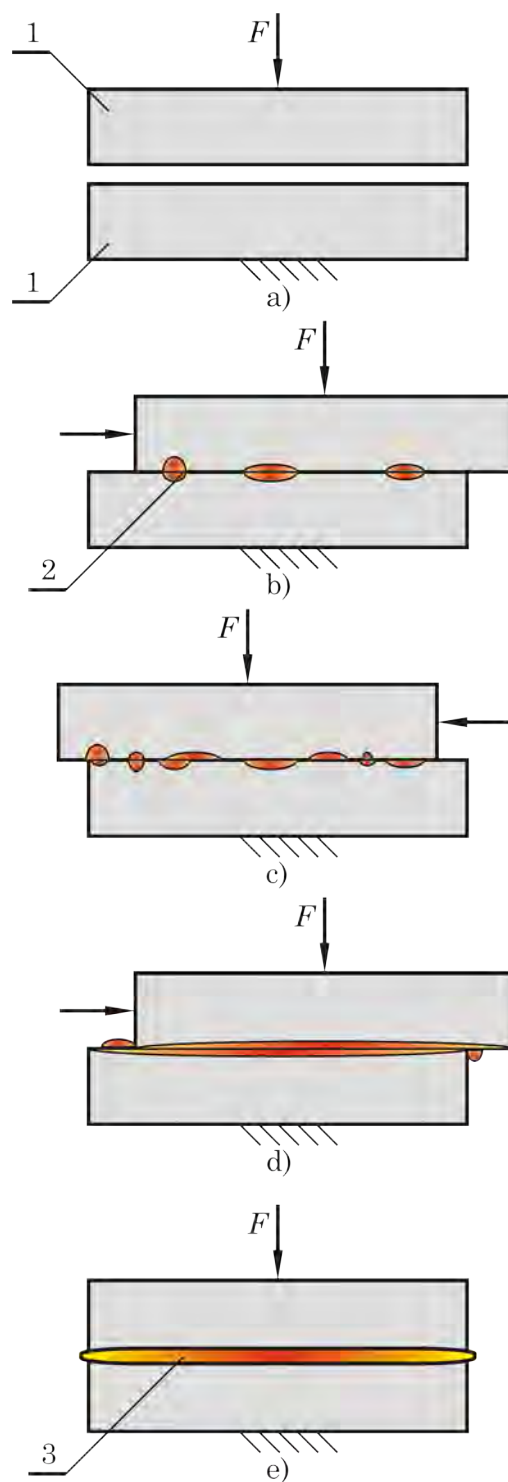
4.2.4 Postupak linearnog zavarivanja trenjem

Postupak linearnog zavarivanja limova trenjem (ISO 4063 – 424) u savremenom izvođenju je 2016. godine prvi predstavio TWI iz Velike Britanije, kao postupak zavarivanja limova od titanijuma [27]. Zavarivanje je izvršeno unutar vakuum komore kako bi se sprečila metalurška degradacija zavarenog spoja u atmosferi – što je tipična osobina izrade spojeva od titanijuma bilo kojim postupkom. Linearno zavarivanje trenjem je kasnije primenjeno za zavarivanje čelika, bakra, aluminijuma, ali ova istraživanja još uvek traju [27].

Postupak linearnog zavarivanja trenjem podseća na postupak orbitalnog zavarivanja bez rotacije pločastih delova.

Limovi/Ploče (slika 4.10, pozicija 1) postavljaju se u mašinu za zavarivanje. Donja ploča se fiksira dok se gornja postavlja u pokretnu steznu glavu mašine. Stezna glava obezbeđuje translatorno kretanje naviše-naniže i kao i kretanje levo-desno.

U inicijalnom položaju (slika 4.10, a) ploče samo naležu jedna na drugu. Nakon toga gornja ploča klizi u stranu, u odnosu na donju ploču (slika 4.10, b). Usled trenja se na kontaktu pojavljuju mala ostrva omekšalog metala (slika 4.10, pozicija 2).



Slika 4.10 Linearno zavarivanje limova trenjem: 1 – limovi, 2 – omekšali metal, 3 – metal šava, a – primicanje, b, c, d – oscilovanje gornjeg lima levo-desno, e – završetak zavarivanja, iskivanje šava

Gornja ploča se, zatim, pomera u drugu stranu, ali se neprekidno održava kontakt sa donjom pločom, što intenzivira grejanje ploča i formiranje novih ostrva (slika 4.10, b, c).

Pred kraj zavarivanja (slika 4.10, d) ostrva omekšalog metala su sjedinjena u jedan objedinjeni film, koji pokriva celu površinu

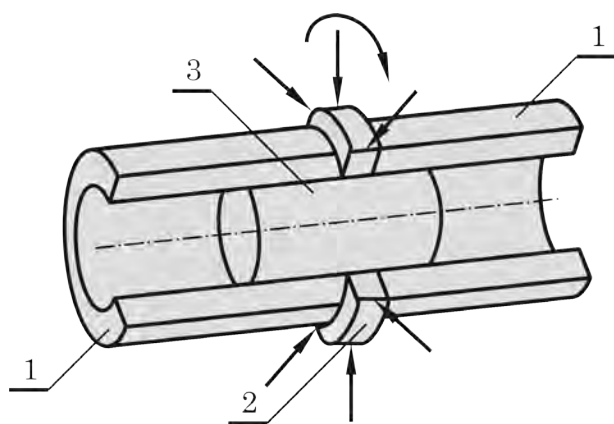
kontakta. Kretanje se zaustavlja tako da ploče leže jedna na drugoj (slika 4.10, e) kao u inicijalnom položaju, vrši se iskivanje šava, a onda sledi hlađenje i formiranje zavarenog spoja (slika 4.10, pozicija 3). Omekšali materijal se istiskuje iz zone zavarivanja, sve do prestanka kretanja i očvršćavanja metala.

Postupak linearnog zavarivanja trenjem je primenjiv na sve materijale i (teorijski posmatrano) sve debljine ploča. Osnovna prednost postupka je zavarivanje ploča velikih kontaktnih površina – što je osobina zalepljenih spojeva. Nedostataka je, još uvek, više nego prednosti: skupa, složena i glomazna oprema za zavarivanje, ograničenost primene na radioničke uslove, velika potrošnja energije, potrebna je obuka operatora zavarivanja, parametri zavarivanja nisu dovoljno istraženi itd [27].

4.2.5 Postupak radijalnog zavarivanja trenjem

Ovaj postupak je sredinom sedamdesetih godina dvadesetog veka prvi put primenjen u Velikoj Britaniji za sučeono zavarivanje cevi [21]. Klasifikovan je kao ISO 4063 – 425.

Cevi koje se zavaruju (slika 4.11, pozicija 1) se postavljaju u sučeoni položaj i pritiskaju jedna na drugu.

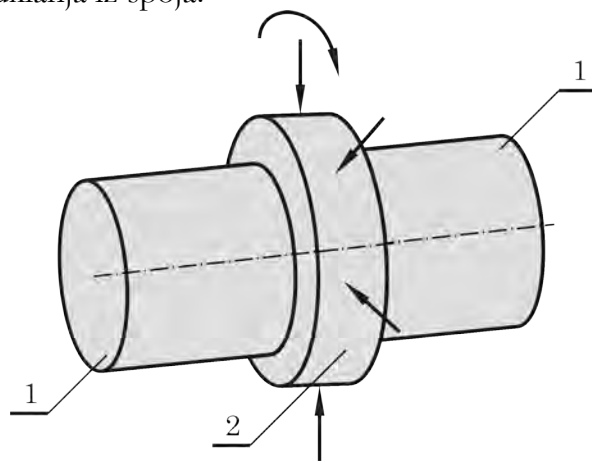


Slika 4.11 Postupak radijalnog zavarivanja cevi trenjem primenom spoljašnjeg prstena: 1 – cevi, 2 – radijalni prsten, 3 – trn [17]

Kroz cevi se provlači trn (slika 4.11, pozicija 2), prečnika koji je jednak unutrašnjem prečniku cevi. Trn se postavlja

na mesto spoja i njegova namena je učvršćenje cevi, formiranje korena i sprečavanje formiranja okovratnika unutar cevi. Sa spoljašnje strane cevi se, na mesto spoja, postavlja radijalni prsten (slika 4.11, pozicija 3). Prsten je izrađen od čelika i on je jedini pokretni deo u ovako postavljenom sistemu. Prsten rotira oko svoje ose, a usled dejstva sile pritiska sa spoljašnje strane, prsten naleže na cevi (slika 4.11).

Trenje između unutrašnje površine prstena i cevi dovodi do zagrevanja prstena i cevi. Radijalni pritisak na spoljašnju površinu prstena istiskuje omekšali materijal ka spolja – formira se okovratnik, ali je on neznatan, dok trn unutar cevi sprečava curenje materijala ka unutra. Na kraju ciklusa zavarivanja, prsten se zaustavlja, a radijalni pritisak na spoljašnji pritisak pojačava, kako bi se završilo iskivanje zavarenog spoja. Nakon hlađenja, trn se izvlači iz cevi, a cevi i radijalni prsten ostaju zavareni u jednu celinu. Ukoliko je potrebno, naknadnom mehaničkom obradom se prsten uklanja iz spoja.

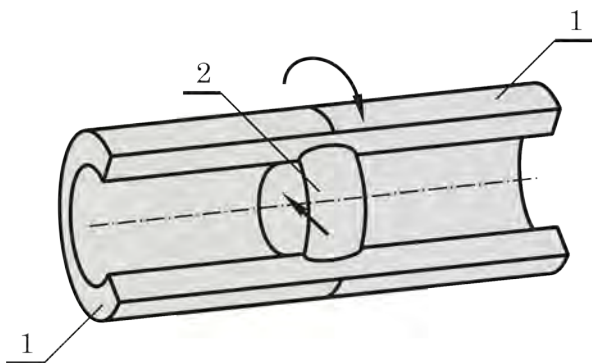


Slika 4.12 Postupak radijalnog zavarivanja šipki trenjem primenom spoljašnjeg radijalnog prstena: 1 – cevi, 2 – radijalni prsten [17]

Isti princip se primenjuje za zavarivanje šipki (slika 4.12), ali uz znatno duže vreme zaokretanja radijalnog prstena i uz primenu veće sile pritiska na prstenu. Ovako oštiji režimi zavarivanja se primenjuju kako bi se obezbedilo dovoljno zagrevanje delova i potpuni provar šipki (do same ose rotacije).

U trećoj varijanti postupka (slika 4.13), vrši se zavarivanje cevi trenjem uz pomoć unutrašnjeg radijalnog prstena. U saosno

postavljene cevi (slika 4.13, pozicija 1), uvlači se radijalni prsten sa rotacionim pogonom (slika 4.13, pozicija 2). Prsten se postavlja na mesto spoja cevi i nakon toga se započinje rotacija prstena, uz dejstvo sile pritiska na unutrašnju površinu radijalnog prstena.



Slika 4.13 Radijalno zavarivanje cevi trenjem sa unutrašnjim prstenom: 1 – cevi, 2 – radijalni prsten [21]

Prsten svojom spoljašnjom površinom naleže na cevi i usled trenja na kontaktu se zagrevaju i cevi i prsten. Zagrejani prsten se širi i vrši dodatni pritisak na cevi (utiskuje se u omekšani materijal cevi). Ciklus zavarivanja prestaje sa zaustavljanjem prstena. Nakon toga, pogonski sistem se izvlači iz cevi, a cevi i prsten ostaju da se hlade, međusobno zavareni.

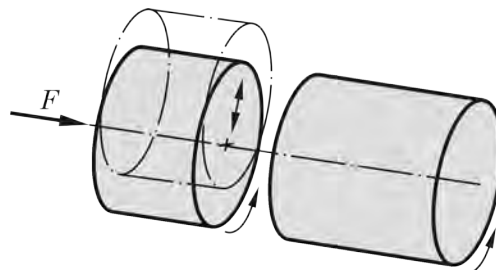
Zbog složene konstrukcije opreme za zavarivanje, sve tri varijante radijalnog postupka zavarivanja trenjem (na metalima), za gotovo 50 godina postojanja nisu odmakle dalje od faze istraživanja. Postupci radijalnog zavarivanja trenjem se uspešno primenjuju za zavarivanje plastike.

Sve tri varijante postupka se uspešno primenjuju za zavarivanje debelozidnih plastičnih cevi, u radioničkim uslovima, ali i na terenu.

4.2.6 Postupak orbitalnog zavarivanja trenjem

Orbitalno zavarivanje trenjem (ISO 4063 – 426) je specijalni slučaj postupka zavarivanja trenjem sa direktnim pogonom. Ova dva postupka se razlikuju po dva osnova: kod orbitalnog zavarivanja, moguće je izvođenje pogona na oba dela i neophodno je

izmeštanje jedne ose rotacije radnog komada u odnosu na osu rotacije drugog radnog komada (slika 4.14). Tako se, pored rotacionog kretanja, definiše i translatorno kretanje jednog radnog komada, što se svodi na (relativno) kretanje po orbiti u odnosu na drugi radni komad.



Slika 4.14 Principijelna šema orbitalnog zavarivanja trenjem [21]

Uvođenjem ovakvog složenog kretanja radnog komada, skraćuje se vreme zavarivanja, intenzivnije se formira okovratnik i lakše se zavaruju kruti materijali jer se manje zagrevaju nego pri prosto rotaciji. Međutim, uređaj za ostvarivanje orbitalnog kretanja je složen i skup, što značajno umanjuje isplativost primene ovakvog postupka zavarivanja.

4.3 Postupci zavarivanja trenjem sa mešanjem

Postupci zavarivanja trenjem sa mešanjem su još jedna grupa postupaka koji koriste trenje kao dominantni izvor energije za zagrevanje i zavarivanje radnih komada. Međutim, kako je prisutno i znatno deformisanje radnih komada prilikom zavarivanja, postupci zavarivanja trenjem nisu pridruženi „klasičnim” postupcima zavarivanja trenjem (grupa ISO 4063 – 42) već su odvojeni kao nova grupa postupaka zavarivanja trenjem uz pomoć alata (treće telo u kontaktu). Postupci zavarivanja trenjem sa mešanjem su klasifikovani kao grupa ISO 4063 – 43.

Postupci iz grupe 43 se najčešće koriste za tačkasto ili šavno, sučeono ili preklopno zavarivanje pločastih delova izrađenih od aluminijuma, obojenih metala, čelika i plastike.

Istorija postupka

Prva istraživanja postupka zavarivanja trenjem sa mešanjem sproveo je Institut za zavarivanje iz Kembridža (TWI)⁷, krajem osamdesetih godina dvadesetog veka [28]. Već 1991. godine, Vejn Tomas⁸ sa kolegama iz TWI je u Velikoj Britaniji (a novembra 1992. godine i u Americi) patentirao postupak sučeonog zavarivanja limova od aluminijuma trenjem sa mešanjem, pomoću alata za zavarivanje. Zbog svojih dobrih osobina, postupak je našao primenu u industriji lakih konstrukcija [29].

Učesnik u istraživanjima i prvi korisnik postupka, bila je kompanija „Hitachi”. Od kraja 1991. godine do sredine 1992. godine, tim Hitačija je razvio mašinu kojom je izradio 25 m dugu aluminijumsku šasiju (u jednom prolazu, trenjem) kod lakih šinskih vozila, tzv. „Hitachi A-Train”. Od 1997. godine i kompanija „Alstom LHB” ovom tehnologijom počinje da proizvodi krovne panele železničkih vozila za državne železnice Danske [28]. Već sledeće godine švajcarska kompanija „Stadler” u svoje „double decker” vagone ugrađuje podne ploče izrađene u Austriji postupkom zavarivanja trenjem sa mešanjem. Prva primena postupka u brodogradnji je registrovana 1996. godine kada je švedska kompanija „Sapa AB” aluminijumske profile kod luksuznih jahti spajala ovim postupkom. U avioindustriji, od 1999. godine, kompanija „Boeing” koristi zavarivanje trenjem sa mešanjem za proizvodnju „Delta II” i „Delta IV” nosača svemirskih šatlova, zatim, kod stajnog trapa i utovarne rampe velikog transportnog aviona „USAF C-17 Globemaster IIIs”, itd. I „NASA” je od 2000. do 2001. godine u više navrata zahtevala primenu postupka pri izradi rezervoara i naplate svemirskih letelica [28]. Kod automobila „Lincoln Town Car” (Ford Motor Company), nosači motora i amortizera izrađuju se postupkom zavarivanja trenjem sa mešanjem od 1999. godine. Od 2001. godine, „Mazda RKS-8” i „Toyota Prius” imaju

sistem za dovod goriva i panele na vratima izrađene postupkom zavarivanja trenjem sa mešanjem. Na isti način se izrađuju delovi šasijske za „Audi R8” od aluminijumskih profila, i zadnja sedišta za „Volvo KSC70” od 1997. Vejn i njegov tim su oktobra 1995. godine patentirali postupak zavarivanja trenjem sa mešanjem za razne tipove alata [30].

Nakon 2000. godine, postupak zavarivanja trenjem sa mešanjem, kao mlad, specifičan i nedovoljno istražen postupak zavarivanja, postaje predmet interesovanja mnogih naučnika i industrijalaca širom sveta. Područje interesovanja se odnosilo na zavarivanje različitih materijala, alat za zavarivanje, simulaciju postupka, validaciju rezultata itd. Broj naučno-istraživačkih radova vezanih za postupak zavarivanja trenjem sa mešanjem je rastao eksponencijalno sve do treće decenije dvadeset prvog veka [31].

Sa prostora bivše Jugoslavije, postupak zavarivanja trenjem sa mešanjem prvi je istraživao profesor Radovan Kovačević – ali u Sjedinjenim Američkim Državama [32]. Njegovi radovi iz 2002. godine (i kasnije) se, najvećim delom, odnose na razvoj termomehaničkih modela postupka i spadaju u najcitiranije radove iz oblasti. Kako je poreklom iz Crne Gore, prof. Kovačević je ostavio jak uticaj na Mašinski fakultet u Podgorici pa se tamo formirala grupa istraživača koja se bavi istraživanjem postupka zavarivanja trenjem sa mešanjem na različitim legurama aluminijuma.

Prva istraživanja postupka zavarivanja trenjem sa mešanjem u Srbiji vezana su za profesora Miroslava B. Đurđanovića⁹ sa Mašinskog fakulteta u Nišu. On je u svom radu „Prilog razmatranju primene toplote generisane trenjem” iz 2003. godine [22], opisao principe postupka zavarivanja trenjem sa mešanjem i naveo je postupak kao tipičan primer „indirektnog generisanja toplote trenjem”.

Tadašnji doktorand Mašinskog fakulteta

⁷ Eng. The Welding Institute, Cambridge, UK.

⁸ Eng. Thomas, Wayne.

⁹ Srp. Miroslav B. Đurđanović (28.04.1940 – 12.01.2019), dipl. inž. maš, profesor Mašinskog fakulteta u Nišu, istoričar, reprezentativac SFRJ u streljaštvu.

u Beogradu, Aleksandar Živković, dipl. inž. maš, EWE, je u prisustvu prof. Đurđanovića, grupe nastavnika i saradnika sa Mašinskog fakulteta u Nišu, kao i grupe zaljubljenika u zavarivanje, dana 13.03.2009. godine u Nišu, na vertikalnoj glodalici izveo prvo (delimično) uspešno sučeono zavarivanje ploča od aluminijuma iz serije 5×××. Za zavarivanje je primenjen cilindrični alat sa zavojnicom, ali, nije primenjena podložna ploča i parametri zavarivanja su uzeti bez prethodne provere, pa je provar na pločama izostao (a i sam kvalitet dobijenog zavarenog spoja bio je krajnje diskutabilan). Ipak, ovo je prvo „uspešno” zavarivanje trenjem sa mešanjem izvedeno u Srbiji¹⁰.

Od 2009. godine nadalje, Ministarstvo nauke Republike Srbije finansiralo je tri naučno-istraživačka projekta koji se odnose na postupak zavarivanja trenjem sa mešanjem [33-35]. Tada su započeta prva studiozna eksperimentalna istraživanja postupka zavarivanja trenjem sa mešanjem.

Aprila 2011 godine, Aleksandar Živković je na Mašinskom fakultetu u Beogradu odbranio prvu doktorsku disertaciju u Srbiji sa temom izbora geometrijskih parametara alata i tehnoloških parametara postupak zavarivanja trenjem sa mešanjem, na teškozavarivoj leguri aluminijuma 2024T351 [36]. U Srbiji je do 2021. usledilo još šest disertacija iz oblasti zavarivanja trenjem sa mešanjem.

Međutim, do praktične primene postupka zavarivanja trenjem sa mešanjem u srpskoj industriji, počev od 2003. do sredine 2021, nije došlo. Pojedini sklopovi koje kompanija „MIND-Milanović Industries Group” iz Kragujevca ugrađuje na vagonima, imaju spojeve izrađene zavarivanjem trenjem sa mešanjem, ali oni u Srbiju dolaze ranije zavareni – iz Nemačke.

Postupak zavarivanja trenjem sa mešanjem, u okruženju Srbije od 2002. godine se istražuje u Rumuniji, Hrvatskoj, Bosni, Sloveniji, Bugarskoj i Grčkoj, i to u saradnji sa brojnim istraživačima iz Srbije.

Princip rada, parametri zavarivanja i oprema za zavarivanje

Osnovni postupak zavarivanja trenjem sa mešanjem (ISO 4063 – 43) se, sa punim pravom, naziva i postupkom zavarivanja trenjem (sa) alatom jer sve aktivnosti vezane za zavarivanje inicira i vrši alat složene geometrije. Alat se izrađuje od materijala koji se topi na znatno višoj temperaturi nego radni komadi. Takođe, on mora da podnese veliko habanje i mehaničke deformacije prilikom zavarivanja. Danas postoji više izvođenja postupka zavarivanja, ali, u osnovnoj verziji, zavarivanje vrši cilindrični alat sa trnom (slika 4.15, pozicija 1) na limovima (pločastim radnim komadima, slika 4.15, pozicija 2).

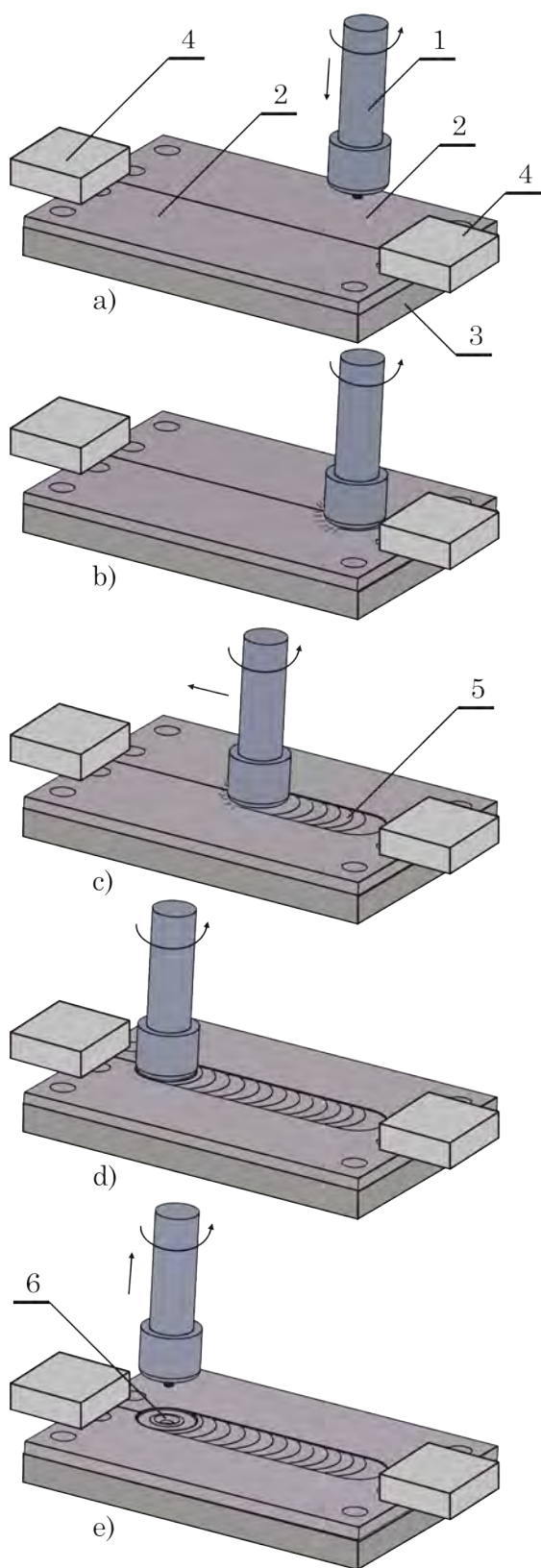
Limovi su postavljeni sučeono na krutu podložnu ploču (slika 4.15, pozicija 3) i veoma čvrsto pritisnuti držačima (slika 4.15, pozicija 4).

Alat se postavlja u radnu mašinu koja može da mu obezbedi rotaciju oko ose simetrije, približi do radnih komada i translatorno vodi duž linije spajanja radnih komada. U prvim izvođenjima, radna mašina je bila vertikalna glodalica, zavarivanje je izvođeno i na strugu. Danas postoje specijalizovane mašine za zavarivanje trenjem sa mešanjem.

U početnoj fazi zavarivanja (slika 4.15, a) alat koji rotira se približava radnim komadima i započinje kontakt sa njima. Usled trenja, trn alata i materijal radnih komada blizu zone kontakta se zagrevaju. Kako materijal radnih komada omekšava, trn alata (slika 4.16) prodire unutar metala, sve dok se ne dostigne maksimalna dubina prodiranja – dok rame alata (slika 4.15) ne dodirne radne komade. Deo omekšalog materijala radnih komada je istisnut naviše. Nakon završetka prodiranja u radne komade, alat nastavlja da rotira „u mestu” (slika 4.15, b) i zagreva radne komade.

Sada su sve aktivne površine alata u kontaktu sa radnim komadima i vrši se intenzivno zagrevanje materijala, kao kod tipičnih postupaka zavarivanja trenjem. Prisutno je i neznatno plastično deformisanje materijala blizu zone kontakta. Kada je materijal dovoljno zagrejan, započinje faza zavarivanja (slika 4.15, c).

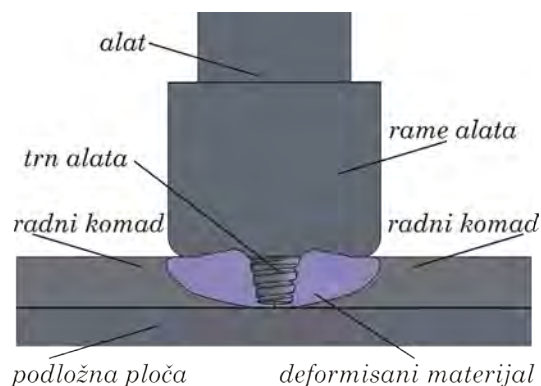
¹⁰ Slike ovog događaja se nalaze u prilogu.



Slika 4.15 Postupak sučeonog šavnog zavarivanja trenjem sa mešanjem na pločama, 1 – alat, 2 – radni komadi, 3 – podložna ploča, 4 – držači, 5 – šav, 6 – izlazni otvor, a – primicanje alata, b – rad u mestu, c – zavarivanje, d – rad u mestu, e – odmicanje alata [37]

Alat započinje kretanje duž linije spajanja radnih komada. Kako alat i dalje rotira, zagrevanje materijala trenjem je intenzivno. Međutim, sada je prisutno i značajno plastično deformisanje materijala radnih komada jer alat, poput glodala, reže materijal limova, odrezane komadiće pokreće, pritiska, zagreva, drobi i meša. Tako izmešani materijal ostaje iza alata kao šav (slika 4.15, pozicija 5).

Kada alat pređe predviđenu dužinu zavarivanja, prestaje translatorno kretanje alata, ali alat ostaje da rotira u mestu još neko vreme (slika 4.15, d). Tada se završava proces rezanja metala, stabilizuje se završni deo šava i počinje hlađenje. Po završetku stabilizacije, alat se izvlači iz radnih komada (slika 4.15, e) a u njima ostaje rupa (slika 4.15, pozicija 6) kao nesavršenost postupka.



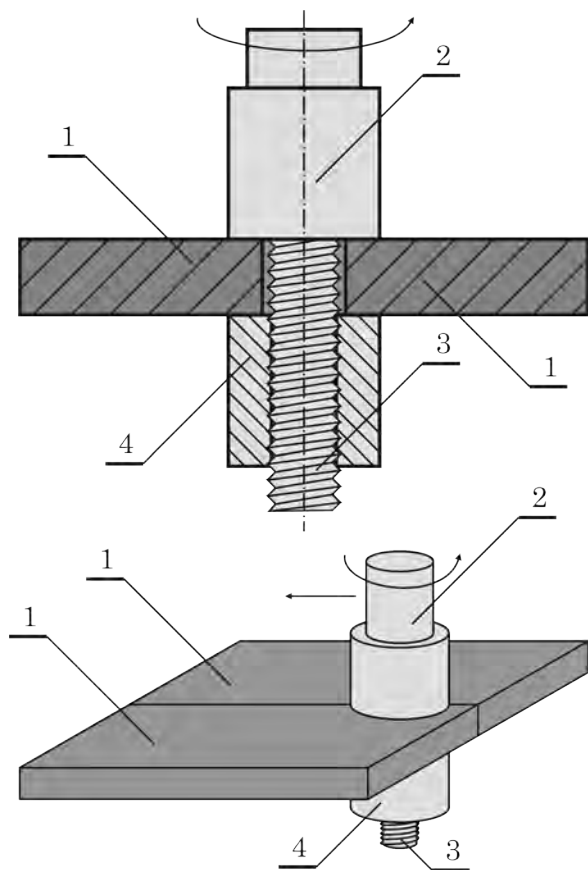
Slika 4.16 Profil alata i zone zavarivanja [37]

Mešanje materijala u zoni zavarivanja ograničeno je na zonu deformisanog materijala radnih komada koja se nalazi ispod alata (slika 4.16). Zavojnica na trnu alata reže materijal i pokreće ga, te je trn osnovni izvor toplote dobijene deformisanjem materijala. Rame alata ima znatno veću površinu kontakta sa radnim komadima i ono je dominantni izvor toplote dobijene trenjem. Prema tome, alat mora da ima trn i rame kako bi ispravno funkcionisao. Bez trna, osnovni materijal bi se grejao ali se ne bi mešao dok bi alat bez ramena, samo sa trnom, mešao hladan materijal. U oba slučaja, radni komadi se ne bi uspešno zavarili.

Podložna ploča (slika 4.15, pozicija 3) je neophodna kako bi obezbedila krutost radnih komada tokom zavarivanja i sprečila prodor

pokrenutog metala kroz korenu stranu šava. Njena funkcija je identična funkciji korene letve kod elektro-lučnih postupaka zavarivanja.

Nešto novija konstrukcija alata (iz 1995. godine) ima jedan trn i dva ramena – alat je dvodelan (slika 4.17). Ovakav alat je nazvan „alatom u obliku kalema“.



Slika 4.17 Postupak sućeonog šavnog zavarivanja trenjem sa mešanjem alatom u obliku kalema. 1 – radni komadi, 2 – alat sa trnom, 3 – trn (zavrtanj), 4 – alat (navrtka)

Princip zavarivanja ovakvim alatom je isti kao sa regularnim alatom ali uz nekoliko izmena. Radni komadi (slika 4.17, pozicija 1) se postavljaju u položaj za zavarivanje i ukrućuju. Na radnim komadima, na mestu gde treba da počne zavarivanje, buši se tehnološki otvor, prečnika neznatno većeg od prečnika trna alata (slika 4.17, pozicija 3). Polovina alata sa trnom (slika 4.17, pozicija 2) se provlači kroz otvor i drugim delom alata – navrtkom (slika 4.17, pozicija 4), se priteže. Radi osiguranja od odvrtnja sa strane navrtke dodaje se još jedna navrtka ili rascepk. Montirani sklop alata se okreće oko svoje ose, ali u smeru suprotnom od smeru odvrtnja

navrtke – opet sa ciljem da se navojna veza dodatno osigura od samoodvrtnja. Alat se kreće duž linije spajanja limova do dostizanja željene dužine zavarenog spoja.

Zavarivanje se tada prekida, navrtka se odmah skida i trn izvlači iz šava kako ne bi ostao zavaren. Na mestu izvlačenja ostaje otvor, kao nesavršenost postupka. Podložna ploča se pri zavarivanju alatom u obliku kalema ne koristi.

Trn alata (slika 4.17, pozicija 3) je sa navojem koji služi za pritezanje, ali i za rezanje materijala radnih komada. Slobodni deo trna, unutar tehnološkog otvora, je na završetku zavarivanja polepljen materijalom radnih komada. Kako je materijal alata/trna tvrdi i čvršći od materijala radnih komada, u narednom ciklusu zavarivanja, usled trenja i zagrevanja, alat brzo odbacuje nalepljeni deo materijala i uspešno nastavlja zavarivanje novih delova.

Osnovni parametri postupka zavarivanja trenjem sa mešanjem mogu da se podele na geometrijske (dimenzije i oblik alata za zavarivanje) i tehnološke (broj obrtaja alata, brzina zavarivanja-translacije, trajanje zastoja-rada u mestu, moment pritezanja navrtke, čvrstoća i tvrdoća materijala alata itd).

Izbor parametara zavarivanja se vrši saglasno materijalu radnih komada, njihovoj debljini i nameni zavarenog spoja. Izbor parametara prema nameni spoja se još uvek istražuje – na primer, zavisno od odnosa broj obrtaja/brzina zavarivanja, dobijaju se (kolokvijalno nazvani) normalni, topli (velika količina generisane toplote) ili hladni šavovi (mala količina generisane toplote). Svi šavovi imaju drugačije osobine jedan u odnosu na drugi. Na primer, hladan šav kod legure aluminijuma 6060 je znatno osetljiviji na zamor (dinamičko opterećenje) nego što je to slučaj sa toplim šavom na istoj leguri [37].

Prednosti i nedostaci

Postupak zavarivanja trenjem sa mešanjem je jedan tipičan postupak zavarivanja u čvrstom stanju. Samim tim, problemi brzog prelaska iz tečnog u čvrsto stanje (prisutni kod svih postupaka

zavarivanja topljenjem) ne postoje i mikrostruktura zavarenog šava je ovde znatno povoljnija. Zavareni spojevi imaju mehaničke osobine koji odgovaraju mehaničkim osobinama osnovnog metala, a spojevi su ostvareni za debljine materijala u rasponu od 0,25 mm do 75 mm u jednom prolazu. Cena zavarivanja (po dužnom metru) ovim postupkom je znatno niža nego kod većine drugih postupaka zavarivanja, nije potreban dodatni materijal (mada se u nekim najnovijim izvođenjima koristi i dodatni materijal), postupak je lak za automatizaciju, primenljiv je za sve položaje zavarivanja, zavarivanje raznorodnih postupaka je lakše nego kod drugih postupaka itd.

Međutim, postupak zavarivanja trenjem sa mešanjem odlikuju i neki nedostaci:

- Postupak nije fleksibilan i vezan je samo za radioničke uslove.
- Alat za zavarivanje se vrlo brzo troši i haba.
- Za zavarivanje je neophodno da delovi budu čvrsto stegnuti, što zahteva dodatni pribor i opremu.
- Postupak je znatno sporiji nego većina postupaka zavarivanja topljenjem.
- Iako nema tipičnih grešaka zavarivanja (prisutnih kod postupaka zavarivanja topljenjem), javlja se niz drugih grešaka – kaviteti i greška u obliku tunela (nekad prisutni celom dužinom šava), neprovar usled nedovoljne penetracije alata, pregrevanje šava i preveliko istiskivanje materijala oko alata itd.

Primena postupaka

Prva i osnovna primena postupka je za sučeono zavarivanje pločastih delova od aluminijuma. Aluminijum i njegove legure su specifični zbog svoje mase, a neke od osobina su im uporedive sa najslabijim čelicima (npr. čvrstoća). Legure aluminijuma su, u poređenju sa čelicima, složene za zavarivanje, a legure iz serija 2xxx i 7xxx spadaju u, ekonomski posmatrano, nezavarive legure (sa metalurškog stanovišta su to teško zavarive legure).

Postupak zavarivanja trenjem sa

mešanjem se pokazao kao povoljan za zavarivanje ovih legura.

Druge, konvencionalnim postupcima lako zavarive, legure aluminijuma (npr. legure iz serije 6xxx) se zavaruju postupkom zavarivanja trenjem sa mešanjem bez ikakvih poteškoća i bez ikakvih grešaka.

Sa manje ili više poteškoća, ali vrlo uspešno, postupak je primenljiv za zavarivanje više vrsta čelika, mesinga, bronzi, titanijuma i polimera (plastičnih masa).

Podela, klasifikacija i standardizacija postupka

Postupci zavarivanja trenjem sa mešanjem su (iz suštinskih i birokratskih razloga) standardizovani i klasifikovani prema SRPS ISO 4063:2021 kao grupa ISO 4063 – 43¹¹, odvojeno od ostalih postupaka zavarivanja trenjem.

Do juna 2021. godine su standardizovani i klasifikovani samo postupci tačkastog zavarivanja trenjem sa mešanjem na preklopljenim limovima:

- Postupak tačkastog zavarivanja trenjem sa mešanjem, klasifikovan kao ISO 4063 – 431,
- Postupak tačkastog zavarivanja trenjem sa mešanjem sa potpunom tehnološke rupe, klasifikovan kao ISO 4063 – 432,
- Postupak tačkastog zavarivanja trenjem sa mešanjem kretanjem alata po konturi, klasifikovan kao ISO 4063 – 433,
- Postupak tačkastog zavarivanja trenjem sa mešanjem kretanjem alata po pravoj liniji, klasifikovan kao ISO 4063 – 434,
- Postupak tačkastog zavarivanja trenjem sa mešanjem ljuljanjem alata, klasifikovan kao ISO 4063 – 435.

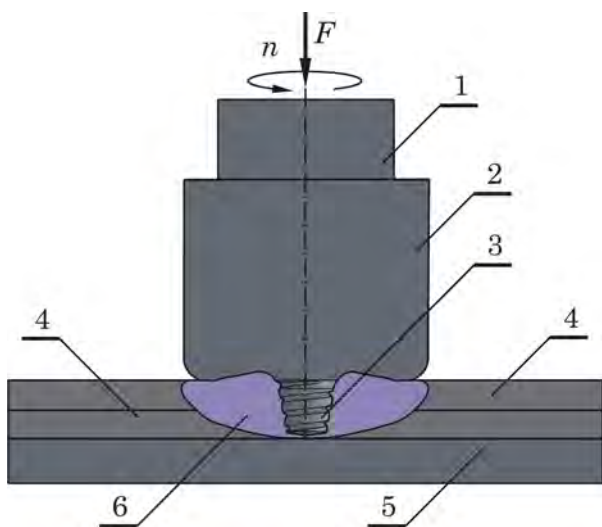
Nacrt standarda ISO 4063:2020 ne definiše/klasifikuje klasičan (prvobitni) postupak zavarivanja trenjem sa mešanjem (sučeono zavarivanje limova).

¹¹ U prethodnim verzijama standarda ISO 4063, oznaka 43 bila je pripisana kovačkom zavarivanju. U verziji standarda ISO 4063:2009 postupak kovačkog zavarivanja je prikazan kao „zastareli” i nije klasifikovan, a postupci zavarivanja trenjem sa mešanjem su preuzeli oznaku grupe ISO 4063 – 43.

4.3.1 Postupak tačkastog zavarivanja trenjem sa mešanjem

Postupak tačkastog zavarivanja trenjem sa mešanjem (ISO 4063 – 431) je najjednostavniji i najstariji tačkasti postupak zavarivanja trenjem sa mešanjem. Primenuje se za tačkasto zavarivanje preklopljenih limova koji su izrađeni od aluminijuma, polimera, ali se sve više koristi za zavarivanje čelika.

Limovi (slika 4.18, pozicija 4) se postavljaju jedan na drugi i naležu na podložnu ploču (slika 4.18, pozicija 5).



Slika 4.18 Postupak tačkastog zavarivanja trenjem sa mešanjem, 1 – alat za zavarivanje, 2 – rame alata, 3 – trn alata, 4 – radni komad, 5 – podložna ploča, 6 – deformisani materijal radnih komada

Alat (slika 4.18, pozicija 1) sa profilisanim trnom (slika 4.18, pozicija 3) rotira i pritiska limove. Usled trenja između alata i limova dolazi do zagrevanja limova (i alata) što dovodi do omekšavanja limova i tada dolazi do prodora trna u limove. Prodiranje alata traje dok ne dođe do kontakta ramena alata (slika 4.18, pozicija 2) sa gornjim radnim komadom. Tokom prodiranja, deo omekšalog materijala je potisnut naviše i ostaje istisnut oko ramena alata (ili ostaje zarobljen unutar „rezervoara” ispod ramena, ukoliko on postoji). Alat nastavlja da rotira oko svoje ose i svojim trnom i ramenom zagreva radne komade. Zagrejali, omekšali i alatom deformisani materijal radnih komada (slika 4.18, pozicija 6) se meša u zoni dejstva alata. Nakon izvlačenja alata iz radnih

komada, pomešani materijal se hladi i ostaje kao „tačkasti” šav. Unutar šava ostaje tehnološka rupa (kao nesavršenost samog postupka) koja ne umanjuje nosivost formiranog šava.

Kao posebna varijanta postupka 431, zavarivanje može da se izvede alatom bez trna. U tom slučaju, moguće je zavarivanje samo tanjih limova, šav je manje efikasan u odnosu na šav dobijen zavarivanjem alatom sa trnom, ali zato nema tehnološke rupe na mestu zavarivanja.

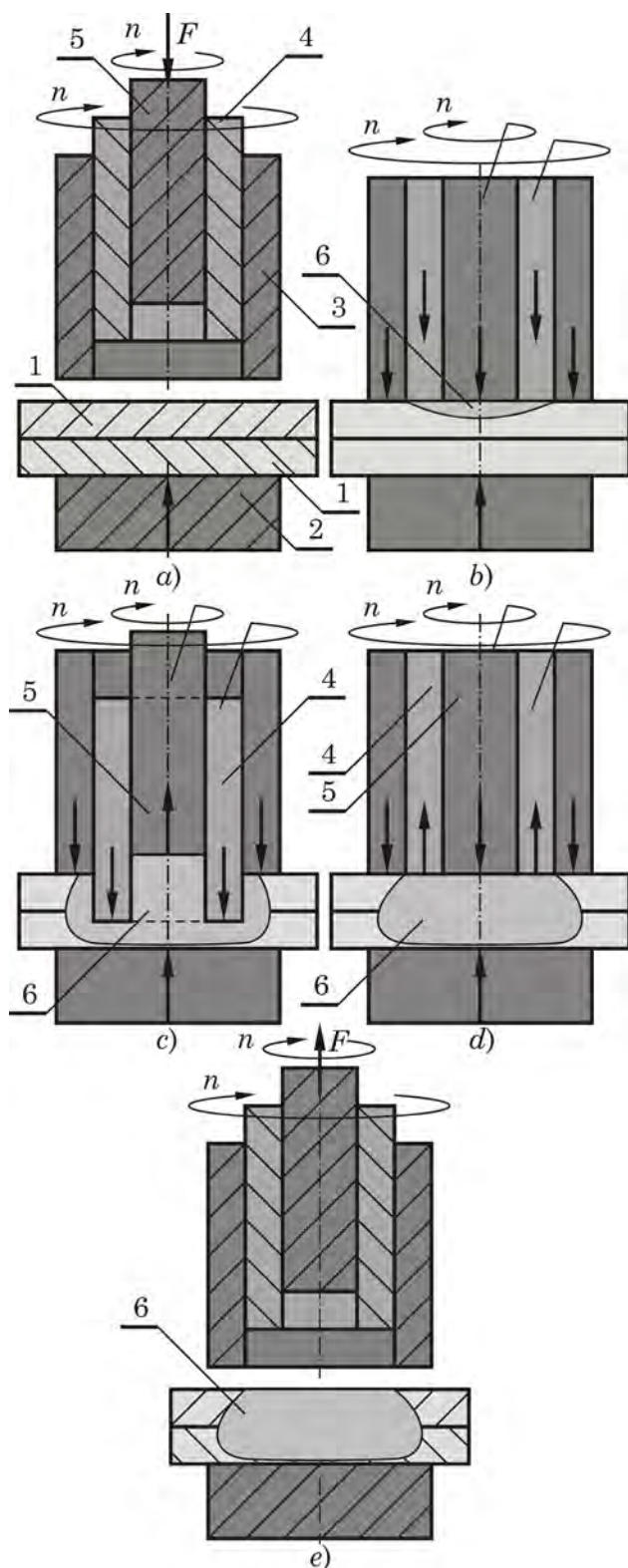
Postupak tačkastog elektrootpornog zavarivanja trenjem sa mešanjem nastao je i usavršen je u periodu od 2003. do 2009. godine u Japanu (u Hitačiju) [17].

4.3.2 Postupak tačkastog zavarivanja trenjem sa mešanjem sa potpunom tehnološke rupe

Kao postupak tačkastog zavarivanja trenjem sa mešanjem koji nema tehnološku rupu na kraju procesa, nastao je postupak tačkastog zavarivanja trenjem sa mešanjem sa potpunom tehnološke rupe (ISO 4063 – 432). Međutim, izbegavanje ovog tehnološkog nedostatka postupka zahteva primenu vrlo složenog alata za zavarivanje.

U početnoj fazi zavarivanja (slika 4.19, a), radni komadi (slika 4.19, pozicija 1) se postavljaju jedan na drugi i pozicioniraju na fiksiranu podložnu ploču (slika 4.19, pozicija 2). Višedelni alat se pozicionira iznad radnih komada i započinje se procedura zavarivanja. Alat se sastoji od spoljašnje čaure (slika 4.19, pozicija 3), unutrašnje čaure (slika 4.19, pozicija 4) i oblikača (slika 4.19, pozicija 5).

U inicijalnoj fazi zavarivanja – fazi zagrevanja (slika 4.19, b) sva tri dela alata se naslanjaju na radne komade i pritiskaju ga. Unutrašnja čaura i oblikač rotiraju oko svoje ose, i usled trenja zagrevaju gornji radni komad i počinje deformisanje materijala, a samim tim – počinje formiranje šava (slika 4.19, pozicija 6). Spoljašnja čaura učvršćava limove i pozicionira alat tokom zavarivanja. Sa omekšanjem materijala, započinje faza prodiranja unutrašnje čaure u radne komade (slika 4.19, c).



Slika 4.19 Postupak tačkastog zavarivanja trenjem sa mešanjem sa potpunom tehnološkom rupom, 1 – radni komadi, 2 – podložna ploča, 3 – spoljašnja čaura alata, 4 – unutrašnja čaura alata, 5 – oblikač, 6 – zavareni šav (deformisani materijal radnih komada), a – pozicioniranje alata, b – zagrevanje radnih komada, c – prodiranje unutrašnje čaure, d – popunjavanje tehnološke rupe, e – izvlačenje alata

Unutrašnja čaura prodire do približno polovine debljine donjeg radnog komada. Istovremeno sa prodiranjem čaure, oblikač rotira i pod pritiskom istisnutog materijala radnih komada se translatorno izdiže naviše. U ovoj fazi zavarivanja se aktivira maksimalna zapremina materijala radnih komada (definišu se dimenzije zavarenog šava).

U poslednjoj fazi zavarivanja (slika 4.19, d) se unutrašnja čaura izvlači iz radnih komada (do gornje ivice gornjeg lima) dok se oblikač spušta translatorno naniže i potiskuje istisnuti materijal. Samim tim, oblikač ispunjava tehnološku rupu i, zajedničkom rotacijom oblikača i čaure, vrši završno oblikovanje lica šava. Po završetku zavarivanja, alat se odvaja od radnih komada (slika 4.19, e), izmešani materijal se hladi i ostaje zavarena tačka.

U drugoj varijanti postupka, prodiranje u radne komade i oblikovanje lica šava vrši oblikač, ali je zavarena tačka nešto manjih dimenzija i samim tim je šav nešto niže efikasnosti.

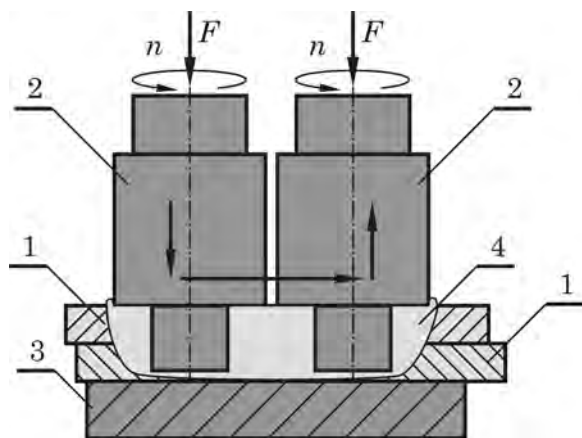
Zavarena tačka dobijena postupkom 432 je uvek masivnija i znatno efikasnija nego tačka dobijena postupkom 431. Međutim, za zavarivanje postupkom 432 se primenjuje znatno složeniji alat, neophodna je mašina koja može da obezbedi odvojeni rotaciono/translatorni pogon i za oblikač i za unutrašnju čauru, pa je i cena zavarivanja po tački znatno viša nego kod postupka 431. Postupak je primenjiv za preklopno zavarivanje i tankih i debelih limova od aluminijuma, ostalih obojenih metala, polimera i čelika.

Postupak 432 je nastao 1999. godine u Nemačkoj i inicijalno je primenjivan za zavarivanje limova od aluminijuma kod železničkih vozila [17].

4.3.3 Postupak tačkastog zavarivanja trenjem sa mešanjem kretanjem alata po pravoj liniji

Postupak tačkastog zavarivanja trenjem sa mešanjem kretanjem alata po pravoj liniji (ISO 4063 – 434) je suštinski identičan prvobitnom postupku zavarivanja trenjem sa

mešanjem koji se koristi za sučeono zavarivanje limova sa razlikom što se postupak 434 primenjuje za preklopno zavarivanje limova.



Slika 4.20 Postupak tačkastog zavarivanja trenjem sa mešanjem kretanjem alata po pravoj liniji, 1 – radni komadi, 2 – alat, 3 – podložna ploča, 4 – zavareni šav

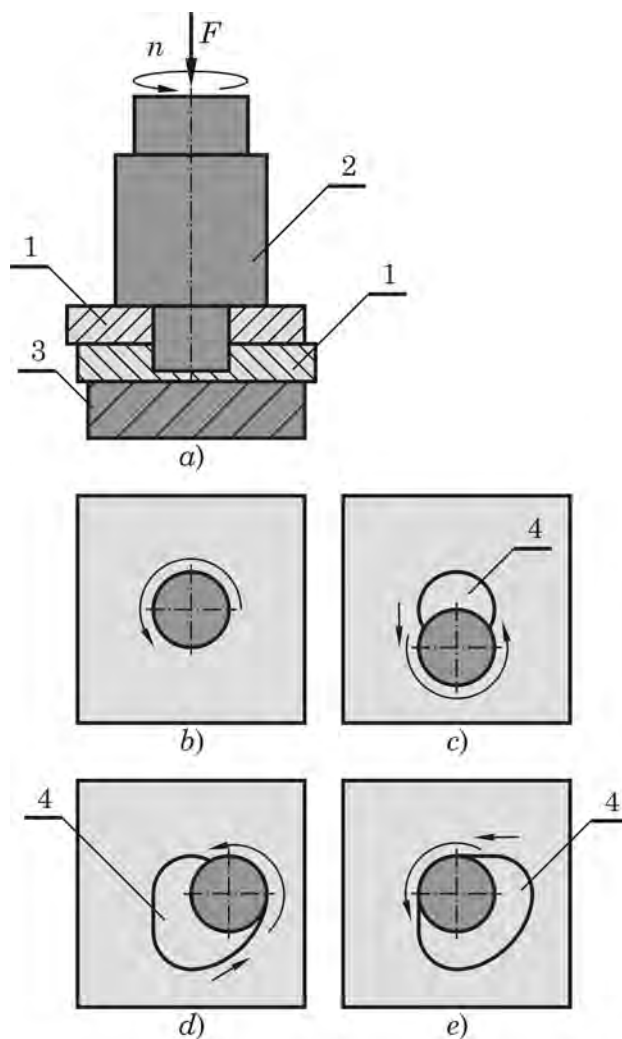
Limovi (slika 4.20, pozicija 1) se postavljaju jedan na drugi i učvršćuju na podložnu ploču (slika 4.20, pozicija 3). Alat za zavarivanje (slika 4.19, pozicija 2) se kao kod postupka sučeonog zavarivanja limova (objašnjenog u prethodnim poglavljima, saglasno slici 4.14) pozicionira, prodire u radne komade i kreće duž prave linije. Prodiranje trna alata u donji lim mora da bude minimalno jednako polovini debljine donjeg lima. Pravolinijska putanja kretanja alata je približno jednaka dvostrukoj vrednosti prečnika ramena alata.

Ovako dobijeni šav ima tehnološku rupu na mestu izlaska alata iz zahvata, kao i kod postupka 431. Međutim, kako je dužina šava, a samim tim, i zapremina zavarene „tačke”, mnogo veća nego kod tačke dobijene postupkom 431, ovako dobijeni šav je efikasniji (ima veću nosivost) nego šav dobijen postupkom 431.

4.3.4 Postupak tačkastog zavarivanja trenjem sa mešanjem kretanjem alata po konturi

Princip postupka tačkastog zavarivanja trenjem sa mešanjem kretanjem alata po konturi (ISO 4063 – 433) je istovetan

postupku zavarivanja 434. Jedina razlika je vezana za putanju kojom se kreće alat za zavarivanje: putanja može da bude trougaona, kvadratna (4 prave linije), šestostrana, oktogonalna, kružna ili bilo koja konturna kriva. U ovom slučaju je neophodno da radna mašina ima sposobnost kretanja po površinskoj krivoj ili makar od koordinate do koordinate po pravoj liniji.



Slika 4.21 Postupak tačkastog zavarivanja trenjem sa mešanjem kretanjem alata po konturi, 1 – radni komadi, 2 – alat, 3 – podložna ploča, 4 – tehnološka rupa, a – šema postupka, b – inicijalni položaj, c – prvi korak, d – drugi korak, e – treći korak

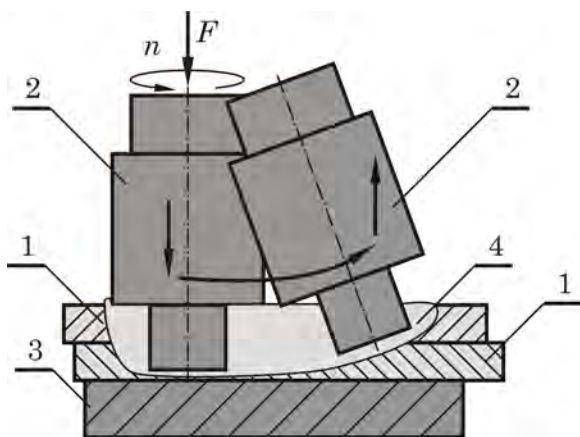
Na slici 4.21, prikazan je postupak zavarivanja 433 po trougaonoj konturi. Nakon prodiranja (slika 4.21, a) u preklapljenе radne komade (slika 4.21, pozicija 1), alat (slika 4.21, pozicija 2) započinje kretanje po planiranoj trougaonoj konturi (slika 4.21, c, d i e). Po

završetku zavarivanja, alat se izvlači iz radnih komada, ostaje izrađeni šav i tehnološka rupa (slika 4.21, pozicija 4).

Ovakvom procedurom zavarivanja se ostvaruje veća zapremina pomešanog materijala (šav) nego kod postupka 431 ali se ostvaruje i bolje mešanje materijala nego kod postupka 434.

4.3.5 Postupak tačkastog zavarivanja trenjem ljuljanjem alata

Postupak tačkastog zavarivanja trenjem ljuljanjem alata (ISO 4063 – 435) je još jedna varijanta tačkastog zavarivanja trenjem sa mešanjem sa ciljem povećanja zapremine zavarene tačke. Zbog toga se alat (slika 4.22, pozicija 2) nakon uranjanja u radne komade (slika 4.22, pozicija 1) a nakon određenog vremena, izvlači iz zone zavarivanja laganim „ljuljanjem” oko horizontalne ose.



Slika 4.22 Postupak tačkastog zavarivanja trenjem ljuljanjem alata, 1 – radni komadi, 2 – alat, 3 – podložna ploča, 4 – šav

Takvim postupkom se dobija nešto veća zapremina zavarene tačke nego kod postupka 431, ali se dobija i nešto manja tehnološka rupa na izlazu.

Ljuljanje alata iziskuje poseban mehanizam na mašini, što postupak ISO 4063 – 435 usložnjava i znatno poskupljuje u odnosu na druge postupke zavarivanja trenjem sa mešanjem. Zbog toga se postupak 435 najmanje primenjuje od svih tačkastih postupaka zavarivanja trenjem sa mešanjem.

4.4 Postupci zavarivanja velikom količinom mehaničke energije

Kao posebna grupa postupaka zavarivanja, u okviru osnovne grupe 4, izdvojeni su postupci zavarivanja velikom količinom mehaničke energije. Dve su osnovne osobenosti ovih postupaka: kao energiju aktivacije koriste neki vid mehaničke energije (kinetičku ili potencijalnu energiju, energiju pritiska fluida, mehaničku energiju električnog i magnetnog polja i slično) i ta energija je dovedena u zonu zavarivanja u ekstremno kratkim periodima vremena (zavarivanje delova se dešava gotovo trenutno). Delovi koji se zavaruju, moraju da budu blizu jedan drugom.

Postupci zavarivanja velikom količinom mehaničke energije su, prema SRPS ISO 4063, klasifikovani kao ISO 4063 – 44. Ovoj grupi postupaka pripadaju postupak zavarivanja eksplozijom i postupak zavarivanja magnetnim (im)pulsom.

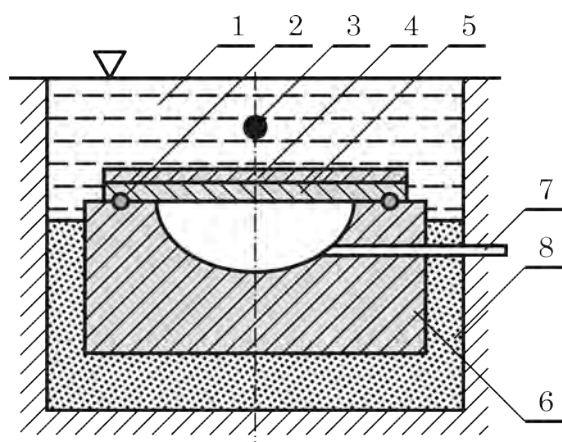
4.4.1 Postupak zavarivanja eksplozijom

Postupak zavarivanja eksplozijom (često nazivan – postupkom plakiranja eksplozivom) je tipičan predstavnik postupaka zavarivanja velikom količinom mehaničke energije – hemijska energija baruta (ili sličnih hemijskih, eksplozivnih jedinjenja) se prilikom eksplozije pretvara u mehaničku energiju koja pokreće fluid ili radni komad ogromnom brzinom. Pokrenuti fluid (ili radni komad), vrlo intenzivno deluje na prepreku – delove koji se zavaruju. Ovakvo dejstvo mehaničke energije deformiše radne komade, i ukoliko su oni postavljeni u odgovarajući položaj i učvršćeni, zavaruje ih u čvrstom stanju.

Počeci zavarivanja eksplozivom vezuju se Prvi svetski rat kada je primećeno da se geleri iz bombi zabijaju u metalne površine i pri tom se delimično zavaruju za njih [38]. Ozbiljnija istraživanja primene postupka započela su u Americi nakon Drugog svetskog rata, a 1964. godine je odobren prvi patent koji se odnosi na spajanje eksplozijom [39].

Danas postoje dve varijante postupka zavarivanja eksplozijom: indirektni (posredni) i direktni postupak [21].

Posredni postupak zavarivanja eksplozijom podrazumeva postojanje medijuma – fluida, koji prenosi energiju zavarivanja na radne komade. Na slici 4.23 prikazan je primer zavarivanja – plakiranja eksplozijom u bazenu sa vodom.



Slika 4.23 Posredni postupak zavarivanja eksplozijom preklapljenih delova, 1 – voda, 2 – zaptivka, 3 – eksploziv, 4 – zaštitna ploča, 5 – lim za plakiranje, 6 – kalup koji se plakira, 7 – odvod za vazduh, 8 – pesak [21]

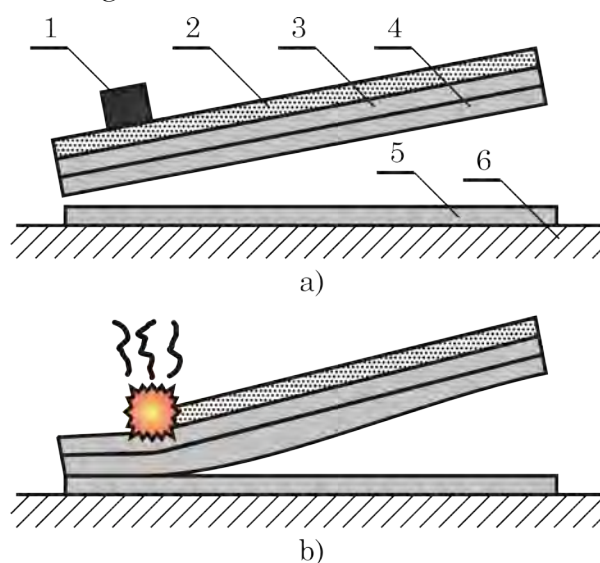
Lim koji se koristi za plakiranje (slika 4.23, pozicija 5) se postavlja na deo koji se plakira – kalup (slika 4.23, pozicija 6), i ceo sistem se uranja u bazen sa peskom (slika 4.23, pozicija 8). Kalup ima izrađen otvor za vazduh (slika 4.23, pozicija 7), koji je neophodan da bi se sprečilo razaranje delova. Kako bi se lim za plakiranje dodatno zaštitio od udarnog dejstva eksplozije, na njega se, sa gornje strane, postavlja zaštitni lim (slika 4.23, pozicija 4). Kada je sistem pozicioniran, bazen se puni vodom (slika 4.23, pozicija 1). Prodor vode u kalup se sprečava gumenim zaštitnim prstenom (slika 4.23, pozicija 2).

Nakon završenih priprema, u vodu se spušta eksploziv (slika 4.23, pozicija 3) i detonira se. Energija eksplozije se predaje vodi, koja je dalje predaje limovima, pod pritiskom od približno 10 GPa. Limovi se savijaju prateći oblik kalupa a lim za plakiranje se utiskuje na kalup. Iako je neprekidno u čvrstom stanju, lim teče u čvrstom stanju, i pri tom se vezuje za materijal kalupa. Veza

između zaštitnog lima i lima za plakiranje se ne formira (ili se marginalno formira) jer oba lima nemaju dovoljnu krutost, odnosno, ne pružaju otpor kretanju i slobodno se deformišu.

Kod direktnog postupka zavarivanja eksplozivom, zaštitni lim (slika 4.24, pozicija 3) i lim za plakiranje (slika 4.24, pozicija 4) postavljaju se najčešće pod nekim uglom, na lim koji se plakira (slika 4.24, pozicija 5). Lim koji se plakira je oslonjen na podložnu ploču (slika 4.24, pozicija 6) koja ukrućuje strukturu.

Eksploziv sa detonatorom (slika 4.24, pozicije 1 i 2) se postavlja sa gornje strane zaštitnog lima.



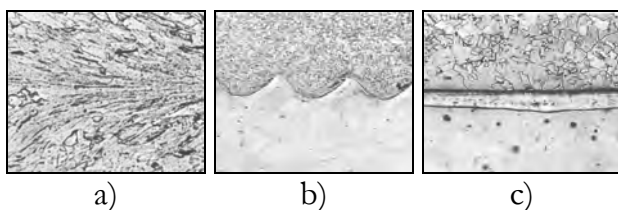
Slika 4.24 Direktni postupak zavarivanja eksplozijom, a – početak zavarivanja, b – tokom zavarivanja, 1 – detonator, 2 – eksploziv, 3 – zaštitni lim, 4 – lim koji plakira, 5 – lim koji se plakira, 6 – podložna ploča, slika preuzeta iz standarda, retuširana [13]

Aktiviranjem detonatora, počinje kontrolisano, sukcesivno paljenje eksploziva postavljenog duž lima. Sila pritiska od detonacije pritiska zaštitni lim i lim za plakiranje, i, kao i kod zavarivanja posrednim postupkom, lim za plakiranje teče i vezuje se za donji lim.

U zavisnosti od brzine paljenja eksploziva i ugla pod kojim su postavljeni limovi, veza između limova koji se zavaruju može da bude ravna (direktna), talasasta ili ravna veza sa međuslojem (slika 4.25).

Ravna veza dva metala (slika 4.25, a)

nastaje kada je brzina udara (detonativnog talasa) manja od kritične brzine nastanka talasa u metalu. U tom slučaju, vazduh između dva lima ima dovoljno vremena da napusti zonu formiranja šava. Kvalitet ovako formirane veze je dobar, ali se retko primenjuje, jer je usled primene male brzine zavarivanja, moguća pojava da do zavarivanja uopšte ne dođe.



Slika 4.25 Metalurške veze kod eksplozivnog zavarivanja: a – ravna, b – talasasta, c – ravna sa međuslojem [21]

Talasasta veza (slika 4.25, b) je optimalni vid spoja metala – može da se ostvari dobrim izborom pogodne brzine i ugla udara. Brzina udara je dovoljno velika da vazduh ne može brzo da napusti zonu zavarivanja i svojim turbulentnim kretanjem vrši dodatni pritisak na limove. Zbog toga se limovi talasaju pa i veza među njima ostaje takva.

Veza delova sa međuslojem (slika 4.25, c) nastaje pri najvećim brzinama udara detonacionog talasa. Kako je energija pritiska dovedena u zonu zavarivanja ekstremno brzo, limovi na kontaktu se trenutno deformišu, mešaju, a deo izmešanog materijala se potiskuje u smeru zavarivanja. Istisnuti materijal je na samoj granici topljenja i predstavlja svojevrstni vid „lepka” koji ostaje zarobljen između limova.

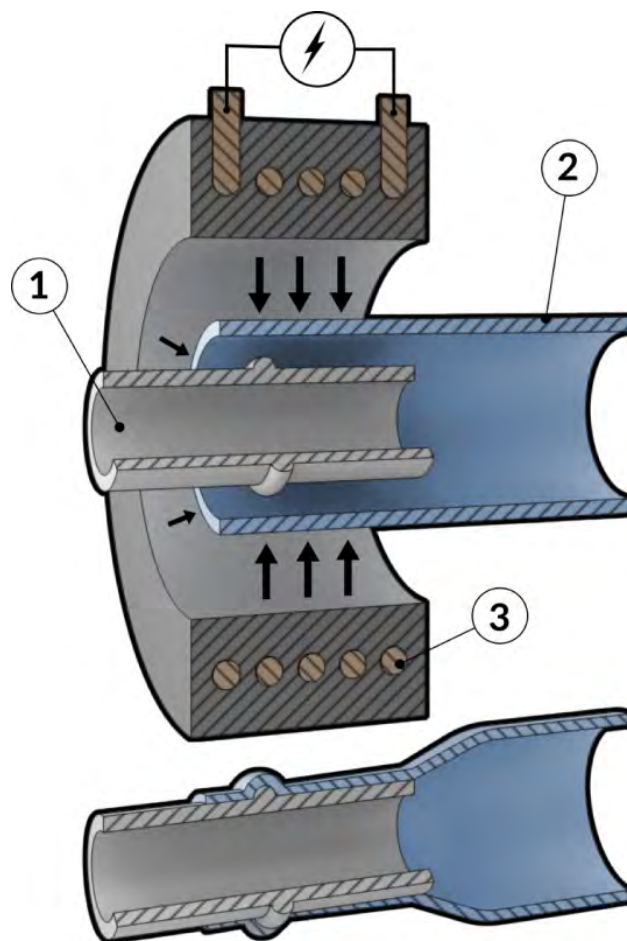
Postupak zavarivanja eksplozijom se najčešće primenjuje za uspešno zavarivanje/plakiranje raznorodnih delova koji mogu biti veoma različitih dimenzija – to je njegova najveća prednost. Kako nema zagrevanja, postupak zavarivanja ne stvara zonu uticaja toplote, ali, postoji velika zona deformacije. Postupak ima ogroman nedostatak – veoma je opasan po zavarivača i osoblje zbog gotovo nekontrolisanog odavanja ogromne količine energije.

Postupak zavarivanja eksplozivom je,

prema SRPS EN ISO 4063:2021, klasifikovan kao ISO 4063 – 441.

4.4.2 Postupak zavarivanja magnetnim pulsom

Postupak zavarivanja magnetnim pulsom je drugi komercijalno upotrebljivi postupak zavarivanja iz grupe postupaka koji koriste veliku količinu mehaničke energije. Veliku primenu ima pri spajanju delova u automobilske industriji. Prva primena postupka se vezuje za 1972. godinu, kada su u Sjedinjenim Američkim Državama započela istraživanja primene magnetnog pulsa za deformisanje magnetičnih materijala [40].



Slika 4.26 Postupak zavarivanja magnetnim pulsom, 1 – unutrašnja cev, 2 – spoljašnja cev, 3 – solenoid [41]

Postupak se koristi za zavarivanje cilindričnih delova, odnosno, cevi. Cev manjeg prečnika (slika 4.26, pozicija 1) se postavlja u centralni deo uređaja za zavarivanje i fiksira. Uobičajeno je da unutrašnja cev ima neki graničnik (navareni

sloj, venac i slično), čiji je cilj da inicira zavarivanje ali i da spreči aksijalno kretanje (smicanje) cevi. Spoljašnja cev – cev većeg prečnika (slika 4.26, pozicija 2) se navlači na unutrašnju cev i pozicionira oko graničnika. Kroz solenoid (slika 4.26, pozicija 3) se propušta naizmenična struja jačine od približno 10^6 A tokom vrlo kratkog vremenskog perioda (100 μ s). U tom trenutku se uspostavlja kratkotrajno ali veoma jako, magnetno polje koje povlači spoljašnju cev ka unutrašnjoj. Električno polje, praktično „zgužva” spoljašnju cev uz unutrašnju. Brzina „gužvanja” cevi se kreće i do 800 m/s uz pojavu znatne Lorencove sile (sila kojom elektromagnetno polje deluje na naelektrisanu česticu u pokretu) [21].

Prema tome, ogromna količina kinetičke energije deluje na cevi, plastično ih deformiše i zavaruje u čvrstom stanju, slično kao kod postupka zavarivanja eksplozijom.

Postupak ima brojne prednosti: moguće je zavarivanje potpuno raznorodnih materijala, velika je brzina zavarivanja pa je samim tim i produktivnost ogromna, nema potrebe za dodatnim materijalima, nema zone uticaja toplote, skoro da nema zaostalih napona u zavarenom spoju, nema pojave korozije, deformacija i, gotovo uvek, zavareni spoj ima čvrstoću koja je veća nego čvrstoća slabijeg materijala u spoju. Međutim, postoji i određeni broj nedostataka: visoka cena opreme, primena struja velike jačine, neophodna je velika čistoća i preciznost delova, nemoguće je zavarivanje krutih metala i neophodna je obuka zavarivača.

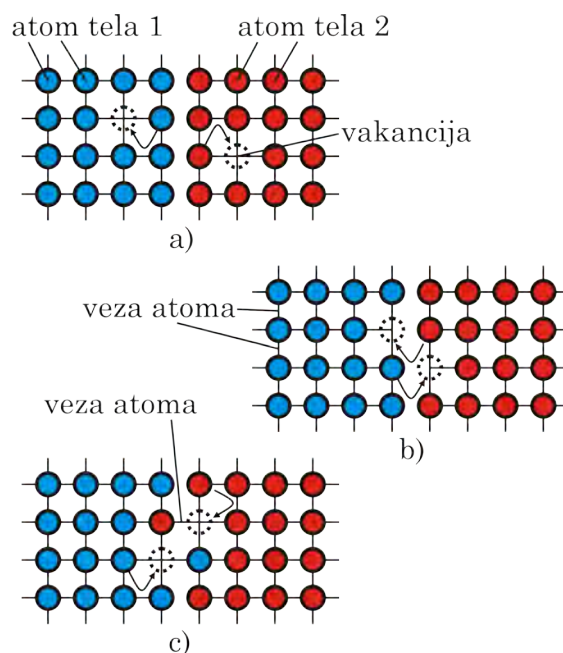
Postupak zavarivanja magnetnim pulsom je, prema SRPS ISO 4063, klasifikovan kao ISO 4063 – 442.

4.5 Postupak zavarivanja difuzijom

Postupak zavarivanja difuzijom (ili difuziono zavarivanje) je postupak spajanja metala u čvrstom stanju, gde dva tela u kontaktu, na osnovu difuzije, uspostavljaju fizičke, međuatomske, veze među atomima na

graničnim slojevima tela. Metali su tela sa kristalnom rešetkom koja je pravilna, ali se odlikuje nizom nesavršenosti (između ostalih – vakancijama, slika 4.27) [42].

Tokom vremena, atomi unutar kristalne rešetke menjaju svoj položaj – atomi blizu vakancije zauzimaju mesto vakancije, na njihovo mesto dolazi novi atom, koji ostavlja upražnjeno mesto, i proces se nastavlja (slika 4.27, a). Kada se vakancija na jednom telu „premesti” na granični sloj, atom u graničnom sloju drugog tela zauzima njeno mesto (slika 4.27, b). On i dalje zadržava vezu sa telom odakle je potekao, ali, uspostavlja vezu i sa telom čiju je vakanciju zauzeo. Kada se uspostavi dovoljno ovakvih veza, tela su trajno međusobno spojena.



Slika 4.27 Zauzimanje vakancija, a – samo unutar tela, b – između tela u kontaktu, c – nastavak razmene vakancija [43]

Razmena vakancija se nastavlja i unutar tela ali i između tela (slika 4.27, c). Teorijski posmatrano, nakon beskonačno mnogo proteklog vremena, broj veza među telima je ogroman i suštinski postoji samo jedno telo.

Difuzija je posledica drugog zakona termodinamike¹² i predstavlja proces razmene

¹² Entropija izolovanog sistema ne može da se smanji tokom vremena. U idealnim uslovima, ona može da ostane konstantna, dok u realnim uslovima može samo nepovratno da raste.

materije (i energije) između dva tela sa ciljem uravnoteženja bilo kakve neravnoteže – energetske, hemijske, termičke. Difuzija se opisuje i definiše Fikovim zakonima.

Pojava difuzije prisutna kod svih agregatnih stanja materije, pri čemu je najsporija kod materije u čvrstom agregatnom stanju a najbrža kod materije u tečnom agregatnom stanju.

Grupa postupaka zavarivanja difuzijom je, prema ISO 4063, klasifikovana je kao ISO 4063 – 45 a najprimenjivaniji i jedini standardizovani postupak je izostatički difuziono-pritisni postupak zavarivanja, klasifikovan kao ISO 4063 – 451.

Istorija postupka

Difuzija kod metala je pojava koja je čoveku poznata barem tri hiljade godina. Međutim, ona svoju primenu u tehnologiji spajanja nije našla do razvoja tehnologije obrade tankih folija od zlata i pozlaćivanja bez topljenja – što se desilo tek u srednjem veku.

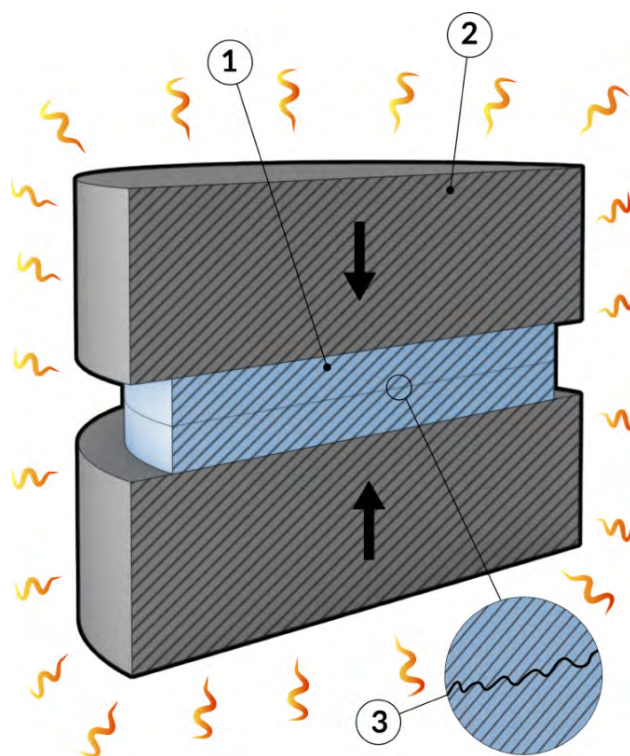
Prvi naučni radovi i teorijske osnove postupka zavarivanja difuzijom pripisuju se sovjetskom metalurgu Nikolaju Kazakovu ¹³ koji je od 1951. do 1957. godine radio istraživanja vezana za zavarivanje metala difuzijom u vakuumu [43]. Danas se postupak zavarivanja difuzijom primenjuje svuda u svetu, u različitim granama industrije.

Princip rada, parametri zavarivanja i oprema za zavarivanje

Kako je proces difuzije kod čvrstih tela relativno spor proces (na primer, kod zlata, koje jako dobro „difunduje”, za formiranje neraskidive veze, na 20°C potrebno je 12-14 dana). Da bi se proces difuzije ubrzao, zavarivanje se vrši na povišenoj temperaturi, uz dejstvo sile pritiska, i to u vakuumu.

Zbog toga se zavarivanje difuzijom vrši u vakuum komori, opremljenoj sistemom za zagrevanje i odgovarajućom presom.

Na slici 4.28, prikazan je osnovni princip zavarivanja difuzijom. Radni komadi (slika 4.28, pozicija 1), postavljaju se u vakuum komoru, pritiskaju presom (slika 4.28, pozicija 2), zagrevaju do određene temperature i tako zadržavaju neko vreme. Nakon toga, delovi se vade iz komore – zavareni u monolitnu celinu.



Slika 4.28 Šematski prikaz postupka zavarivanja difuzijom (ISO 4063 – 451, 1 – radni komadi, 2 – pritiskači, 3 – kontakt radnih komada [44])

Temperatura na kojoj se vrši difuziono zavarivanje je 50% do 75% temperature topljenja metala u kontaktu, sa nižom tačkom topljenja. Atomi metala na tim temperaturama su znatno pokretljiviji i njihov afinitet ka difuziji je veći. Takođe, na tim temperaturama, površina kontakta ima manji broj nečistoća, koje su sagorele ili su isparile. Metali na ovim temperaturama su na samoj granici faznih transformacija – izborom temperature zavarivanja, direktno se definiše da li do fazne transformacije u metalu dolazi ili ne [45].

Primenom sile pritiska na radne komade povećava se njihova aktivna površina dodira čime se, dodatno, pojačava afinitet metala ka difuziji. Povećanje aktivne površine kontakta podrazumeva elastične deformacije radnih komada. Dejstvo sile pritiska izaziva plastične

¹³ Rus. НИКОЛАЙ ФЕДОТОВИЧ КАЗАКОВ (1906 – 1984), metalurg, doktor tehničkih nauka u oblastima zavarivanja, metalurgije i tehnologije metala [45].

deformacije neravnina (hrapavost), ali su one neznatne u poređenju sa elastičnim. Pri zavarivanju konstrukcionih čelika, neophodni su pritisci od približno 10 MPa [43].

Zavarivanje difuzijom se, po pravilu, vrši u vakuumu, kako bi se dodatno pojačao afinitet metala ka difuziji (kad nema gasova, neumireni atomi metala se vezuju za druge atome metala, umesto za kiseonik iz atmosfere, na primer). Drugi razlog je da se iz zone zavarivanja eliminišu neželjeni gasovi iz atmosfere (kiseonik, vodonik, azot, vodena para itd) i tako se poboljšava kvalitet šava.

Zavarivanje difuzijom u vakuum komori traje od nekoliko minuta do deset i više dana, zavisno od materijala koji se zavaruju, dimenzija, pritiska i temperature na kojoj se vrši zavarivanje. Moguće je izvođenje zavarivanja difuzijom u atmosferi inertnog gasa – tada se sprečava nastanak oksida na kontaktnim površinama, ali je proces difuzije među telima znatno sporiji nego što je to slučaj u vakuumu. U veoma retkim situacijama, moguće je zavarivanje u slobodnoj atmosferi, ali, je trajanje procesa znatno duže i moguće su pojave različitih tipova grešaka u metalu šava.

Ukoliko se posmatra na mikro-nivou, postupak zavarivanja difuzijom ima tri faze:

- Mikro deformacije – pre nego se uspostavi potpuni kontakt radnih komada, najviši vrhovi neravnina se dodiruju i deformišu (prvo elastično, a po tom i plastično). Inicijalno spajanje dva tela započinje ovom plastičnom deformacijom.
- Prenos mase izazvan difuzijom – povišena temperatura i pritisak dovode materijal u kontaktu u stanje puzanja i materijal počinje da „teče” od jednog tela ka drugom i obratno.
- Intenzivna razmena mase, odnosno, nestajanje kontakta – u ovoj fazi zavarivanja, radni komadi počinju da gube jasnu granicu svoje materijalnosti na kontaktu sa drugim telom i dva tela u vezi postaju jedno monolitno telo.

Prednosti i nedostaci

Postupak zavarivanja difuzijom ima veliki broj prednosti u odnosu na

konvencionalne postupke zavarivanja: zavarivanje se vrši bez dodatnog materijala, nema značajnih metalurških promena u osnovnom metalu tokom zavarivanja, nema zone uticaja toplote, nema deformacija i zaostali naponi su minimalni. Ukoliko se zavaruju isti materijali, šav ima identične osobine kao osnovni metal.

Postupak odlikuje i prilično veliki broj nedostataka: visoka cena opreme i samog postupka zavarivanja, trajanje samog zavarivanja može da bude dugo, neophodna je velika čistoća priprema, a bitno je da hrapavost kontaktnih površina bude što manja. Zaštitni slojevi, premazi, kao i slojevi materijala, dobijeni pojedinim tipovima termičkih obrada, mogu značajno da uspore ili čak onemoguće zavarivanje difuzijom.

Primena postupka

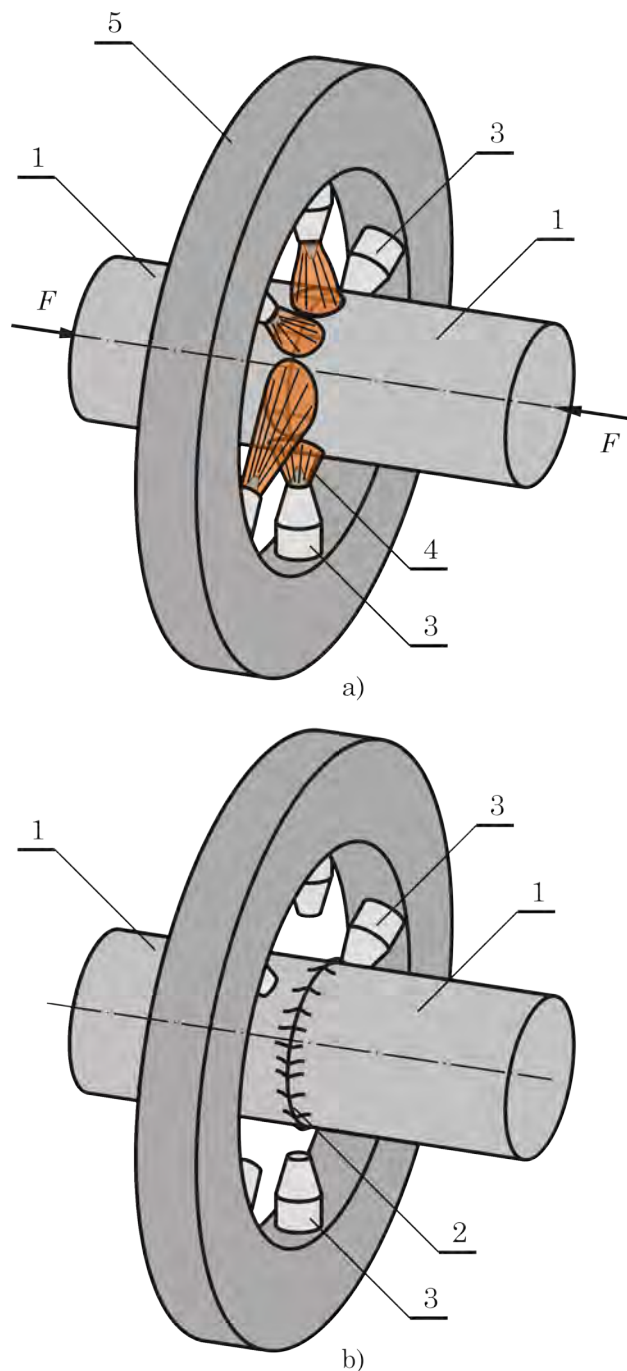
Postupak zavarivanja difuzijom je podjednako upotrebljiv i za zavarivanje metala i za zavarivanje nemetala. Poznati su primeri spajanja metala sa nemetalom: alati od metala (odvijači) spajaju se sa drškom od plastike postupkom difuzionog zavarivanja/lemljenja.

Svi metali i legure, koji se koriste u industriji današnjice, uspešno se zavaruju difuzijom. Posebno atraktivno je zavarivanje titanijuma, i njegovih legura, cirkonijuma, berilijuma, kao i sitnozrnih visokolegiranih čelika. Vrlo uspešno se zavaruju raznorodni materijali, uz primenu blagih režima – niža temperatura, mala sila pritiska i dugo vreme zadržavanja u vakuum komori.

4.6 Postupak gasno-pritisnog zavarivanja

Gasno-pritisni postupak zavarivanja je pripadnik posebne grupe konvencionalnih postupaka zavarivanja koji primarnu energiju aktivacije dobijaju iz hemijske energije sagorevanja gorivog gasa. Kako je količina energije dobijena sagorevanjem gorivog gasa velika, ovaj potencijal se primenjuje za kombinovani postupak zavarivanja – gasno pritisni postupak. Energija dobijena

sagorevanjem gasa se koristi za prethodno zagrevanje radnih komada i delimično topljenje, dok se zavarivanje delova vrši dejstvom mehaničke energije. Kombinovanjem toplote dobijene sagorevanjem gasa, sa mehaničkom energijom pritiska, moguće je zavarivanje delova većih dimenzija nego primenom tipičnog gasnog postupka zavarivanja.



Slika 4.29 Postupak gasno-pritisnog zavarivanja sa istovremenim zagrevanjem i iskivanjem šava, 1 – radni komadi, 2 – šav, 3 – mlaznice, 4 – plamen, 5 – nosač mlaznica (plamenik) [13]

Prema standardu SRPS ISO 4063, postupak gasno-pritisnog zavarivanja klasifikovan je kao ISO 4063 – 47.

Istorija postupka

Postupak gasno-pritisnog zavarivanja je nastao krajem pedesetih godina dvadesetog veka u Americi, ali su prve ideje o primeni gorivog gasa samo za zagrevanje delova, uz primenu drugog principa/postupka za zavarivanje, vezane za početak dvadesetog veka i Francusku [42].

Princip rada, parametri zavarivanja i oprema za zavarivanje

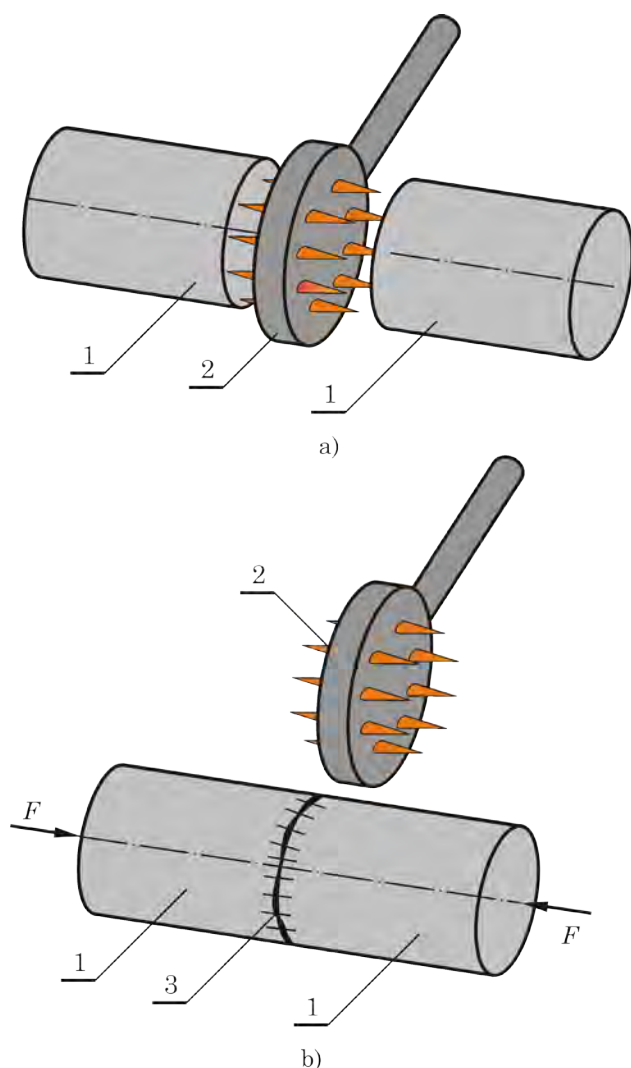
U praksi se sreću dva izvođenja postupka gasno-pritisnog zavarivanja:

- uz istovremeno zagrevanje i primenu mehaničke sile, i
- prethodnim zagrevanjem delova, pa naknadnim iskivanjem šava.

Dva masivna radna komada (slika 4.29, a, pozicija 1) se pozicioniraju jedan uz drugi i pritiskaju silom F . Oko njih, direktno iznad linije spajanja, postavlja se nosač sa snopom mlaznica – plamenik (slika 4.29, a, pozicije 3 i 5) kroz koje se u zonu zavarivanja dovodi mešavina gorivog gasa i acetilena. Nakon paljenja smeše, plamen iz mlaznica (slika 4.29, a, pozicija 4) zagreva radne komade u zoni kontakta i delimično ih topi. Sa početkom topljenja delova, povećava se intenzitet sile pritiska i započinje se iskivanje šava (slika 4.29, b, pozicija 4). Po završetku zavarivanja, prvo se gasi plamenik a onda se prestaje sa dejstvom mehaničke sile (slika 4.29, b). Ovakva konstrukcija plamenika naziva se zatvorenom.

Kada se zavarivanje vrši prethodnim zagrevanjem pa naknadnim iskivanjem mehaničkom silom, konstrukcija plamenika naziva se otvorenom. Radni komadi (slika 4.30, a, pozicija 1) se, u inicijalnom položaju, postavljaju jedan naspram drugog ali na određenom rastojanju. Između tako postavljenih delova se uvodi plamenik (slika 4.30, pozicija 2) koji je simetrično-cilindrične konstrukcije, tako da mlaznice

usmeravaju plamen na oba radna komada podjednako. Zagrevanje delova traje sve do crvenog „usijanja” čela radnih komada. Kada osnovni metal počne da se topi, plamenik se izvlači iz zone zavarivanja i odmah se na radne komade primenjuje mehanička sila iskivanja F (slika 4.30, b), koja deluje duž ose delova. Usled dejstva sile, radni komadi se priljubljuju jedan uz drugi i vrši se iskivanje šava (slika 4.30, pozicija 3). Sila deluje sve dok se metal šava ne ohladi – i tada je zavarivanje završeno.



Slika 4.30 Postupak gasno-pritisnog zavarivanja sa uzastopnim zagrevanjem i iskivanjem šava, 1 – radni komadi, 2 – plamenik, 3 – šav [13]

Prednosti i nedostaci. Primena postupka.

Kako je postupak gasno-pritisnog zavarivanja kombinacija gasnog zavarivanja i kovačkog zavarivanja „na hladno”, prisutne su

neke prednosti, ali i nedostaci oba postupka.

Gasno zagrevanje delova pre primene/uz primenu mehaničke sile poboljšava zavarivost delova, koji su najčešće vrlo masivni. Međutim, veliki problem postupka je samo predgrevanje – vrlo lako može da se dogodi da se delovi ne zagrevaju dovoljno, ili se zagrevaju nejednako, pa sa tim dolazi i do formiranja nepravilnog šava.

Postupak je teško primenjiv na visoko legirane i nerđajuće čelike, kao i na materijale koji brzo odводе toplotu – austenitni čelici, bakar, aluminijum, kao i njihove legure.

Sa druge strane, postupak ne zahteva neku posebnu pripremu šava, posebnu čistoću, kao ni preciznost u izradi. Međutim, neophodan je precizan alat za centriranje, pozicioniranje i vođenje radnih komada.

Postupak je primenjiv za masivne delove, najčešće u horizontalnom položaju zavarivanja [21].

4.7 Postupci hladnog zavarivanja pritiskom

Postupci hladnog zavarivanja pritiskom su pravi predstavnici cele grupe ISO 4063 – 4: zavarivanje radnih komada se kod ovih postupaka vrši primenom samo mehaničke sile pritiska. Primenjena sila pritiska je velikog intenziteta i primenjuje se u relativno kratkom vremenskom periodu. Druga osobenost hladnog postupka zavarivanja je da je temperatura radnih komada jednaka sobnoj temperaturi.

Postupci zavarivanja pritiskom „na hladno” su, standardom ISO 4063, klasifikovani kao grupa ISO 4063 – 48.

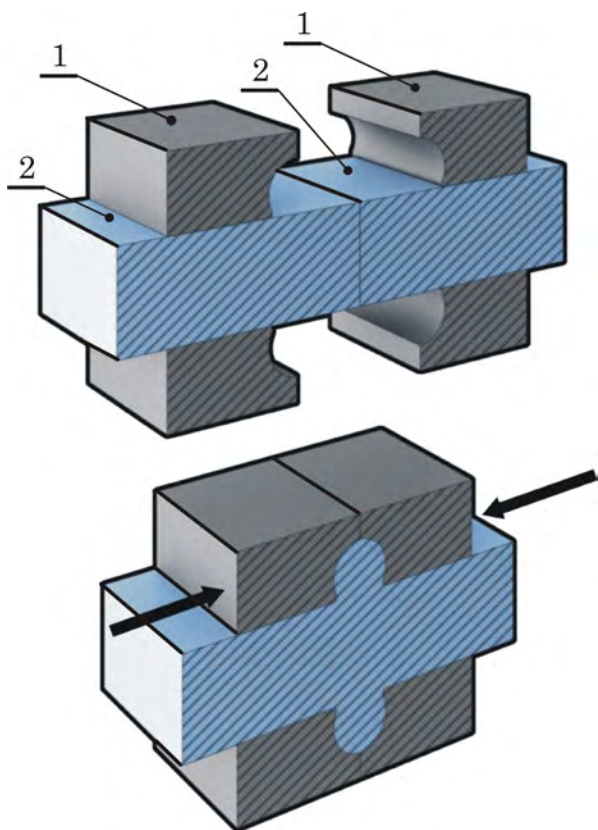
Jedini standardizovani postupak koji pripada grupi 48 je postupak hladnog ekstruzionog zavarivanja (ISO 4063 – 481).

Princip rada, parametri zavarivanja i oprema za zavarivanje

Pored radnih komada, kod oba postupka, za zavarivanje je neophodan kalup (slika 4.31, pozicija 1).

Radni komadi se pozicioniraju u kalup i

fiksiraju. Nakon toga, mehanička sila pritiska se primenjuje na kalup i prenosi se na radne komade. Hladni (ili topli) radni komadi su dejstvom sile pritiska prisiljeni da se plastično deformišu u zoni kontakta – dolazi do značajnog tečenja čvrstog materijala oba radna komada, koji se usled primenjene sile zagreva, teče i prisilno meša unutar kalupa. Po prestanku delovanja sile, materijal unutar kalupa ostaje izmešan, hladi se i formira metal šava [47, 48].



Slika 4.31 Postupak hladnog/toplog zavarivanja pritiskom (ekstruzijom, ISO 4063 – 481), 1 – kalup, 2 – radni komadi [49]

Kalup je izrađen sa šupljinom u sredini kako bi mogao da primi istisnuti višak materijala koji se, po potrebi, mehanički uklanja sa zavarenih komada nakon skidanja kalupa.

4.8 Postupci toplog zavarivanja pritiskom

Kod toplog postupka zavarivanja pritiskom, radni komadi su prethodno zagrejani pa se tek onda zavaruju ili se

zagrevaju tokom zavarivanja.

Prema EN ISO 4063:2020, postupci toplog zavarivanja su klasifikovani kao grupa ISO 4063 – 49, i njoj pripadaju postupci:

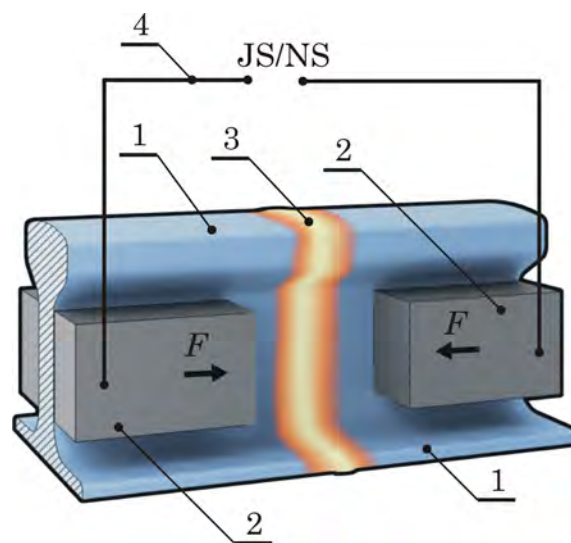
- Postupak zavarivanja toplim alatom, klasifikovan kao ISO 4063 – 491,
- Postupak termo-pritiskog zavarivanja, klasifikovan kao ISO 4063 – 492, i
- Postupak koekstruzionog zavarivanja, klasifikovan kao ISO 4063 – 493.

4.8.1 Postupak zavarivanja toplim alatom

Postupak zavarivanja toplim alatom ISO 4063 – 491 je detaljnije opisan u poglavlju 6. Postupak se uspešno primenjuje za zavarivanje plastičnih delova i metalnih delova malih dimenzija.

4.8.2 Postupak termo-pritiskog zavarivanja

Postupak termo-pritiskog zavarivanja ili postupak zavarivanja pritiskom „na toplo” (ISO 4063 – 492) je postupak 481 koji ima dodatni izvor toplotne energije koji zagreva i topi radne komade na površini spajanja. Zagrevanjem radnih komada smanjuje se intenzitet sile pritiska koja je neophodna za iskivanje šava.



Slika 4.32 Postupak toplog zavarivanja pritiskom (elektrotopno zagrevanje, ISO 4063 – 492), 1 – radni komadi, 2 – stezne čeljusti, 3 – šav, 4 – izvor struje [50]

Na slici 4.32 prikazana je varijanta toplog zavarivanja pritiskom sa dodatnim (elektrootpornim) zagrevanjem radnih komada. Radni komadi (slika 4.32, pozicija 1) su postavljeni unutar čeljusti mašine (slika 4.32, pozicija 2) i povezani na izvor struje (slika 4.32, pozicija 4).

Kako se radni komadi dodiruju preko svojih lica, električna struja protiče kroz njih. Omskim otporom na kontaktu (elektrootporno) se električna struja pretvara u toplotu i zagreva radne komade. Stezne čeljusti konstantno vrše pritisak na radne komade i tako iskivaju šav (slika 4.32, pozicija 3) od zagrejanog osnovnog metala.

Prednosti i nedostaci. Primena postupka.

Osnovna prednost postupka je zavarivanje delova velikih dimenzija. Ovako zavareni delovi nemaju zonu uticaja toplote, minimalna je promena mikrostrukture metala šava (u odnosu na osnovni metal) i moguće je zavarivanje raznorodnih metala. Međutim, neophodan je robustan i snažan sistem za zavarivanje, vrlo precizno izrađen i dovoljno krut kalup, koji može da izdrži ogromne sile koje se primenjuju tokom zavarivanja. Samim tim, postupak nije primenjiv van radionice, a cena opreme i zavarivanja je visoka.

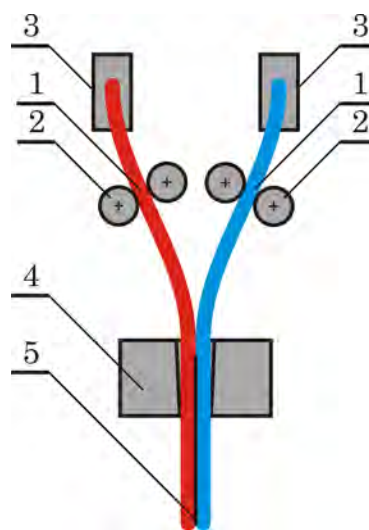
Postupak je primenjiv i za delove malih dimenzija i tada je procedura zavarivanja veoma slična postupku zavarivanja trenjem vitkih delova na ploču, uz primenu izvora toplote umesto toplote dobijene trenjem.

Vrlo često se postupak 492 primenjuje za zavarivanje elektronskih komponenti i kućišta. Žica (ili pin) na elektronskom kolu se prethodno istopi plamenom ili električnim otporom. Pri tom se formira loptica rastopljenog materijala koja se pritiskom dejstvom alata zalepi za osnovni metal – ploču. Tada dolazi do delimičnog topljenja ploče i formiranja šava između čipa i ploče.

Vrlo često se postupkom 492 zavaruju čelici, bronz, legure bakra, a moguća su zavarivanja raznorodnih materijala.

4.8.3 Postupak koekstruzionog zavarivanja

Postupak koekstruzionog zavarivanja (prema SRPS EN ISO 4063:2021, klasifikovan kao ISO 4063 – 493) koristi toplotu za zagrevanje radnih komada a završno iskivanje šava vrši se mehaničkom energijom. Njegova najčešća primena je za zavarivanje provodnika i obloge provodnika, odnosno, primenjuje se za zavarivanje polimera, bakra i ostalih obojenih metala.



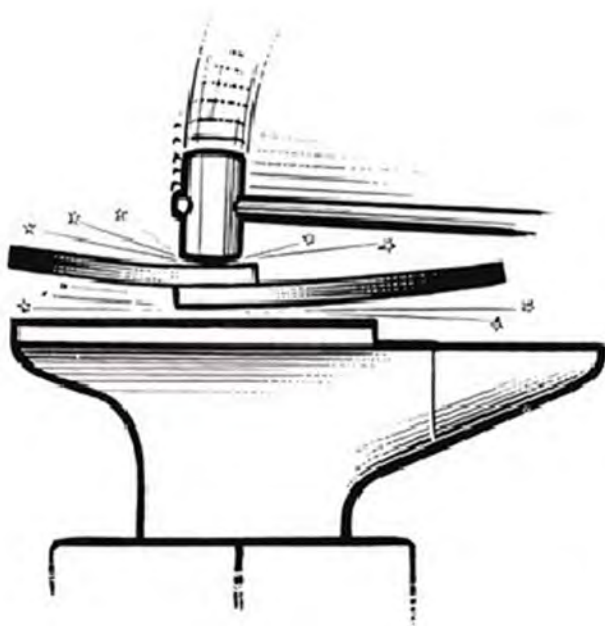
Slika 4.33 Postupak koekstruzionog zavarivanja, 1 – radni komad, 2 – sistem za pokretanje, 3 – grejači, 4 – matrica (kalup), 5 – šav

Radni komadi (slika 4.33, pozicija 1) se prethodno zagrevaju grejačima (slika 4.33, pozicija 3) do temperature topljenja. Nakon toga, sistem za pokretanje (slika 4.33, pozicija 2) gura zagrejane radne komade u otvor u matrici (slika 4.33, pozicija 4) gde se oni pribijaju jedan uz drugi. Otvor u matrici (kalupu) je konusnog oblika i sužava se prema izlazu što primorava radne komade da se čvrsto pribijaju jedan uz drugi pa se tako vrši iskivanje šava (slika 4.33, pozicija 5).

Pri prolasku kroz kalup radni komadi trpe značajne mehaničke deformacije – ekstrudiraju, a kako se ekstruzija događa istovremeno kod oba radna komada, onda se i postupak spajanja naziva koekstruzija ili koekstruziono zavarivanje.

4.9 Kovačko zavarivanje

Postupak kovačkog zavarivanja je prvi postupak zavarivanja metala – smatra se da je nastao u bronzano doba kao postupak spajanja/izrade nakita i noževa. Kovačko zavarivanje je postupak spajanja metala u čvrstom stanju.



Slika 4.34 Šematski prikaz kovačkog zavarivanja
[51]

Radni komadi se zagrevaju do temperature niže od temperature topljenja. Za većinu čelika to je temperatura niža od 1000 °C. Zagrevanje se vrši kako bi radni komadi postali deformabilniji – plastičniji. Nakon toga započinje se mehaničko spajanje zagrejanih delova – udarcima čekića ili primenom konstantne sile pritiska, kao što je to slučaj kod postupka 49.

Kako je „kovanje” delova dugotrajan proces, dolazi do hlađenja radnih komada pa je neophodno ponovno zagrevanje (dogrevanje) delova. Kako bi se izbegla oksidacija delova zagrejanih do „crvenog usijanja”, primenjuje se zaštitni prašak – najčešće je to pepeo.

Do spajanja delova dolazi kombinovanim dejstvom toplote i mehaničke pritisne energije, ali i difuzije.

Na slici 4.34, prikazana je šema kovačkog zavarivanja dva pločasta dela.

Postupak kovačkog zavarivanja, verzijom ISO 4063:1978 bio je standardizovan i klasifikovan kao ISO 4063 – 43. Postupak je izbačen iz kasnijih verzija standarda, a oznaka 43 dodeljena je postupku zavarivanja trenjem sa mešanjem. Danas je kovačko zavarivanje, prema EN ISO 40636:2020, „zastareli” postupak zavarivanja!

LITERATURA

- [1] SRPS EN ISO 4063:2021: Welding, brazing, soldering, cutting, mechanical joining and adhesive bonding – Nomenclature of processes and reference numbers (EN ISO 4063:2020), naziv na sprskom: Zavarivanje, tvrdo lemljenje, meko lemljenje, rezanje, mehaničko spajanje i adheziono spajanje — Lista postupaka i njihovo označavanje, objavljen: 17.12.2020;
- [2] EN ISO 4063:2020: Welding, brazing, soldering, cutting, mechanical joining and adhesive bonding – Nomenclature of processes and reference numbers, objavljen: 12/2020;
- [3] Britannica Biography: <https://www.britannica.com/biography/Pythagoras> (dokument pregledan 08.11.2020.);
- [4] Francis Galton: https://en.wikipedia.org/wiki/Francis_Galton, (dokument pregledan 08.11.2020.);
- [5] Paul Langevin: https://en.wikipedia.org/wiki/Paul_Langevin, (dokument pregledan 08.11.2020.);
- [6] Sonar: <https://en.wikipedia.org/wiki/Sonar>, (dokument pregledan 08.11.2020.);
- [7] Amazon: <https://amazon.com/mask>, (dokument pregledan 08.11.2020.);
- [8] Sonics and Materials Inc.: <https://www.sonics.com/liquid-processing/about/>, (dokument pregledan 08.11.2020.);
- [9] Seymour Linsley: <https://prezi.com/uumqkxclmugc/ultrasonic-welding/>, (dokument pregledan 08.11.2020.);
- [10] Patent USA 3224916: Solof et al: Sonic Method of Welding Thermoplastic parts, 21.12.1965;
- [11] Ultrasonic Welding: https://en.wikipedia.org/wiki/Ultrasonic_welding, (dokument pregledan 08.11.2020.);
- [12] Howard B. Cary: Modern Welding Technology, 5th edition, Prentice Hall, USA, 2002;
- [13] ISO 857-1:1998: Welding and allied processes – Vocabulary – Part 1: Metal welding processes, 1998 (povučen 2007);
- [14] ISO/TR 25901-3:2016: Welding and allied processes – Vocabulary – Part 3: Welding processes, 2016;
- [15] TWI: Ultrasonic: <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/job-knowledge/ultrasonic-welding-of-injection-moulded-components-part-2-component-design-and-weld-parameters-062>, (dokument pregledan 09.11.2020.);
- [16] US Patent: 444,721, J. H. Bevington: Spinning Tube, 13.01.1891;
- [17] M. Maalekian: Friction welding – critical assessment of literature, Science and Technology of Welding and Joining, Volume 12, Issue 8, <https://doi.org/10.1179/174329307X249333>, 2013;
- [18] Вилль В.И. Сварка металлов трением. Ленинград, „Машиностроение”, 1970;
- [19] KUKA AG: <https://www.kuka.com/RS300>, (dokument pregledan 12.03.2021);
- [20] Fabrika reznog alata Čačak: Katalog reznog alata, Čačak, 1972;
- [21] Autorizovana predavanja na kursu za međunarodne inženjere zavarivanja IWE, Mašinski fakultet Niš, 2009-2021;
- [22] Đurđanović Miroslav: Prilog razmatranju primene toplote generisane trenjem, Tehnika – Mašinstvo, vol. 52, br. 6, str. 1-7, 2003;
- [23] Сварка трением; Справочник, Машиностроение, Ленинградское отделение, 1987;
- [24] Газизов Я.Б., Трусков А.В., Ким П.В., Цепин А.М.: Исследование термофрикционной прошивки заготовках, Кузнечно-штамповочное производство, No 3, 1981;

- [25] D. Jones Joseph Jebaraj, R. Sankaranarayanan: Friction stud welding – An overview, AIP Conference Proceedings 2220, 140037, <https://doi.org/10.1063/5.0001232>, 2020;
- [26] Friction Stud Welding: https://en.wikipedia.org/wiki/Friction_stud_welding, (dokument pregledan 03.03.2021);
- [27] Linear Friction Welding: <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/job-knowledge/linear-friction-welding-146>, (dokument pregledan 08.11.2020.);
- [28] TWI: <https://www.twi-global.com/who-we-are>, (dokument pregledan 03.03.2021);
- [29] Thomas, WM; Nicholas, ED; Needham, JC; Murch, MG; Temple-Smith, P; Dawes, CJ. Friction-stir butt welding, GB Patent No. 9125978.8, International patent application No. PCT/GB92/02203, (1991);
- [30] Thomas W et al: US Patent, 5,460,317, Friction Welding, 24.10.1995;
- [31] Z. Y. Ma, A. H. Feng, D. L. Chen, J. Shen: Recent Advances in Friction Stir Welding/Processing of Aluminum Alloys: Microstructural Evolution and Mechanical Properties, Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences, Volume 43, Issue 4, pp. 269-333, 2018;
- [32] Radovan Kovačević:
<https://www.smu.edu/Lyle/Academics/Departments/ME/People/Faculty/KovacevicRadovan>, (dokument pregledan 03.03.2021);
- [33] Projekat: Osvajanje tehnologije zavarivanja istorodnih i raznorodnih materijala postupkom zavarivanja trenjem alatom, rukovodilac projekta: Radović Nenad, Ministarstvo nauke i zaštite životne sredine, tehnološki razvoj, broj projekta TR-6758, 2005-2009;
- [34] Projekat: Osvajanje proizvodnje komponenti konstrukcija postupkom zavarivanja trenjem alatom, rukovodilac projekta: Petrović A., Materijali i hemijske tehnologije, evidencioni broj projekta: 19050, 2005-2009;
- [35] Projekat: Istraživanje primene savremenih nekonvencionalnih tehnologija u proizvodnim preduzećima sa ciljem povećanja efikasnosti korišćenja, kvaliteta proizvoda, smanjenja troškova i uštede energije i materijala, Naučno - istraživački projekat u okviru programa tehnološkog razvoja. Projekat finansiran od strane Ministarstva za nauku i tehnološki razvoj Republike Srbije. Evidencioni broj TR 35034. Realizacija projekta 2011.-2020. Rukovodilac projekta prof. dr Miroslav Radovanović;
- [36] Živković B. Aleksandar: „Uticaj geometrije alata za postupak zavarivanja trenjem pomoću alata na svojstva zavarenog spoja legure Al2024”, doktorska disertacija, Mašinski fakultet Beograd, April 2011;
- [37] Mijajlović Miroslav: Istraživanje i razvoj analitičkog modela za određivanje količine generisane toplote pri postupku zavarivanja trenjem sa mešanjem, Univerzitet u Nišu, Mašinski fakultet, Niš, Srbija, 15.06.2012, Niš, Srbija, doktorska disertacija, pp. 210
- [38] Explosion Welding: https://en.wikipedia.org/wiki/Explosion_welding, (dokument pregledan 13.03.2021);
- [39] G. R. Cowan et al: US Patent, 3,137,937, Explosive Bonding, 23.06.1964;
- [40] Magnetic Pulse Welding: https://en.wikipedia.org/wiki/Magnetic_pulse_welding, (dokument pregledan 13.03.2020.);
- [41] Manufacturing Guide: <https://www.manufacturingguide.com/en/magnetic-pulse-welding-mpw>, (dokument pregledan 28.11.2020.);
- [42] Howard B. Cary: Modern Welding Technology, 5th edition, Prentice Hall, USA, 2002;
- [43] Николай Федотович Казаков: Диффузионная сварка в вакууме, Издательство „Машиностроение”, 1968;
- [44] Manufacturing Guide: <https://www.manufacturingguide.com/en/diffusion-welding-dfw>, (dokument pregledan 29.11.2020.);

- [45] Николай Федотович Казаков:
https://ru.wikipedia.org/wiki/Казаков,_Николай_Федотович, (dokument pregledan 29.11.2020.);
- [46] Miller Welding: <https://www.millerwelds.com/resources/article-library/the-history-of-welding>, (dokument pregledan 03.03.2021);
- [47] Cold Welding: https://en.wikipedia.org/wiki/Cold_welding, (dokument pregledan 13.03.2021);
- [48] Hans J. Fahrenwaldt, Volkmar Schuler: Praxiswissen Schweißtechnik: Werkstoffe, Prozesse, Fertigung, Springer, ISBN 978-3-8348-1523-1, 2011
- [49] Manufacturing Guide: <https://www.manufacturingguide.com/en/cold-pressure-welding>, (dokument pregledan 29.11.2020.);
- [50] Manufacturing Guide: <https://www.manufacturingguide.com/en/forge-welding>, (dokument pregledan 29.11.2020.);
- [51] Forge Welding: <https://www.theweldingmaster.com/what-is-forge-welding-and-how-it-works/>, (dokument pregledan 13.03.2020.).

5 POSTUPCI ZAVARIVANJA SNOptom ČESTICA

Postupci zavarivanja snopom čestica spadaju u „novije” postupke zavarivanja topljenjem i zbog specifičnosti njihove realizacije, oni se smatraju specijalnim ili „egzotičnim”. Ovi postupci se u literaturi sreću kao postupci zavarivanja zrakom. Ovaj naziv vrlo dobro oslikava princip kojim se vrši zavarivanje: odgovarajućim uređajima, formira se snop/zrak čestica koje se vrlo brzo kreću od izvora ka osnovnom metalu, udaraju o površinu osnovnog metala i kinetička energija koju čestice u zraku/snopu nose se pretvara u toplotu. Zbog gustine primenjenih zraka (količine čestica), količina oslobođene toplote je dovoljno velika da istopi deo osnovnog metala (u zoni zavarivanja) što je kod ovih postupaka potreban i dovoljan uslov za zavarivanje topljenjem.

Postupci zavarivanja snopom klasifikuju se i kao visokoenergetski postupci zavarivanja, odnosno, postupci sa velikom količinom energije zavarivanja po jedinici zavarene dužine (velika linijska gustina energije).

Snop/zrak kojim se vrši zavarivanje može da bude sačinjen samo od elektrona, elektrona i fotona (svetlosti) ili samo od fotona. U praksi se za zavarivanje koriste zraci sačinjeni samo od elektrona ili samo od svetlosti, dok se prelazna varijanta zraka (elektroni i fotoni) izbegava. Zavarivanje snopom vrši se u vakuumu, slobodnoj atmosferi (u vazduhu) ili u atmosferi zaštitnog gasa.

Prema SRPS EN ISO 4063:2021 [1], postupci zavarivanja snopom klasifikovani su kao osnovna grupa ISO 4063 – 5. Ovoj osnovnoj grupi pripadaju dve grupe postupaka:

- Postupci zavarivanja elektronskim snopom, klasifikovani kao ISO 4063 – 51 i
- Postupci zavarivanja laserskim snopom, klasifikovani kao ISO 4063 – 52.

Obe grupe postupaka se primenjuju za precizna spajanja, za masivne delove, daju čiste spojeve koji ne zahtevaju naknadnu

obradu i koriste veoma skupu i složenu opremu za zavarivanje.

5.1 Postupci zavarivanja elektronskim snopom

Postupak zavarivanja elektronskim snopom je postupak zavarivanja topljenjem koji kao izvor energije aktivacije zavarivanja koristi snop usmerenih elektrona. Elektroni se kreću velikom brzinom i nose veliku količinu kinetičke energije. Prilikom udara u čvrstu površinu, elektron svoju kinetičku energiju predaje toj površini, i ona se većim delom, gotovo trenutno, pretvara u toplotu. Nakon udara, elektron prodire u telo koje ga „hvata” ili se elektron odbija od tela i odlazi.

Istorija postupka

Smatra se da je postupak zavarivanja elektronskim snopom nastao 1952. godine, kada je Karl-Hajns Štajneger¹ napravio prvu mašinu za zavarivanje [2-3]. Međutim, istraživanje koje je Štajneger vršio tokom 1948. godine bilo je usmereno razvoju izvora elektronskih snopova koji bi se koristili za elektronske mikroskope. Nakon toga, Štajneger je istraživao mogućnost primene elektronskog snopa za bušenje kamena, pa je tek 1951. godine počeo eksperimente koji su za cilj imali topljenje metala elektronskim snopom.

Prva istraživanja koje se odnose na tehnologiju dobijanja i primene elektronskog snopa, vezuje se za drugu polovinu devetnaestog veka i fizičare Johana Hitorfa² i Vilijama Kruksa³. U periodu 1869-1879,

¹ Nem. Karl-Heinz Steigerwald (10.09.1920–2001), naučnik, doktor fizike [2].

² Nem. prof. Johann Wilhelm Hittorf (27.03.1824–28.11.1914), naučnik, fizičar [4].

³ Eng. William Crookes (17.06.1832–04.04.1919), naučnik, fizičar i hemičar [5].

Kruks je razvio i sproveo eksperiment u Kruks-Hitorfovoj cevi, kada je otkrio „katodne zrake”, odnosno, snop elektrona. Prvi eksperimenti iz 1869. godine su se odnosili na stvaranje katodnih zraka u gasovima, a 1879. godine naučnici su uspjeli da tope olovo ovakvim zracima [4-5]. Fizički fenomen „katodnih zraka” bio je okidač za dalja istraživanja, pa je Rentgen⁴, nešto pre 1895. godine, koristio modifikovanu Kruksovu cev sa naponom od 5000 V i smatrao je da je tako dobio koncentrisano-usmereni snop elektrona. Kasnije se ispostavilo da je Rentgen dobio x-zrake [3].

Svi savremenici i bliski nasljednici istraživanja koje je izveo Kruks, smatrali su da je efekat zagrevanja metala elektronskim snopom loš i poguban za metale.

Prvi koji je izveo ozbiljnija istraživanja elektronskog snopa, u vakuumu, sa ciljem primene za topljenje metala složenije hemijske strukture (čelici, tantal itd) bio je Marčelo Pirani⁵ (od 1900. do 1915. godine).

Početak dvadesetog veka, veliki problem daljih istraživanja postupka zavarivanja elektronskim snopom bio je nedostatak snažnih vakuum pumpi – koje su bile neophodne za „visoke vakuume” a proizvedene su tek nakon Drugog svetskog rata [8].

Princip rada, parametri zavarivanja i oprema za zavarivanje

Od samog pronalaska postupka, bilo je očigledno da je neophodna specijalna komora u kojoj se generišu i usmeravaju elektroni inače je postupak zavarivanja neefikasan.

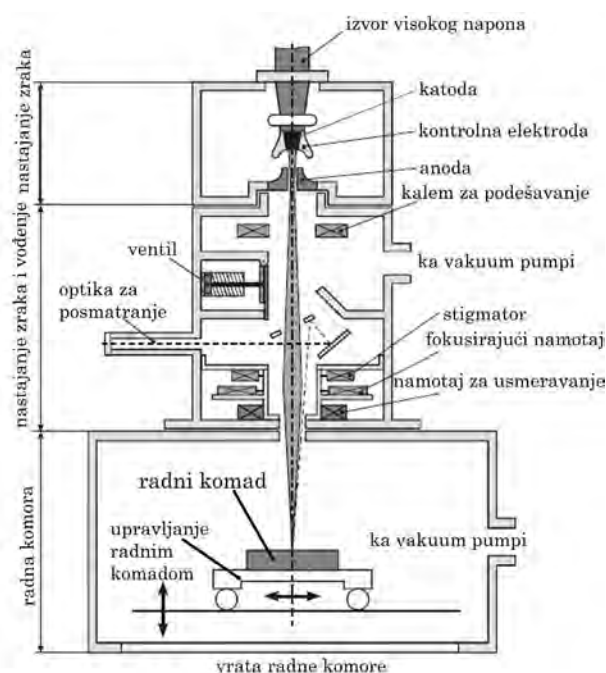
Elektroni neophodni za zavarivanje elektronskim snopom nastaju kao posledica razlike potencijala između katode i anode. Kada se uspostavi razlika potencijala između elektroda, (negativno naelektrisani) elektroni poleću ka anodi, privučeni (pozitivno naelektrisanom) anodom. Masa elektrona je

veoma mala $m_e = 9,10938 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$ ⁶, i prilikom „izletanja” sa katode, elektroni se kreću brzinom od približno $v_e = 2200 \text{ km/h}$. Ovi elektroni su „spori”, i nose relativno malu količinu kinetičke energije E_{ke} :

$$E_{ke} = \frac{1}{2} m_e v_e^2 = 2,204 \cdot 10^{-18} \text{ J} \approx 14 \text{ eV} \quad (5.1)$$

Kako bi elektroni nosili dovoljno energije neophodne za zavarivanje, neophodno je da budu brži i/ili da ih bude više. To su osnovni razlozi zašto je neophodna posebna oprema za zavarivanje. Ona se sastoji od četiri osnovna dela (slika 5.1):

- izvor električne struje,
- elektronski top,
- radna komora, i
- manipulator.



Slika 5.1. Uređaj za zavarivanje elektronskim snopom [9]

Izvor električne struje mora da obezbedi veoma veliku razliku potencijala između anode i katode (od 30 kV do 150 kV, u zavisnosti od dubine koju snop treba da ostvari). U takvim uslovima, elektroni izleću iz katode brzinama koje iznose i do 60% brzine svetlosti te nose značajno više kinetičke

⁴ Nem. prof. Wilhelm Conrad Röntgen (27.03.1845–10.02.1923), mašinski inženjer, fizičar [6].

⁵ Ita. Marcello Stefano Pirani (01.07.1880–11.01.1968), fizičar iz Nemačke [7].

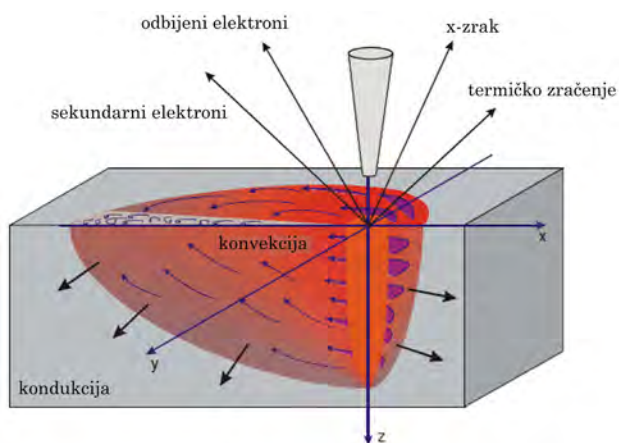
⁶ Poređenja radi, masa protona je $m_p \approx 1800 \cdot m_e$ [10].

energije ($E_{ke}=1,474\cdot 10^{-14}\text{ J}\approx 91980\text{ eV}$ pri 60% brzine svetlosti) [10].

Sklop koji čine izvor napona, katoda, kontrolna elektroda i sistem za upravljanje naziva se elektronskim topom. Kako bi se pojačao efekat ispaljivanja elektrona, katoda se zagreva tako što se kroz nju propušta slaba struja, napona 5 V. Kontrolna elektroda ima zadatak da dodatno ubrza i usmeri ispaljene elektrone te je i ona pod naponom od približno 1 kV [11].

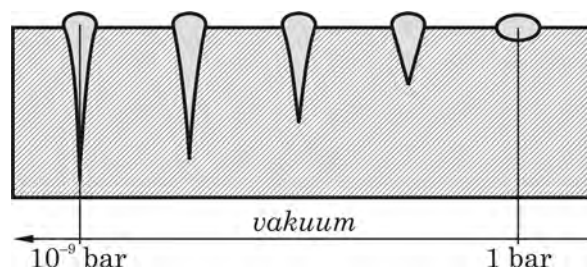
Anoda (koja je šuplja) privlači elektrone ispaljene iz elektronskog topa. Veliki broj elektrona prolazi kroz nju i nastavlja put ka radnim komadima, prolazeći kroz kalemове za podešavanje, stigmator i namotaj za usmeravanje. Njihov cilj je da grupišu i usmere elektrone ka radnim komadima, odnosno, da formiraju snop elektrona [9].

Usmereni elektroni udaraju u površinu radnih komada – veliki broj elektrona prodire u unutrašnjost radnih komada dok se jedan deo odbija i vraća nazad. Elektroni koji prodru u telo se sudaraju sa čvrstim česticama i vrlo brzo „predaju” svoju kinetičku energiju – pretvara se u toplotu (slika 5.2). Inicijalna dubina prodiranja elektrona je približno 1 μm . Međutim, kako je gustina deponovane energije vrlo velika (10^4 W/mm^2 do 10^7 W/mm^2), materijal radnih komada gotovo trenutno prelazi u tečno stanje, tako da svaki naredni elektron udari u rastopljeni metal, prođe kroz njega i prodire sve dublje u čvrsti deo osnovnog metala.



Slika 5.2. Transformacija kinetičke energije elektrona unutar radnih komada [9]

Dok putuju kroz prostor, elektroni se sudaraju sa atomima gasova i nečistoća (u čvrstom stanju) koje zauzimaju zapreminu prostora kroz koji elektroni prolaze. Kao rezultat ovih sudara, velika količina elektrona je „izgubljena” što se značajno odražava na efikasnost primene postupka. Zbog toga se, osnovni postupak zavarivanja elektronskim snopom vrši u vakuum komori. Kao sekundarni uticaj vakuuma, mora da se napomene zaštita električnih komponenti uređaja za zavarivanje od isparavanja i visokih temperatura.



Slika 5.3. Uticaj vakuuma na oblik i dimenzije šava [9]

Za komercijalno zavarivanje primenjuju se srednji i visoki vakuumi ($1,3\cdot 10^{-9}\text{ bar}$ do $1,3\cdot 10^{-8}\text{ bar}$), pri čemu važi pravilo – viši vakuum, veća dubina uvarivanja ali i uži šav [9].

Pored zavarivanja elektronskim snopom u vakuumu, moguće je zavarivanje u slobodnoj atmosferi ili u atmosferi zaštitnog gasa (aktivnog ili inertnog). U oba slučaja, neophodni su znatno snažniji elektronski topovi nego što se koriste kod zavarivanja u vakuumu. Upravljanje dubinom zavarivanja je otežano i šavovi dobijeni u atmosferi su znatno plići nego u vakuumu. Posebni problemi su sudar elektrona sa atomima pojedinih gasova (kao na primer helijuma, azota) kada se emituju x-zraci, i rayna isparenja u zoni zavarivanja.

Uvođenje vakuum komore u obaveznu opremu za zavarivanje elektronskim snopom nameće obaveznu upotrebu manipulatora, koji će vršiti pokretanje radnih komada i/ili uređaja za zavarivanje koji se sa uređajem za zavarivanje nalaze unutar vakuum komore.

Funkcionisanje osnovnih delova sistema za zavarivanje elektronskim snopom nije

moguće bez brojnih dodatnih sistema: vakuum pumpe, optičkih uređaja za nadzor vakuum komore, displeja, kontrolera procesa, senzora pritiska i temperature, a kod uređaja novije generacije – programabilnih, procesorskih jedinica. Postupak zavarivanja elektronskim snopom uvek prati pojava „ključaonice” [9, 11].

Prednosti i nedostaci

Osnovna prednost postupka zavarivanja elektronskih snopom je zavarivanje velikom količinom koncentrisane energije. Zbog koncentracije energije, zavarivanje se vrši gotovo trenutno, zona topljenja je veoma mala, a samim tim, mala je i zona uticaja toplote, male su temperaturne deformacije, kao i zaostali naponi. Posmatrajući ove karakteristike postupka, realni model postupka zavarivanja elektronskim snopom je vrlo blizak teorijskom modelu – zavarivanje graničnih slojeva radnih komada uz koncentrisani unos energije [12].

Koncentrisan unos energije, dozvoljava vrlo duboko uvarivanje, kao i veliku brzinu zavarivanja (2 mm/s do 50 mm/s) [9].

Dodatni materijal se ne koristi pri zavarivanju elektronskim snopom. Kako se zavarivanje odvija u vakuum komori, čistoća zavarenog spoja je velika, pa samim tim nije potrebno naknadno čišćenje.

Postupak prate i brojni nedostaci:

- Postupak zavarivanja je, zbog potrebe za sofisticiranom i složenom opremom, veoma skup. Vođenje postupka zavarivanja, odnosno, rukovanje opremom zahteva dobro obučenog operatora zavarivanja.
- Male dimenzije šava (koncentrisano zavarivanje) zahtevaju preciznu prethodnu obradu radnih komada, besprekorno pozicioniranje (male zazore) i kruto spajanje u manipulatoru za zavarivanje.
- Zapremina radne komore predstavlja dimenziono ograničenje radnih komada.
- Brzo i koncentrisano zavarivanje, kod pojedinih materijala (osetljivih na prsline), može da dovede do pojave toplih prslina, zakaljivanja ili čak do potpunog, krstog loma.

- Iako se postupak zavarivanja izvodi u komori (koja je izolovana i bez gasova), postoji verovatnoća nastanka određene količine α -zraka koji, dugoročno gledano, mogu da naškode operatoru zavarivanja. Ovaj problem rešava se uklanjanjem čoveka iz zone zavarivanja i primenom sistema upravljanja na daljinu ili potpunom automatizacijom postupka zavarivanja – uz dodatne troškove.

Primena postupka

Postupak zavarivanja elektronskim snopom je primenjiv za gotovo sve metale (uključujući i klasičnim postupcima teško zavarive metale), kako istorodne, tako i raznorodne hemijsko-metalurške prirode. Postupak se najviše primenjuje za zavarivanje većine čelika, metala otpornih na toplotu (niobijum, molibden, volfram), hemijski aktivnih metala (titanijuma, berilijuma, cirkonijuma), aluminijuma i njegovih legura. Moguće je zavarivanje čelika ekstremno male debljine (minimalno 0,01 mm), izvršena su zavarivanja čelika debljine od 150 mm, ali i legure aluminijuma debljine 500 mm.

Zavarivanje nemetala, kao i zavarivanje metala koji se odlikuju visokim pritiskom pare – magnezijum, cink, kadmijum, torijum i sl, nije moguće. Postupak je teško primenjiv za zavarivanje zakaljivih materijala (zbog velike brzine hlađenja zone zavarivanja).

Najbolje rezultate postupak pokazuje pri zavarivanju u uskom (i dubokom) žlebu, kao i za reparaturno zavarivanje delova različitih oblika i dimenzija [9].

Podela, klasifikacija i standardizacija postupka

Postupci zavarivanja elektronskim snopom su, prema SRPS EN ISO 4063:2021, klasifikovani kao grupa ISO 4063 – 51. Dalja podela i klasifikacija postupaka zavarivanja elektronskim snopom je izvršena prema atmosferi u kojoj se vrši zavarivanje na:

- Postupak zavarivanja elektronskim snopom u vakuumu (ISO 4063 – 511),
- Postupak zavarivanja u atmosferi (ISO 4063 – 512), i

- Postupak zavarivanja elektronskim snopom u atmosferi zaštitnih gasova (ISO 4063 – 513).

Svi standardni postupci zavarivanja elektronskim snopom koriste istu opremu za zavarivanje dok je jedina razlika u okruženju/atmosferi.

5.2 Postupci zavarivanja laserskim snopom

Druga grupa postupaka iz grupe postupaka zavarivanja snopom jesu postupci zavarivanja laserskim snopom ⁷. U ovom slučaju, snop koji vrši zavarivanje je snop čestica svetlosti – fotona (ili elektromagnetnih talasa ⁸), generisan u posebnom izvoru (stimulisano elektromagnetno zračenje), fokusiran vrlo preciznom optikom i usmeren u zonu zavarivanja.

Postupak zavarivanja laserom je postupak sa najvećom gustinom energije (ali i sa najvećom angažovanom snagom zavarivanja). Istovremeno, to je postupak sa najmanjom zonom uticaja toplote od svih postupaka zavarivanja topljenjem [12].

Istorija postupka

Princip stimulisane emisije (čestica, svetlosti), kao jednu od osnova kvantne mehanike, 1917. godine objavio je Albert Ajnštajn ⁹. Na osnovu teorije stimulisane emisije, kao preteča lasera nastao je „maser“¹⁰

u periodu 1950–1964. Maser je prvi uređaj koji je proizvodio koherentne ¹¹ elektromagnetne talase, ali je imao dva značajna nedostatka: nije mogao kontinualno da emituje talase i domet ovih talasa je bio veoma mali, te zato maser nije našao značajniju primenu u tehnici. Otkriće masera pripisuje se naučnicima sa Kolumbija univerziteta: Čarlsu Tauvnsu ¹², Džejmsu Gordonu ¹³, Arturu Šavlovu ¹⁴ i Herbertu Cajgeru¹⁵ i vezuje se za 1953. godinu.

Međutim, otkriće masera se pripisuje i Nikolaju Basovu¹⁶ i Aleksandru Prokhorovu¹⁷ koji su od 1950. godine do 1952. godine postavili osnove masera i razvili prvi osciloskop-maser. Međutim, Basov i Prokhorov su svoje rezultate objavili na sovjetskoj konferenciji nacionalnog značaja 1952. godine, a na međunarodnom nivou tek 1954. godine pa je Tauvnsonov i Gordonov koncept masera prvi internacionalizovan. Basov je 1955. godine konstruisao „3-stage laser“, a 1959. godine je započeo rad na poluprovodničkom laseru, koji je izgradio 1963. godine [23].

Gordon Gould¹⁸ je prvi naveo pojam „laser“ 1959. godine u svojoj doktorskoj disertaciji, tako da se on smatra jednim od izumitelja lasera. Gould nije odmah patentirao

¹¹ Koherentni talasi imaju istu talasnu dužinu, amplitudu i period oscilovanja, odnosno, istu faznu razliku.

¹²Eng. Charles Hard Townes (28.07.1915–27.01.2015), fizičar iz Amerike. Jedan je od tri dobitnika Nobelove nagrade za 1964. godinu za oblast fizika – maser i laser [16].

¹³Eng. James Power Gordon (20.04.1928–21.06.2013), fizičar iz Amerike [17].

¹⁴ Eng. Arthur Leonard Schawlow (05.05.1921–28.04.1999), fizičar iz Amerike [18].

¹⁵ Eng. Herbert J. Zeiger (16.03.1925–14.01.2011), fizičar iz Amerike [19].

¹⁶ Rus. Никола́й Генна́диевич Ба́сов (14.12.1922–01.07.2001), fizičar iz Rusije. Jedan je od tri dobitnika Nobelove nagrade za 1964. godinu za oblast fizika – maser i laser [20].

¹⁷ Rus. Алекса́ндр Миха́йлович Про́хоров (11.07.1916–08.01.2002), fizičar iz Rusije. Jedan je od tri dobitnika Nobelove nagrade za 1964. godinu za oblast fizika – maser i laser [21].

¹⁸Eng. Gordon Gould (17.07.1920–16.09.2005), fizičar iz Amerike [22].

⁷ Svetlost je, prema važećim teorijama, dualne prirode – ima neke osobine čvrste čestice (i tada se najmanji delić svetlosti zove foton) ali i neke osobine elektromagnetnog talasa (npr. frekvenciju oscilovanja). Ovom prilikom, nećemo zalaziti u dublju analizu prirode svetlosti – za zavarivanje je dovoljno da kažemo – svetlost, čestica svetlosti – foton.

⁸ Naziv laser potiče od skraćenice naziva pojave na engleskom jeziku: *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation* [14].

⁹Nem. Albert Einstein (14.03.1879–18.04.1955), fizičar poreklom iz Nemačke. Dobitnik Nobelove nagrade 1921. godine za oblast fizika [13].

¹⁰Naziv maser potiče od skraćenice naziva pojave na engleskom jeziku: *Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation* [15].

laser, što su drugi naučnici iskoristili. Od 1960. godine do 1977. godine, Gould je vodio „pravni rat” za laser i tek krajem 1977. godine dobio je prvi patent sa nazivom laser [22].

Fizičar Teodor Maiman¹⁹ je 16.05.1960. godine prvi izveo eksperiment sa laserom (sa kristalom) kakav danas poznajemo, a već 1961. godine dobio je patentna prava za ovaj laser. Prema tome, najmanje tri čoveka, u periodu 1955-1960, polažu pravo na otkriće savremenog lasera.

Tokom 1964. godine, „Bell Labs” (u vlasništvu Nokia-e) je izumela prvi laser sa veštačkim kristalom (Nd:YAG) koji je omogućio zavarivanje laserom. Već sredinom 1970. godine je vršeno zavarivanje laserom sa ugljendioksidom kao medijumom. Danas postoji čitava paleta lasera sa argonom, ksenonom ili neonom kao medijumom, kao i više poluprovodničkih vrsta lasera kojima se uspešno zavaruju različiti metali [25].

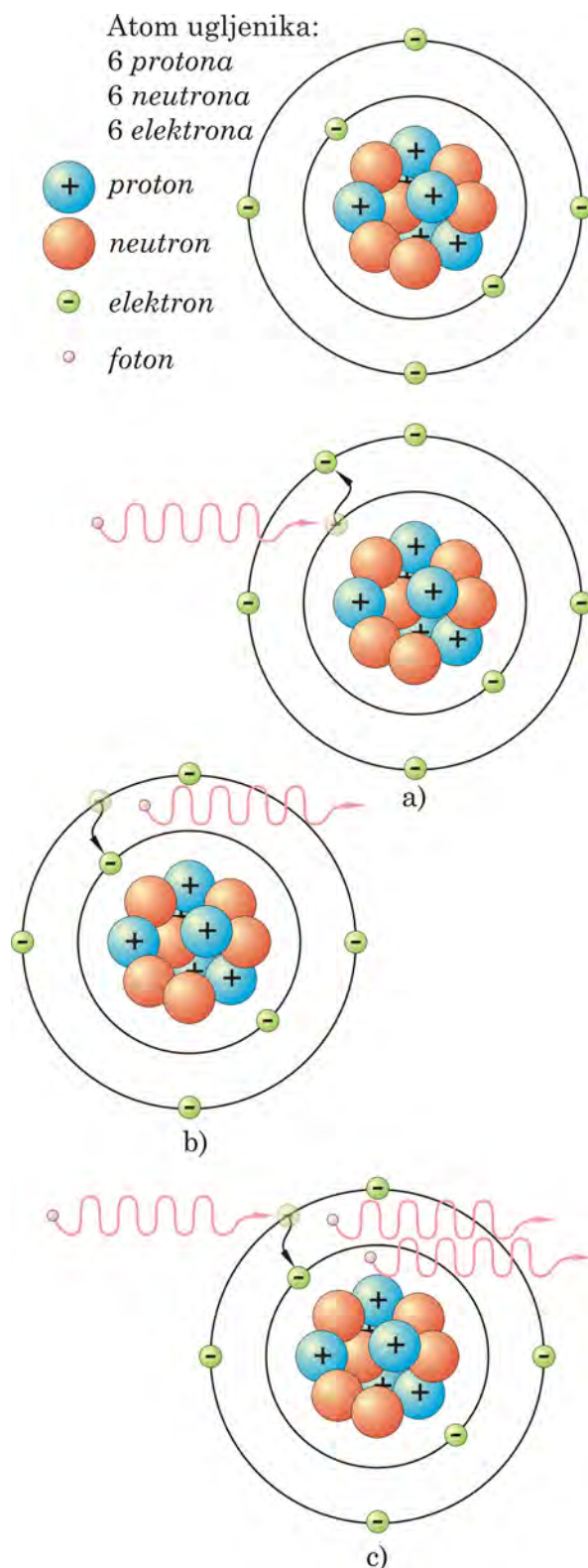
Princip rada, parametri zavarivanja i oprema za zavarivanje

Laser je uređaj koji emituje snop koherentne usmerene svetlosti u određenom pravcu. Svetlost lasera dobija se principom stimulisanе emisije (elektromagnetnog zračenja), a usmerava se i pojačava optičkim uređajima.

Kada foton svetlosti (ili energije) pogodi elektron koji se nalazi u stacionarnoj orbiti (primer, atom ugljenika, slika 5.4), elektron prelazi iz svoje stacionarne orbite u višu orbitu (slika 5.4, a). Takav prelazak elektrona naziva se ekscitacijom a atom iz stabilnog stanja prelazi u pobuđeno stanje (ima višak energije). Ukoliko nema novih pobuda, nakon nekog vremena, elektron sa viškom energije ispušta jedan foton svetlosti, vraća se u svoju stacionarnu orbitu a atom se vraća u stabilno stanje (slika 5.4, b). Ovakav proces otpuštanja fotona, naziva se deekscitacijom.

Stimulisana emisija (svetlosti) je proces kod koga foton svetlosti (određene frekvencije, faze, polariteta, pravca i smer

kretanja) udara u pobuđeni (ekscitirani) elektron atoma nekog medijuma.



Slika 5.4 Atom ugljenika u interakciji sa fotonom:
a – spontana apsorpcija – ekscitacija, b – spontana emisija – deekscitacija, c – stimulisana emisija

Posledica ovog sudara je umirenje elektrona (vraćanje u stacionarnu orbitu, energetska umirenje) i emisija jednog fotona

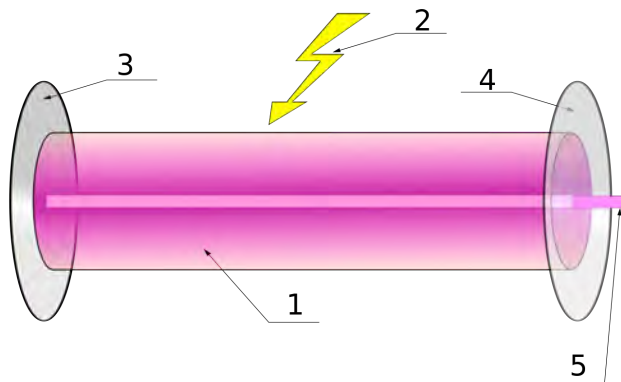
¹⁹ Eng. Theodore Harold Maiman (11.07.1927–05.05.2007), inženjer i fizičar iz Amerike [24].

istih osobina kao inicijalni foton. Sad su prisutna dva fotona koji nastavljaju kretanje i sudaraju se novim elektronima te se proces nastavlja.

Ukoliko se spoljašnjim izvorom energije obezbedi da je minimalno 50% svih atoma medijuma pobuđeno, onda se oslobođenim fotonima postiže efekat daljeg pobuđivanja medijuma – nepobuđeni atomi „hvataju” fotone, pobuđuju se, novi fotoni ih umiruju, atomi ispuštaju fotone koje su uhvatili uz dodatak još jednog. Ovakvo ponašanje medijuma traje sve dok spoljašnji izvor pobuđuje atome medijuma.

Na slici 5.5 prikazana je šema lasera. Medijum (slika 5.5, pozicija 1) se uvek pobuđuje spoljašnjim izvorom (slika 5.5, pozicija 2).

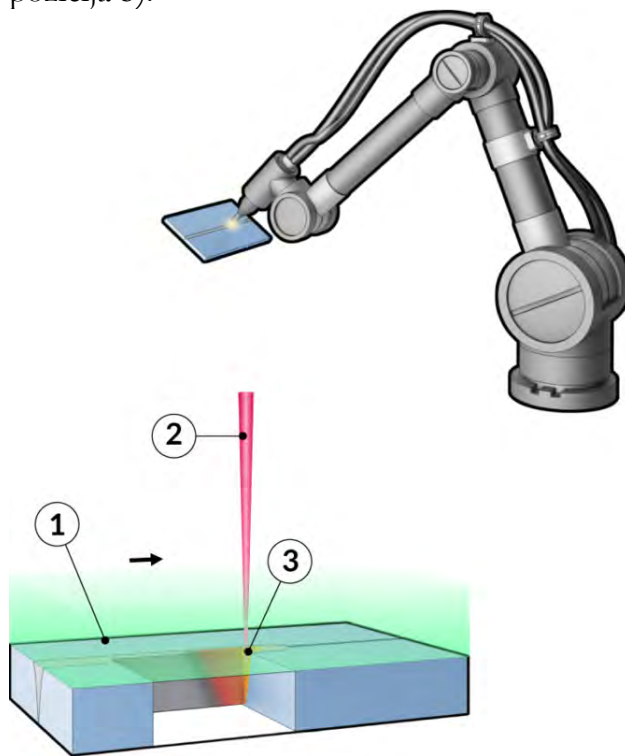
Medijum je uvek izrađen od materijala koji je sklon lakom pobuđivanju – kristali, titanijum, hrom, staklo, plemeniti gasovi, azot, ugljenmonoksid, ugljendioksid, metali u tečnom stanju, poluprovodnici, kao i pojedine tečnosti na bazi ugljenika.



Slika 5.5 Šematski prikaz lasera, 1 – medijum, 2 – spoljašnji izvor pobude, 3 – ogledalo (reflektor), 4 – polupropusno ogledalo na izlazu, 5 – laserski snop (zrak) [14]

Boja svetlosti lasera, njegova snaga i domet zavise od vrste medijuma u komori. Kako bi se pojačao efekat (snaga) lasera, medijum se nalazi u komori koja reflektivna (slika 5.5, pozicija 3). Sa jedne strane komore, nalazi se polupropusno ogledalo (slika 5.5, pozicija 4) koje na sebi ima mali otvor kroz koji laser emituje koncentrisani snop

koherentne svetlosti – laserski zrak (slika 5.5, pozicija 5).



Slika 5.6 Uređaj za zavarivanje laserom, 1 – zaštitni gas, 2 – laserski snop, 3 – zona zavarivanja [26]

Spoljašnji izvor pobudi medijum i „osvetli” ga fotonima. Kao reakcija medijuma, javlja se veliki broj fotona koji se kreću kroz komoru, odbijaju se o ogledala, i tako se usmeravaju. Posle određenog broja odbijanja, formira se tanak snop svetlosti koji kroz otvor na polupropusnom ogledalu izlazi iz lasera.

Ovakav laser se postavlja na uređaj kojim se vrši zavarivanje – uglavnom je to robotizovana ili mehanizovana zavarivačka ruka²⁰, koja nosi dodatne optičke uređaje (sočiva, ogledala) za još bolje fokusiranje i usmeravanje laserskog snopa (slika 5.6).

U zonu zavarivanja (slika 5.6, pozicija 2) dovodi se zaštitni gas (slika 5.6, pozicija 1) kako bi se sprečio negativan uticaj gasova iz atmosfere i usporilo brzo hlađenje zavarenog spoja. Laserski zrak odlikuje se velikom energijom (gustinom energije), pa je dubina uvarivanja veoma velika (slika 5.6, pozicija 3).

²⁰Lasери za zavarivanje metala debljine preko 3 mm se retko izvode kao ručni zbog svoje velike snage i velikog rizika od povrede zavarivača/operatora zavarivanja [9].

U osnovnom izvođenju, zavarivanje laserom vrši se bez dodatnog materijala. Međutim, razvoj postupka omogućio je nastajanje hibridnih postupaka (npr. laser MIG postupak) gde se, radi povećanja produktivnosti, kontinualno dovodi dodatni materijal [9].

Ekperimentalni podaci pri zavarivanju čelika pokazuju da, ukoliko je gustina energije niža od 10^3 W/mm^2 , onda se zavarivanje vrši u modu „kondukcije” – zagrevanje i topljenje materijala koji se zavaruju vrši se na površini i plitko unutar radnih komada usled brzog odvođenja toplote. Tečno kupatilo je malo i vrlo lokalizovano.

Ukoliko je gustina energije viša od 10^4 W/mm^2 , dolazi do većeg topljenja metala i „efekta ključaonice” (slika 5.7). U ovom slučaju, mehanizam odvođenja toplote kondukcijom ne može dovoljno brzo da odvede toplotu, te na mestu dejstva dolazi do brzog topljenja metala. Rastopljeni metal, usled zagrevanja, vrlo brzo isparava (čak se delimično jonizuje i nastaje plazma) i formira se rupa u metalu šava koja podseća na vulkan ili ključaonicu. Kretanje plazme po zidu „ključaonice” sprečava njeno popunjavanje rastopljenim metalom što za posledicu ima veliku dubinu uvarivanja, dodatno mešanje rastopljenog metala i sprečavanje brzog hlađenja metala šava. Širina rastopljenog kupatila kao i širina samog šava je mala [27].

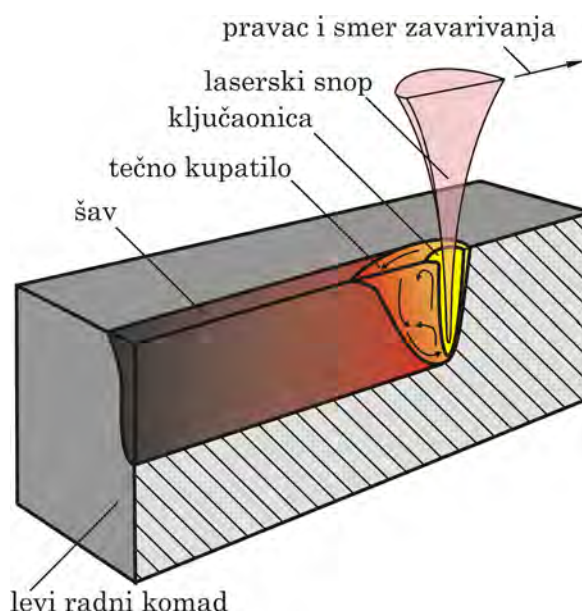
Ukoliko je gustina energije veća od 10^3 W/mm^2 a manja od 10^4 W/mm^2 , prisutan je efekat penetracije (ali ne ključaonice) uz jaku kondukciju – što je slučaj sličan postupku zavarivanja elektronskim snopom [9].

Efekat ključaonice je toliko snažan da se izvodi namerno izmeštanje optičkih sistema lasera van fokusa kako bi se sprečilo trenutno isparavanje (čak i paljenje) osnovnog metala u centru ključaonice.

Osnovni parametri postupka zavarivanja laserom su snaga lasera, gustina energije, brzina zavarivanja i protok zaštitnog gasa.

Na primer, za zavarivanje austenitnog, nerđajućeg čelika X2CrNiMo17-13-2, primenjuje se brzina zavarivanja od 2 mm/s, koristi se izvor struje koji pravi kvadratni

pulsni oblik svetlosti lasera, pri čemu se za zavarivanje lima debljine 17 mm koristi snaga lasera 15 kW (zavisnost snage od dubine uvarivanja je linearna). Kao zaštitni gas, koriste se argon, helijum ili mešavina 75% argona+25% helijuma, sa protokom gasa ne manjim od 15 l/min. Koristi se laser sa poluprovodničkim vlaknima od elemenata „retke zemlje” (lantanoidi, aktinoidi itd).



Slika 5.7 Efekat ključaonice kod postupka zavarivanja laserom i elektronskim snopom [27]

Laseri sa običnim kristalima (rubin npr) koriste izvore struje od 10 W do 20 W i proizvode laserski snop debljine 1,5 mm do 25 mm. Koriste se samo za zavarivanje ali ne i za sečenje materijala. Kada se koristi kristal Nd:YAG²¹, koriste se izvor snage 0,04 W do 600 W, laserski snop je širok 1 mm do 10 mm, ali je moguće zavarivanje većih debljina nego laserom sa rubinom [27].

Laseri sa CO₂ koriste izvore snage 50 W do 25 kW i daju snop debljine 1 mm do 10 mm. Danas se oni znatno više primenjuju nego laseri sa kristalom.

Laseri sa poluprovodnicima imaju najmanja ograničenja – najmoćniji laser (iz 2018. godine) za zavarivanje ima izvor struje od 200 kW, snop debljine do 20 mm i cenu od 4,000,000 američkih dolara. Brzina zavarivanja ovim laserom se kreće do 200 mm/s [28].

²¹ Kristal eng. neodymium-doped yttrium aluminum garnet Nd:Y₃Al₅O₁₂ [28].

Prednosti i nedostaci

Osnovne prednosti postupka zavarivanja laserom, u odnosu na ostale postupke zavarivanja su:

- Primenjiv je za zavarivanje velikog broja metala, uključujući i visokolegirane čelike, kao i za zavarivanje raznorodnih materijala;
- Unos toplote je veoma koncentrisan;
- Prilikom zavarivanja nastaje vrlo mala zona uticaja toplote;
- Male su deformacije radnih komada;
- Kvalitet zavarenih spojeva je odličan;
- Moguće je zavarivanje delova veoma složene topologije, kao i šavova velike dužine;
- Pojedine greške, na primer – kaviteti, se ne javljaju pri zavarivanju laserom;
- Zavarivanje je moguće bez dodatnog materijala (ali i sa dodatnim materijalom);
- Zavarivanje je moguće u vazduhu, u atmosferi zaštitnih gasova ili u vakuumu;
- Nije potrebna naknadna mehanička obrada lica zavarenog šava;
- Postupak zavarivanja se lako automatizuje i kontroliše.

Postupak zavarivanja laserom ima nekoliko ozbiljnih nedostataka:

- Brzi i kratkotrajni unos toplote, vodi ka brzom hlađenju nakon zavarivanja (red veličina 10^{-6} s), a samim tim, moguće je zakaljivanje zavarenih delova i pojava ozbiljnih prslina u metalu šava;
- Priprema žleba zahteva visoku preciznost i čistoću;
- Operatori zavarivanja moraju da budu dobro obučeni za zavarivanje;
- Prema nekim autorima, maksimalna debljina koja je zavariva laserom je 19 mm [27];
- Step en iskorišćenja energije je oko 10%;
- Oprema za zavarivanje je složena,

osetljiva, zahtevna za održavanje i veoma skupa.

Primena postupka

Postupak zavarivanja laserom se najviše primenjuje za spajanje delova u automobilske i avioindustriji, za izradu medicinske opreme, u prehrambenoj industriji, kao i za proizvodnju nakita.

Samim tim, postupak zavarivanja laserom je primenjiv za većinu obojenih metala, aluminijum, gotovo sve vrste tehnički zavarenih čelika, ali, mora da se napomene velika uspešnost zavarivanja čelika otpornih na koroziju, visoku temperaturu, habanje i ostale čelike otporne na uticaj agresivnih sredina.

Ne postoje ograničenja primene postupka zavarivanja laserom vezana za oblike delova, položaj zavarivanja ili oblik zavarenog šava.

Podela, klasifikacija i standardizacija postupka

Postupci zavarivanja laserom su, prema SRPS EN ISO 4063:2021, klasifikovan kao grupa ISO 4063 – 52. Dalja podela i klasifikacija postupaka zavarivanja laserom je izvršena prema vrsti medijuma u laseru:

- Postupak zavarivanja laserom sa kristalom (medijum u čvrstom stanju) ISO 4063 – 521,
- Postupak zavarivanja gasnim laserom (medijum za zavarivanje je u gasovitom stanju) ISO 4063 – 522, i

Postupak zavarivanja laserom sa poluprovodnicima (diodni laser) ISO 4063 – 523.

LITERATURA

- [1] SRPS EN ISO 4063:2021: Welding, brazing, soldering, cutting, mechanical joining and adhesive bonding – Nomenclature of processes and reference numbers (EN ISO 4063:2020), naziv na sprskom: Zavarivanje, tvrdo lemljenje, meko lemljenje, rezanje, mehaničko spajanje i adheziono spajanje – Lista postupaka i njihovo označavanje, objavljen: 17.12.2020;
- [2] Karl-Heinz_Steigerwald : https://de.wikipedia.org/wiki/Karl-Heinz_Steigerwald, (dokument pregledan 03.12.2020.);
- [3] Steigerwald Strahltechnik GmbH: <https://www.sst-ebeam.com/en/electron-beam-technology/history-of-eb-technology.html>, (dokument pregledan 03.12.2020.);
- [4] Johann_Wilhelm_Hittorf: https://en.wikipedia.org/wiki/Johann_Wilhelm_Hittorf, (dokument pregledan 03.12.2020.);
- [5] William Crookes : https://en.wikipedia.org/wiki/William_Crookes, (dokument pregledan 03.12.2020.);
- [6] Wilhelm Röntgen: https://en.wikipedia.org/wiki/Wilhelm_Röntgen, (dokument pregledan 03.12.2020.);
- [7] Marcello_Pirani: https://en.wikipedia.org/wiki/Marcello_Pirani, (dokument pregledan 03.12.2020.);
- [8] Peter N. Stearns: The Industrial Revolution in World History – 4th Edition, Routledge, ISBN – 9780813347295, 2012;
- [9] Autorizovana predavanja na kursu za međunarodne inženjere zavarivanja IWE, Mašinski fakultet Niš, 2009-2021;
- [10] Božidar S. Milić: Osnove fizike gasne plazme, 2. Izdanje, Građevinska knjiga, ISBN 86-395-0129-7, 1989;
- [11] H Schultze: Electron Beam Welding, 1st edition, Woodhead Publishing, ISBN: 9781855730502, 1994 (ebook 2020);
- [12] Mijajlović M. Miroslav: Tehnologija zavarivanja 1, Univerzitet u Nišu, Mašinski fakultet Niš, ISBN 978-86-6055-089-9, 2017;
- [13] Albert Einstein: https://en.wikipedia.org/wiki/Albert_Einstein, (dokument pregledan 18.03.2021.);
- [14] Laser: <https://en.wikipedia.org/wiki/Laser>, (dokument pregledan 18.03.2021.);
- [15] Maser: <https://en.wikipedia.org/wiki/Maser>, (dokument pregledan 18.03.2021.);
- [16] Charles H. Townes: https://en.wikipedia.org/wiki/Charles_H._Townes, (dokument pregledan 18.03.2021.);
- [17] James P. Gordon: https://en.wikipedia.org/wiki/James_P._Gordon, (dokument pregledan 18.03.2021.);
- [18] Arthur Leonard Schawlow: https://en.wikipedia.org/wiki/Arthur_Leonard_Schawlow, (dokument pregledan 18.03.2021.);
- [19] Herbert Zeiger: https://en.wikipedia.org/wiki/Herbert_Zeiger, (dokument pregledan 18.03.2021.);
- [20] Nikolay Basov : https://en.wikipedia.org/wiki/Nikolay_Basov, (dokument pregledan 18.03.2021.);
- [21] Alexander Prokhorov: https://en.wikipedia.org/wiki/Alexander_Prokhorov, (dokument pregledan 18.03.2021.);
- [22] Gordon Gould: https://en.wikipedia.org/wiki/Gordon_Gould, (dokument pregledan 18.03.2021.);

- [23] Melinda Rose, Hank Hogan: A History of the Laser: 1960 – 2019, E-article, https://www.photonics.com/Articles/A_History_of_the_Laser_1960_-_2019/a42279, (dokument pregledan 18.03.2021.);
- [24] Theodore Maiman: https://en.wikipedia.org/wiki/Theodore_Maiman, (dokument pregledan 18.03.2021.);
- [25] Bell Labs: https://en.wikipedia.org/wiki/Bell_Labs, (dokument pregledan 18.03.2021.);
- [26] Manufacturing Guide: <https://www.manufacturingguide.com/en/laser-welding>, (dokument pregledan 18.03.2021.);
- [27] S. Katayama: Handbook of Laser Welding Technologies, Elsevier Science, ISBN 0857098772, 2013;
- [28] Laser beam welding: https://en.wikipedia.org/wiki/Laser_beam_welding, (dokument pregledan 18.03.2021.).

6 POSTUPCI ZAVARIVANJA PLASTIKE

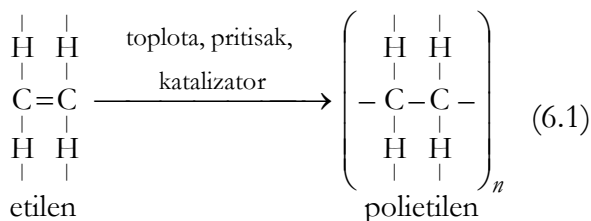
Polimeri su velika grupa veštačkih materijala (kojoj pripada i plastika), i nešto manja grupa prirodnih materijala koji se odlikuju osobinom da uvek grade makromolekule. Tokom poslednjih pedeset godina ovi materijali su potisnuli veliki broj drugih materijala iz upotrebe u raznim oblastima tehnike. Zbog toga je njihova obradivost, a samim tim, spajanje i zavarivanje, posebna tema unutar tehnologije zavarivanja.

Osnovna grupa ISO 4063 – 6 prema standardu SRPS EN ISO 4063:2021 [1] se načelno odnosi na postupke zavarivanja plastike, ali se primena ovih postupaka ne odnosi i na većinu polimernih (tehnički zavarivih) materijala.

Definicija polimera

Izraz „polimer” se koristi za hemijsko jedinjenje koje je sačinjeno od manjih sastavnih jedinica koje se nazivaju monomeri. Monomeri reaguju sa drugim monomerima i formiraju lance polimera. Proces formiranja ovih lanaca je polimerizacija, a formirani lanac je polimer.

Većina monomera su organski materijali kod kojih su atomi ugljenika povezani kovalentnim vezama sa drugim atomima (vodonik, kiseonik, azot, fluor, hlor, silicijum, sumpor). Jedan od najjednostavnijih monomera je molekul etilena koji se sastoji od atoma ugljenika i vodonika, koji se polimerizacijom (u prisustvu katalizatora) prevodi u polietilen (jednačina 6.1).

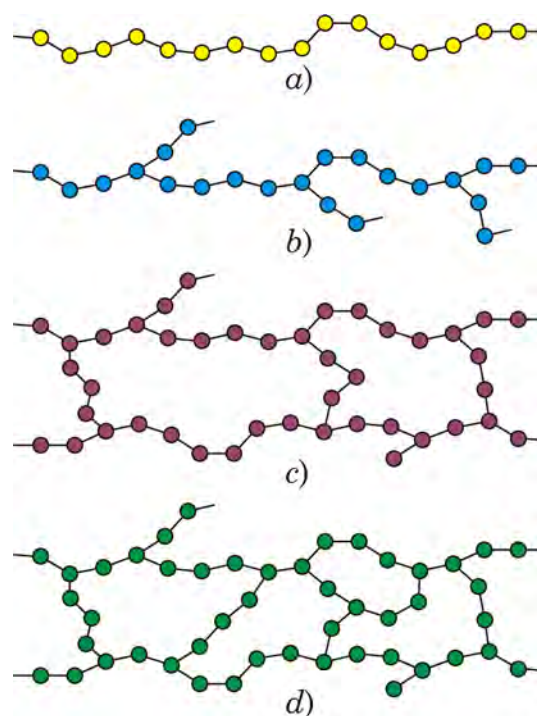


Danas postoji više stotina potpuno različitih monomera, a samim tim, postoji još više polimera [2].

Podela polimera

Osobine polimera zavise od monomera koji ga sačinjavaju, ali i oblika (tipa) veza među njima i prostornog oblika. Tako se, prema načinu vezivanja monomera razlikuju:

- linijski polimeri,
- razgranati polimeri,
- poprečno povezani polimeri i
- umreženi polimeri.



Slika 6.1 Vrste polimera prema načinu vezivanja monomera, a – linearni, b – razgranati, c – poprečno povezani, d – umreženi

Linearni polimeri (slika 6.1, a) nastaju prostim vezivanjem monomera u duge lančane strukture. Veze između monomera u lancu su stabilne i jake, dok su lanci međusobno povezani samo slabim Van der Valsovim silama [3]. Ovakvi polimeri su veoma duktilni a lanci su retko potpuno pravolinijski oblikovani. Linearni polimeri su polietilen, polivinil hlorid, polistiren, polimetil metakrilat i najlon [2].

Razgranati polimeri (slika 6.1, b) predstavljaju linearne polimere koji imaju

sekundarne lance, slično granama na drvetu. Odlikuje ih veća elastičnost nego linearne polimere, veća čvrstoća, ali i manja gustina strukturnih lanaca.

Poprečno povezani polimeri (slika 6.1, c) nastaju kada se grane različitih linearnih lanaca međusobno povežu u jedinstvenu celinu. Poprečno povezivanje lanaca dešava se na povišenim temperaturama, odnosno, tokom polimerizacije, ukoliko monomeri imaju sklonost ka formiranju takvih veza. Kao rezultat poprečnog povezivanja lanaca, polimer dobija čvrstoću, krutost, tvrdoću i strukturnu stabilnost. Polimeri sa poprečnim vezama su epoksidi, silikoni i fenoli.

Umreženi polimeri (slika 6.1, d) nastaju kada se međusobno povežu trodimenzionalno razgranati polimeri. Osobine ovakvog polimera zavise od velikog broja faktora kao što su vrste uključenih monomera, načina polimerizacije, brzine polimerizacije, starenja itd. Najpoznatiji umreženi polimeri su iz grupe formaldehida.

Prema strukturi, polimeri mogu da budu amorfni i kristalni, pri čemu je moguća pojava dvofazne strukture polimera – deo polimera je amorfni a drugi deo kristalni.

Prema svojim osobinama i oblasti primene, polimeri se dele na plastike i elastomere.

Plastika je veštački dobijen materijal čiju osnovu predstavljaju sintetičke i polusintetičke smole, uz dodatak punioca, omekšivača, stabilizatora, boje, pigmenata itd. Osnovno svojstvo plastike je plastičnost – sposobnost materijala da se trajno deformiše bez razaranja. Plastika je jeftin materijal, lako se proizvodi i obrađuje, a otporan je na vremenske uslove.

Prema svojoj termičkoj obradivosti, plastike se dele na termoplaste i duroplaste [4].

Termoplasti (termoplastični materijali) omekšavaju tokom grejanja, a nakon hlađenja, vraćaju se u prvobitno stanje. Termoplasti su, uglavnom, linearni polimeri i oni su, uglavnom, veoma pogodni za spajanje zavarivanjem.

Duroplasti (termoreaktivni materijali) tokom grejanja otvrdnjavaju i nakon hlađenja

postaju neobrađivi – ne vraćaju se u prvobitno stanje. Duroplasti imaju umreženu strukturu.

Elastomeri su amorfni polimerni materijali koje odlikuju viskoelastičnost, nizak moduo elastičnosti i slabe međumolekularne sile. Zbog svoje elastičnosti, elastomeri se često mešaju sa gumom. Pojam guma se prvobitno koristio samo za prirodnu gumu dobijenu od prirodnog kaučuka. Međutim, danas postoji veliki broj sintetičkih guma (za čiju izradu se koristi sintetički kaučuk) koje su, u stvari, elastomeri, ali ih i dalje većina ljudi naziva gumom. Ispravno bi bilo reći: sintetičke gume su elastomeri dok je prirodna guma, jednostavno – guma.

Elastomeri se obrađuju postupkom vulkanizacije – procesom ojačanja, otvrdnjavanja i „popravke” strukture elastomera. Vulkanizacija plastike nije moguća tako da je vulkanizacija postupak koji se ekskluzivno primenjuje na pojedinim elastomerima i gumi.

I elastomeri mogu da budu termoplasti ili duroplasti, pri čemu, je veći deo termoplastičnih elastomera zavariv. Sa druge strane, samo pojedini duroplasti su uslovno zavarivi. Zbog toga se tehnologija zavarivanja polimera odnosi uglavnom na termoplaste.

Podela i klasifikacija postupaka zavarivanja plastike

Prema SRPS EN ISO 4063:2021[1], postupci zavarivanja plastike standardizovani su i klasifikovani kao:

- Postupci zavarivanja električnim otporom primenom grejača koji ostaje u šavu, klasifikovani kao ISO 4063 – 61,
- Postupak radio-frekventnog zavarivanja, klasifikovan kao ISO 4063 – 62,
- Postupci zavarivanja rastvaranjem, klasifikovani kao ISO 4063 – 63,
- Postupci zavarivanja zagrejanim gasom, klasifikovani kao ISO 4063 – 64,
- Postupci termičkog zaptivanja, klasifikovani kao ISO 4063 – 65,
- Postupci zavarivanja toplim alatom, klasifikovani kao ISO 4063 – 66,
- Postupci zavarivanja bez

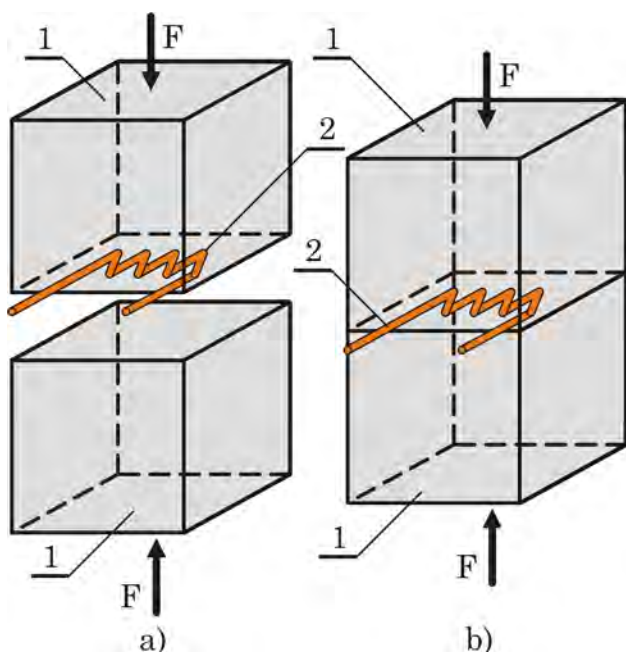
svetlucanja/varničenja, klasifikovani kao ISO 4063 – 67,

- Ostali postupci zavarivanja plastike, klasifikovani kao ISO 4063 – 69.

Pojedini postupci iz ostalih osnovnih grupa postupaka (na primer, ISO 4063 – 4 i ISO 4063 – 7) se primenjuju za zavarivanje metala, ali su primenjivi za zavarivanje plastike. Oni nisu opisani u ovom poglavlju.

6.1 Postupci zavarivanja električnim otporom primenom grejača koji ostaje u šavu

Postupci zavarivanja električnim otporom primenom grejača koji ostaje u šavu (ili postupci elektrootpornog zavarivanja implantom) su grupa postupaka zavarivanja koji se primenjuju za zavarivanje termoplastičnih i kompozitnih materijala primenom elektrootpornog grejača koji nakon zavarivanja ostaje u formiranom šavu. Zavarivanje se vrši kombinovanim dejstvom toplote i sile pritiska.



Slika 6.2 Šematski prikaz postupka elektrootpornog zavarivanja implantom, 1 – radni komadi, 2 – grejač, a – početna faza, b – završna faza

U početnoj fazi zavarivanja (slika 6.2, a) grejač za zavarivanje (slika 6.2, pozicija 2) se

postavlja na lice jednog radnog komada (slika 6.2, pozicija 1). Grejač je izrađen od elektro-provodnog materijala i oblikovan/savijen tako da pokriva što veću površinu.

Radni komadi prislanjaju jedan na drugi i pritiskaju silom (F) a grejač se nalazi između radnih komada.

U završnoj fazi zavarivanja (slika 6.2, b) se kroz grejač propušta jednosmerna (ili niskofrekventna naizmenična) struja. Iako je grejač provodnik, protok električne struje kroz njega dovodi do pojave „Džulove toplote”, odnosno, dolazi do elektrootpornog zagrevanja. Ovako generisana toplota se kondukcijom prenosi na radne komade, omekšava ih i na kraju delimično topi. Dejstvom sile pritiska na radne komade iskiva se šav.

Po završetku zavarivanja, grejač ostaje zarobljen u šavu kao njegov sastavni deo. Kako grejač predstavlja svojevrsni „implant” u zavarenom spoju, on svojim prisustvom pozitivno utiče na integritet spoja.

Postupci elektrootpornog zavarivanja implantom su vrlo jednostavni za izvođenje, šavovi su čisti i izvodljivi u gotovo svim položajima i na svim lokacijama. Kvalitet zavarenog spoja ne zavisi od operatera zavarivanja već samo od parametara zavarivanja – jačine i tipa primenjene struje, kao i od sile pritiska [5]. Masovno se primenjuju za spajanje i reparaciju vodovodnih i kanizacionih cevi, a poslednjih godina i kod visokopritisnih-gasovoda [2].

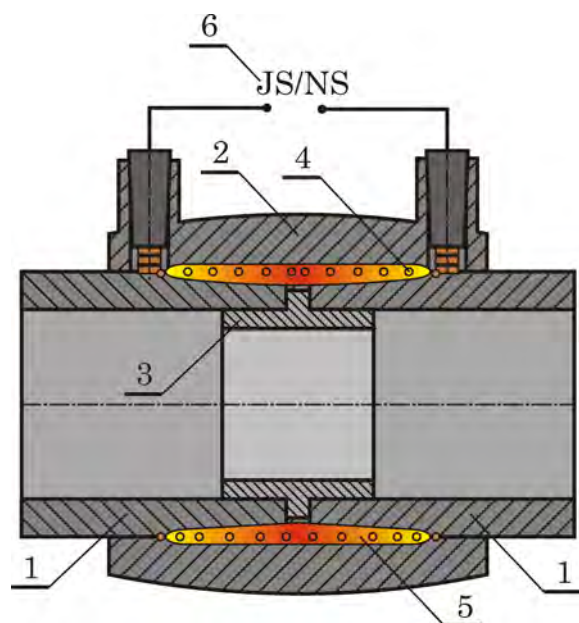
Prema SRPS EN ISO 4063:2021, grupa postupaka zavarivanja otporom primenom grejača koji ostaje u šavu klasifikovana je kao ISO 4063 – 61. Za sada, ovoj grupi pripada samo postupak elektrofuzionog zavarivanja, klasifikovan kao ISO 4063 – 611.

6.1.1 Postupak elektrofuzionog zavarivanja

Specifičan postupak elektrootpornog zavarivanja implantom, koji se primenjuje za zavarivanje cevi, naziva se elektrofuzionim postupkom zavarivanja (slika 6.3).

Dve cevi (slika 6.3, pozicija 1) se

postavljaju jedna naspram druge. Njihovo pozicioniranje se vrši primenom unutrašnje čaure (slika 6.3, pozicija 3) i spoljašnje čaure – implanta (slika 6.3, pozicija 2). Na unutrašnjem obodu implanta namotan je grejač – žica od provodnog metala (slika 6.3, pozicija 4). Krajevi žice se povezuju na izvor struje (slika 6.3, pozicija 6).



Slika 6.3 Šematski prikaz elektrofuzionog postupka zavarivanja cevi, 1 – cev, 2 – implant, 3 – unutrašnja čaura, 4 – grejač, 5 – šav, 6 – izvor električne struje [6]

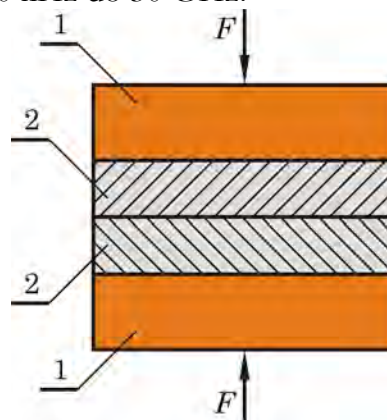
Nakon montaže i povezivanja izvora struje na implant, struja protiče kroz grejač koji se zagreva usled Džulove toplote. Toplota se prenosi na implant i cevi, koje se lagano tope u zoni zagrevanja. Unutrašnja čaura i implant održavaju integritet konstrukcije i sprečavaju curenje rastopljenog materijala. Istopljeni materijal obe cevi se meša, a nakon isključenja struje, hladi i ponovo očvršćava. Tada se formira šav koji povezuje cevi, čauru i implant u monolitnu celinu. Tako se dobija nepropustan i efikasan spoj dve cevi [7].

Zavarivanje elektrofuzijom vrši se primenom jednosmerne struje, naizmenične struje male frekvencije, kvadratnog ili pravougaonog oblika.

Postupak elektrofuzionog zavarivanja je klasifikovan kao ISO 4063 – 611.

6.2 Postupak radio-frekventnog zavarivanja

Postupak radio-frekventnog zavarivanja termoplasta (poznatiji kao dielektrično zavarivanje ili kao visokofrekventno zavarivanje) je postupak zavarivanja koji koristi visoko-frekventna električna polja za generisanje toplote u osnovnom materijalu. Frekvencija primenjenih radio talasa se kreće od 20 kHz do 30 GHz.



Slika 6.4 Šematski prikaz radio-frekventnog postupka zavarivanja, 1 – elektrode, 2 – radni komadi

Radni komadi (slika 6.4, pozicija 2) se postavljaju između dve metalne elektrode (slika 6.4, pozicija 1) koje pritiskaju radne komade. Tokom formiranja i trajanja promenljivog električnog polja između elektroda, dolazi do (dielektrične) polarizacije radnih komada – molekuli radnih komada se pokreću, grupišu, rotiraju i osciluju intenzivnije, što za posledicu ima postepeno zagrevanje spoljašnjih površina radnih komada, odnosno, kontakta radnih komada [8]. Materijal radnih komada na kontaktu počinje da se topi i meša. Hlađenjem i očvršćavanjem materijala na kontaktu formira se šav koji se oblikuje dejstvom sile pritiska.

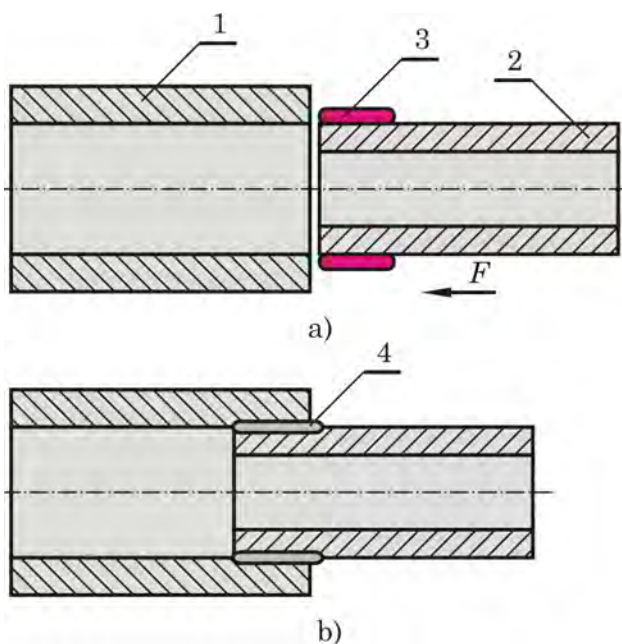
Postupak dielektričnog zavarivanja polimera je veoma brz i efikasan, vrlo lako se automatizuje a kvalitet šava je odličan. Međutim, njegova primena je ograničena samo na materijale koji imaju izraženu sposobnost polarizacije.

Postupak dielektričnog zavarivanja je klasifikovan kao ISO 4063 – 62.

6.3 Postupci zavarivanja rastvaranjem

Postupci zavarivanja rastvaranjem (ISO 4063 – 63) se od drugih postupaka zavarivanja razlikuju po tome što energiju aktivacije procesa zavarivanja dobijaju od hemijske reakcije rastvarača i plastike uz dejstvo mehaničke sile.

Najčešća primena postupaka je za zavarivanje plastičnih cevi i priključaka u vodovodnoj instalaciji [9].



Slika 6.5 Šematski prikaz postupka zavarivanja rastvaranjem, 1 – cev većeg prečnika (priključak, eng. fitting), 2 – cev manjeg prečnika, 3 – rastvarač, 4 – šav, a – početak zavarivanja, b – završetak zavarivanja

Da bi se spojili cev (slika 6.5, pozicija 2) i priključak (slika 6.5, pozicija 1), na cev se, u početnoj fazi zavarivanja (slika 6.5, a) nanosi rastvarač (slika 6.5, pozicija). Rastvarač vrlo brzo reaguje sa materijalom cevi i omekšava je. Nakon toga, cev se (u fazi zavarivanja, slika 6.5, b) dejstvom sile pritiska uvlači u priključak. Nakon pozicioniranja cevi i priključka, rastvarač reaguje i sa materijalom priključka te i njega omekšava. Zbog omekšavanja oba tela u kontaktu dolazi do mešanja omekšanih materijala i nastaje šav (slika 6.5, pozicija 4).

Kada rastvarač ispari (i delimično se

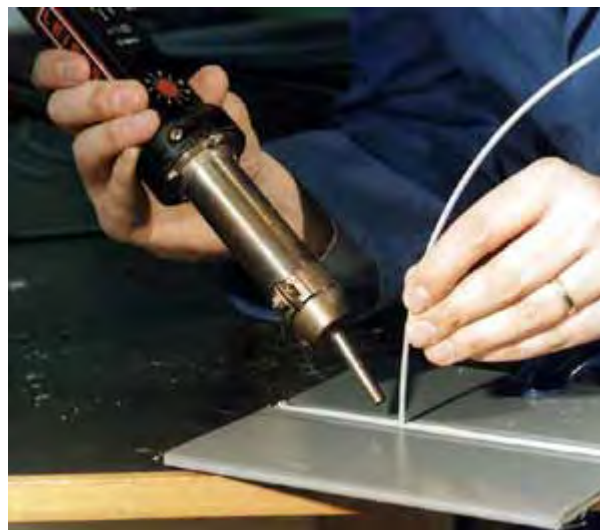
pomeša sa materijalom šava), šav očvrstne i cev i priključak ostaju čvrsto spojeni – zavareni. Ovako formirani šavovi imaju dobru efikasnost i odličnu zaptivenost.

Jedini standardizovani/klasifikovani postupak zavarivanja rastvaračem je ISO 4063 – 631.

6.4 Postupci zavarivanja zagrejanim gasom

Postupci zavarivanja zagrejanim gasom (klasifikovani kao ISO 4063 – 64) su grupa postupaka spajanja termoplasta delimičnim topljenjem dodatnog materijala i dela osnovnog materijala uz primenu sile pritiska. Za zavarivanje (zagrevanje) materijala se koristi zagrejeni gas koji se odgovarajućom mlaznicom iz pištolja (gorionika) usmerava u zonu zavarivanja (slika 6.6). Najčešće se za zavarivanje koristi vazduh, ali se sve više koriste ugljendioksid, argon ili helijum, sa ciljem postizanja boljeg kvaliteta šava.

Da bi se zavarivanje uspešno izvelo, dodatni materijal mora da bude sličnog hemijskog sastava kao osnovni materijal.



Slika 6.6 Ručni postupak zavarivanja zagrejanim gasom [10]

Prednosti i nedostaci postupka. Parametri zavarivanja.

Osnovna mana svih postupaka zavarivanja toplim gasom je potreba za

dobrom pripremom materijala (pre zavarivanja) dok je završna obrada lica šava (nakon zavarivanja) minimalna.

Zavarivanje se vrši u jednom ili više prolaza a kvalitet šava je vrlo dobar. Najnoviji postupci zavarivanja zagrejanim gasom su automatizovani i postižu maksimalni kvalitet šavova.

Osnovni parametri zavarivanja su temperatura, pritisak, brzina zavarivanja i položaj pištolja za zavarivanje.

Temperatura mora da bude 80 °C do 100 °C viša od temperature topljenja osnovnog i dodatnog materijala. Brzina zavarivanja je oko 0,1 m/min (za okruglu mlaznicu) do 0,3 m/min (za profilisanu mlaznicu i delove 5 mm debljine). Sila pritiska koju čovek treba da ostvari iznosi od 15 N do 30 N [2].

Pištolj se drži nagnuto, pod uglom od približno 45 ° u odnosu na pravac napredovanja/kretanja. Dodatni materijal se dovodi upravno na liniju spajanja.

Postupak zavarivanja zagrejanim gasom, po pravilu, sprovode zavarivači/operateri sa odgovarajućim sertifikatom o teorijskom i praktičnom poznavanju postupka [11].

Klasifikacija i podela postupaka. Oprema za zavarivanje.

Prema SRPS EN ISO 4063:2021, postupci zavarivanja zagrejanim gasom su klasifikovani prema tipu pištolja, mlaznici i dodatnom materijalu, na [1]:

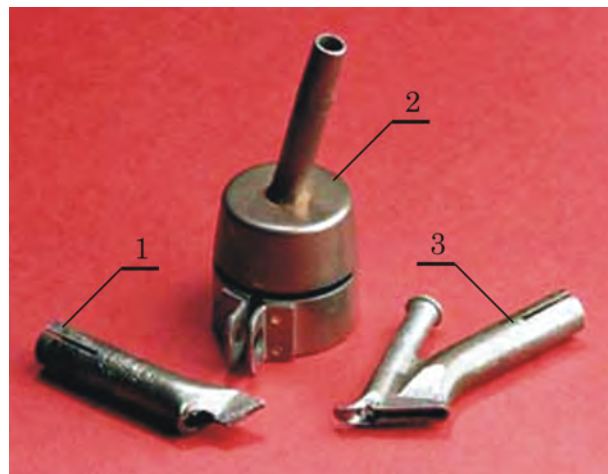
- Postupak brzog zavarivanja zagrejanim gasom (profilisanom mlaznicom), klasifikovan kao ISO 4063 – 641,
- Postupak zavarivanja zagrejanim gasom primenom okrugle mlaznice, klasifikovan kao ISO 4063 – 642,
- Postupak ručnog zavarivanja zagrejanim gasom bez dodatnog materijala, klasifikovan kao ISO 4063 – 643,
- Postupak mašinskog zavarivanja zagrejanim gasom bez dodatnog materijala, klasifikovan kao ISO 4063 – 644,
- Postupak mašinskog zavarivanja zagrejanim gasom sa dodatnim materijalom,

klasifikovan kao ISO 4063 – 645,

- Postupak konvekcionog zavarivanja zagrejanim gasom, klasifikovan kao ISO 4063 – 646,
- Postupak ekstruzionog zavarivanja, klasifikovan kao ISO 4063 – 647.

U zavisnosti od primenjenog pištolja za zavarivanje, razlikuju se ručni i mašinski (mehanizovani, automatizovani ili robotizovani) postupak zavarivanja.

Pištolj za zavarivanje ručnim postupkom zavarivanja toplim gasom je posebnim vodom (poliprovodnik) povezan za izvor struje i napojni gasni vod (ukoliko postoji). Električna struja pokreće ventilator i električni grejač unutar tela pištolja. Grejač zagreva gas unutar pištolja a ventilator pokreće zagrejeni gas i usmerava ga ka izduvnom vodu pištolja.



Slika 6.7 Mlaznice za postupak zavarivanja zagrejanim gasom, 1 – mlaznica za pripojne spojeve, 2 – okrugla mlaznica, 3 – profilisana mlaznica za brzo zavarivanje [10]

Upravljanje parametrima zavarivanja (temperatura gasa, protok gasa) vrši se prekidačima i potencimetrima na telu pištolja. Pištolj se drži u jednoj ruci i njiše u zoni zavarivanja radi zagrevanja zone zavarivanja. Zbog specifičnog njihanja pištolja tokom zavarivanja, postupak ručnog zavarivanja zagrejanim gasom se naziva i „pendulum zavarivanjem” [10].

Mehanizovani pištolj za zavarivanje zagrejanim gasom je suštinski identičan ručnom pištolju ali je, po potrebi, većih dimenzija od ručnog pištolja. Postoji

izvođenje sa lokalnim (unutrašnjim) grejačem za gas i ventilatorom (kao kod ručnog pištolja) i izvođenje sa spoljašnjim grejačem, ventilatorom, sistemom za dovod dodatnog materijala i gasovodom. Mehanizovani pištolj se montira na robotsku ruku ili manipulator koji ga vodi duž linije zavarivanja.

Mlaznice koje se koriste za zavarivanje zagrejanim gasom su istovetne za obe vrste pištolja. One se međusobno razlikuju po obliku i dimenzijama, pa je samim tim definisana i njihova namena.

Osnovna mlaznica je okrugla (široka) mlaznica (slika 6.7, pozicija 2) i primenjuje se za osnovni ručni postupak zavarivanja zagrejanim gasom. Mlaznica za pripojne spojeve (slika 6.7, pozicija 1) i profilisana mlaznica za brzo zavarivanje (slika 6.7, pozicija 3) se montiraju na okruglu mlaznicu i tako primenjuju za zavarivanje.

6.4.1 Postupak brzog zavarivanja zagrejanim gasom

Postupak zavarivanja zagrejanim gasom profilisanom mlaznicom (ISO 4063 – 641, prikazan na slici 6.8) vrši se pištoljem za topli gas i dodatnim materijalom, uz primenu profilisane mlaznice za brzo zavarivanje.



Slika 6.8 Postupak zavarivanja zagrejanim gasom uz primenu profilisane mlaznice [10]

Pištolj sa montiranom okruglom mlaznicom se navlači na jedan kraj profilisane mlaznice, dok se kroz njen drugi deo provlači dodatni materijal koji zavarivač rukom pritiska

ka zoni zavarivanja. Profilisana mlaznica se svojim licem naslanja na radne komade. Ovakvom konstrukcijom se zagrejani gas kontrolisano usmerava na dodatni materijal pa je zagrevanje osnovnog i dodatnog materijala ravnomerno. Rastojanje između pištolja i dodatnog materijala je uvek isto, mlaznica svojim zadnjim krajem oblikuje lice šava a zavarivaču je znatno lakše da održava konstanti pritisak na dodatni materijal. Kretanje pištolja i dodatnog materijala duž linije spajanja je znatno brže nego pri zavarivanju okruglom mlaznicom.

6.4.2 Postupak zavarivanja zagrejanim gasom primenom okrugle mlaznice

Postupak zavarivanja zagrejanim gasom okruglom mlaznicom (ISO 4063 – 642, prikazan na slici 6.6) je starija verzija, ali ne i jednostavnija verzija postupka zavarivanja toplim gasom. Na pištolj, kroz koji se dovodi topli gas, postavljena je cilindrična mlaznica koja gas usmerava u zonu zavarivanja. Zavarivač tokom zavarivanja jednom rukom drži pištolj i povlači ga ka sebi duž linije spajanja. U drugoj ruci, zavarivač drži dodatni materijal – šipku ili žicu od plastike, koju licem prislanja na radne komade. Zavarivač zagreva žicu toplim gasom iz pištolja, ona omekšava, savija se i ispunjava pripremljeni žleb. Zavarivač dalje prati proces spajanja, polako povlači pištolj i žicu duž linije spajanja i tako zavaruje delove. Žica uvek ide iza pištolja (tehnika „vučenja“).

Neiskusni zavarivač ima problem sa koordinacijom ruku jer je neophodno usklađeno pomeranje pištolja uz povlačenje i pritiskanje dodatnog materijala uz radne komade. Samim tim, kvalitet zavarenog šava u potpunosti zavisi od brzine kretanja pištolja i žice, vremena zagrevanja i sile pritiska koju primeni zavarivač tokom zavarivanja.

Po pravilu, zavarivanje cilindričnom mlaznicom je veoma sporo i primenjuje se samo kratkotrajno, u teško pristupačnim pozicijama (na uglovima, oko žlebova i slično) [11].

6.4.3 Postupak ručnog zavarivanja zagrejanim gasom bez dodatnog materijala

Postupak ručnog zavarivanja zagrejanim gasom bez dodatnog materijala (ISO 4063 – 643) je podvarijanta postupka 642 ali bez primene dodatnog materijala (šipke za zavarivanje). Ručnim pištoljem se vrši zagrevanje i topljenje dela osnovnog materijala a silom pritiska se vrši iskivanje šava. Postupak 643 se primenjuje za reparaciju delova ili za zavarivanje tankih delova.

6.4.4 Postupak mašinskog zavarivanja zagrejanim gasom bez dodatnog materijala

Postupak mašinskog zavarivanja zagrejanim gasom bez dodatnog materijala (ISO 4063 – 644) podrazumeva primenu manipulatora/robota koji vodi gorionik duž linije spajanja. Zavarivanje postupkom 644 se vrši okruglom mlaznicom na delovima male debljine.

6.4.5 Postupak mašinskog zavarivanja zagrejanim gasom sa dodatnim materijalom

Postupak mašinskog zavarivanja zagrejanim gasom sa dodatnim materijalom (ISO 4063 – 645) je varijanta postupka 644 uz primenu profilisane (brze) mlaznice. Druga varijanta postupka je kada se primenjuje pištolj koji poliprovodnikom dovodi gas i dodatni materijal u zonu zavarivanja.

6.4.6 Postupak konvektionog zavarivanja zagrejanim gasom

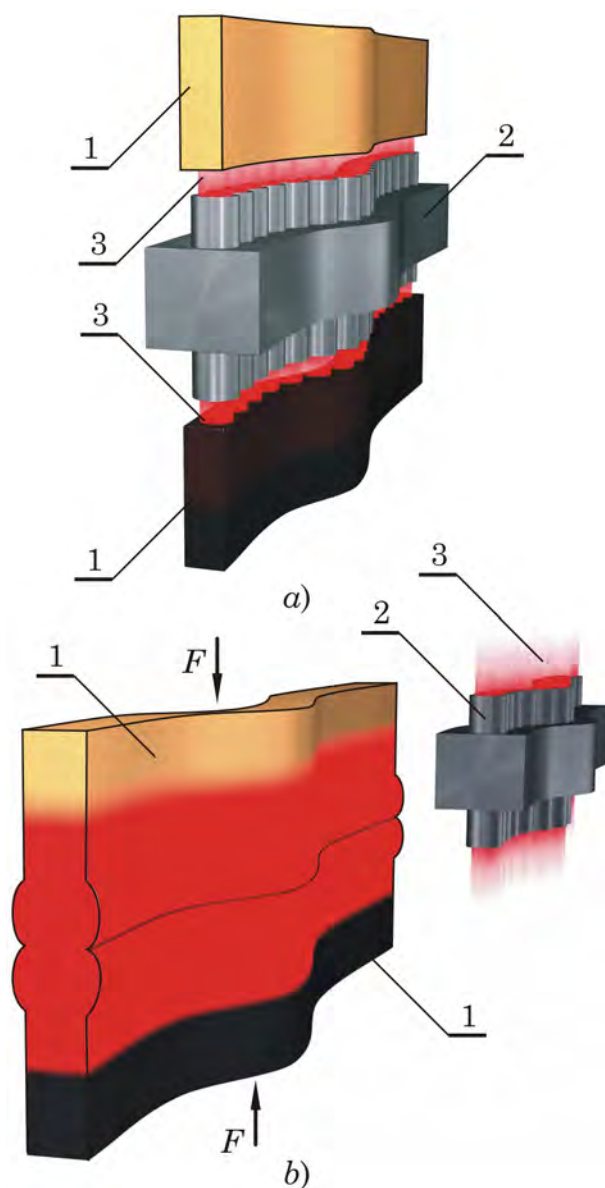
Postupak konvektionog zavarivanja zagrejanim gasom (ISO 4063 – 646) je jedini postupak zavarivanja zagrejanim gasom kod koga se zavarivanje delova događa duž cele linije/površine spajanja jednovremeno.

Zavarivanje postupkom 646 se događa u dve faze.

U prvoj fazi zavarivanja (slika 6.9, a), pištolj (slika 6.9, pozicija 2) sa gasnim mlaznicama (slika 6.9, pozicija 3), koje su

usmerene u dva smera, postavlja se između radnih komada (slika 6.9, pozicija 1). Pištolj sa mlaznicama je, u suštini, grejni alat čiji oblik odgovara konturi radnih komada koji se zavaruju. Zagrejan gas opstrujava radne komade, zagreva i topi površine koje je potrebno da se spoje.

U drugoj fazi (slika 6.9, b), pištolj sa mlaznicama se izvlači a na radne komade se primenjuje sila pritiska kako bi se istopljeni materijal radnih komada pomešao i nastao (iskovani) šav. Sila pritiska se zadržava sve do hlađenja radnih komada, odnosno, do hlađenja šava [12].



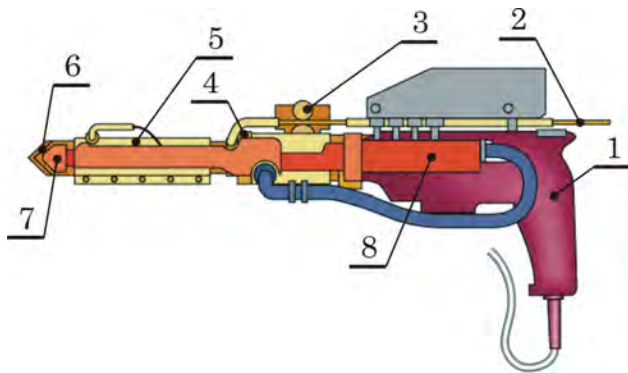
Slika 6.9. Šematski prikaz postupka konvektionog zavarivanja zagrejanim gasom, 1 – radni komad, 2 – pištolj sa mlaznicama, 3 – zagrejani vazdub [12]

Za zavarivanje se primenjuje električno zagrejani vazduh ali se primenjuju i vrući produkti sagorevanja acetilena, metana, propana. Postupak 646 se primenjuje za izradu plastičnih rezervoara kod vozila, kućnih bojlera, kućišta, šasija i slično.

6.4.7 Postupak ekstruzionog zavarivanja

Postupak ekstruzionog zavarivanja se koristi za zavarivanje termoplastičnih materijala velike debljine, u samo jednom prolazu. Zbog toga se najčešće primenjuje za zavarivanje plastičnih cevi i rezervoara.

Zbog složenosti opreme za zavarivanje, postupak ekstruzionog zavarivanja se još uvek sprovodi samo ručno.



Slika 6.10 Šema pištolja za ekstruziono zavarivanje, 1 – motor, 2 – dodatni materijal (plastična šipka), 3 – mehanizam za dovodenje dodatnog materijala, 4 – ekstruder, 5 – komora za mlevenje i topljenje, 6 – oblikač, 7 – mlažnica sa grejačem, 8 – komora sa toplim vazduhom [13]

Zavarivanje ekstruzijom vrši se posebno oblikovanim pištoljem (slika 6.10) koji dovodi dodatni materijal u zonu zavarivanja. Pištolj je u osnovi sličan električnoj bušilici a proces zavarivanja podseća na proces lepljenja pištoljem. Pištolj ima električni motor (slika 6.10, pozicija 1) koji pokreće navojno vreteno u ekstruderu (slika 6.10, pozicija 4) čija funkcija je da transportuje zagrejani/rastopljeni dodatni materijal. Dodatni materijal u šipkastom stanju (slika 6.10, pozicija 2) se dovodi sa zadnje strane pištolja i uvlači u pištolj sistemom valjaka za dotur materijala (slika 6.10, pozicija 3). Dodatni materijal se vodi u ekstruder, gde se

zagreva i delimično topi, a potom gura (kao testasta masa) u komoru za mlevenje i topljenje (slika 6.10, pozicija 5). Tu se dodatni materijal finalno zagreva/topi i odvodi u zonu zavarivanja. Dodatno zagrevanje i pogon materijala napred vrši se sistemom za uduvavanje toplog vazduha (slika 6.10, pozicija 8). Posebnim oblikačem (slika 6.10, pozicija 6) se rastopljeni materijal dovodi u zonu zavarivanja, još jednom zagreva grejačem (slika 6.10, pozicija 7) i nakon toga deponuje u zoni zavarivanja.

Kao i postupak zavarivanja toplim gasom, postupak zavarivanja ekstruzijom je veoma zavistan od temperature vazduha/temperature zagrevanja dodatnog materijala, ali, zavisi od protoka dodatnog materijala i ugla pod kojim se materijal deponuje u zonu zavarivanja. I kod ovog postupka zavarivanja je neophodna dobra priprema radnih komada pre zavarivanja, ali, ukoliko su parametri zavarivanja optimalno izabrani, završna obrada šava nije potrebna [14].

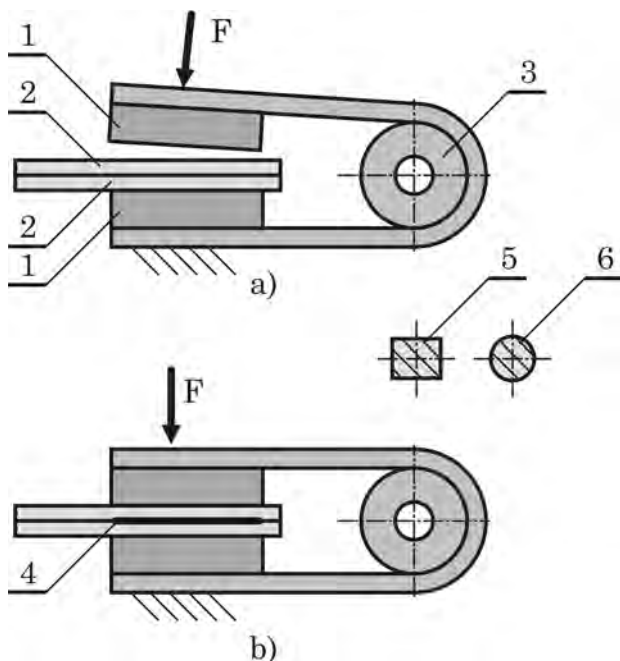
Postupak zavarivanja ekstruzijom je gotovo deset puta produktivniji od postupka zavarivanja toplim gasom, ali je znatno složeniji – kvalitetno zavarivanje može da vrši samo dobro obučeni, iskusni zavarivač [1]. Postupak je klasifikovan kao ISO 4063 – 647.

6.5 Postupci termičkog zaptivanja

Grupa postupaka termičkog zaptivanja (klasifikovana kao ISO 4063 – 65) obuhvata dva postupka zavarivanja koji se primenjuju za zavarivanje vrlo tankih folija. U načelu, spojevi dobijeni postupcima iz grupe 65 su male nosivosti (nisu strukturni) već se primenjuju samo za spajanje delova sa ciljem sprečavanja prodora fluida – zaptivanja. Iako se „termičko zaptivanje” vrši zagrejanim alatom (kao i kod postupaka iz grupe 66), postupci termičkog zaptivanja toplim alatom (zaptivno zavarivanje, grupa 65) odvojeni su od postupaka strukturnog zavarivanja toplim alatom (grupa 66).

6.5.1 Postupak impulsnog zavarivanja

Postupak impulsnog zavarivanja (ISO 4063 – 651) (ili postupak zavarivanja toplom Ni-Cr žicom) je postupak zavarivanja tankih termoplastičnih folija, ne debljih od 0,5 mm [15].



Slika 6.11 Šematski prikaz postupka zavarivanja toplom žicom, a – početni položaj, zavarivanje, 1 – žica (poluga), 2 – folija, 3 – pritiski mehanizam, 4 – šav, 5 – poprečni presek poluge, 6 – poprečni presek žice

U početnom položaju (slika 6.11, a), folije (slika 6.11, pozicija 2) se postavljaju jedna na drugu. Nakon toga, tokom faze zavarivanja (slika 6.11, b), primenom mehanizma za pritiskanje (slika 6.11, pozicija 3), folije se pritiskaju između dve zagrejane žice (slika 6.11, pozicija 2). Toplota žice zagreva i omekšava folije dok sila pritiska vrši iskivanje šava (slika 6.11, pozicija 4).

Zagrevanje alata (poluga/šipki) vrši se električno (elektrotopno ili indukcijom), vrlo intenzivno, i to pre početka zavarivanja. Kada zavarivanje počne, zagrevanje alata prestaje kako se folije ne bi razorile pregrejanim alatom [15].

Zavarivanje tankih i osetljivih folija vrši se vrlo tankom žicom (poprečni presek žice je prikazan na slici 6.11, pozicija 6, prečnika do 2 mm). Tada se formira mala površina

spajanja folija i zavarivanje traje vrlo kratko – maksimalno 1 s. Zbog kratkog trajanja ciklusa zavarivanja, postupak zavarivanja toplom žicom se naziva impulsnim zavarivanjem.

Postupak se najviše primenjuje u industriji pakovanja (zaptivanja) zbog svoje produktivnosti, preciznosti i velike čistoće [2].

6.5.2 Postupak zavarivanja toplom polugom

Postupak zavarivanja toplom polugom (ISO 4063 – 652) je suštinski istovetan postupku 651 sa razlikom što se kao alat za zavarivanje ne koristi topla žica već topla poluga/šipka koja se naziva „termoda”. Termoda je najčešće kvadratnog poprečnog preseka (slika 6.11, pozicija 5), primenjuje se za zavarivanje folija debljine do 2 mm i tada ciklus zavarivanja traje do 3 s.

6.6 Postupci zavarivanja toplim alatom

Postupci zavarivanja toplim alatom (ili toplom pločom, klasifikovani kao grupa ISO 4063 – 66) su danas najprimenljiviji postupci zavarivanja termoplastičnih materijala [2]. Ovoj grupi pripadaju:

- Postupak zavarivanja toplim alatom u obliku ogledala, klasifikovan kao ISO 4063 – 661,
- Postupak zavarivanja zagrejanim klinom, klasifikovan kao ISO 4063 – 662,
- Postupak zavarivanja plastičnih fittinga zagrejanim alatom, klasifikovan kao ISO 4063 – 663,
- Postupak zavarivanja cevnih (sedlastih) uboda zagrejanim alatom, klasifikovan kao ISO 4063 – 664.

Osnovni parametri zavarivanja.	princip postupaka.
--------------------------------	--------------------

U početnoj fazi zavarivanja (slika 6.12, a), radni komadi (slika 6.12, pozicija 1) postavljaju se jedan naspram drugog. Između njih se postavlja poseban alat (ploča) za zavarivanje (slika 6.12, pozicija 2) kojim se vrši

zavarivanje. Nakon toga se radni komadi naslanjaju na alat i pritiskaju silom F . U jednoj varijanti zavarivanja je alat prethodno zagrejan, pa tek onda naslonjen na radne komade dok se u drugoj varijanti alat zagreva tek kada stupi u kontakt sa radnim komadima. U oba slučaja, „topli” alat je u kontaktu sa radnim komadima i zagreva ih (slika 6.12, b). Kada lica radnih komada dostignu željenu temperaturu (odnosno, kada materijal dostigne „testasto” stanje), radni komadi se odmiču od alata, pa se alat odmiče iz zone zavarivanja (slika 6.12, c). Nakon toga se zagrejani radni komadi naslanjaju jedan na drugi, i pritiskaju silom iskivanja ($F + \Delta F$). Na kontaktu zagrejanih lica dolazi do formiranja šava (slika 6.12, d). Radni komad i ostaju pritisnuti sve dok se u potpunosti ne ohlade. Po oslobađanju pritiska, oni ostaju zavareni (slika 6.12, e).

Parametri zavarivanja su temperatura toplog alata, dužina trajanja ciklusa zavarivanja i intenzitet sile pritiska/iskivanja šava.

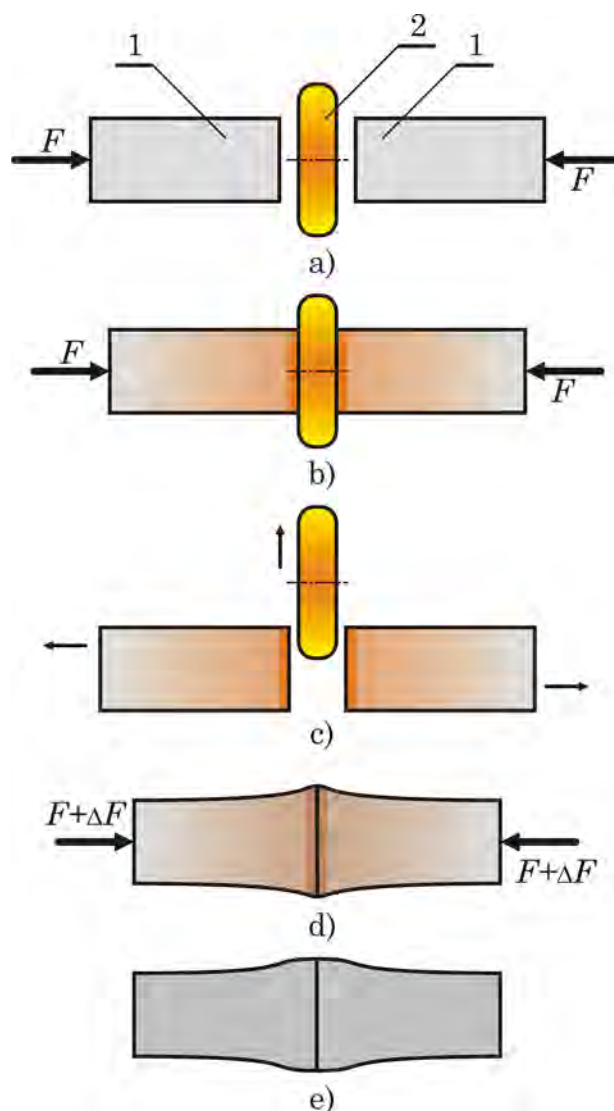
Temperatura alata uslovljena je temperaturom topljenja radnih komada i režimom rada (trajanjem ciklusa zavarivanja). Ukoliko se zavarivanje vrši dugotrajno, topli alat na kontaktnim površinama mora da bude zagrejan 30°C do 100°C više od temperature topljenja radnih komada. Ukoliko se zavarivanje vrši skraćenim ciklusom, onda temperatura toplog alata mora da bude 100°C do 200°C viša od temperature topljenja radnih komada. Ukoliko se zagrevanje radnih komada vrši beskontaktno (radijacijom), onda temperatura alata mora da bude barem 300°C viša od temperature topljenja radnih komada.

Postupak je primenjiv za sve termoplaste čija je temperatura topljenja niža od temperature termolize materijala (hemijsko razlaganje materijala usled dejstva povišene temperature).

Ciklus zavarivanja traje od 10 s (za delove debljine 5 mm) do nekoliko minuta (za cevi debljine zida 15 mm).

Intenzitet primenjene sile pritiska mora da bude dovoljno veliki da se obezbedi potpuni kontakt između zagrejanih radnih komada. Intenzitet sile iskivanja uzima se

približno 20% veći od sile pritiska primenjene tokom zagrevanja radnih komada.



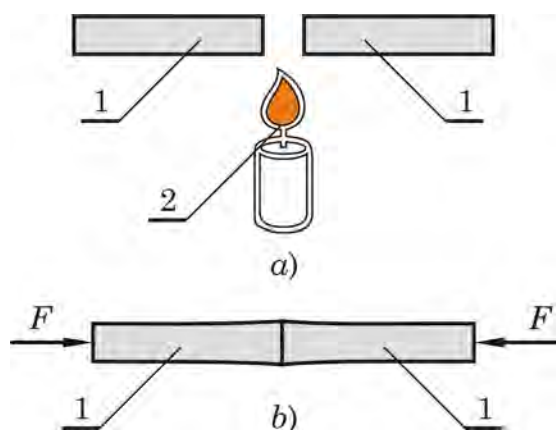
Slika 6.12 Šematski prikaz postupaka zavarivanja toplim alatom, 1 – radni komadi, 2 – alat, a – primicanje radnih komada, b – zagrevanje, c – izvlačenje alata, d – iskivanje šava, e – zavareni ohlađeni delovi

Postupak zavarivanja toplim alatom je primenjiv za delove različitih oblika i dimenzija – kako pločastih/ravnih, tako i osnosimetričnih. Maksimalna debljina materijala zavarenih toplim alatom iznosi 1,6 m [8].

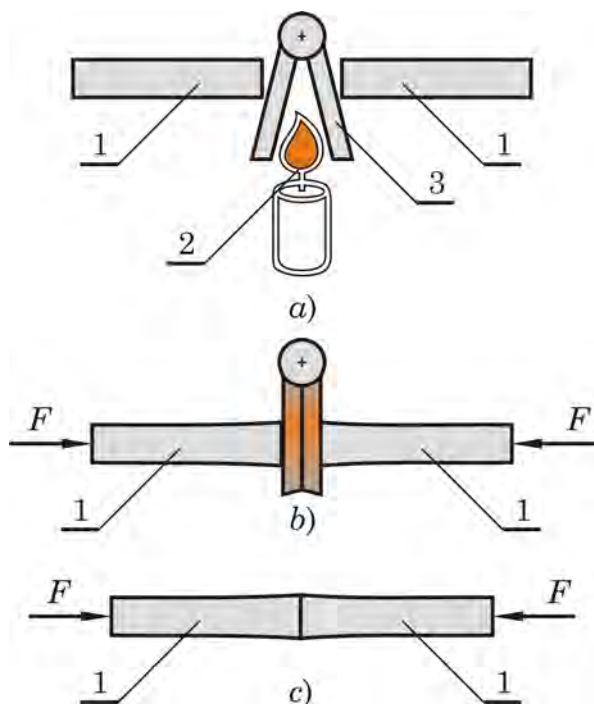
6.6.1 Postupak zavarivanja toplim alatom u obliku ogledala

Prvobitni postupak zavarivanja toplim alatom u obliku ogledala je postupak zavarivanja vitkih (šipkastih) delova

zagrevanjem na plamenu. Kod ovog postupka, „topli alat” je otvoreni plamen.



Slika 6.13 Šematski prikaz postupka zavarivanja „toplim alatom” u obliku ogledala – otvorenim plamenom, 1 – radni komadi, 2 – izvor toplote (otvoreni plamen), a – početak zavarivanja (zagrevanje), b – kraj zavarivanja (iskivanje šava) [8]



Slika 6.14 Šematski prikaz postupka zavarivanja toplim alatom u obliku ogledala, 1 – radni komadi, 2 – izvor toplote (otvoreni plamen), 3 – alat u obliku ogledala, a – početak zavarivanja (zagrevanje alata), b – zagrevanje radnih komada, c – završetak zavarivanja (iskivanje šava) [8]

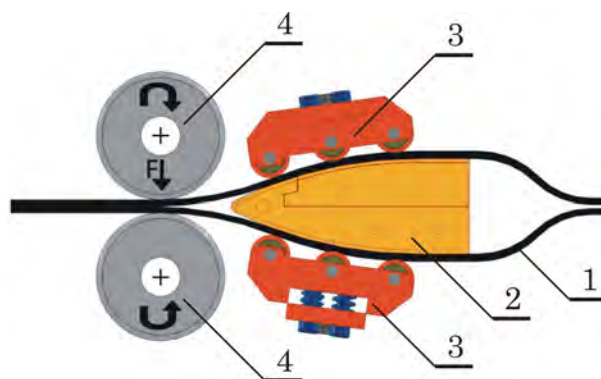
Radni komadi (slika 6.13, pozicija 1) se inicijalno (slika 6.13, a) zagrevaju na plamenu (slika 6.13, pozicija 2), delimično tope, a na kraju zavarivanja (slika 6.13, b) se dejstvom

pritisne sile iskiva šav. Ovako dobijeni šav je „zaprljan” plamenom i moguća je pojava nesavršenosti u njemu.

Moderniji postupak zavarivanja toplim alatom u obliku ogledala (ISO 4063 – 661) prikazan je na slici 6.14.

U inicijalnoj fazi zavarivanja (slika 6.14, a), izvor toplote (slika 6.14, pozicija 2) zagreva alat u obliku ogledala (slika 6.14, pozicija 3). Alat čine dva metalna lima koja su zgloбно povezani na vrhu – slično makazama, mogu da se „otvaraju i zatvaraju”. Nakon zagrevanja alata, izvor toplote se uklanja, radni komadi (slika 6.14, pozicija 1) se naslanjaju na zagrejeni alat (slika 6.14, b), zagrevaju i delimično tope. U završnoj fazi zavarivanja (slika 6.14, c), alat se uklanja iz zone kontakta a usled dejstva pritisne sile se iskiva šav. Primenom ovakvog alata se izbegava direktni uticaj plamena na radne komade te se postiže bolja čistoća šava.

Postupak 661 se primenjuje za vitke delove manjeg poprečnog preseka.



Slika 6.15 Šematski prikaz postupka zavarivanja zagrejanim klinom, 1 – folija/traka, 2 – zagrejeni klin, 3 – pritiskači, 4 – valjci [16]

6.6.2 Postupak zavarivanja zagrejanim klinom

Postupak zavarivanja zagrejanim klinom, klasifikovan kao ISO 4063 – 662, primenjuje se za zavarivanje folija/traka izrađenih od plastike/polimera.

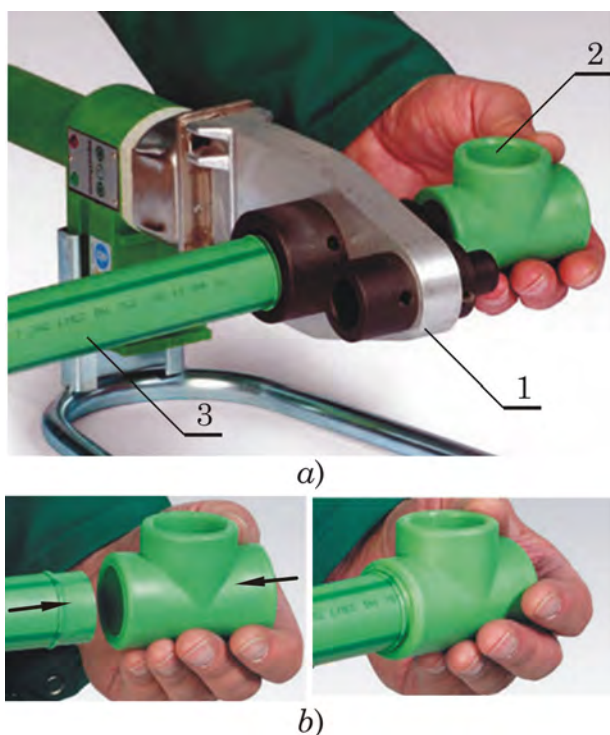
Osnovni materijal (slika 6.15, pozicija 1) se dovodi do zagrejanog klina (slika 6.15, pozicija 2) i naslanja na njega pritiskačima (slika 6.15, pozicija 3). Prilikom kontakta radnih komada na klin, radni komadi se

zagrevaju i delimično tope a cilindrični valjci (slika 6.15, pozicija 4) ih povlače dalje i pritiskom silom spajaju (iskivaju šav).

Klin se neprekidno zagreva električnom energijom te se zavarivanje odvija u neprekidnom (kontinualnom) režimu.

6.6.3 Postupak zavarivanja plastičnih fittinga zagrejanim alatom

Za spajanje plastičnih cevi i fittinga (priključaka) različitih prečnika se primenjuje postupak zavarivanja plastičnih fittinga zagrejanim alatom (klasifikovan kao ISO 4063 – 663).



Slika 6.16 Postupak zavarivanja fittinga zagrejanim alatom, 1 – alat, 2 – fitting, 3 – cev, a – faza zagrevanja, b – faza zavarivanja [17]

Osnovni princip postupka odgovara opisu osnovne grupe postupaka zavarivanja zagrejanim alatom. Alat (slika 6.16, pozicija 1) za zavarivanje na sebi nosi promenljive umetke kojima se pozicioniraju cevi/fitinzi. Unutar alata je postavljen električni grejač koji zagreva alat do željene temperature. U početnoj fazi zavarivanja (faza zagrevanja, slika 6.16, a) na odgovarajuće umetke na alatu se postavljaju fitting (slika 6.16, pozicija 2) i cev (slika 6.16, pozicija 3). Toplota zagrejanog

alata se preko umetaka prenosi na čelo i unutrašnju površinu fittinga, odnosno, na čelo i spoljašnju površinu cevi. Tako se delovi zagrevaju i delimično tope. Kada je dostignuta odgovarajuća temperatura, cev i fitting se izvlače iz umetaka i fitting se dejstvom sile pritiska navlači na cev (slika 6.16, b). Rastopljeni materijal ovako spojenih delova se meša, delovi se hlade i ostaju zavareni.

Završno iskivanje šava može da se izvodi ručno (za cevi manjeg prečnika i manje debljine zida) ili mehanizovano u odgovarajućem steznom alatu (za cevi većeg prečnika i veće debljine zida).

6.6.4 Postupak zavarivanja cevni (sedlastih) uboda zagrejanim alatom

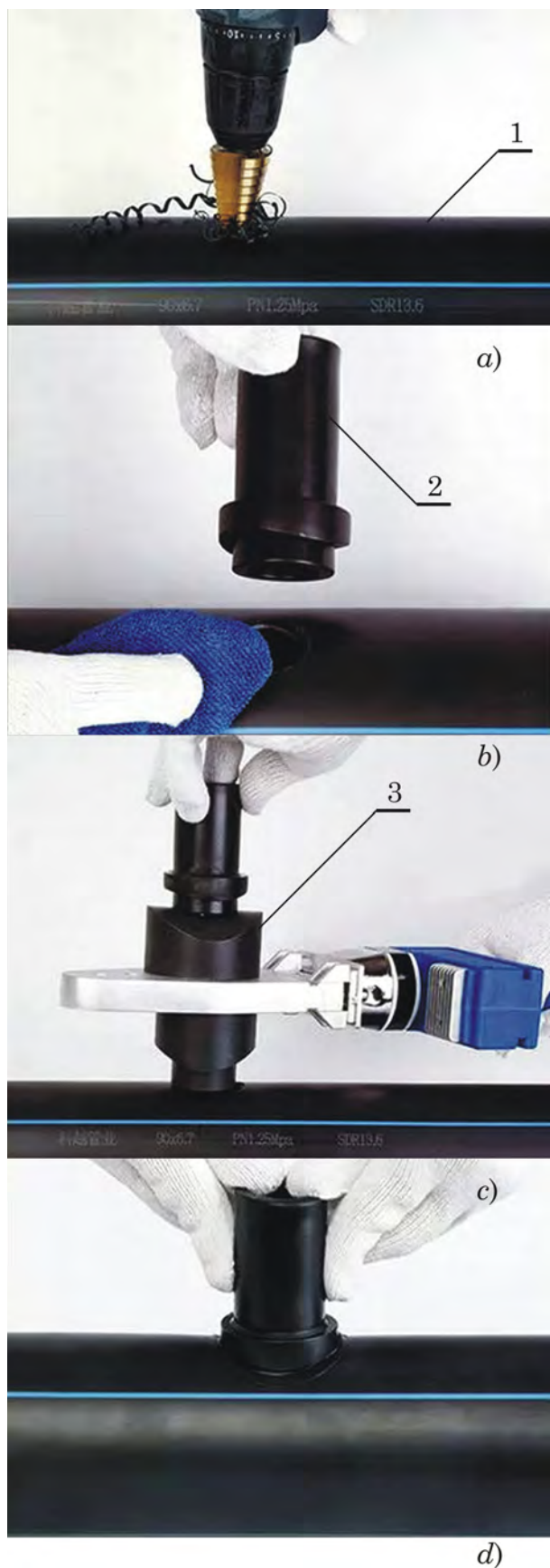
„Ubod cevi u cev” je zavarivački naziv za spajanje dve cevi, postavljene pod nekim uglom (npr. 90°), pri čemu je (najčešće, ali ne obavezno) jedna cev manjeg prečnika i „ubada” se u cev većeg prečnika. Dobijanje ovakvih spojeva podrazumeva dobru prethodnu pripremu ubodnog mesta – neophodno je bušenje odgovarajućeg „sedlastog” otvora u cevi većeg prečnika, kako bi se cev manjeg prečnika propisno pozicionirala.

Postupak zavarivanja cevni (sedlastih) uboda zagrejanim alatom (klasifikovan kao ISO 4063 – 664) za spajanje „sedlastih uboda” cevi je suštinski istovetan postupku 663: koristi se identičan alat za zagrevanje/zavarivanje delova dok su umeci za cevi drugačiji. Alat ima ugrađen električni grejač u svom telu koji obezbeđuje željenu temperaturu zavarivanja.

U cevi većeg prečnika (slika 6.17, pozicija 1) se buši otvor (slika 6.17, a) koji dimenziono odgovara cevi manjeg prečnika (slika 6.17, pozicija 2) i predstavlja sedlo cevi.

Cev manjeg prečnika ima „okovratnik” – sedlo na cevi, koje oblikom i dimenzijama odgovara izbušenom sedlu na cevi većeg prečnika.

Pre početka zavarivanja, obe cevi i oba sedla moraju da budu čista (slika 6.17, b).



Slika 6.17 Postupak zavarivanja cevnih (sedlastih) uboda zagrejanim alatom, 1 – cev većeg prečnika, 2 – cev manjeg prečnika, 3 – zagrejani alat, [18]

Nakon toga se na alat za zavarivanje (slika 6.17, pozicija 3) montiraju odgovarajući sedlasti umeci čija funkcija je zagrevanje i delimično topljenje sedala na cevima (slika 6.17, c). Kada je dovoljno materijala rastopljeno, alat i umeci se uklanjaju, a cevi manjeg prečnika se dejstvom sile pritiska uvlači u otvor na cevi većeg prečnika (slika 6.17, d). Pri tom se vodi računa da se sedla na cevima poklope. Nakon hlađenja pomešanog materijala formira se šav.

Postupak ISO 4063 – 664 je veoma efikasan, funkcionalan i pouzdan, pa se njime zavaruju cevi čiji radni pritisak dostiže vrednosti i do 150 bar.

Zavarivanje se vrši vrlo brzo i cena zavarivanja je niska, međutim, oprema za zavarivanje (umeci) je znatno skuplja nego kod ostalih postupaka zavarivanja zagrejanima alatom.

6.7 Postupci zavarivanja bez svetlucanja/varničenja

Standard SRPS EN ISO 4063:2021 definiše malu grupu postupaka zavarivanja (polimera) bez svetlucanja (bez pojave svetlosti, bez pojave varničenja). Ova specifična grupa postupaka je klasifikovana kao ISO 4063 – 67 i pripada joj samo jedan standardni postupak zavarivanja – Postupak protočnog/livačkog zavarivanja, klasifikovan kao ISO 4063 – 671 [1].

6.7.1 Postupak protočnog/livačkog zavarivanja

Postupak protočnog zavarivanja (klasifikovan kao ISO 4063 – 671, ranije poznat kao postupak livačkog zavarivanja, slika 6.18) je postupak zavarivanja topljenjem kod koga se zagrevanje delova vrši rastopljenim dodatnim materijalom (plastikom).

Radni komadi od plastike se postavljaju u kalup, pozicioniraju i fiksiraju. Nakon toga, delovi se prelivaju rastopljenim dodatnim materijalom koji ispunjava prazan prostor unutar kalupa. Slično kao kod

aluminotermijskog postupka zavarivanja (ISO 4063 – 71) koji se primenjuje za zavarivanje metala, radni komadi od plastike se delimično tope i mešaju sa dodatnim materijalom. Kada se materijal ohladi i ponovo očvrstne, radni komadi i naliveni dodatni materijal ostaju povezani kao monolitna celina. Nakon vađenja iz kalupa, delovi se obrađuju kako bi se uklonio višak materijala.



Slika 6.18 Železničko skretničko srce zavarjeno postupkom livačkog zavarivanja, a – poprečni presek šine, b – skretničko (tramvajsko) srce, slikano 1885 i retuširano radi štampe u časopisu „The Street Railway Journal“ [19]

Postupak zahteva primenu kalupa, dobro zaptivanje kalupa, posude za zagrevanje i topljenje dodatnog materijala. Postoji velika verovatnoća da dodatni materijal ne bude u potpunosti istopljen što za posledicu može da ima pojavu pukotina i šupljina u zoni zavarivanja. Na kraju zavarivanja je neophodna dodatna obrada kako bi se uklonio višak materijala. Zbog svega toga se postupak 671 primenjuje znatno ređe od ostalih postupaka zavarivanja polimera.

6.8 Ostali postupci zavarivanja plastike

Standard SRPS EN ISO 4063:2021 predviđa grupu ISO 4063 – 69 za sve postupke zavarivanja polimera koji su standardizovani ali nisu pridruženi ni jednoj drugoj grupi postupaka. Ovoj grupi pripada samo jedan (!) postupak – postupak mikrotalasnog zavarivanja, klasifikovan kao ISO 4063 – 691 [1].

6.8.1 Postupak mikrotalasnog zavarivanja

Postupak mikrotalasnog zavarivanja (klasifikovan kao ISO 4063 – 691) je suštinski identičan postupku 62 (postupak visokofrekventnog zavarivanja) – princip nastajanja šava je isti (usled dielektrične polarizacije), zavaruju se preklopljeni pločasti delovi od plastike. Jedina razlika je u mehanizmu nastajanja dielektrične toplote. Kod postupka 691 koriste se mikrotalasi (elektromagnetno zračenje) talasne dužine od 1 m do 1 mm i odgovarajućih frekvencija frekvencije od 300 MHz do 300 GHz. Energija mikrotalasa je dovoljna da pobudi čestice plastike na kontaktu radnih komada. One se pri tom polarizuju, usled pojave dielektričnog zagrevanja, temperatura radnih komada raste (delimično se tope na kontaktu) i nakon prestanka dejstva mikrotalasa, moguće je iskivanje šava između radnih komada [20].

LITERATURA

- [1] SRPS EN ISO 4063:2021: Welding, brazing, soldering, cutting, mechanical joining and adhesive bonding – Nomenclature of processes and reference numbers (EN ISO 4063:2020), naziv na sprskom: Zavarivanje, tvrdo lemljenje, meko lemljenje, rezanje, mehaničko spajanje i adheziono spajanje – Lista postupaka i njihovo označavanje, objavljen: 17.12.2020;
- [2] Autorizovana predavanja na kursu za međunarodne inženjere zavarivanja IWE, Mašinski fakultet Niš, 2009-2021;
- [3] Van der Waals Force: https://en.wikipedia.org/wiki/Van_der_Waals_force, (dokument pregledan 23.03.2021);
- [4] George Brady, et al: Materials Handbook. McGraw Hill. pp. 768–70. ISBN 978-0-07-007084-4, 1996;
- [5] Electrofusion Welding: https://en.wikipedia.org/wiki/Electrofusion_welding, (dokument pregledan 23.03.2021);
- [6] Electrofusion Welding: <https://www.youtube.com/watch?v=CIXvfBfrByw>, (dokument pregledan 23.03.2021);
- [7] Implant Welding: https://en.wikipedia.org/wiki/Implant_induction_welding_of_thermoplastics, (dokument pregledan 23.03.2021);
- [8] Howard B. Cary: Modern Welding Technology, 5th edition, Prentice Hall, USA, 2002;
- [9] Solvent Welding: <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/faq-what-is-solvent-welding>, (dokument pregledan 23.03.2021);
- [10] Hot Gas Welding: <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/job-knowledge/hot-gas-welding-of-plastics-part-1-the-basics-056>, (dokument pregledan 23.03.2021);
- [11] Hot Gas Welding: https://en.wikipedia.org/wiki/Hot_gas_welding, (dokument pregledan 23.03.2021);
- [12] Bielomatik: <http://www.bielomatik.com.cn/en/plastic-welding-systems/plastic-welding-method/hot-gas-welding.html>, (dokument pregledan 23.03.2021);
- [13] Extrusion Welding: <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/job-knowledge/extrusion-welding-of-thermoplastics-057>, (dokument pregledan 23.03.2021);
- [14] Extrusion Welding: https://en.wikipedia.org/wiki/Extrusion_welding, (dokument pregledan 23.03.2021);
- [15] Impulse Welding: <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/faq-what-is-impulse-welding-of-thermoplastics>, (dokument pregledan 23.03.2021);
- [16] Wedge Welding: <https://munsch-kunststoff-schweisstechnik.de/produkte/>, (dokument pregledan 23.03.2021);
- [17] Muffenschweißen: <https://www.krv.de/wissen/verfahrensbeschreibung-23>, (dokument pregledan 23.03.2021);
- [18] Sattelschweißen: <https://www.fuyitools.com/saddles-sockets.html>, (dokument pregledan 23.03.2021);
- [19] Cast Welding: <https://www.alamy.com>, (dokument pregledan 23.03.2021);
- [20] Induction Welding: https://en.wikipedia.org/wiki/Induction_welding, (dokument pregledan 23.03.2021);

7 OSTALI POSTUPCI ZAVARIVANJA

Standard SRPS EN ISO 4063:2021 [1] definiše posebnu osnovnu grupu postupaka zavarivanja (ISO 4063 – 7) koju čine svi postupci zavarivanja koji zbog svojih specifičnosti nisu klasifikovani kao neka od drugih grupa postupaka (električni luk, gorivi gas, snop, pritisak, temperatura, trenje i slično).

Kao „ostale” postupke zavarivanja, standard SRPS EN ISO 4063:2021 klasifikuje:

- Postupak aluminotermijskog zavarivanja, klasifikovan kao ISO 4063 – 71,
- Postupak zavarivanja pod troskom, klasifikovan kao ISO 4063 – 72,
- Elektrogasni postupak zavarivanja, klasifikovan kao ISO 4063 – 73,
- Postupci indukcionog zavarivanja, klasifikovani kao ISO 4063 – 74,
- Postupak zavarivanja svetlosnim snopom, klasifikovan kao ISO 4063 – 75, i
- Postupke elektrolučnog zavarivanja vitkih delova, klasifikovane kao grupa ISO 4063 – 78.

7.1 Postupak aluminotermijskog zavarivanja

Postupak aluminotermijskog zavarivanja naziva se i postupkom egzotermnog zavarivanja ili postupkom termitnog zavarivanja. U praksi se sreću oba naziva, ali je utisak da se naziv „egzotermno zavarivanje” češće primenjuje za zavarivanje delova od bakra, dok se naziv „termitno zavarivanje” više vezuje za zavarivanje delova izrađenih od čelika¹.

Postupak aluminotermijskog zavarivanja je postupak spajanja delova koji, kao energiju aktivacije, koristi toplotu dovedenog rastopljenog metala (trećeg tela), koja delimično topi radne komade, pa se rastopljeni osnovni metal meša sa dovedenim

rastopljenim metalom, a po očvršćivanju, formira monolitnu celinu [3]. Za dobijanje energije aktivacije (toplote) zavarivanja koristi se egzotermna hemijska reakcija mešavine različitih aktivnih supstanci – „termita”. Prema tome, za zavarivanje termitima nije potrebna primena kontinuiranog, spoljašnjeg izvora toplote (električna struja, gorivi gas, laser itd) već je dovoljna brzo oslobođena toplota iz egzotermne hemijske reakcije [3].

Postupak aluminotermijskog (egzotermnog) zavarivanja je prema SRPS EN ISO 4063:2021 [1] standardizovan i klasifikovan kao postupak ISO 4063 – 71 [4].

Istorija postupka

Pronalazačem aluminotermijskog postupka zavarivanja smatra se nemački hemičar Johanes Goldšmit². On je autor inicijalnog patenta iz 1897. godine [6] koji se odnosi na aluminotermijsku (hemijsku, egzotermnu) reakciju, koja je, po njemu, dugo zvana „Goldšmitova reakcija”³. Međutim, ovaj patent samo marginalno pominje primenu „reakcije” na zavarivanje – osnovna ideja patenta bila je proizvodnja čistih metala tokom topljenja u visokim pećima bez primene ugljenika. Ubrzo je „Hans” Goldšmit shvatio mogućnost primene „reakcije” za zavarivanje, pa je prve ozbiljnije radove na temu aluminotermijskog zavarivanja objavio 1898. godine. Već 1899. godine, Goldšmitova kompanija je u Esenu izradila prve železničke

² Nem. Johannes Wilhelm Goldschmidt (18.01.1861–21.05.1923) hemičar iz Nemačke [5].

³ „Goldšmitova reakcija” nije prvi put sprovedena u Nemačkoj. Hemičar i metalurg iz carske Rusije, Nikolaj Beketov (rus. Николай Николаевич Бекетов, 13.01.1827–13.12.1911) [7] je svojim eksperimentima, izvedenim od 1859. do 1865. godine, dokazao da aluminijum, na visokim temperaturama može da „vrati metale u čisto stanje” redukcijom iz oksida metala. Smatra se da je prve termitne reakcije u kontrolisanim uslovima sproveo baš Beketov [8]. Termitno zavarivanje je nastalo tridesetak godina nakon Beketovih eksperimenata.

¹ U daljem tekstu nije obraćana pažnja na ovu opasku jer primena ni jednog naziva nije obavezujuća [2].

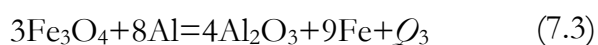
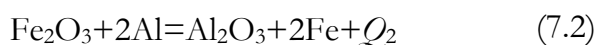
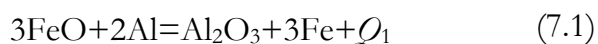
koloseke egzotermnim zavarivanjem a 1904. godine je osnovana kompanija u Njujorku i započelo se sa komercijalnim egzotermnim zavarivanjem šina u Sjedinjenim Američkim Državama. Iste 1904. godine izvršeno je prvo aluminotermijsko zavarivanje tramvajskih šina u Lidsu (Velika Britanija) [9]. U periodu 1924–1930, nemačka železnica je ispitivala termitne zavarene spojeve, ustanovila je osnovne zahteve koje zavareni spoj mora da ostvari, dala je preporuke za zavarivanje i ustanovila interne standarde za egzotermno zavarivanje [11]. Američka komisija za uvođenje standarda u železnicu [10] je 1932. godine donela propis kojim se nalaže primena egzotermnog zavarivanja, kao najbržeg i najpouzdanijeg postupka reparacije šina. Od 1943. godine Nemačka je egzotermno zavarivanje šina masovno koristila za brzu reparaciju uništenih šina [12].

Do današnjih dana, zbog svoje fleksibilnosti, brzine zavarivanja i kvaliteta šava, egzotermno zavarivanje nalazi svoju primenu u industriji.

Princip rada, parametri zavarivanja i oprema za zavarivanje

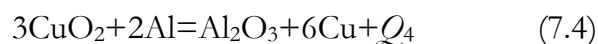
Toplota neophodna za termitno zavarivanje dobija se tokom burne egzotermne reakcije termita na povišenoj temperaturi.

Aluminotermnit predstavlja mešavinu oksida gvožđa⁴ (železa – najčešće FeO, Fe₂O₃, Fe₃O₄) i čistog aluminijuma. Smeša je prethodno pripremljena/pomešana (u odgovarajućem masenom odnosu oksida i aluminijuma), zatim samlevena i spakovana u vodonepropusnu ambalažu. Zagrevanjem aluminotermita na temperaturu višu od 1150 °C (paljenjem termita), započinje burna hemijska reakcija sagorevanja oksida železa [3].



Proizvodi sagorevanja (jednačine 7.1 do 7.3) su čisto gvožđe (Fe), aluminijum oksid (Al₂O₃) i velika količina oslobođene toplote (Q). Količina toplote oslobođena sagorevanjem viših oksida gvožđa (Fe₂O₃ i Fe₃O₄) dovoljna je da zagreje radne komade od čelika (lokalno, u zoni zavarivanja) do temperature više od 2000 °C.

Za zavarivanje bakra i ostalih obojenih metala, koristi se bakar-termit – mešavina bakra oksida i aluminijuma:



Proizvodi sagorevanja iz reakcije prikazane jednačinom 7.4 su isti kao kod aluminotermita, a količina oslobođene toplote (Q₄) je dovoljna za uspešno zagrevanje i zavarivanje bakarnih delova. Zavarivanje čelika bakar-termitom nije moguće.

Pored aluminijumovog i bakrovog termita, postoje termiti nikla i mangana, ali njihova primena za zavarivanje nije komercijalna.

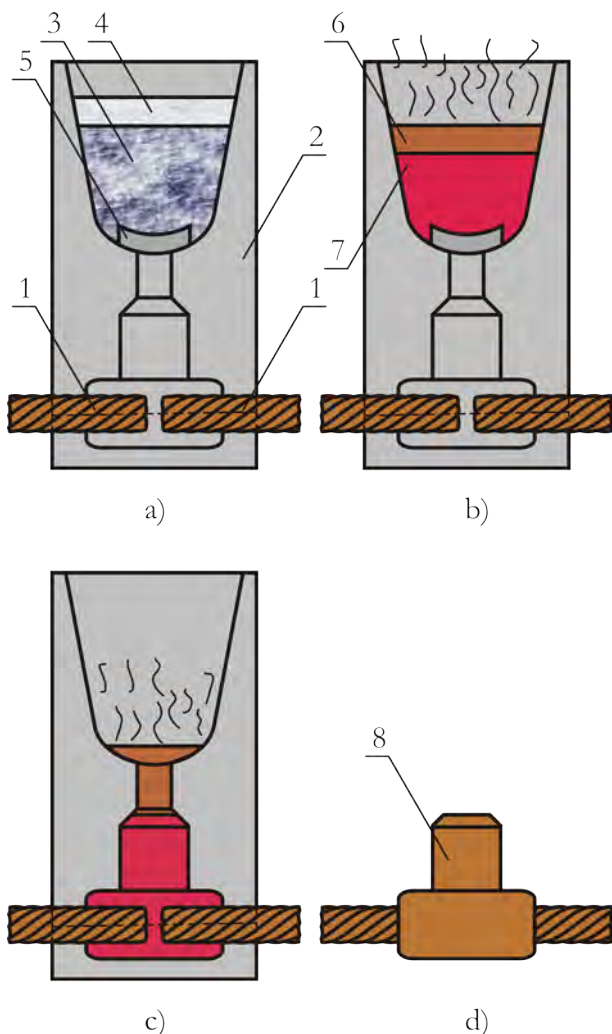
Standardna (mala) pakovanja termita su od 50 g do 1 kg i uključuju pakovanje start-praška za paljenje termita. Za zavarivanje masivnih delova koriste se pripremljena pakovanja termita i start-praška (kantice, burad) u kojima je smeša već pripremljena i spakovana. Posude sa termitom imaju ulivne i odlivne kanale, komore za sagorevanje, ekspanzere itd. Ovakva pakovanja termita mogu da budu od 50 kg teška (velika pakovanja) [3].

Start-prašak je 100% magnezijum u zrnu ili mešavina 99% magnezijuma u zrnu i 1% belog baruta. Masa start-praška je približno jednaka 5% mase termita kojim se vrši zavarivanje ali ne sme da bude manja od 5 g radi uspešnog paljenja termita [13].

Postupak egzotermnog zavarivanja vrši se uvek u kalupu (slika 7.1, pozicija 2). Kalup je izrađen od grafita, gline, ređe od čelika ili, znatno ređe, od peska. Kalup je dvodelan – ravan razdvajanja polutki kalupa je kolinearna osi simetrije delova koji se zavaruju (slika 7.1, pozicija 1). Radni komadi se postavljaju u kalup i kalup se nakon toga učvršćava. Zazor između radnih komada i kalupa se popunjava mekom glinom ili netopivim kitom kako bi se

⁴ Gvožđe gradi 16 različitih oksida.

sprečilo curenje rastopljenog metala izvan kalupa. U početnoj fazi zavarivanja (slika 7.1, a) na dno ulivnog dela kalupa se postavlja tanka, okrugla, čelična pločica (slika 7.1, pozicija 5) čiji zadatak je da spreči prodor termita i start-praška u donji deo kalupa.



Slika 7.1 Šematski prikaz aluminotermijskog zavarivanja topljenjem: 1 – ušad, 2 – kalup, 3 – termit, 4 – start-prašak, 5 – čelična pločica, 6 – rastopljena troska, 7 – rastopljeni metal, 8 – zavarjeni delovi

Postupak zavarivanja je, zbog gravitacije, izvodljiv samo u horizontalnom, odnosno, vertikalnom položaju.

Nakon zaptivanja kalupa, u šuplinu se sipa termit (slika 7.1, pozicija 3), a preko njega start-prašak (slika 7.1, pozicija 4).

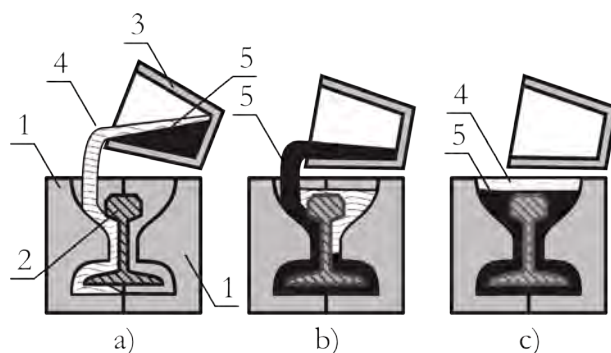
U drugoj fazi zavarivanja (slika 7.1, b) se pali start-prašak koji postepeno zagreva i pali termit. Tokom burne reakcije sagorevanja termita, ulivni deo kalupa se ispunjava

rastopljenim metalom iz termita (slika 7.1, pozicija 7). Površinu osnovnog metala prekriva rastopljena troska (slika 7.1, pozicija 6), koju čini Al_2O_3 , koji je lakši od rastopljenog metala. Rastopljeni metal vrlo brzo topi čeličnu pločicu i prodire u oblikujući deo kalupa.

U trećoj fazi zavarivanja (slika 7.1, c) rastopljeni metal zagreva i delimično topi radne komade unutar kalupa. Troska, koja i dalje pliva po površini rastopljenog metala, štiti zonu zavarivanja od prodora gasova iz atmosfere i sprečava brzo hlađenje rastopljenog metala. Rastopljeni metal iz termita i radnih komada se meša i očvršćava u monolitnu celinu – zavarjeni šav (slika 7.1, pozicija 8). Nakon potpunog očvršćavanja metala, kalup se otvara, zavarjeni delovi (slika 7.1, d) se izvlače iz kalupa i čiste od troske. Neophodno je detaljno čišćenje kalupa kako bi bio spreman za sledeći ciklus zavarivanja.

Ovakva varijanta termitnog zavarivanja se naziva egzotermnim postupkom zavarivanja topljenjem (ili: gravitacijom) jer rastopljeni metal termita, iz ulivnog dela kalupa, usled gravitacije, sam otiče u oblikujući deo kalupa i delimično topi radne komade. Ovakva varijanta se uglavnom primenjuje za radne komade malih poprečnih preseka.

U upotrebi je i egzotermni postupak zavarivanja (pod) pritiskom.



Slika 7.2 Šematski prikaz aluminotermijskog postupka zavarivanja pod pritiskom: 1 – kalup, 2 – šina, 3 – sud, 4 – rastopljena troska, 5 – rastopljeni metal [3]

Šine (slika 7.2, pozicija 2) se postavljaju u kalup (slika 7.2, pozicija 1), kalup se priteže i

zaptiva. Primenjuje se pravilo „jednog inča” – lica šina u kalupu se nalaze na rastojanju od jednog inča. Šine ne moraju da budu „hirurški čiste” kao kod pojedinih konvencionalnih – elektrolučnih postupaka zavarivanja, ali je neophodno stanje „metalnog sjaja” površina. Kalup je tako konstruisan da dozvoljava određeno aksijalno pomeranje šina pri dejstvu sile. Termit i start-prašak su prethodno sipani u posebnu posudu (slika 7.2, pozicija 3) i zapaljeni. Nakon sagorevanja termita, troska (slika 7.2, pozicija 4) je odvojena od tečnog metala (slika 7.2, pozicija 5) i pliva na vrhu posude. Lagano se započinje nalivanje vruće troske u kalup oko šina (slika 7.2, a). Troska kvasi i zagreva šine u kalupu.

Posle troske sledi nalivanje rastopljenog metala (slika 7.2, b). Rastopljeni metal dodatno zagreva šine, ali je udeo topljenja samih šina neznatan a mešanje metala iz termita i šina je još uvek neznatno. Nakon punjenja kalupa (slika 7.2, c), rastopljeni metal je na dnu dok troska pokriva površinu rastopljenog metala. Tada započinje pritiskanje šina aksijalnom silom koja vrši iskivanje – zavarivanje zagrejanih čeonih delova šina u kalupu. Dejstvo aksijalne sile prestaje tek nakon potpunog očvršćavanja rastopljenog metala. Nakon toga se kalup otvara, zavarene šine se vade iz kalupa, uklanjaju se troska i ostatak metala iz termita.

Železničke šine se uspešno zavaruju primenom obe varijante.

Postupak gravitacionog, termitnog zavarivanja, primenjuje se i za reparaturu šina⁵. Kada se utvrdi problematično mesto na šini, nakon složene procedure utvrđivanja izvodljivosti reparaure (koju nameću železnički propisi) i potvrde da je reparatura izvodljiva, šina se, najčešće, gasnim postupkom žlebi (priprema) i potom brusi. Nakon toga se postavlja odgovarajući aluminotermijski kalup, šina se predgreva (opet gasnim postupkom) i vrši sa ispuna

ožlebljenog mesta. Nakon očvršćavanja metala, kalup se uklanja, navareno mesto se čisti i vrši se profilisanje šine (brušenje na odgovarajući oblik i dimenzije). Nakon toga se testira tvrdoća navarenog mesta i reparacija je završena.

Oprema za zavarivanje je slična za obe varijante aluminotermijskog zavarivanja. Jedina razlika kod opreme je vezana za dimenzije delova koji se zavaruju.

Kada se zavaruju delovi većeg poprečnog preseka (železničke šine), normalno, primenjuju se kalupi većih dimenzija. Kako je ranije navedeno, tada se primenjuju posebni kontejneri većih dimenzija sa već pripremljenim i upakovanim termitom (slika 7.3).



Slika 7.3 Deo opreme za aluminotermijsko zavarivanje šina [9]

Kontejner sa termitom se postavlja na kalup i pali. Upaljeni termit gori u samom kontejneru, a rastopljeni metal topi dno kontejnera na oslabljenom mestu, curi u kalup i zavaruje šine po ranije opisanoj proceduri.

Za delove manjih dimenzija (bakarni provodnici), kalupi su manjih dimenzija, imaju svoje ulivne sisteme i bunker za termit (slika 7.4). Tada je pakovanje termita manje, sipa se direktno u bunker kalupa i pali.

Za otvaranje kalupa, čišćenje kalupa i zavarenih delova, koriste se četke, metlice, lopatice, profilisane šipke i slično, i to za obe varijante.

Iako je postupak aluminotermijskog zavarivanja vrlo fleksibilan, (sa aspekta primene na terenu, lake montaže i demontaže opreme za zavarivanje) sa aspekta

⁵ Postupak se na engleskom zove *Head Repair Weld* (HRW). U Sjedinjenim Američkim Državama, Australiji i Kanadi se HRW primenjuje znatno češće nego tipični postupak aluminotermijskog zavarivanja [14].

ponovljivosti i održanja kvaliteta zavarenog spoja je veoma zahtevan. Naime, kvalitet zavarenog spoja veoma zavisi od količine i kvaliteta smeše termita, vremena zavarivanja, brzine i trenutka uklanjanja kalupa nakon zavarivanja.



Slika 7.4 Deo opreme za egzotermno zavarivanje bakarnih provodnika [15]

Poseban problem je zavarivanje šina različitih tvrdoća, što je, na žalost, i najčešća situacija na terenu. Šav dobijen postupkom termitnog zavarivanja je uvek najkritičnije mesto jedne šine jer je tvrdoća u njemu uvek značajnije veća (ili manja!) nego tvrdoća šina koje se zavaruju. Stoga je trenutak uklanjanja kalupa sa mesta zavarivanja kritična aktivnost: prerano uklanjanje za rezultat ima brzo hlađenje šava i stvaranje vrlo krte i tvrde strukture, dok suviše kasno uklanjanje kalupa ima za rezultat mekani zavareni spoj koji se brzo haba usled pritiska železničkih točkova. Najveći problem je što, usled oblika i dimenzija samih šina, toplota brzo putuje kroz njih i period između „suviše kratko” i „suviše dugo” traje 20 s – 40 s [3]. Stoga su dobra i precizna tehnologija zavarivanja, kombinovani sa obučenim zavarivačem, koji pravovremeno reaguje (saglasno propisanoj tehnologiji zavarivanja), jedini način da se dobije željeni kvalitet zavarenog šava bez skupih dodatnih tehnoloških aktivnosti. Postupak se primenjuje svuda u svetu, ali prednjače Indija, Kina i Sjedinjene Američke Države.

Prednosti i nedostaci

Postupak aluminotermijskog zavarivanja je postupak zavarivanja koji odlikuje formiranje kvalitetnih spojeva, vrlo dobre mehaničke nosivosti i otpornosti na degradacione električne pojave (čak i koroziju). Prednost postupka je primenljivost na terenu.

Sa druge strane, za aluminotermijsko zavarivanje je neophodan kalup, neophodni su dobri vremenski uslovi – suvo vreme, i potrebni su vrlo dobro obučeni operateri zavarivanja. Ponovljivost zavarivanja – dobijanje istovetnih metalurških i mehaničkih osobina tokom zavarivanja više parova elemenata, predstavlja ozbiljan problem/nedostatak samog postupka.

Primena postupka

Postupak egzotermnog zavarivanja se najviše primenjuje za zavarivanje železničkih šina, bakarnih provodnika velikog preseka, a primenjuje se i za spajanje užadi i sajli, kao i, za spajanje delova betonske armature. Materijali koji su zavarivi termitnim postupkom su bakar, liveno gvožđe, čelici (i nerđajući), bronzе, mesing i monel [3].

7.2 Postupak zavarivanja pod troskom

Postupak zavarivanja pod troskom je postupak zavarivanja koji primarnu energiju za zavarivanje dobija od električnog luka i električnog otpora. Dalje se ta toplota koristi za delimično topljenje praška i stvaranje rastopljene troske. Troska, koja je tada na visokoj temperaturi od približno 2000 °C, ponaša se kao primarni izvor energije aktivacije zavarivanja – ona zagreva i topi radne komade u zoni zavarivanja, oni se mešaju sa rastopljenim metalom iz troske, i nakon očvršćavanja, formiraju zavareni spoj [3].

Ovaj postupak se koristi za zavarivanje čeličnih delova velike debljine, vrlo velikim

brzinama zavarivanja. Najčešće se koristi za zavarivanje delova u brodogradnji.

Sam postupak je, po mnogim detaljima, veoma sličan postupku zavarivanja pod praškom, ali postoje i značajne razlike.

Istorija postupka

Nastanak postupka zavarivanja pod troskom, sa punim pravom, prisvajaju i Sjedinjene Američke Države i Rusija. Naime, Amerikanac Robert Hopkins i kompanija M.W. Kellogg Co su 1936. godine radili na proizvodnji plakiranih limova od nerđajućeg čelika primenjujući postupak zavarivanja pod praškom za nanošenje sloja metala na jednu stranu čelične ploče. Nakon toga je valjanjem dobijen lim određene debljine [16]. Hopkins je imao problema sa prslinama na krajevima lima pa je eksperimentisao sa parametrima zavarivanja – povećavao je dimenzije tečnog kupatila i bilo je neophodno da postavi odgovarajuće „ustave” kojima bi usmerio i ograničio kretanje tečne troske koja je nastajala pri zavarivanju. Praktično gledano, Hopkins je, takvim rešenjem, dao osnove novog postupka zavarivanja – pod troskom.

Do 1939. godine, Hopkins je prijavio veliki broj patenata koji se odnose na topljenje pod troskom radi proizvodnje čeličnih ingota. Ni u jednom od njih se ne pominje zavarivanje. Međutim, juna 1939. godine, Hopkins je podneo zahtev za američki patent broj 2,191,481 koji opisuje nanošenje jednog metala na drugi u okruženju rastopljene troske [17]. Na neki način, ovo jeste način spajanja dva metala delimičnim topljenjem (ili potpunim topljenjem u zoni zavarivanja), što jeste prihvaćena definicija zavarivanja.

Tokom 1947. godine, Institut za zavarivanje Paton u Kijevu, započeo je istraživanje serije postupaka zavarivanja u vertikalnom položaju, uz primenu rastopljene troske i vertikalne, vodom hladene oblikače zavarenog spoja. Već 1949. godine, ekipa sa Patona, predvođena D.Z. Voloskevičem⁶ [18], rešavala je problem prekomerne rastopljene

troske (preko 40 mm dubine), zatim problem pregrevanja i brzog hlađenja. Iste godine, postupkom zavarivanja pod troskom, zavareni su prvi zidovi kotlova, debljine 90 mm [19].

Početak 1950. godine, vodom hladene ploče-oblikači, inicijalno izrađeni od čelika, zamenjeni su pločama od bakra i započela je primena Voloskevičijevog postupka u brodogradnji, teškoj mašinogradnji i vojnoj industriji. Prvu svetsku prezentaciju postupka, Paton je imao krajem 1950. godine na sajmu u Briselu [20]. Do kraja pedesetih godina dvadesetog veka, Paton je uveliko eksperimentisao sa različitim poprečnim preseccima žica za zavarivanje, na raznim mešavinama praška koji formira trosku i na dodavanju metalnog praha u zonu zavarivanja.

Tek 15. marta 1957. godine, Amerikanac Hari Šrabsal (eng. Harry Shrubsall) u okviru „Linde Division of UCC” podneo je prijavu za američki patent 2,868,951 koji je prihvaćen 1959. godine [21]. Slike iz patenta nedvosmisleno podsećaju na postupak zavarivanja pod troskom koji se primenjuje u današnje vreme.

Godine 1959, „General Motors” je započeo serijsku proizvodnju blokova motora velikih traktora postupkom zavarivanja pod troskom [20].

Klasifikacija i podela postupaka

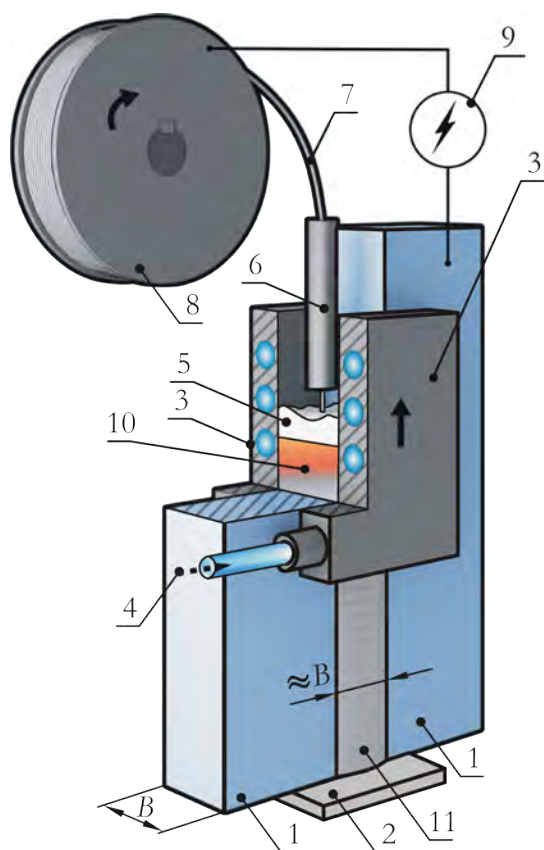
Postupak zavarivanja pod troskom je prema SRPS EN ISO 4063:2021 standardizovan i klasifikovan kao grupa 72 (ISO 4063 – 72). Grupa 72 obuhvata postupak zavarivanja pod troskom uz primenu trake za zavarivanje (ISO 4063 – 721) i postupak zavarivanja pod troskom uz primenu žice za zavarivanje (ISO 4063 – 722). Kao što nazivi postupaka kažu – oni se međusobno razlikuju samo po obliku primenjenog dodatnog materijala.

Osnovni principi postupka

Zavarivanje pod troskom spada u visokoproduktivne postupke zavarivanja čeličnih delova (uglavnom ploča, limova) velikih dimenzija. Zavarivanje se uvek izvodi

⁶ Rus. Георгий Зосимович Волошкевич (1911–1986), sovjetski naučnik, profesor zavarivanja [18].

u jednom prolazu. Ploče koje se zavaruju (slika 7.5, pozicija 1) su velike debljine ($B \geq 25$ mm). One se postavljaju u vertikalni položaj, sučeljavaju pa odmiču na rastojanje blisko B . Ploče leže na podložnoj ploči (slika 7.5, pozicija 2) čiji je zadatak zatvaranje žleba sa donje strane. Žleb (prazan prostor između radnih komada), sa bočnih strana zatvaraju ploče-vođice (slika 7.5, pozicija 3). One su izrađene od bakra (ili od čelika) i one su pokretni delovi sistema za zavarivanje – tokom zavarivanja se pomoću odgovarajućih vođica pomeraju naviše. Ploče-vođice su izložene velikom zagrevanju i neophodno je intenzivno hlađenje kako se ne bi pretopile tokom zavarivanja. Zbog toga u pločama postoje masivni žlebovi za cirkulaciju vode za hlađenje (slika 7.5, pozicija 4).



Slika 7.5 Šematski prikaz postupka zavarivanja pod troskom: 1 – radni komadi, 2 – podložna ploča, 3 – ploče-vođice, 4 – voda za hlađenje, 5 – prašak, 6 – vođica elektrodne žice, 7 – elektrodna žica, 8 – kalem (kotur) elektrodne žice, 9 – izvor električne struje, 10 – rastopljena troska pomešana sa rastopljenom elektrodnom žicom i delom radnih komada, 11 – lice/naličje šava, očvrsl deo metala šava [22]

Nakon postavljanja ploča-vođica, žleb među pločama je zatvoren sa svih strana, sem sa gornje strane (formirana je šupljina-rupa). U šuplinu se, zatim, sipa određena količina praška (slika 7.5, pozicija 5). Prašak je sličnih osobina kao prašak koji se primenjuje za postupak zavarivanja pod praškom – delimično se topi, legira metal šava i štiti zavareni spoj od negativnog uticaja gasova iz atmosfere i brzog hlađenja. Prašak je vrlo loš provodnik električne struje. Prilikom izbora praška, mora da se vodi računa i o sledećem: troska mora da bude odgovarajuće viskoznosti kako bi sprečila curenje tečnog metala šava pored pokretnih ploča, a pri tom temperatura isparavanja troske mora da bude što viša. Temperatura topljenja praška mora da bude niža od temperature topljenja osnovnog i dodatnog metala!

Pomoću vođice elektrodne žice (slika 7.5, pozicija 6), elektrodna žica (slika 7.5, pozicija 7) se sa kalema (slika 7.5, pozicija 8) dovodi u dodir sa praškom unutar šupljine. Izvor struje (slika 7.5, pozicija 9) je jednim polom povezan za radne komade a drugi pol je povezan za elektrodnu žicu. Izvor struje sa ravnom strujnom karakteristikom snabdeva sistem jednosmernom strujom (JS, DC) jačine 750 A do 1000 A, pod naponom 30 V – 55 V. Kada elektrodna žica dodirne radne komade ispod praška, uspostavlja se intenzivan električni luk⁷. Luk gori do trenutka kada se rastopi dovoljno praška i elektrodne žice u okolini električnog luka, te se formira kritična količina rastopljene troske. Nakon toga, luk „uranja” u trosku i gasi se. Međutim, kako je sistem i dalje „pod naponom” električna struja protiče kroz žicu i prašak do radnih komada. Kako prašak vrlo loše provodi električnu struju (ima veliki električni otpor), usled Džulovog efekta dolazi do zagrevanja samog praška i elektrodne žice, i oni se delimično ili potpuno tope. Česta je pojava naknadnog paljenja električnog luka (pod praškom), ali, se on uvek brzo gasi.

⁷ Ovo je najprimitivniji način uspostavljanja električnog luka. Luk je moguće uspostaviti pilot lukom, VF generatorom – sve metode paljenja luka, koje se koriste kod postupka zavarivanja pod praškom, su primenjive i za postupak zavarivanja pod troskom.

Takvim kombinovanim dejstvom električnog luka i električnog otpora, veliki deo praška i elektrodna žica u zoni zavarivanja se tope (slika 7.5, pozicija 10) i dovode do temperature od približno 2000°C. Rastopljeni metal u troski pada na dno žleba i kako proces zavarivanja odmiče, puni žleb. Ostala jedinjenja u troski (najlakša jedinjenja) plivaju na površini troske i mešaju se sa praškom iznad (kvase ga).

Temperatura troske dovodi do intenzivnog zagrevanja i topljenja materijala radnih komada na čelima. Intenzivno hlađenje ploča-vođica odnosi deo toplote iz troske tako da se na dodiru ploča-vođica i troske formira sloj od očvrsllog metala šava⁸ (slika 7.5, pozicija 11).

Kako proces hlađenja i očvršćavanja traje kontinualno, formiranje očvrsllog sloja dozvoljava vertikalno kretanje ploča-vođica naviše. Tako prethodno zavarena zapremina materijala (delimično očvrsla) ostaje ispod. Očvršli sloj ne dozvoljava curenje tečnog metala iz središta žleba. Sa druge strane, kontinualno dovođenje elektrodne žice (i praška, po potrebi) produžava proces gorenja električnog luka, a samim tim, produžava proces elektrotopnog zagrevanja i topljenja elektrodne žice i praška. Tako se podiže nivo rastopljene troske i praška i zavarivanje se nastavlja.

Brzina kretanja ploča-vođica je, u stvari, brzina zavarivanja i najčešće iznosi 10 mm/s do 150 mm/s.

Za zavarivanje delova manjih debljina (od 25 mm do 75 mm) koristi se jedna elektrodna žica. Velike debljine radnih komada (preko 75 mm), zahtevaju primenu sistema sa dve i više elektrodnih žica⁹, ili trake velike širine za maksimalne debljine radnih komada (preko 120 mm) [23].

Kao posebna varijanta, primenjuje se postupak zavarivanja pod troskom uz dodatak zaštitnog gasa (najčešće CO₂). To je, u suštini,

po mnogim osobinama, postupak koji je različit od elektrogasnog postupka zavarivanja, (ISO 4063 – 73). Dodatkom gasa se povećava/poboljšava zaštita tečnog kupatila od uticaja gasova iz atmosfere, ali se smanjuje brzina deponovanja (brzina zavarivanja).

Prednosti i nedostaci postupka

Postupak zavarivanja pod troskom odlikuju:

- Velika brzina deponovanja materijala u jednom prolazu (15 kg/h do 25 kg/h), odnosno, velika brzina zavarivanja.
 - Zavaruju se delovi vrlo velikih dimenzija.
 - Za razliku od postupka zavarivanja pod praškom, ne postoji ugaono zakrivljenje kod delova zavarenih pod troskom. Šav je uvek simetričan.
 - Zaostali naponi u zavarenom spoju su, zbog relativno dugog termičkog uticaja rastopljenje troske, umireni. Samim tim, i deformacije šava su minimalne.
 - Priprema žleba je znatno jednostavnija nego kod ostalih postupaka zavarivanja.
 - Potrošnja troske (samim tim i praška) je oko 5% u odnosu na ukupnu količinu deponovanog materijala (kod postupka zavarivanja pod praškom je oko 20%). Samim tim je uticaj praška na sastav metala šava manji i lako upravljiv.
 - Postupak je u potpunosti mehanizovan, automatizovan ili robotizovan tako da kvalitet zavarenog spoja ne zavisi od zavarivača.
- Postupak se odlikuje brojnim nedostacima:
- Zona uticaja toplote je, po dubini – mereno od čela radnih komada, višestruko veća od debljine *B*. Sama zona uticaja toplote je sklona pojavi toplih prslina.
 - Ukoliko su parametri zavarivanja (jačina struje, napon, brzina zavarivanja i brzina hlađenja ploča-vođica) loše izabrani i količina generisane toplote iz troske je suviše velika, kvalitet zavarenog spoja je vrlo loš – šav odlikuje mala čvrstoća, kao posledica krupnozrnih struktura u zonama topljenja i zoni uticaja toplote.

⁸ Mešavina metala iz troske, rastopljene elektrodne žice i rastopljenog dela radnih komada.

⁹ Na osnovu nekih izvora, maksimalno zavarena debljina radnih komada bila je *B*=910 mm, sistemom sa 6 elektrodnih žica prečnika 5 mm [3].

- Postupak je izvodljiv samo u vertikalnom (horizontalnom) položaju i to kod pločastih delova od čelika.
- Postupak je skoro neprimenljiv (teško primenljiv) za zavarivanje cevi, profilisanih oblika, pojedinih obojenih metala i čelika osetljivih na tople prsline.
- Iskustva pokazuju da je postupak manje isplativ ukoliko je $B < 60$ mm. U tom slučaju, preporučuje se postupak zavarivanja pod praškom.
- Postupak troši mnogo električne energije, uz srednji i nizak stepen iskorišćenja (do maksimalnih 55%).

7.3 Elektrogasni postupak zavarivanja

Elektrogasni postupak zavarivanja je, prema opremi za zavarivanje, proceduri zavarivanja i kadrovima potrebnim za realizaciju zavarivanja, potpuno identičan postupku zavarivanja pod troskom, sa dve razlike. Prva je da nema praška za zavarivanje, pa samim tim, nema ni pojave troske pri zavarivanju. Kao kod jednog broja elektrolučnih postupaka, koristi se zaštitni gas (u većini slučajeva je to ugljendioksid, zato što je najjeftiniji i teži od vazduha). Druga razlika je u činjenici da se električni luk upali na početku i on gori neprekidno tokom ciklusa zavarivanja, što nije situacija kod postupka zavarivanja pod troskom.

Ostale osobine, primenljivost, većina prednosti i nedostataka elektrogasnog postupka, identične su osobinama postupku zavarivanja pod troskom [3].

Istorija postupka

Nakon prihvatanja patenta za postupak zavarivanja pod troskom, kompanija Linde je, početkom 1960. godine, podnela dokumenta za patent koji se odnosi na elektrogasni postupak zavarivanja. Patent je odobren 1962. godine [24]. Samim tim, može da se smatra da je elektrogasni postupak zavarivanja nastao krajem pedesetih godina dvadesetog veka.

Klasifikacija i podela postupaka

Postupak elektrogasnog zavarivanja je prema SRPS EN ISO 4063:2021 [1] standardizovan i klasifikovan kao 73 (ISO 4063 – 73).

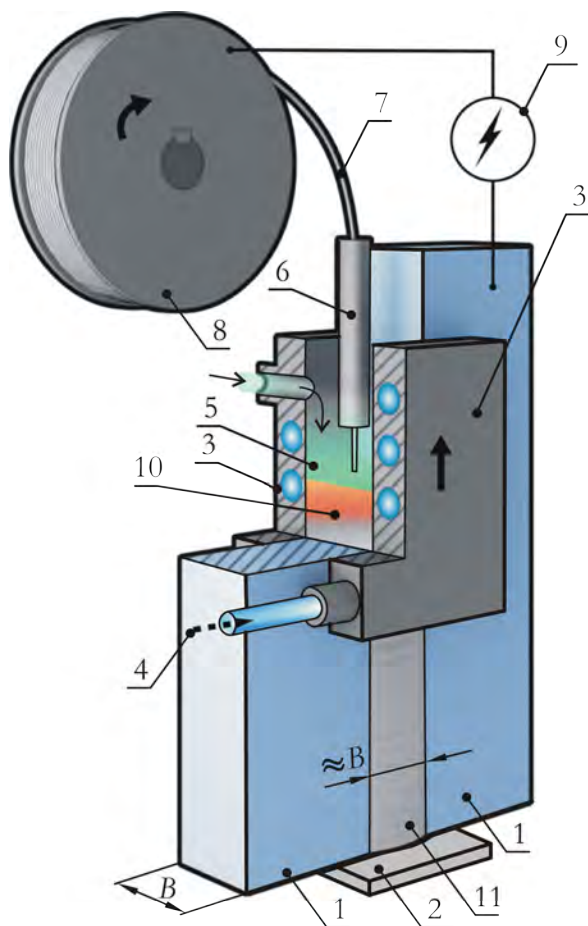
Osnovni principi postupka

Postupak elektrogasnog zavarivanja koristi istu opremu i princip zavarivanja kao postupak zavarivanja pod troskom. Zavarivanje masivnih delova se uvek izvodi u jednom prolazu. Ploče koje se zavaruju (slika 7.6, pozicija 1) su debljine $B \leq 25$ mm. One se postavljaju u vertikalni položaj, sučeljavaju pa odmiču na rastojanje blisko vrednosti B . Ploče leže na podložnoj ploči (slika 7.6, pozicija 2) čiji je zadatak zatvaranje žleba sa donje strane. Žleb (prazan prostor između radnih komada), sa bočnih strana zatvaraju ploče-vođice (slika 7.6, pozicija 3). One su izrađene od bakra (ili od čelika) i one su pokretni delovi sistema za zavarivanje – tokom zavarivanja se, pomoću odgovarajućih vođica, pomeraju naviše. Ploče-vođice su izložene velikom zagrevanju i neophodno je intenzivno hlađenje kako se ne bi istopile tokom zavarivanja. Zbog toga u pločama postoje masivni žlebovi za cirkulaciju vode za hlađenje (slika 7.6, pozicija 4).

U žleb se, pomoću vođice (slika 7.6, pozicija 6) kontinualno dovodi žica (slika 7.6, pozicija 7) sa kalema (slika 7.6, pozicija 8). Izvor struje (slika 7.6, pozicija 9) je povezan sa radnim komadima i žicom te se električni luk uspostavlja između vrha elektrodne žice i radnih komada. Uglavnom se primenjuje izvor jednosmerne struje sa ravnom strujnom karakteristikom. Struja zavarivanja nikad nema vrednost nižu od 100 A, a dostiže i do 2000 A. Električni luk topi žicu u zoni zavarivanja ali topi i deo radnih komada te formira masivno tečno kupatilo (slika 7.6, pozicija 10). Prostor u žlebu iznad tečnog kupatila (slika 7.6, pozicija 5) ispunjava se zaštitnim gasom (najčešće je to CO_2) čiji je zadatak da štiti metal šava.

Kako proces hlađenja i očvršćavanja rastopljenog metala šava traje kontinualno, formiranje očvrstlog sloja dozvoljava

vertikalno kretanje ploča-vodica navise. Tako prethodno zavarena zapremina materijala (koja je delimično očvrsla) ostaje ispod. Očvršli sloj ne dozvoljava curenje tečnog metala iz središta žleba. Sa druge strane, kontinualno dovođenje elektrodne žice produžava proces gorenja električnog luka i topljenja elektrodne žice i praška. Tako se podiže nivo rastopljenog metala i zavarivanje se nastavlja.



Slika 7.6 Šematski prikaz elektrogasnog postupka zavarivanja: 1 – radni komadi, 2 – podložna ploča, 3 – ploče-vodice, 4 – voda za hlađenje, 5 – zaštitni gas, 6 – vodilica elektrodne žice, 7 – elektrodna žica, 8 – kalem (kotur) elektrodne žice, 9 – izvor električne struje, 10 – rastopljena troska pomešana sa rastopljenom elektrodnom žicom i delom radnih komada, 11 – lice/naličje šava, očvršli deo metala šava [25]

Brzina kretanja ploča-vodica je, u stvari, brzina zavarivanja i najčešće iznosi 10 mm/s do 150 mm/s.

Za zavarivanje delova nešto manjih debljina (od 10 mm do 15 mm) koristi se jedna elektrodna žica. Veće debljine radnih

komada (20 mm do 25 mm), zahtevaju primenu sistema sa dva i više elektrodnih žica.

Prednosti i nedostaci postupka

Osnovne prednosti elektrogasnog postupka zavarivanja su:

- Velika brzina deponovanja materijala u jednom prolazu (15 kg/h do 25 kg/h), odnosno, velika brzina zavarivanja.
- Zavaruju se delovi vrlo velikih dimenzija.
- Priprema žleba je znatno jednostavnija nego kod ostalih postupaka zavarivanja.
- Postupak je u potpunosti mehanizovan, automatizovan ili robotizovan tako da kvalitet zavarenog spoja ne zavisi od zavarivača.

Postupak se odlikuje brojnim nedostacima:

- Zona uticaja toplote je, po dubini – mereno od čela radnih komada, višestruko veća od debljine B . Sama zona uticaja toplote je sklona pojavi toplih prslina.
 - Ukoliko su parametri zavarivanja (jačina struje, napon, brzina zavarivanja i brzina hlađenja ploča-vodica) loše izabrani, kvalitet zavarenog spoja je vrlo loš – šav odlikuje mala čvrstoća, što je posledica krupnozrnih struktura u zonama topljenja i zoni uticaja toplote.
 - Postupak je izvodljiv samo u vertikalnom položaju i to kod pločastih delova od čelika.
 - Postupak je skoro neprimenljiv (teško primenljiv) za zavarivanje cevi, profilisanih oblika, pojedinih obojenih metala i čelika (metalnih materijala uopšte) osetljivih na tople prsline.
 - Iskustva pokazuju da je postupak manje isplativ ukoliko je $25 \text{ mm} < B < 60 \text{ mm}$. U tom slučaju, preporučuje se postupak zavarivanja pod praškom [3].
 - Postupak troši mnogo električne energije, sa malim stepenom korisnog dejstva.
- Postupci zavarivanja pod troskom i elektrogasni postupci zavarivanja se komercijalno ne izvode nigde u Srbiji. Bivši MIN iz Niša i „14. Oktobar” iz Kruševca su do početka 1991. Obe firme su navedene postupke koristili za zavarivanje stranica teretnih vagona i pancir-ploča kod tenkova M84 [3].

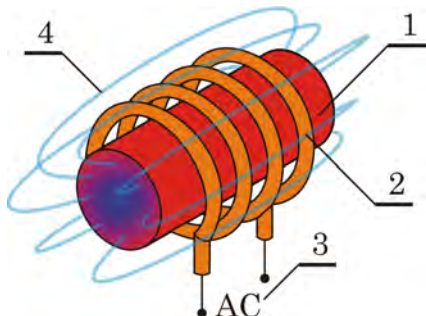
7.4 Postupci indukcionog zavarivanja

Postupci indukcionog zavarivanja kao energiju aktivacije primarno koriste toplotu koju dobijaju usled elektro-mehaničkih efekata koji nastaju pri proticanju električne struje kroz provodnik.

Osnovni principi postupka

Energija aktivacije kod postupaka indukcionog zavarivanja je kombinovanog tipa – toplotna energija zagreva radne komade, a mehanička sila vrši završno iskivanje šava.

Toplotna energija dobija se na osnovu principa elektromagnetne indukcije [3]. Osnovni deo opreme je elektromagnetni grejač (spiralna, kalem, slika 7.7, pozicija 2) kroz koji se propušta električna struja. Kada kroz kalem protiče naizmenična struja (slika 7.7, pozicija 3), u samom kalemu i oko njega se uspostavlja promenljivo elektromagnetno polje (slika 7.7, pozicija 4).



Slika 7.7 Princip elektromagnetne indukcije, 1 – radni komad, 2 – namotaji, 3 – izvor električne struje, 4 – prikaz promenljivog magnetnog polja

Ako je kalem obmotan oko metalnog dela (radnog komada, slika 7.7, pozicija 1), njegovo promenljivo elektromagnetno polje dovodi do indukcije vrtložnih struja u radnom komadu, koje se pri proticanju kroz radni komad, Džulovim efektom (kod visoko elektroprovodnih metala) ili na osnovu magnetnog histerezisa (kod feromagnetnih metala), pretvaraju u toplotu. Realni materijali se zagrevaju kombinacijom oba principa.

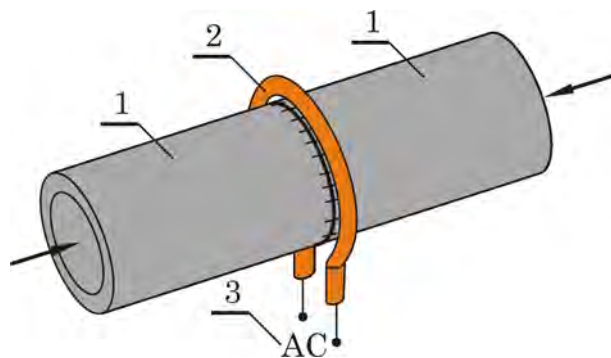
Nemagnetični materijali ili električni

izolatori (kao što su guma i plastika) mogu da se zavare indukcijom ukoliko se primene metalni implant – metalni elementi koji se indukciono zagrevaju pa toplotu prenose na osnovni materijal kondukcijom. Šav se naknadno iskiva dejstvom sile pritiska [26].

Maksimalna temperatura do koje indukcija može da zagreje radne komade je nekih 85% od temperature topljenja radnog komada. Intenzitet zagrevanja radnih komada zavisi od amplitude primenjene električne struje, električne otpornosti radnih komada i vremena zagrevanja [26].

Dubina intenzivnog zagrevanja radnih komada (dejstvom vrtložnih sila a ne mehanizmom prenosa toplote: kondukcija-konvekcija-radijacija) zavisi od dubine prodora vrtložnih sila u materijal radnih komada. Dubina prodiranja vrtložnih sila je obrnuto proporcionalna kvadratnom korenu frekvencije primenjene struje [3].

Kako je proces zagrevanja tela indukcijom intenzivan i veoma lokalnog karaktera, automatizovanim kretanjem radnih komada velike dužine, vrlo lako se izvodi izrada šavnih cevi zavarivanjem. Tu se nalazi osnovna primena postupaka zavarivanja indukcijom – zavarivanje i proizvodnja cevi.

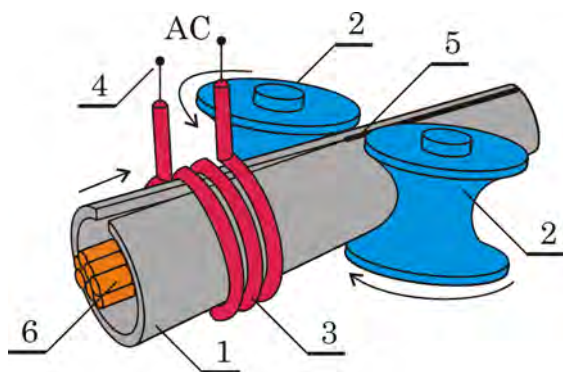


Slika 7.8 Postupak indukcionog sučeonog zavarivanja cevi, 1 – radni komadi, 2 – kalem, 3 – izvor električne struje

Dve cevi (slika 7.8, pozicija 1) su postavljene sučeonu/saosno jedna drugoj i naslanjaju se licem jedna na drugu. Oko cevi, blizu linije spajanja, postavlja se kalem koji čini jedan namotaj (slika 7.8, pozicija 2) kroz koji se propušta naizmenična struja (slika 7.8, pozicija 3). Materijal cevi ispod kalema se usled elektromagnetne indukcije zagreva. Cevi

su pritisnute jedna na drugu i, po završetku ciklusa zagrevanja, povećava se intenzitet sile pritiska kako bi se izvelo iskivanje šava.

Šavne cevi se dobijaju od dugih limova, koji se nizom valjaoničkih parova (stanova) savijaju i oblikuju u cev. Pre prolaska kroz poslednji oblikujući valjaonički par (slika 7.9, pozicija 2), delimično savijeni lim (slika 7.9, pozicija 1) se provlači kroz kalem (slika 7.9, pozicija 3), kroz koji protiče naizmenična struja (slika 7.9, pozicija 4). Lim se savija oko jednog provodnika ili oko snopa provodnika (slika 7.9, pozicija 6) čiji zadatak je da, svojim prisustvom, poveća impedancu vrtložne struje/toka struje oko lima/cevi ali i da „zgusne” magnetno polje od kalema, što pojačava generisanje vrtložnih struja u cevima. Efekat elektromagnetne indukcije dovodi do zagrevanja materijala lima ispod kalema a brzina okretanja valjaka, odnosno, brzina kretanja lima, su izabrani saglasno brzini/intenzitetu zagrevanja lima, tako da prilikom finalnog oblikovanja lima (između valjaka) dolazi do iskivanja šava (slika 7.9, pozicija 5).



Slika 7.9 Postupak oblikovanja/valjanja cevi i indukcijom zavarivanja šava na cevi, 1 – lim, 2 – valjci, 3 – kalem

Usled intenzivnog zagrevanja, kao i zbog primene sile pritiska velikog intenziteta, sve nečistoće prisutne na kontaktima isplivaju na ivicu cevi (kao „okovratnik”) i lako se uklanjaju naknadnom mehaničkom obradom.

Osnovna oprema za induktivno zavarivanje sastoji se od izvora naizmenične struje/generatora frekvencije, upravljačke jedinice, grejača i sistema za hlađenje.

Izvor struje, za regularno indukcijom

zavarivanje, mora da obezbedi struju napona 220 V do 380 V, učestanosti 50 Hz do 60 Hz. Prilikom visokofrekventnog indukcijom zavarivanja, primenjuju se struje učestanosti 10 Hz do 400 kHz. Izvori struje kod tipičnih uređaja za indukcijom zavarivanje su nominalne snage od 3 kW do 500 kW.

Tipičan postupak indukcijom zavarivanja, primenjuje se za zavarivanje delova debljine do 20 mm.

Istorija postupka

Osnovne principe elektromagnetne indukcije, a samim tim i zagrevanje elektromagnetnom indukcijom, istraživao je Majkl Faradej¹⁰. Početkom dvadesetih godina devetnaestog veka, Faradej je počeo svoja prva istraživanja elektriciteta, magnetizma i indukcije, a 1831. godine uspeo je da generiše električnu struju pomoću magnetnog polja. Međutim, Faradej se nije bavio efektima zagrevanja provodnika kroz koje protiču nestabilne struje nastale usled dejstva promenljivog elektromagnetnog polja.

Pred sam početak Prvog svetskog rata (1912. godine), započeta su istraživanja primene indukcijom zagrevanja za topljenje ruda u topionicama. Tek 1927. godine u Šefildu je instalirano prvo postrojenje za topljenje metala koje je primenjivalo indukcijom peč [26].

Prednosti i nedostaci postupaka

Postupak indukcijom zavarivanja je beskontaktni postupak spajanja gde oprema za zavarivanje nema fizički dodir sa radnim komadima. Samim tim, oprema je dugotrajnija i nemoguće je „zagađenje” zavarenog spoja od strane opreme. Podešavanje, kalibrisanje i održavanje opreme, kao i upravljanje parametrima zavarivanja su veoma jednostavni. Kvalitet zavarenog spoja je veoma dobar, zona uticaja toplote je mala, a sam proces zavarivanja je stabilan i zahteva minimalno angažovanje operatera. Postupci

¹⁰ Eng. Michael Faraday (22.09.1791–25.08.1867), naučnik iz Engleske [27].

indukcionog zavarivanja su automatizovani.

Međutim, oprema za zavarivanje je skupa a brzina zavarivanja je i do 30% niža nego kod MIG/MAG postupaka zavarivanja. Potrošnja električne energije može da bude i 5× veća nego pri uporedivom MAG postupku zavarivanja [28].

Klasifikacija i podela postupaka

Postupci indukcionog zavarivanja su standardizovani i prema SRPS EN ISO 4063:2021 klasifikovani kao ISO 4063 – 74. Ovoj grupi postupaka pripadaju:

- Postupak sučeonog indukcionog zavarivanja ISO 4063 – 741,
- Postupak šavnog indukcionog zavarivanja ISO 4063 – 742,
- Postupak visokofrekventnog indukcionog zavarivanja ISO 4063 – 743.

7.5 Postupak zavarivanja svetlosnim snopom

Postupak zavarivanja svetlosnim snopom je specifičan postupak zavarivanja primenjiv za zavarivanje tankih delova (do 1 mm) od plastike ili gume.

Klasifikacija i podela postupaka

Postupci zavarivanja svetlosnim snopom su prema SRPS EN ISO 4063:2021 standardizovani i klasifikovani kao grupa 75 (ISO 4063 – 75). Kao poseban postupak (podgrupa) definisan je postupak zavarivanja infra-crvenim (IC) zracima ISO 4063 – 753, a zastareli postupak *Arc image welding* je bio klasifikovan kao ISO 4063 – 752*.

Iako postupci zavarivanja svetlosnim snopom koriste snop čestica kao izvor energije aktivacije (što je osnovna karakteristika postupaka zavarivanja iz grupe ISO 4063 – 5), postupke zavarivanja svetlosnim snopom odlikuju i druge pojave (slaba refleksija svetlosti, slaba radijacija, na primer) pa je zbog toga njihova klasifikacija drugačija.

Osnovni principi postupka

Delovi koji se zavaruju svetlosnim snopom se uvek zagrevaju lokalno a uzrok zagrevanja je aktivno „upijanje” energije koju fotoni svetlosti predaju površini u koju udare. Svetlosni snop koji daje laser je, uglavnom, monohromatski, dok se za zavarivanje svetlosnim snopom primenjuje polihromatska svetlost. U ovom slučaju, fotoni „nose” različite količine energije i različito je predaju prepreci na koju naiđu. Samim tim je efekat zagrevanja prepreke uniformniji, ali je manje intenzivan nego pri zagrevanju laserom.

Jedan deo energije fotona se odbija o površinu prepreke (na primer, kod metalnih materijala) te je efikasnost postupka zavarivanja svetlosnim snopom veoma uslovljen koeficijentom refleksije materijala koji se zavaruju. Kako je količina energije dopremljena svetlosnim snopom u zonu zavarivanja mala, neophodno je da se ona dobro koncentriše i zadrži u samoj zoni zavarivanja. Takve zahteve ispunjavaju samo materijali koji loše provode toplotu, malih su dimenzija i imaju relativno nisku tačku topljenja – a to su delovi od plastike, i to malih gabarita. To su osnovna ograničenja postupka. Međutim, ovako zavareni delovi skoro da nemaju nikakve deformacije od zavarivanja, spojevi su veoma čisti a zona uticaja toplote gotovo da ne postoji.

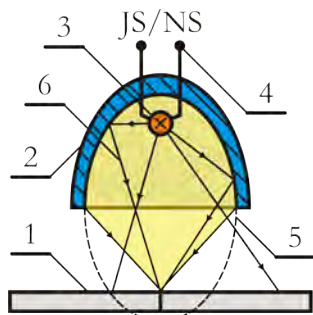
Pored termo-mehaničkih osobina materijala i dimenzija radnih komada, dominantni uticaj na (maksimalnu) temperaturu zavarivanja imaju karakter izvora svetlosti, njegova snaga i fokusiranost svetlosnog snopa.

Zavarivanje svetlosnim snopom vrši se lampom koja emituje polihromatsku svetlost i najčešće se primenjuju gasni izvori svetlosti – popularno nazivani „ksenoni”. Kućište lampe je elipsastog profila kako bi se refleksijom svetlosnih talasa obezbedilo koncentrisanje svetlosti u tačku (ili makar na malu površinu). Zavarivanje se vrši na pločastim delovima, gotovo uvek samo sučeono [3].

Da bi se zavarivanje efikasno sprovelo, neophodno je da radni komadi (slika 7.10,

pozicija 1) i izvor svetlosti – sijalica (slika 7.10, pozicija 2) budu postavljeni u žižama elipse koja definiše profil lampe (slika 7.10, pozicija 5). Jedino u tom slučaju lampa za zavarivanje (slika 7.10, pozicija 2) ostvaruje maksimalni efekat zagrevanja radnih komada – svetlosni zraci isijani iz sijalice (slika 7.10, pozicija 3) koji se odbiju o zid lampe – eliptično ogledalo (slika 7.10, pozicija 6) su fokusirani u donju žižu, gde se nalazi lice radnih komada.

Ovakav tačkasti izvor svetlosti zagreva radne komade u zoni zavarivanja i lokalno ih topi. Kretanjem lampe duž linije spajanja radnih komada ostvaruje se kontinualno zagrevanje, odnosno, šavno sučeono zavarivanje.



Slika 7.10 Šematski prikaz postupka zavarivanja svetlosnim snopom: 1 – radni komadi, 2 – lampa, 3 – izvor svetlosti – sijalica, 4 – izvor električne struje, 5 – profil elipse, 6 – odbijeni zrak svetlosti

Izvor električne struje (slika 7.10, pozicija 4) napaja sijalicu (ksenon) električnom strujom. Koriste se i jednosmerna i naizmenična struja, međutim, jednosmerna struja se češće primenjuje. Tipičan izvor struje za sučeono zavarivanje PVC ploča debljine 1 mm mora da ima barem 5 kW kako bi ksenonska lampa mogla da zagreje i zavari ploče u razumnom vremenu (npr. jednu tačku za jedan ciklus zavarivanja, a za vreme kraće od 1 s).

Zavarivanje se vrši u atmosferi, ređe u atmosferi zaštitnog gasa (i aktivni i inertni gasovi, dovedeni sa lica i/ili naličja spoja) a još ređe se zavarivanje vrši u vakuumu.

Prednosti i nedostaci postupka

Postupak zavarivanja svetlosnim stopom je veoma ograničenog opsega – primenjiv je

samo za zavarivanje plastičnih masa i obojenih metala, malih dimenzija (do 1 mm debljine), pločastog oblika. Za zavarivanje se koristi eliptična lampa velike snage. Zavarivanje se vrši srednje brzo, bez dodatnog materijala, sa ili bez upotrebe zaštitnog gasa, uz minimalne deformacije zavarenih delova i nepostojanje zone uticaja toplote. Spojevi dobijeni ovim postupkom imaju veoma malu efikasnost spoja (nosivost zavarenog spoja je maksimalno 50% nosivosti materijala osnovnog metala) [29].

Postupak zavarivanja IC zracima

Kao član podgrupe postupaka zavarivanja zracima svetlosti, postupak zavarivanja IC zracima se dominantno primenjuje za zavarivanje termoplastičnih masa. IC zraci, koji se primenjuju za zavarivanje, imaju talasne dužine u rasponu od 0,8 μm do 11 μm . U ovom slučaju, energija aktivacije je dominantno energija infracrvenog zračenja iako izvor daje i svetlost drugih frekvencija.

IC zračenje, kojim se ozračuje radni komad, može da bude reflektovano o površinu radnog komada, apsorbovano ili provedeno u unutrašnjost (transmisija). Zavarivanje omogućavaju apsorbovana energija IC zraka i energija koja je provedena u unutrašnjost tela i tamo transformisana u toplotu [29].

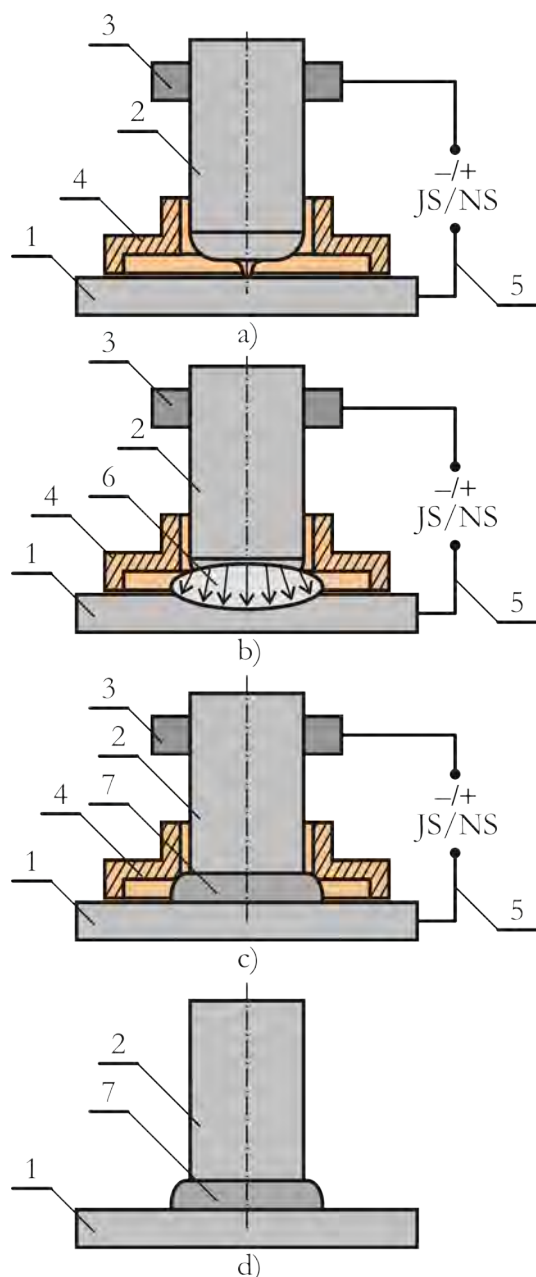
7.6 Postupci elektrolučnog zavarivanja vitkih delova

Postupci elektrolučnog zavarivanja vitkih delova (zavrtnjeva, klinova, direkta, osovinica i slično) su grupa postupaka kojima se spaja lice (čelo) vitkog tela za masivnu ploču. Oblik poprečnog preseka vitkog tela ne predstavlja ograničenje za zavarivanje, kao ni debljina ploče. Međutim, veličina poprečnog preseka vitkog tela ograničena je jačinom struje koja je neophodna za zavarivanje. Sam ciklus zavarivanja je vrlo kratak i, uz optimalan izbor parametara zavarivanja, može da se dobije materijal šava vrlo dobrog

kvaliteta. Postupcima iz ove grupe, uspešno se zavaruju konstrukcioni (meki) čelici, nerđajući čelici i aluminijum, u gotovo svim međusobnim kombinacijama.

Osnovni principi postupka

Elektrolučno zavarivanje vitkih delova vrši se primenom posebnog pištolja koji pozicionira i pokreće vitki deo, aktivira proceduru zavarivanja i vrši iskivanje šava.



Slika 7.11 Šematski prikaz postupka zavarivanja vitkih delova: 1 – ploča, 2 – šipka, 3 – držač, 4 – keramički oblikač, 5 – izvor struje, 6 – rastopljeni metal, 7 – metal šava (očvrslu šav)

Vitki deo (slika 7.11, pozicija 2), postavlja se u čeljusti pištolja za zavarivanje (slika 7.11, pozicija 3) i naslanja na pločasti radni komad (slika 7.11, pozicija 1). Električni luk se uspostavlja između vitkog dela i ploče, pa je izvor struje vezan za radne komade (slika 7.11, pozicija 5).

Vrh vitkog dela je prethodno obrađen tako da ima „zaoštren vrh” – zapreminu materijala koja ima zadatak uspostavljanja električnog luka velike gustine (struje), ali je zavarivanje moguće i bez oštrenja vrha.

Oko vitkog dela, u zoni kontakta sa pločom, postavlja se keramički oblikač (slika 7.11, pozicija 4) čiji zadatak je usmeravanje električnog luka, ograničenje tečenja rastopljenog metala i završno oblikovanje šava. Znatno ređe, oblikač može da bude izrađen od metala, i tada se i on delimično topi prilikom zavarivanja [30].

U početnoj fazi zavarivanja (slika 7.11, a), pištolj približava vitki deo ploči i uspostavlja se intenzivan električni luk između zaoštrenog vrha i ploče. Električni luk topi materijal oba tela u kontaktu (slika 7.11, b) koji se sliva u šupljinu koju čine radni komadi i keramički oblikač. Proces uspostavljanja električnog luka, topljenja metala i formiranja šava unutar oblikača traje vrlo kratko (slika 7.11, c). Po završetku zavarivanja, oblikač se lomi i uklanja a ostaju zavareni delovi (slika 7.11, d).

Električni luk se uspostavlja primenom jedne od sledećih metoda:

- Kratkim kontaktom vrha vitkog dela i ploče, pa udaljavanjem vitkog dela od ploče (metoda „izvučenog” električnog luka),
- Dovođenjem delova u kontakt (kratak spoj), uz promenu jačine struje do uspostavljanja varnice, i brzo odvajanje delova radi održanja električnog luka,
- Primenom kondenzatora sa i bez upaljača,
- Primenom visokofrekventnih uređaja za paljenje električnog luka.

Osnovni parametri zavarivanja su jačina primenjene struje i vreme trajanja ciklusa zavarivanja. Zavarivanje se vrši jednosmernom strujom, a polaritet zavisi od

vrste materijala vitkog dela (na primer, ukoliko je vitki deo od aluminijuma, vezuje se za pozitivni pol, a vitki deo od čelika vezuje se na negativni pol). Uobičajeno je da se zavaruju vitki delovi od čelika, prečnika do 25 mm, primenom struja jačine od 200 A do 600 A. Tipičan ciklus zavarivanja traje od 0,1 s do 1 s.

Zavarivanje se vrši u atmosferi, ali je moguće izvođenje u atmosferi zaštitnog gasa.

Prednosti i nedostaci postupka

Elektrolučni postupci zavarivanja vitkih delova su veoma brzi i produktivni, proizvode čiste i kvalitetne šavove koji su sposobni da, podjednako dobro, prenose i statička i dinamička opterećenja. Postupci su operativni i u radioničkim uslovima i na terenu a postupak zavarivanja sprovodi jedan operater.

Osnovni nedostaci postupka su značajna pojava oksidacije spoja ukoliko se ne izaberu odgovarajući parametri zavarivanja, velika je buka koju pištolj stvara pri radu i cena opreme i njenog održavanja je visoka. Postupak ima znatno niži stepen iskorišćenja energije u odnosu na druge elektrolučne postupke zavarivanja i neophodan je dobro obučeni operater kako bi se ostvario ponovljiv kvalitet spojeva.

Klasifikacija i podela postupaka

Prema ISO 4063, elektrolučni postupci zavarivanja vitkih delova klasifikovani su kao grupa ISO 4063 – 78. Saglasno pojedinim specifičnostima (načinu uspostavljanja električnog luka, primeni oblikača i slično), dalja klasifikacija postupaka je:

- Elektrolučni postupak zavarivanja vitkih delova sa izvučenim električnim lukom i primenu keramičkog oblikača ili zaštitnog gasa ISO 4063 – 783,
- Elektrolučni postupak zavarivanja vitkih delova kratkospojenim električnim lukom ISO 4063 – 784,
- Elektrolučni postupak zavarivanja vitkih delova sa izvučenim električnim lukom dobijenim pražnjenjem kondenzatora ISO 4063 – 785.
- Elektrolučni postupak zavarivanja vitkih delova sa zaoštrenim vrhom, izvučenim električnim lukom dobijenim pražnjenjem kondenzatora ISO 4063 – 786.
- Elektrolučni postupak zavarivanja vitkih delova sa izvučenim električnim lukom i topivim oblikačem ISO 4063 – 787.

LITERATURA

- [1] SRPS EN ISO 4063:2021: Welding, brazing, soldering, cutting, mechanical joining and adhesive bonding – Nomenclature of processes and reference numbers (EN ISO 4063:2020), naziv na sprskom: Zavarivanje, tvrdo lemljenje, meko lemljenje, rezanje, mehaničko spajanje i adheziono spajanje – Lista postupaka i njihovo označavanje, objavljen: 17.12.2020;
- [2] ISO/TR 25901-3:2016: Welding and allied processes – Vocabulary – Part 3: Welding processes, 2016;
- [3] Autorizovana predavanja na kursu za međunarodne inženjere zavarivanja IWE, Mašinski fakultet Niš, 2009-2021;
- [4] EN ISO 4063:2020: Welding, brazing, soldering, cutting, mechanical joining and adhesive bonding – Nomenclature of processes and reference numbers, objavljen: 12/2020;
- [5] Johannes Wilhelm Goldschmidt: https://en.wikipedia.org/wiki/Hans_Goldschmidt, (dokument pregledan 23.03.2021.);
- [6] Patent: US 578,868, Hans Goldschmidt: Method of Producing Metals and Alloys, 16.03.1897, link: <https://patentimages.storage.googleapis.com/21/7f/00/d66da512a9f900/US578868.pdf>, (dokument pregledan 23.03.2021.);
- [7] Николай Николаевич Бекетов: https://ru.wikipedia.org/wiki/Бекетов,_Николай_Николаевич, (dokument pregledan 23.03.2021.);
- [8] Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут": Бекетов Николай Николаевич: http://library.kpi.kharkov.ua/ru/school_chemistry_BeketovNN, (dokument pregledan 23.03.2021.);
- [9] Goldschmidt Smart Rail Solutions: Thermit Welding (GB) Ltd, <http://thermit-welding.com/product-category/aluminothermic-welding/>, (dokument pregledan 23.03.2021.);
- [10] Federal Railroad Administration: Comission for Standards, History: <https://railroads.dot.gov/>, (dokument pregledan 23.03.2021.);
- [11] <https://history.evonik.com/en/predecessor-companies/goldschmidt>, (dokument pregledan 23.03.2021.);
- [12] Elektro-Thermit: <https://www.elektro-thermit.de/en/history/>, (dokument pregledan 23.03.2021.);
- [13] Exothermic Welding: https://en.wikipedia.org/wiki/Exothermic_welding, (dokument pregledan 23.03.2021.);
- [14] <https://www.thermit.com.au/products-and-services/weld-kits/Thermit-brochure-HI-RES-Head-Repair-Weld.pdf>, (dokument pregledan 23.03.2021.);
- [15] Indiamart: <https://www.indiamart.com/proddetail/exothermic-welding-kit-5374707991.html>, (dokument pregledan 23.03.2021.);
- [16] John Lancaster: Handbook of Structural Welding, Abington Publishing, ISBN 1855733439, 1992;
- [17] Patent: US 2,191,481, Robert K. Hopkins: Method For Manufacturing Composite Metal Articles, 27.02.1940, link: <https://www.freepatentsonline.com/2191481.pdf>, (dokument pregledan 23.03.2021.);
- [18] Георгий Зосимович Волошкевич: <https://ru.wikipedia.org/wiki/>

- Волошкевич, Георгий_Зосимович, (dokument pregledan 23.03.2021.);
- [19] Электродшлаковая сварка и наплавка - история развития: https://www.autowelding.ru/publ/1/1/ehlektroshlakovaja_svarka_i_naplavka_istorija_razvitiija/9-1-0-402, (dokument pregledan 23.03.2021.);
- [20] Electroslag welding: <http://www.welding-backing.com/news/shownews.php?lang=en&id=19>, (dokument pregledan 23.03.2021.);
- [21] Patent: US 2,868,951, H. I. Shrubsall: Vertical Welding With Consumable Guide Tube, 13.01.1959, link: <https://patentimages.storage.googleapis.com/9c/ba/cf/67d65795b1715c/US2868951.pdf>, (dokument pregledan 23.03.2021.);
- [22] Manufacturing Guide: <https://www.manufacturingguide.com/en/electro-slag-welding>, (dokument pregledan 23.03.2021.);
- [23] Miomir Vukićević: Tehnologija spajanja materijala – Zavarivanje 1, ISBN 978-86-82631-73-6, Fakultet za mašinstvo i građevinarstvo u Kraljevu, 2014;
- [24] Patent: US 3,046,386, W. H. Wooding et al: Articulated Wing Shoe For The Electroslag and Electrogas Welding Equipment, 24.07.1962, link: <https://patentimages.storage.googleapis.com/8c/16/f5/9338444884f9e4/US3046386.pdf>, (dokument pregledan 23.03.2021.);
- [25] Manufacturing Guide: <https://www.manufacturingguide.com/en/electro-gas-welding>, (dokument pregledan 23.03.2021.);
- [26] Induction Welding: https://en.wikipedia.org/wiki/Induction_welding, (dokument pregledan 23.03.2021.);
- [27] Michael Faraday: https://en.wikipedia.org/wiki/Michael_Faraday, (dokument pregledan 23.03.2021.);
- [28] Milorad Jovanović, Dragan Adamović, Vukić Lazić, Nada Ratković: CO₂ – priručnik, YU ISBN 86-80581-71-2, Mašinski fakultet Kragujevac, Srbija, 2005;
- [29] Howard B. Cary: Modern Welding Technology, 5th edition, Prentice Hall, USA, 2002;
- [30] Stud Welding: https://en.wikipedia.org/wiki/Stud_welding, (dokument pregledan 23.03.2021.).

8 POSTUPCI LEMLJENJA

Lemljenje je proces stvaranja monolitne veze između dva metalna ili nemetalna tela u čvrstom stanju, uz obavezni dodatak trećeg tela (dodatnog materijala). Kod većine postupaka zavarivanja u čvrstom stanju dolazi do delimičnog topljenja/omekšavanja makar male zapremine osnovnog materijala, međutim, prilikom lemljenja se osnovni metal ne topi ni malo već se samo delimično rastvara. Topi se samo dodatni materijal i to na znatno nižoj temperaturi nižoj što je to temperatura topljenja osnovnog metala. Rastopljeni dodatni materijal popunjava zazor između osnovnog materijala (između radnih komada) i nakon očvršćavanja povezuje radne komade u monolitnu celinu. Metal zalemljenog šava (ili, jednostavno, lem) nastaje samo od dodatnog materijala. Sledeća osobenost zalemljenih spojeva je gotovo obavezna primena topitelja koji se prvi topi i odnosi okside (prljavštinu) sa površina radnih komada [1].

Postupci lemljenja se primenjuju za precizna spajanja elektronskih komponenti, za spajanje polimera, ali se pojedini postupci lemljenja primenjuju za noseće konstrukcije.

Istorija postupka

Prvi postupci lemljenja izvedeni su približno 3000 godina pre nove ere u Mesopotamiji. Lemljenje je tada korišćeno prilikom izrade nakita. Hiljadu godina kasnije, u Sumeriji (južna Mesopotamija) lemljenjem su spajana sečiva noževa sa drškama [2].

Feliks Kanic je u svojim putopisima zapisao da je na teritoriji Srbije, u blizini palate Mediana kod Naissusa, današnjeg Niša, kao i kod sela Kolari kod Smedereva, naišao na kalajem zalemljene delove olovnih cevi, za koje se smatra da su korišćene kao primitivni vodovod [3].

U vreme „industrijske revolucije 1.0” (okvirno od 1750. do 1850. godine), postupci lemljenja nisu doživeli veliku ekspanziju, za

razliku od većine savremenih elektrolučnih postupaka zavarivanja. Postupci lemljenja su počeli sa ubrzanim razvojem tek sa razvojem elektro-industrije, odnosno, u periodu između dva svetska rata. Lemljenje je svoj tehnički napredak doživelo od šezdesetih godina dvadesetog veka nadalje – u doba „industrijske revolucije 3.0” [4].

Princip nastajanja zalemljenog šava

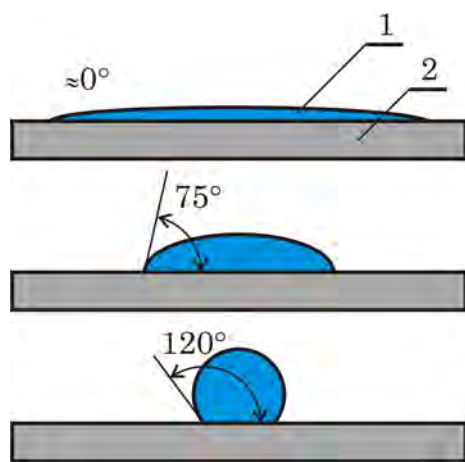
Sušтина postupka lemljenja je topljenje dodatnog materijala i „utapanje” radnih komada u rastopljeni lem. Rastopljeni dodatni materijal mora da bude takvih osobina da dobro prijanja uz radne komade, uspostavlja vezu sa površinskim slojem radnih komada i održava je nakon očvršćavanja. Samim tim, za nastajanje zalemljenog spoja važne su tri fizičko-hemijske pojave [5]:

- kvašenje,
- kapilarnost i
- difuzija.

Kvašenje je fizička pojava koja definiše koliko tečnost (rastopljeni dodatni metal) naleže na površinu čvrstog tela (osnovni metal). Zbog uravnoteženja površinskih napona koji se javljaju na granici slobodne površine tečnosti, slobodna tečnost (kap) na čvrstom telu uvek teži da ima sferičan oblik. Sfera je geometrijski oblik koji ima najmanju površinu u odnosu na zapreminu koju zauzima i samo se na sferičnoj površini površinski naponi u potpunosti samostalno umiruju/poništavaju. Zbog ovakve težnje tečnosti kontakt kapi tečnosti i čvrstog tela je uvek minimalan (u granicama ostvarivog).

Pokazatelj obima kvašenja neke tečnosti je ugao kvašenja. To je ugao koji zaklapa tangenta ivične tačke tečnosti sa površinom čvrstog tela koju tečnost kvasi (slika 8.1).

Ugao kvašenja tečnosti zavisi od vrste tečnosti, njenog površinskog napona i uslova okolne sredine. U slučaju lemljenja, okolnu sredinu rastopljene tečnosti čine topitelji i gasovi.



Slika 8.1 Kvašenje tečnosti i ugao kvašenja,
1 – tečnost (lem), 2 – čvrsto telo

Posmatrano iz ugla lemljenja, idealna situacija bi bila kada bi rastopljeni dodatni materijal (lem) u potpunosti kvasio površinu osnovnog metala. U tom slučaju bi ugao kvašenja bio vrlo blizak 0° . Eksperimentalna istraživanja pokazuju da je lemljenje metala moguće ukoliko je ugao kvašenja lema manji od 40° dok je ta granica 75° za lemljenje većine polimera. Ukoliko je ugao kvašenja veći od 120° , smatra se da tehnički upotrebljivo kvašenje lema ne postoji [5].

Uslov kvašenja je ispunjen samo ukoliko lem ima manji površinski napon od osnovnog materijala (u kombinaciji sa topiteljem). Takođe je neophodno da površinski napon između lema i topitelja bude što manji.

Kapilarnost lema je osobina lema da dobro (najbolje bi bilo – u potpunosti) popunjava zazor/žleb između radnih komada bez prinudnog dejstva neke druge pojave (sile). Kapilarnost je pojava koja je uslovljena adhezionim i kohezionim silama koje se javljaju u tečnosti i na granici tečnost-čvrsto telo. Eksperimentalno je utvrđeno da je kapilarnost metalnog lema dobra ukoliko su žlebovi debljine do 0,25 mm [5]. Ukoliko je žleb širi od 0,25 mm, efekat kapilarnosti lema se gubi i problem nekapilarnog popunjavanja žleba lemom se rešava dodavanjem veće količine lema sa namerom da sila gravitacije „na većoj masi” nadomesti nedostatak adhezije. Podrazumeva se da se „nekapilarno” lemljenje obavlja u horizontalnom položaju (PA) i smatra se da je 10% više lema dovoljno za većinu metala [5].

Kapilarno deponovanje rastopljenog dodatnog materijala se javlja kod postupaka niskotemperaturnog lemljenja (eng. *soldering*) i visokotemperaturnog lemljenja (eng. *brazing*). Drugi oblici deponovanja rastopljenog dodatnog materijala (nakapavanje, slično kao kod postupka zavarivanja ISO 4063 – 311 [6]) se javljaju prilikom zavarivačkog lemljenja (eng. *weld brazing*) čelika, bakra i slično, primenom gole ili obložene žice od mesinga, bronzе ili neke druge elektrodne žice [7-9].

Difuzija (ili **rastvaranje pri lemljenju**) je pojava koja dovodi do stvaranja intekristalnih jedinjenja između lema i osnovnog metala, kao i uslov uspostavljanja trajne veze između njih. Proces difuzije traje neprekidno, ali je najintenzivniji tokom samog procesa lemljenja jer zavisi od temperature lemljenja i termomehaničkih osobina osnovnog i dodatnog materijala. Zbog toga je važno da se lemljenjem spajaju samo oni materijali koji su „odgovarajući” jedan u odnosu na drugi [5].

Prednosti i nedostaci lemljenja

Prednosti lemljenja su brojne:

- Gotovo nikakav uticaj na strukturu i mehaničke osobine osnovnog materijala izvan zone lemljenja;
- Postupak je primenjiv na gotovo sve vrste kompozitnih materijala;
- Moguće je spajanje materijala različitih debljina;
- Zalemljeni spojevi skoro da nemaju zaostale napone.

Osnovna mana lemljenja je nedovoljna čvrstoća (efikasnost) šava, tako da ovaj postupak spajanja materijala ipak ne može u potpunosti da zameni zavarene spojeve kod odgovornih konstrukcija.

Podela i klasifikacija postupaka lemljenja

Osnovna podela postupaka lemljenja se vrši prema temperaturi lemljenja na postupke niskotemperaturnog i postupke visokotemperaturnog lemljenja [9].

Niskotemperaturno ili **meko lemljenje** (eng. *soldering*) je pojam koji

obuhvata sve postupke lemljenja kod kojih temperatura lema/lemljenja ne prelazi 450°C (prilikom topljenja lema). Ovi postupci se primenjuju za spajanje delova male debljine, izrađenih od obojenih metala ili polimera, kao i za pojedine čelike, vrlo malih debljina (do 0,5 mm). Meko lemljenje se izvodi vrlo jednostavno jer je koncipirano tako da ne postoje specifični zahtevi pripreme osnovnog metala, izvođenja lemljenja i završnih aktivnosti lemljenja. Mana mekog lemljenja su šavovi male čvrstoće koji ne mogu da budu strukturni (ne prenose velika mehanička opterećenja).

Visokotemperatureno ili tvrdo lemljenje (eng. *brazing*) obuhvata sve postupke lemljenja kod kojih je temperatura lema 450°C ili više, ali ne više od temperature topljenja osnovnog metala. Tvrdo lem formira strukturne spojeve koji mogu da imaju nosivost i do 700 MPa, vrlo homogen šav i povoljnu metaluršku strukturu lema.

Poseban vid visokotemperaturnog lemljenja, kod koga kapilarnost nije dominantni efekat kojim se ispunjava žleb, naziva se **zavarivačko lemljenje**. Kod zavarivačkog lemljenja rastopljeni lem „curi” ili „se nakapava” u žleb između u radnih komada.

Postupci lemljenja su prema SRPS EN ISO 4063:2021 [10] klasifikovani kao osnovna grupa ISO 4063 – 9. Klasifikacija na grupe postupaka je izvršena prema temperaturi lemljenja, mehanizmu nastajanja i deponovanja lema (kapilarno ili nekako drugačije) i načinu zagrevanja osnovnog i dodatnog materijala:

- Postupci visokotemperaturnog lemljenja sa lokalnim izvorom toplote, klasifikovani kao grupa ISO 4063 – 91,
- Postupci visokotemperaturnog lemljenja sa globalnim izvorom toplote, klasifikovani kao grupa ISO 4063 – 92,
- Ostali postupci visokotemperaturnog lemljenja, klasifikovani kao grupa ISO 4063 – 93,
- Postupci niskotemperaturnog lemljenja sa lokalnim izvorom toplote, klasifikovani kao grupa ISO 4063 – 94,

- Postupci niskotemperaturnog lemljenja sa globalnim izvorom toplote, klasifikovani kao grupa ISO 4063 – 95,
- Ostali postupci niskotemperaturnog lemljenja, klasifikovani kao grupa ISO 4063 – 96,
- Postupci zavarivačkog lemljenja, klasifikovani kao grupa ISO 4063 – 97.

U sledećim poglavljima biće reči o svakoj od navedenih grupa postupaka lemljenja.

8.1 Postupci visokotemperaturnog lemljenja sa lokalnim izvorom toplote

Grupu postupaka visokotemperaturnog lemljenja sa lokalnim izvorom toplote (ISO 4063 – 91) čine postupci lemljenja koji toplotu neophodnu za lemljenje dobijaju lokalizovano – od nekog izvora koji toplotu dovodi samo oko dodatnog materijala i u zoni lemljenja.

Klasifikovani (standardni) postupci iz ove grupe su:

- Postupak visokotemperaturnog lemljenja infracrvenom svetlošću, klasifikovan kao ISO 4063 – 911,
- Postupak visokotemperaturnog lemljenja plamenom, klasifikovan kao ISO 4063 – 912,
- Postupak visokotemperaturnog lemljenja laserskim snopom, klasifikovan kao ISO 4063 – 913,
- Postupak visokotemperaturnog lemljenja elektronskim snopom, klasifikovan kao ISO 4063 – 914,
- Postupak indukcionog visokotemperaturnog lemljenja, klasifikovan kao ISO 4063 – 916,
- Postupak elektrootpornog visokotemperaturnog lemljenja, klasifikovan kao ISO 4063 – 918,
- Postupak difuzionog visokotemperaturnog lemljenja, klasifikovan kao ISO 4063 – 919.

8.1.1 Postupak visokotemperaturnog lemljenja infracrvenom svetlošću

Postupak tvrdog lemljenja infracrvenom svetlošću (klasifikovan kao ISO 4063 – 911) koristi fokusiranu infracrvenu svetlost (dobijenu od jakih kvarcnih lampi) za zagrevanje osnovnog i dodatnog materijala do temperature lemljenja. Ovako dobijena svetlost podjednako dobro zagreva i metalne i nemetalne delove, relativno male debljine (do 2 mm) [11].

Zagrevanje kvarcnim lampama je kratkotrajno i veoma intenzivno, te je i ciklus lemljenja vrlo kratak. Samim tim, osnovni metal nema zonu uticaja toplote niti dolazi do ikakvih temperaturnih deformacija delova.

Tvrdo lemljenje infracrvenom svetlošću se najčešće izvodi u vakuum-komori kako bi se sprečio negativan uticaj gasova iz okoline na lem i kako bi se postigla visoka čistoća spoja.

Postupak 911 se najčešće primenjuje za izradu električnih kola i mikročipova, jer je veoma produktivan (lemljenje traje vrlo kratko i istovremeno se vrši lemljenje više delova od jednom) i veoma precizan.



Slika 8.2 Delovi mlaznog motora od titanijuma spojeni postupkom tvrdog lemljenja infracrvenom svetlošću [12]

Na slici 8.2 prikazani su strukturni delovi mlaznog motora izrađeni postupkom tvrdog lemljenja infracrvenom svetlošću. Delovi su izrađeni od titanijuma [12].

8.1.2 Postupak visokotemperaturnog lemljenja plamenom

Postupak visokotemperaturnog lemljenja plamenom (ISO 4063 – 912) toplotu neophodnu za zagrevanje radnih komada i dodatnog metala dobija od plamena koji nastaje pri sagorevanju smeše gorivog gasa (acetilena ili MAPP-a) i kiseonika. Za tvrdo lemljenje plamenom se koristi gotovo ista oprema kao oprema za zavarivanje postupcima iz grupe ISO 4063 – 31 a dodatni materijal je odgovarajuća lem-žica [1].

Postupak 912 je ručni postupak lemljenja koji se najviše koristi za izradu bakarnih instalacija centralnog/toplovodnog grejanja (slika 8.3).



Slika 8.3 Postupak tvrdog lemljenja bakarnih cevi plamenom [13]

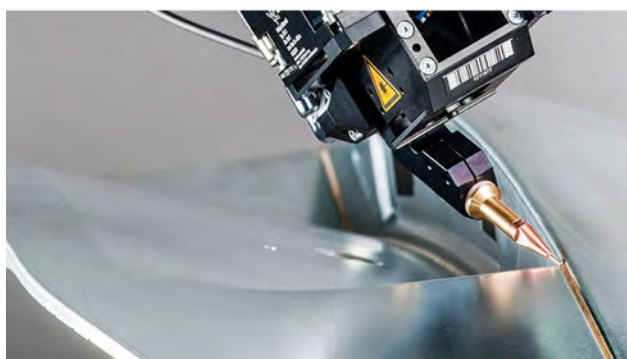
Za razliku od zavarivanja postupcima 31 gde dolazi do topljenja osnovnog metala, lemljenje postupkom 912 podrazumeva topljenje samo dodatnog materijala (lema) koji kapilarno prodire u vrlo uzani žleb između radnih komada. Pri tome, rastopljeni lem delimično rastvara materijal radnih komada i nakon očvršćavanja ih spaja u monolitnu celinu. Lemljenje se gotovo uvek vrši uz primenu topitelja (npr. boraks).

Osnovna prednosti postupka su laka primenljivost na terenu, velika produktivnost, kao i mogućnost spajanja velikog broja metala (čak i čelika), uključujući i spajanje raznorodnih metala. Osnovni nedostatak je dimenziona ograničenost (zavaruju se materijali debljine do 5 mm).

8.1.3 Postupak visokotemperaturnog lemljenja laserskim snopom

Postupak visokotemperaturnog lemljenja laserskim snopom (klasifikovan kao ISO 4063 – 913) je visokoproduktivni, najčešće automatizovani/robotizovani postupak lemljenja delova u automobilske industriji i u industriji medicinske opreme [5].

Tipičan robotizovani sistem za tvrdo lemljenje laserskim snopom (slika 8.4) automatski dovodi lem-žicu u zonu lemljenja, topi je, zagreva osnovni metal i kreće se duž linije spajanja, vršeći sve istovremeno.



Slika 8.4 Postupak tvrdog lemljenja laserskim snopom [14]

S obzirom da se postupak 913 najčešće primenjuje za spajanje tankih pocinkovanih čelika, ponekad se primenjuju zaštitni gasovi radi zaštite lema. Topitelji se primenjuju uvek kada je to potrebno.

8.1.4 Postupak visokotemperaturnog lemljenja elektronskim snopom

Postupak tvrdog lemljenja elektronskim snopom (klasifikovan kao ISO 4063 – 914) koristi iste principe i sličnu opremu kao postupci zavarivanja iz grupe ISO 4063 – 51 uz dodatak lem-žice i činjenicu da elektronski snop topi samo lem-žicu dok se osnovni metal samo zagreva [5].

Zbog efikasnosti elektronskog snopa (ali i zbog higijene šava), lemljenje postupkom 914 se vrši u vakuum komori, uz automatsko kontinualno dovodenje lem-žice.

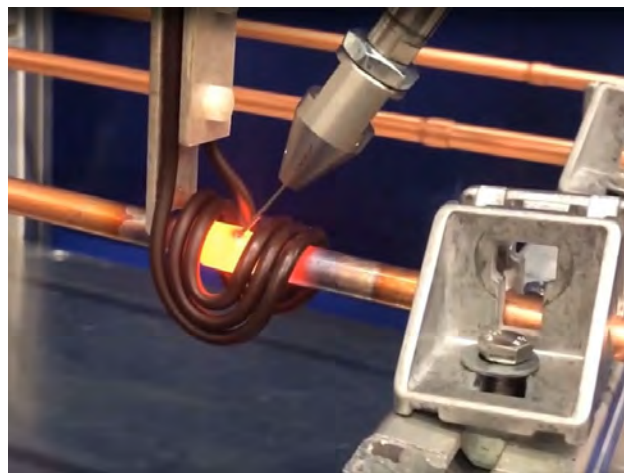
Cena opreme za tvrdo lemljenje elektronskim snopom je veoma visoka, pa se postupak primenjuje za veoma specifične slučajeve. Postupak 914 se najviše primenjuje

za lemljenje titanijuma i njegovih legura, zlata, ali i za spajanje safira na specifičnim komponentama satelita, „svemirskih” robota i uređaja za istraživanje svemira [15].

8.1.5 Postupak indukcionog visokotemperaturnog lemljenja

Postupak indukcionog visokotemperaturnog lemljenja (klasifikovan kao ISO 4063 – 916) je jedan od najproduktivnijih postupaka lemljenja koji je nastao sedamdesetih godina dvadesetog veka. Lemljenje se vrši indukcionim zagrevanjem osnovnog metala i topljenjem lem-žice. Lem kapilarno prodire u žleb između radnih komada.

Indukciono zagrevanje je najefikasnije kod ferometala, ali je tvrdo indukciono lemljenje primenljivo za sve vrste čelika, bakra, bronz, mesinga, titanijuma, nikla i pojedine keramičke delove.



Slika 8.5 Postupak robotizovanog indukcionog tvrdog lemljenja [16]

Postupak 916 se izvodi kao ručni ili robotizovani postupak i najčešće se primenjuje za spajanje cevi, slično kao postupak 912 (slika 8.5) [17].

8.1.6 Postupak elektrotopnog visokotemperaturnog lemljenja

Postupak elektrotopnog tvrdog lemljenja, klasifikovan kao ISO 4063 – 918, je postupak spajanja metalnih delova topljenjem lem-žice kod koga se toplota dobija na osnovu Džulovog efekta.

Lemljenje postupkom 918 je moguće na

metalima koji dobro provode električnu struju. Kontakti predstavljaju električnu barijeru kod koje dolazi do transformacije električne energije u toplotu [1].

Za lemljenje se koriste posebna klešta sa elektrodama koje prate oblik delova koji se leme (sa ciljem da imaju dovoljno veliku kontaktnu površinu). Klešta moraju da imaju mehanizam koji obezbeđuje potrebnu silu pritiska na elektrodama. Toplota generisana na kontaktu radnih komada ih zagreva i topi lem-žicu koja kapilarno ispunjava žleb između radnih komada (slika 8.6).



Slika 8.6 Postupak ručnog elektrootpornog visokotemperaturnog lemljenja bakarnih cevi [18]

Kada rastopljeni lem ispuni žleb, kontaktni otpor se smanjuje te prestaje generisanje Džulove toplote i ciklus lemljenja je završen.

Postupak je primenjiv za zavarivanje bakarnih cevi ali i tankih čeličnih delova. Neophodna je primena topitelja kako bi se očistila površina kvašenja pre lemljenja [5].

U praksi se susreće više izvođenja postupka: ručni i robotizovani postupak, direktni, indirektni i posredni, sa i bez zaštitnog gasa [19].

8.1.7 Postupak difuzionog visokotemperaturnog lemljenja

Postupak difuzionog tvrdog lemljenja, klasifikovan kao ISO 4063 – 919, je još jedan postupak spajanja metalnih delova koji zahteva primenu vakuumu i povišenu temperaturu, i uvek se vrši u prekidnom režimu rada. Specifičnost postupka je što se

difuziono tvrdo lemljenje izvodi sa i bez dodatnog materijala [5].

Ukoliko se lemljenje vrši uz primenu dodatnog materijala, radni komadi se postavljaju u vakuum komoru a između njih se postavlja dodatni materijal. Dodatni materijal je vrlo tanka folija (debljine 50 μm). Nakon toga se radni komadi pritiskaju i fiksiraju. Lemljenje počinje kada se u komori uspostave željeni vakuum i temperatura. Temperatura lemljenja je dovoljna da istopi lem, zagreje radne komade i inicira mehanizme difuzije (objašnjene u poglavlju 4.5 koje opisuje difuziono zavarivanje). Kombinovanjem lema i difuzije, uspostavlja se interkristalna veza između sva tri tela [20].

Lemljenje postupkom 919 bez dodatnog materijala ima istu proceduru kao postupak sa dodatnim materijalom, uz tri razlike:

- Moguća je primena više temperature lemljenja nego što je to moguće za lemljenje sa dodatnim materijalom,
- Postupak lemljenja traje nešto duže i
- Monolitna veza između radnih komada nastaje samo usled mehanizama difuzije između tela.

Ovakvo izvođenje postupka 919 bez dodatnog materijala se naziva postupkom difuzionog spajanja.

Postupak 919 je primenjiv za gotovo sve metale (osim za legure sa prevlakama), ali je dimenziono ograničen na delove koji mogu da se smeste u vakuum komori.

Cena ovakvog lemljenja je nešto viša u odnosu na ostale postupke lemljenja zbog cene opreme i dužine trajanja samog ciklusa lemljenja (koji može da bude i do 15 dana za čelike debljine preko 20 mm) [21].

8.2 Postupci visokotemperaturnog lemljenja sa globalnim izvorom toplote

Grupi postupaka tvrdog lemljenja sa globalnim izvorom toplote (ISO 4063 – 92) pripadaju svi postupci tvrdog lemljenja koji se (globalno) zagrevaju i spajaju u pećima ili

termohemijskim kupatilima (kadama), i pri tome se spaja veliki broj (masovna proizvodnja) radnih komada malih dimenzija [1].

Ovoj grupi postupaka lemljenja pripadaju [10]:

- Postupak visokotemperaturnog lemljenja u peći, klasifikovan kao ISO 4063 – 921,
- Postupak visokotemperaturnog lemljenja u vakuumu, klasifikovan kao ISO 4063 – 922,
- Postupak visokotemperaturnog lemljenja u rastopljenom metalu, klasifikovan kao ISO 4063 – 923,
- Postupak visokotemperaturnog lemljenja u sonom kupatilu, klasifikovan kao ISO 4063 – 924,
- Postupak visokotemperaturnog lemljenja u kupatilu sa topiteljem, klasifikovan kao ISO 4063 – 925,
- Postupak visokotemperaturnog lemljenja potapanjem, klasifikovan kao ISO 4063 – 926.

8.2.1 Postupak visokotemperaturnog lemljenja u peći

Jedan od najproduktivnijih postupaka spajanja metalnih delova je postupak tvrdog lemljenja u peći (klasifikovan kao ISO 4063 – 921).

Primenjuje se za izradu jednostavnih „lemova” kod malih delova i to više komada od jednom. Delovi koji se leme se postave u odgovarajući položaj i učvrste a topitelj i dodatni materijal se postave u žleb između radnih komada koji se leme (slika 8.6)

Nakon toga se svi pripremci unose u peć koja ih zagreva do temperature lemljenja. Peć se zagreva gasnim plamenom, indukciono ili kombinovano. Osnovni metal u peći se samo zagreva dok se topitelji i dodatni metal tope. Topitelji čiste površine koje lem treba da kvasi a rastopljeni dodatni metal kapilarno ispunjava žleb između radnih komada. Nakon toga se delovi izvlače iz peći i hlade pa je proces lemljenja završen [5].

Postupak 921 je vrlo jednostavan, efikasan i jeftin. Primenjuje se za većinu

metala koji mogu da podnesu hemijsko-temperaturno aktivnu sredinu peći, bez posledica po strukturu materijala.



Slika 8.6 Delovi pripremljeni za spajanje postupkom tvrdog lemljenja u peći [22]

8.2.2 Postupak visokotemperaturnog lemljenja u vakuumu

Postupak tvrdog lemljenja u vakuumu (klasifikovan kao ISO 4063 – 922) je postupak ISO 4063 – 921 kod koga je peć za zagrevanje istovremeno i vakuum komora.

Namena postupka je ista kao kod postupka ISO 4063 – 921, a cilj vakuuma je da zaštiti lem i osnovni metal od negativnog uticaja gasova iz atmosfere i same peći. Cena vakuum-peći-komora je znatno viša od cene obične peći za tvrdo lemljenje, pa je i cena lemljenja postupkom 922 znatno viša.

Najčešća primena postupka 922 je za spajanje titanijuma, zlata ali je moguća primena i na čelicima.

8.2.3 Postupak visokotemperaturnog lemljenja potapanjem u rastopljeni metal

Postupak visokotemperaturnog lemljenja potapanjem u rastopljeni metal (klasifikovan kao ISO 4063 – 923) se najčešće primenjuje za spajanje tankih žica – u prošlosti se koristio za spajanje priključaka

(pinova) na matičnim pločama i sličnim elektronskim komponentama.

U zagrejano kupatilo (kadu, čija se temperatura održava konstantnom) se stavlja dodatni metal u čvrstom stanju. Kupatilo se zagreva do temperature lemljenja što dovodi do topljenja lema. Radni komadi se postavljaju u željeni položaj (jedan u odnosu na drugi) i učvršćuju (kako bi zadržali svoj međusobni položaj). Nakon toga se radni komadi premazuju topiteljom i umaču u kupatilo sa rastopljenim dodatnim materijalom. Prilikom umakanja, radni komadi se samo zagrevaju ali se ne tope (jer je temperatura rastopljenog lema znatno niža od tačke topljenja radnih komada). Rastopljeni lem kapilarno prodire u žleb između radnih komada, formira metal lema i povezuje radne komade u monolitnu celinu [5].

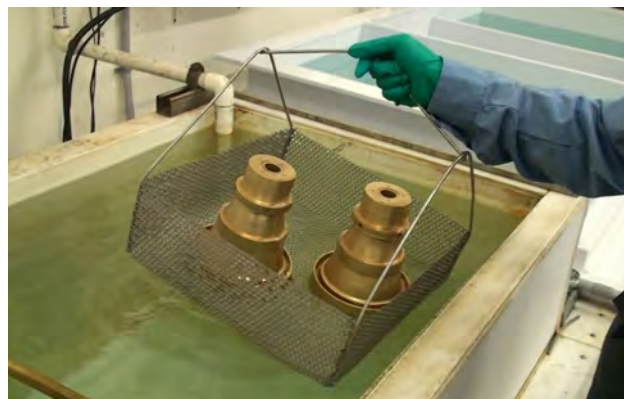
Postupak ISO 4063 – 923 je veoma precizan i produktivan jer se uvek vrši potapanje više radnih komada u jednoj seriji. Primenjuje se za lemljenje bakra, srebra, zlata i slično.

8.2.4 Postupak visokotemperaturnog lemljenja u sonom kupatilu

Postupak tvrdog lemljenja u sonom kupatilu (klasifikovan kao ISO 4063 – 924) je postupak spajanja dva metalna dela u monolitnu celinu primenom toplote iz sonog kupatila. Kupatilo je napunjeno solju i zagrejano do temperature topljenja lema. Spoljašnjim ili unutrašnjim izvorom toplote se temperatura sonog kupatila (odnosno, rastopljene soli) održava konstantnom. Radni komadi su prethodno pripremljeni, očišćeni i pozicionirani jedan u odnosu na drugi. Između njih je postavljen dodatni materijal i sva tri tela su fiksirana jedna u odnosu na druga.

Kao i kod ostalih postupaka, lemljenje u sonom kupatilu se najčešće vrši na više radnih komada odjednom. Nakon toga se čitav sklop umače u sonom kupatilo. Rastopljeni lem kapilarno popunjava žleb između radnih komada. Nakon toga se sklop izvlači iz kupatila i delovi ostaju međusobno zalemljeni.

Lemljenje se uvek vrši u horizontalnom položaju (PA).



Slika 8.7 Postupak visokotemperaturnog lemljenja u sonom kupatilu [23]

Rastopljeni lem nije samo izvor toplote već predstavlja i svojevrsnu zaštitu lema od uticaja gasova iz atmosfere; ona umanjuje zaostale napone u lemu, ne dozvoljava velike deformacije i krivljenje delova, ali i čisti radne komade i lem [1].

Postupak 924 se uspešno primenjuje za lemljenje malih delova od aluminijuma, bakra, i fero metala. U praksi se ovaj postupak naziva „duboko lemljenje” [5].

8.2.5 Postupak visokotemperaturnog lemljenja u kupatilu sa topiteljem

Postupak tvrdog lemljenja u kupatilu sa topiteljem je klasifikovan kao ISO 4063 – 925, i to je jedini višefazni postupak lemljenja. Radni komadi i dodatni materijal se čiste, pripremaju i postavljaju u željeni položaj, a onda učvršćuju. Tako povezani sklop se predgreva (do nekih 100°C kod aluminijuma) – prva faza, i potom umače u kupatilo sa rastopljenim praškom (topiteljom) – druga faza lemljenja. Rastopina u kupatilu se zagreva do temperature lemljenja i održava na toj temperaturi. Sklop se izvlači iz kupatila, pere i čisti, a onda se uklanjaju elementi koji su inicijalno učvršćivali sklop.

Kako se, zbog specifične višefazne procedure lemljenja, u kupatilu primenjuju topitelji koji su hemijski manje agresivni nego kod ostalih postupaka lemljenja, postupkom 925 se uspešno leme aluminijum i njegove teško zavarive/teško lemive legure [24, 25].

8.2.6 Postupak visokotemperaturnog lemljenja potapanjem

Postupak visokotemperaturnog lemljenja potapanjem, klasifikovan kao ISO 4063 – 926, o kome gotovo da nema nikakvih podataka. Postupak je standardizovan prvi put u verziji standarda ISO 4063 iz 2009.

Naziv postupka na francuskom jeziku „Brasage fort par immersion” definisan je u kandaskom standardu W375 SEC. 2-F1986 (C2001): Terminologie française du soudage, Section 2: Procédés de soudage et techniques connexes, iz 1986 godine, kao: „*Procédé de brasage fort dans lequel la chaleur nécessaire à la liaison provient de la résistance de la pièce à un courant induit.*”. U slobodnom prevodu na srpski jezik, definicija postupka 926 glasi: Postupak lemljenja kod koga se toplota potrebna za lemljenje dobija usled (električnog) otpora radnog komada na indukovanu električnu struju [26, 27].

Postupak 926 je vrlo specifičan i redak i autor nije došao do detaljnih informacija.

8.3 Ostali postupci visokotemperaturnog lemljenja

Standard SRPS EN ISO 4063:2021 predviđa grupu ostalih postupaka visokotemperaturnog lemljenja (ISO 4063 – 93) koja nema definisan ni jedan standardni postupak „tvrdog” lemljenja.

8.4 Postupci niskotemperaturnog lemljenja sa lokalnim izvorom toplote

Grupa niskotemperaturnih postupaka lemljenja sa lokalnim izvorom toplote, klasifikovana kao ISO 4063 – 94, obuhvata postupke mekog lemljenja koji se najviše koriste za pojedinačnu proizvodnju i spajanje delova malih dimenzija. Kako se meko lemljenje događa na temperaturama do

450 °C, izvori toplote su malih dimenzija, male snage, lako su upravljivi i mobilni su. Postupci lemljenja iz ove grupe su i ručni i mehanizovani.

Prema ISO 4063:2009, grupi ISO 4063 – 94 pripadaju sledeći postupci:

- Postupak niskotemperaturnog lemljenja infracrvenom svetlošću, klasifikovan kao ISO 4063 – 941,
- Postupak niskotemperaturnog lemljenja plamenom, klasifikovan kao ISO 4063 – 942,
- Postupak niskotemperaturnog lemljenja ručnom lemilicom, klasifikovan kao ISO 4063 – 943,
- Postupak niskotemperaturnog lemljenja vučenjem, klasifikovan kao ISO 4063 – 944,
- Postupak niskotemperaturnog lemljenja laserskim snopom, klasifikovan kao ISO 4063 – 945,
- Postupak niskotemperaturnog indukcionog lemljenja, klasifikovan kao ISO 4063 – 946,
- Postupak niskotemperaturnog lemljenja ultrazvukom, klasifikovan kao ISO 4063 – 947,
- Postupak niskotemperaturnog elektrootpornog lemljenja, klasifikovan kao ISO 4063 – 948,
- Postupak niskotemperaturnog difuzionog lemljenja, klasifikovan kao ISO 4063 – 949.

8.4.1 Postupak niskotemperaturnog lemljenja infracrvenom svetlošću

Postupak niskotemperaturnog lemljenja infracrvenom svetlošću je postupak koji se koristi za izradu spojeva koji ne prenose mehaničko opterećenje ali garantuju dobro prenošenje električnog signala kroz spoj. Spajanje delova se uvek vrši pojedinačno a postupak je prema ISO 4063 klasifikovan kao ISO 4063 – 941.

Na slici 8.8 prikazan je savremeni uređaj za lemljenje postupkom 941. Radni komadi i dodatni materijal je postavljaju u stezni pribor (glava), pozicioniraju i fiksiraju. Nakon toga se zona kvašenja radnih komada premazuje topiteljom [5].

Stezna glava koja nosi kvarcnu lampu male snage je pokretna i operater lemljenja je navodi iznad radnih komada. Uključena lampa zrači infracrvenu svetlost koja zagreva radne komade i topi dodatni materijal.

Lem kapilarno ispunjava zazor između radnih komada i nakon očvršćavanja delovi ostaju trajno spojeni.



Slika 8.8 Stanica (uređaj) za postupak niskotemperaturnog lemljenja infracrvenom svetlošću [28]

Najčešća primena postupka 941 je kod izrade i popravke skupocenog nakita, kao i u elektrotehnici (izrada unikatnih električnih kola, reparacija matičnih tabli, za spajanje elektronskih komponenti i slično). Zbog koncentrisanosti snopa infracrvene svetlosti, zona uticaja toplote je veoma mala a deformacije radnih komada ne postoje.

8.4.2 Postupak niskotemperaturnog lemljenja plamenom

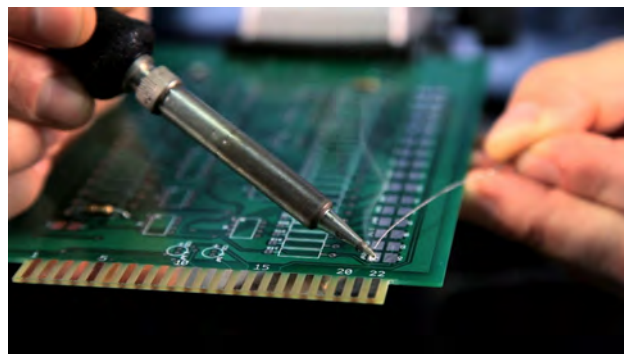
Postupak mekog lemljenja plamenom, klasifikovan kao ISO 4063 – 942, je suštinski identičan sa postupkom tvrdog lemljenja 912 jer je oprema identična, princip rada, kao i gorivi gasovi. Postupci se međusobno razlikuju prema dodatnim materijalima i temperaturama lemljenja.

Postupak 942 se primenjuje za meko lemljenje aluminijuma, bakra i srebra.

8.4.3 Postupak niskotemperaturnog lemljenja ručnom lemlicom

Najpoznatiji postupak mekog lemljenja je postupak niskotemperaturnog lemljenja ručnom lemlicom. Postupak je poznat kao „letovanje”, klasifikovan je kao ISO 4063 – 943 i on je najprimenljiviji postupak za spajanje elektronskih komponenti, provodnika, pocinkovanih limova i slično.

Letovanje se izvodi primenom specijalnog alata (lemilice) koja je, u suštini, štapni elektrotoporni grejač (slika 8.9). Lemilica se zagreva dejstvom električne struje i svojim vrhom topi dodatni materijal koji se kapilarno spušta do delova koji se spajaju. Pri tom ne dolazi do topljenja osnovnog metala [1].



Slika 8.9 Postupak mekog lemljenja ručnom lemlicom [29]

„Letovanje” je veoma brz postupak, jednostavan za primenu, ali je primenljiv za delove malih dimenzija.

Dodatni materijal za letovanje je izrađen na bazi olova ili na bazi kalaja.

8.4.4 Postupak niskotemperaturnog lemljenja vučenjem

Postupak mekog lemljenja vučenjem je podvarijanta postupka 943 – koristi se ista oprema, pribor i dodatni materijali, ali je procedura lemljenja drugačija. U ovom slučaju se rastopljeni lem ne spušta kapilarno do žleba već se vrhom lemilice prevlači preko delova koji se spajaju (slično slikanju četkicom sa bojom po platnu). Tako se dobija vrlo tanak film lema i minimalno se termički opterećuju radni komadi [5].

Postupak mekog lemljenja vučenjem je klasifikovan kao ISO 4063 – 944 i primenjuje se za lemljenje veoma tankih električnih provodnika, pinova i slično.

8.4.5 Postupak niskotemperaturnog lemljenja laserskim snopom

Postupak mekog lemljenja laserskim snopom je identičan postupku tvrdog lemljenja 913 – uz primenu lasera manje snage i dodatnog materijala sa nižom temperaturom topljenja. Postupak je klasifikovan kao ISO 4063 – 945.

8.4.6 Postupak niskotemperaturnog indukcionog lemljenja

Postupak niskotemperaturnog indukcionog lemljenja (klasifikovan kao ISO 4063 – 946) je niskotemperaturna podvarijanta postupka 916. Postupak 946 odlikuje nešto niža produktivnost u odnosu na 916 ali je termičko opterećenje spoja neznatno. Pribor i oprema za lemljenje su identični kod oba postupka.

8.4.7 Postupak niskotemperaturnog lemljenja ultrazvukom

Postupak niskotemperaturnog lemljenja ultrazvukom (ISO 4063 – 947) je podvarijanta „letovanja” gde lemilica nije zagrejana grejač već sonotroda koja vibrira i topi dodatni materijal. Postupak je primenljiv za polimere i veoma tanke metalne delove.

8.4.8 Postupak niskotemperaturnog elektrootpornog lemljenja

Postupak niskotemperaturnog elektrootpornog lemljenja, klasifikovan kao ISO 4063 – 948, je niskotemperaturna podvarijanta postupka 918. Jedina razlika ova dva postupka je dodatni materijal koji se koristi.

8.4.9 Postupak niskotemperaturnog difuzionog lemljenja

Postupak niskotemperaturnog difuzionog lemljenja, klasifikovan kao

ISO 4063 – 949, je podvarijanta postupka 919. Jedina razlika između ova dva postupka je dodatni materijal.

8.5 Postupci niskotemperaturnog lemljenja sa globalnim izvorom toplote

Niskotemperaturni postupci lemljenja sa globalnim izvorom toplote se najčešće primenjuju u elektrotehnici, za masovnu proizvodnju komponenti. Grupa ovih postupaka je klasifikovana kao ISO 4063 – 95 i njoj pripadaju:

- Postupak niskotemperaturnog talasnog lemljenja ISO 4063 – 951,
- Postupak niskotemperaturnog lemljenja u peći ISO 4063 – 953,
- Postupak niskotemperaturnog lemljenja u vakuumu ISO 4063 – 954,
- Postupak niskotemperaturnog lemljenja potapanjem u rastopljeni metal ISO 4063 – 955,
- Postupak niskotemperaturnog lemljenja u sonom kupatilu ISO 4063 – 957.

8.5.1 Postupak niskotemperaturnog talasnog lemljenja

Postupak mekog talasnog lemljenja je visokoproduktivni postupak koji se primenjuje u industriji štampanih kola. Linija za lemljenje (slika 8.10) ima masivnu kadu sa grejačima u koju se stavlja dodatni materijal. Grejači tope dodatni materijal i on se razliva u kadi. Posebnim sistemom pumpi i pregrada se rastopljeni lem „talasa” sa jednog kraja na drugi kade. Pripremljeni radni komadi (matične ploče, štampana kola i slično) sa pozicioniranim delovima koji se leme, prevlače se preko vrha talasa i tako prekrivaju slojem rastopljenog lema. Proces lemljenja je gotovo trenutno – lem kapilarno prodire u žlebove između radnih komada i spaja ih. Zbog kratkotrajnog kontakta osnovnog metala i vrućeg lema, ne dolazi do termičkih deformacija radnih komada.

Ovako dobijeni lemovi imaju malu

nosivost – koja se od njih i ne očekuje, ali obezbeđuju odlična provodna svojstva komponenti [1].



Slika 8.10 Proizvodna linija za postupak niskotemperaturnog talasnog lemljenja [30]

Postupak niskotemperaturnog talasnog lemljenja je klasifikovan kao ISO 4063 – 951.

8.5.2 Postupak niskotemperaturnog lemljenja u peći

Postupak niskotemperaturnog lemljenja u peći, klasifikovan kao ISO 4063 – 953, je suštinski istovetan postupku tvrdog lemljenja 912. Jedine razlike su u primenjenom dodatnom materijalu i temperaturi na kojoj se lemljenje događa.

8.5.3 Postupak niskotemperaturnog lemljenja u vakuumu

Postupak niskotemperaturnog lemljenja u vakuumu, klasifikovan kao ISO 4063 – 954, je istovetan postupku 922 uz napomenu da se lemljenje postupkom 954 događa na temperaturama nižim nego kod postupka 922.

8.5.4 Postupak niskotemperaturnog lemljenja potapanjem u rastopljeni metal

Ovo je još jedan postupak identičan svom visokotemperaturnom parnjaku po osnovu, pribora, opreme i procedure rada, a razlikuje se po dodatnom materijalu i temperaturi lemljenja. Postupak niskotemperaturnog lemljenja potapanjem u

rastopljeni metal je klasifikovan kao ISO 4063 – 955 i suštinski je identičan postupku 923.

8.5.5 Postupak niskotemperaturnog lemljenja u sonom kupatilu

Postupak niskotemperaturnog lemljenja u sonom kupatilu, klasifikovan kao ISO 4063 – 957, identičan je postupku 924, uz sledeće razlike: drugačiji je dodatni materijali, sono kupatilo može da bude manjih dimenzija (jer se postupak 957 primenjuje za delove malih dimenzija) i temperatura rastopljene soli je niža nego kod postupka 924.

8.6 Ostali postupci niskotemperaturnog lemljenja

Standard SRPS EN ISO 4063:2021 predviđa grupu ostalih postupaka niskotemperaturnog lemljenja (ISO 4063 – 96) koja nema definisan ni jedan standardni postupak „mekog” lemljenja.

8.7 Postupci zavarivačkog lemljenja

Postupci zavarivačkog lemljenja (ISO 4063 – 97) su postupci specifičnog visokotemperaturnog lemljenja kod kojih rastopljeni dodatni materijal u žleb između radnih komada prodire ne samo dejstvom kapilarnih sila već, dominantno, usled uticaja gravitacije ili pritiska gasa.

Postupci zavarivačkog lemljenja se primenjuju za spajanje delova većih dimenzija pa su i žlebovi veći nego kod žlebova za meko i tvrdo lemljenje. Oni su dimenzionirani i oblikom bliski žlebovima za postupke zavarivanja topljenjem.

Standardizovani postupci zavarivačkog lemljenja su:

- Postupak gasnog zavarivačkog lemljenja, klasifikovan kao ISO 4063 – 971,
- Postupak elektrolučnog zavarivačkog lemljenja, klasifikovan kao ISO 4063 – 972,

- Postupak elektrolučnog zavarivačkog lemljenja u atmosferi zaštitnog gasa, klasifikovan kao ISO 4063 – 973,
- Postupak elektrolučnog zavarivačkog lemljenja netopivom volframovom elektrodom u atmosferi zaštitnog gasa, klasifikovan kao ISO 4063 – 974,
- Postupak zavarivačkog lemljenja plazmom, klasifikovan kao ISO 4063 – 975,
- Postupak zavarivačkog lemljenja u laserskim snopom, klasifikovan kao ISO 4063 – 976,
- Postupak zavarivačkog lemljenja elektronskim snopom, klasifikovan kao ISO 4063 – 977.

Svi ovi postupci koriste identičnu opremu i principe kao slični postupci zavarivanja uz opštu napomenu koja uvek važi – osnovni metal se ne topi. Namena im je spajanje delova uz minimalno termičko opterećenje osnovnog materijala (što nije slučaj kod postupaka zavarivanja).

8.7.1 Postupak gasnog zavarivačkog lemljenja

Postupak gasnog zavarivačkog lemljenja, klasifikovan kao ISO 4063 – 971, je podvarijanta postupaka zavarivanja iz grupe 3.

Lemljenje se izvodi primenom gorionika i lem-žice. Plamen se dobija sagorevanjem mešavine acetilena ili MAPP-a i kiseonika, odgovarajućim gorionikom. Lemljenje se uvek vrši ručno.

8.7.2 Postupak elektrolučnog zavarivačkog lemljenja

Postupak elektrolučnog zavarivačkog lemljenja, klasifikovan kao ISO 4063 – 972, je suštinski identičan postupku 111: to je REL postupak zavarivačkog lemljenja. Razlika postupka ISO 4063 – 972 od postupka ISO 4063 – 111 je u tome što se topi samo dodatni materijal. Dodatni materijal je obložena lem-elektroda (kao kod postupka ISO 4063 – 111) koja ima funkciju zaštite, legiranja i poboljšanja gorenja električnog luka. Ovaj postupak lemljenja većina ljudi ne razlikuje od postupka zavarivanja 111.

8.7.3 Postupak elektrolučnog zavarivačkog lemljenja u atmosferi zaštitnog gasa

Postupak elektrolučnog zavarivačkog lemljenja u atmosferi zaštitnog gasa, klasifikovan kao ISO 4063 – 973, je suštinski identičan postupcima iz grupe 13, odnosno, ovo je MIG ili MAG postupak zavarivačkog lemljenja. I kod postupka 973 se topi samo lem-žica, koja se u zonu lemljenja dovodi kontinuirano, u prisustvu aktivnog ili inertnog zaštitnog gasa.

8.7.4 Postupak elektrolučnog zavarivačkog lemljenja netopivom volframovom elektrodom u atmosferi zaštitnog gasa

Postupak elektrolučnog zavarivačkog lemljenja netopivom volframovom elektrodom u atmosferi zaštitnog gasa klasifikovan kao ISO 4063 – 974, je identičan postupku 141, uz napomenu da se kod 974 topi samo dodani materijal (lem-žica). Električni luk se uspostavlja između volframove elektrode i radnih komada. Električni luk, elektroda, lem-žica i zona lemljenja su zaštićeni inertnim zaštitnim gasom. Lem žica se u zonu zavarivanja dovodi, ručno, u prekidnom režimu rada.

8.7.5 Postupak zavarivačkog lemljenja plazmom

Postupak zavarivačkog lemljenja plazmom, klasifikovan kao ISO 4063 – 975, je identičan postupcima iz grupe 15. Jedina razlika je što se kod postupka 975 topi samo lem-žica dok se radni komadi samo zagrevaju. Zavarivačko lemljenje postupkom 975 je izvodljivo i u atmosferi zaštitnog gasa i bez primene zaštitnog gasa.

8.7.6 Postupak zavarivačkog lemljenja u laserskim snopom

Postupak zavarivačkog lemljenja u laserskim snopom, klasifikovan kao ISO 4063 – 976, je identičan postupcima iz grupe 51, uz obaveznu primenu dodatnog

materijala koji se jedini topi prilikom lemljenja. Moguće je izvođenje postupka 976 sa i bez zaštitnog gasa.

8.7.7 Postupak zavarivačkog lemljenja elektronskim snopom

Postupak zavarivačkog lemljenja elektronskim snopom, klasifikovan kao

ISO 4063 – 977, identičan je pojedinim postupcima iz osnovne grupe 51, uz obaveznu primenu dodatnog metala – što nije slučaj kod većine postupaka iz grupe 51. I ovde se topi samo dodatni materijal dok se osnovni metal samo zagreva i aktivno učestvuje u zagrevanju lema.

LITERATURA

- [1] Branko Lukić, Ivan Milutinović: Tehnologija spajanja materijala lemljenjem, AGM Knjiga, ISBN 978-86-86363, 2015;
- [2] George Brady, et al: Materials Handbook. McGraw Hill. pp. 768–70. ISBN 978-0-07-007084-4, 1996;
- [3] Felix Kanic: Srbija - Zemlja i stanovništvo I - II od rimskog doba do kraja XIX veka, 1985;
- [4] Peter N. Stearns: The Industrial Revolution in World History – 4th Edition, Routledge, ISBN – 9780813347295, 2012;
- [5] Autorizovana predavanja na kursu za međunarodne inženjere zavarivanja IWE, Mašinski fakultet Niš, 2009-2021;
- [6] SRPS EN ISO 4063:2021: Welding, brazing, soldering, cutting, mechanical joining and adhesive bonding – Nomenclature of processes and reference numbers (EN ISO 4063:2020), naziv na sprskom: Zavarivanje, tvrdo lemljenje, meko lemljenje, rezanje, mehaničko spajanje i adheziono spajanje – Lista postupaka i njihovo označavanje, objavljen: 17.12.2020; 4063:2009: Welding and allied processes – Nomenclature of processes and reference numbers, objavljen: 08/2009;
- [7] ISO 857-1:1998: Welding and allied processes – Vocabulary – Part 1: Metal welding processes, 1998 (povučen 2007);
- [8] ISO/TR 25901-3:2016: Welding and allied processes – Vocabulary – Part 3: Welding processes, 2016;
- [9] ISO 857-2:2005: Welding and allied processes – Vocabulary – Part 2: Soldering and brazing processes and related terms, 11/2005;
- [10] SRPS EN ISO 4063:2021: Welding, brazing, soldering, cutting, mechanical joining and adhesive bonding – Nomenclature of processes and reference numbers (EN ISO 4063:2020), naziv na sprskom: Zavarivanje, tvrdo lemljenje, meko lemljenje, rezanje, mehaničko spajanje i adheziono spajanje – Lista postupaka i njihovo označavanje, objavljen: 17.12.2020;
- [11] Philip Roberts: Industrial Brazing Practice, 2nd edition, CRC Press, ISBN 9781466567740, 2013;
- [12] Vacuum Process Engineering: <https://www.vpei.com/infrared-brazing-services/>, (dokument pregledan 17.03.2021.);
- [13] Harris, Lincoln Electric Company: <https://www.harrisproductsgroup.com/en/Expert-Advice/Articles/turn-up-the-brazing-heat.aspx>, (dokument pregledan 17.03.2021.);
- [14] Scansonic: <https://www.scansonic.de/en/applications/laser-brazing/>, (dokument pregledan 17.03.2021.);
- [15] Lisa Pathfinder: <https://sci.esa.int/web/lisa-pathfinder>, (dokument pregledan 17.03.2021.);
- [16] UltraFlex: <https://ultraflexpower.com/induction-heating-applications/induction-brazing/dragon-15-automated-induction-brazing-copper-to-copper/>, (dokument pregledan 17.03.2021.);
- [17] Induction Brazing: https://en.wikipedia.org/wiki/Induction_brazing, (dokument pregledan 17.03.2021.);
- [18] Resistance Brazing: <https://www.youtube.com/watch?v=qjNHCxvB8Kc>, (dokument pregledan 17.03.2020.);
- [19] Mel M. Schwartz: Brazing, 2nd Edition, Book News, Inc., Portland, OR, ISBN 0-87170-

- 784-5, 2003;
- [20] Николай Федотович Казаков: Диффузионная сварка в вакууме, Издательство „Машиностроение”, 1968;
- [21] Principles of Brazing, Chapter 6: Dufusion brazing, ASM, 2005, link: <https://www.asminternational.org/documents/10192/3451502/ACF1EEB.pdf/ff1e0602-7bb4-4d01-bb7f-cb5bec64d1d5>, (dokument pregledan 08.11.2020.);
- [22] Market Research Report Store: <https://www.openpr.com/news/1808861/furnace-brazing-market-to-witness-robust-expansion-by-2025>, (dokument pregledan 13.03.2021.);
- [23] Dip Brazing: <https://www.youtube.com/watch?v=IaR8KqEgE5s>, (dokument pregledan 13.03.2021.);
- [24] Storchai, E.I., Baranov, N.S. Optimization of the flux bath brazing process for aluminium parts. *Chem Petrol Eng* 12, 252–255 (1976). <https://doi.org/10.1007/BF01145851>
- [25] AWS Brazing Handbook: Chapter 15 Dip Brazing, 2005: https://pubs.aws.org/Download_PDFS/BHC-15PV.pdf, (dokument pregledan 17.03.2020.);
- [26] W375 SEC. 2-F1986 (C2001): Terminologie française du soudage, Section 2: Procédés de soudage et techniques connexes, 1986;
- [27] <https://www.btb.termiumplus.gc.ca/tpv2alpha/alpha-eng.html?lang=eng&i=&index=alt&srchtxt=BRASAGE%20FORT%20IMMERSION>, (dokument pregledan 17.03.2020.);
- [28] Infrared Rework Stations: <https://toolboom.com/en/articles-and-video/infrared-rework-stations-technological-benefits-and-achi-brand-review/>, (dokument pregledan 17.03.2020.);
- [29] Soldering: <https://medium.com/shyam-cortex/learn-how-to-solder-in-5-mins-24964c3f699>, (dokument pregledan 17.03.2020.);
- [30] ITW EAE: https://www.itweae.com/sites/default/files/products/DwellFlex_4.jpg, (dokument pregledan 17.03.2020.).

[illegible]

[illegible]

Tabela 9.1 Pregled standarda

R.b.	Standard	Naziv	ISO 4063 –								
			1	2	3	4	5	6	7	8	9
91	SRPS EN 4344:2010	Vazduhoplovstvo – Čelik FE–WM1002(X13Cr13) – Dodatni materijal za lemljenje – Žica i šipka									×
92	SRPS EN 3896:2011	Vazduhoplovstvo – Čelik FE–WM1501 (X13CrNiMoCo12–3–2–2) – Dodatni materijal za zavarivanje	×								
93	SRPS EN 3890:2011	Vazduhoplovstvo – Čelik FE–WM1502 (X11CrNiMoVN12–3) – Dodatni materijal za zavarivanje	×								
94	SRPS EN 4328:2010	Vazduhoplovstvo – Čelik FE–WM1601(X18CrWNi13–3–2) – Dodatni materijal za lemljenje – Žica i šipka									×
95	SRPS EN 3889:2011	Vazduhoplovstvo – Čelik FE–WM3801 (X5CrNiCu17–4) – Dodatni materijal za zavarivanje	×								
96	SRPS EN 3965:2010	Vazduhoplovstvo – Legura titanijuma TI B17001 – Dodatni materijal za lemljenje – Valjana folija									×
97	SRPS EN 3893:2011	Vazduhoplovstvo – Legura titana TI–W19001 – Dodatni materijal za zavarivanje	×								
98	SRPS EN 3892:2011	Vazduhoplovstvo – Legura titana TI–W64001 – Dodatni materijal za zavarivanje	×								
99	SRPS EN 4342:2013	Vazduhoplovstvo – Titanijum TI–W99001 – Metalni fileri za zavarivanje – Žica i šipka	×								
100	SRPS EN 3635:2016	Vazduhoplovstvo – Zavarivanje ivica – Geometrijska konfiguracija	×	×	×	×	×		×		
101	SRPS EN 4632–003:2012	Vazduhoplovstvo – Zavarljivost i lemljivost materijala u konstrukcijama vazduhoplova – Deo 003: Zavarivanje i lemljenje homogenih konstrukcija od nelegiranog ili nisko legiranog čelika	×	×	×		×		×		×
102	SRPS EN 4632–004:2014	Vazduhoplovstvo – Zavarljivost i lemljivost materijala u konstrukcijama vazduhoplova – Deo 004: Zavarivanje i lemljenje homogenih sklopova od visoko legiranog čelika	×	×	×	×	×		×		×
103	SRPS EN 4632–005:2012	Vazduhoplovstvo – Zavarljivost i lemljivost materijala u konstrukcijama vazduhoplova – Deo 005: Homogene konstrukcije od legura na bazi Ni ili Co otpornog prema toploti	×	×	×	×	×		×		×
104	SRPS EN 4632–006:2014	Vazduhoplovstvo – Zavarljivost i lemljivost materijala u konstrukcijama vazduhoplova – Deo 006: Homogeni sklopovi od legura titanijuma	×	×	×	×	×		×		×
105	SRPS EN 4677–001:2014	Vazduhoplovstvo – Zavareni i lemljeni sklopovi za konstrukcije vazduhoplova – Spojevi metalnih materijala nastalih zavarivanjem elektronskim snopom – Deo 001: Kvalitet zavarenih sklopova					×				
106	SRPS EN 4632–001:2012	Vazduhoplovstvo – Zavareni i lemljeni sklopovi za konstrukcije vazduhoplova – Zavarljivost i lemljivost materijala – Deo 001: Opšti zahtevi	×	×	×	×	×		×		×

Tabela 9.1 Pregled standarda

R.b.	Standard	Naziv	ISO 4063 –								
			1	2	3	4	5	6	7	8	9
107	SRPS EN 4632–002:2010	Vazduhoplovstvo – Zavarene i lemljene konstrukcije u vazduhoplovstvu – Zavarenost i zavarljivost materijala – Deo 002: Homogene konstrukcije aluminijuma i legura aluminijuma	×	×	×	×	×		×		×
108	SRPS EN 4678:2012	Vazduhoplovstvo– Zavareni ili lemljeni spojevi za konstrukcije u vazduhoplovstvu– Spojevi metalnih materijala pomoću zavarivanja laserskim snopom– Kvalitet zavarenog spoja					×				
109	SRPS EN 1715–4:2009	Aluminijum i legure aluminijuma – Materijal za izvlačenje – Deo 4: Posebni zahtevi za primenu pri zavarivanju						×			
110	SRPS EN ISO 9606–3:2008	Ispitivanje u cilju provere zavarivača – Zavarivanje topljenjem – Deo 3: Bakar i legure bakra	×	×	×	×	×		×		
111	SRPS EN ISO 9606–4:2008	Ispitivanje u cilju provere zavarivača – Zavarivanje topljenjem – Deo 4: Nikl i legure nikla	×	×	×	×	×		×		×
112	SRPS EN ISO 9606–5:2008	Ispitivanje u cilju provere zavarivača – Zavarivanje topljenjem – Deo 5: Titan i legure titana, cirkonijum i legure cirkonijuma	×	×	×	×	×		×		×
113	SRPS EN ISO 6848:2017	Elektrolučno zavarivanje i rezanje – Netopive volframove elektrode – Klasifikacija	×							×	
114	SRPS EN 60974–1:2012	Oprema za elektrolučno zavarivanje – Deo 1: Izvori struje za zavarivanje	×								
115	SRPS EN IEC 60974–1:2019/A1:2020	Oprema za elektrolučno zavarivanje – Deo 1: Izvori struje za zavarivanje–Izmena 1	×								
116	SRPS EN 60974–10:2015/A1:2017	Oprema za elektrolučno zavarivanje – Deo 10: Zahtevi za elektromagnetsku kompatibilnost (EMC) – Izmena 1	×								
117	SRPS EN 60974–11:2012	Oprema za elektrolučno zavarivanje – Deo 11: Držači elektroda	×								
118	SRPS EN 60974–12:2012	Oprema za elektrolučno zavarivanje – Deo 12: Spojne naprave za zavarivačke kablove	×								
119	SRPS EN 60974–13:2012	Oprema za elektrolučno zavarivanje – Deo 13: Sprega za zavarivanje	×								
120	SRPS EN IEC 60974–14:2019	Oprema za elektrolučno zavarivanje – Deo 14: Kalibracija, validacija i konzistentno ispitivanje	×								
121	SRPS EN IEC 60974–2:2020	Oprema za elektrolučno zavarivanje – Deo 2: Sistemi hlađenja tečnošću	×								
122	SRPS EN 60974–3:2015	Oprema za elektrolučno zavarivanje – Deo 3: Uređaji za uspostavljanje i stabilizaciju luka	×								
123	SRPS EN IEC 60974–3:2020	Oprema za elektrolučno zavarivanje–Deo 3: Uređaj za paljenje luka i stabilizaciju	×								
124	SRPS EN 60974–4:2017	Oprema za elektrolučno zavarivanje – Deo 4: Periodična kontrola i ispitivanje	×								
125	SRPS EN 60974–5:2014	Oprema za elektrolučno zavarivanje – Deo 5: Dodavači žice	×								
126	SRPS EN IEC 60974–7:2020	Oprema za elektrolučno zavarivanje – Deo 7: Gorionici	×								

Tabela 9.1 Pregled standarda

R.b.	Standard	Naziv	ISO 4063 –								
			1	2	3	4	5	6	7	8	9
148	SRPS EN 1254–1:2009	Bakar i legure bakra – Spojnice – Deo 1: Spojnice za kapilarno meko i tvrdo lemljenje bakarnih cevi									×
149	SRPS EN 1254–5:2018	Bakar i legure bakra – Fitinzi za vodovodne instalacije– Deo 5: Fitinzi sa kratkim krajevima za kapilarno tvrdo lemljenje bakarnih cevi									×
150	SRPS EN ISO 7539–8:2012	Korozija metala i legura – Ispitivanje naponske korozije – Deo 8:Izrada i primena uzoraka za ocenjivanje zavarenih spojeva	×	×	×	×	×		×		×
151	SRPS C.H3.016:1984	Zavarivanje – Obložene elektrode za ručno elektrolučno zavarivanje livenog gvožđa – Označavanje, opis i područje primene	×								
152	ISO 6210–1:1991	Cylinders for robot resistance welding guns – Part 1: General requirements		×							
153	SRPS EN ISO 9333:2012	Stomatologija – Materijali za lemljenje									×
154	SRPS EN ISO 28319:2018	Stomatologija – Lasersko spajanje i materijali za ispune					×				
155	ISO/DIS 5173	Destructive tests on welds in metallic materials – Bend tests	×	×	×	×	×		×		×
156	ISO 5173:2009/Amd 1:2011	Destructive tests on welds in metallic materials – Bend tests – Amendment 1	×	×	×	×	×		×		×
157	SRPS EN ISO 5173:2021	Ispitivanje sa razaranjem zavarenih spojeva metalnih materijala – Ispitivanje savijanjem	×	×	×	×	×		×		
158	SRPS EN ISO 17642–1:2015	Ispitivanje sa razaranjem zavarenih spojeva na metalnim materijalima – Ispitivanje zavarenih spojeva na hladne prsline – Postupci elektrolučnog zavarivanja – Deo 1: Opšte	×								
159	SRPS EN ISO 17642–2:2011	Ispitivanje sa razaranjem zavarenih spojeva na metalnim materijalima – Ispitivanja zavarenih spojeva na hladne prsline – Postupci elektrolučnog zavarivanja– Deo 2: Ispitivanje samopričvršćivanjem	×								
160	SRPS EN ISO 17642–3:2011	Ispitivanje sa razaranjem zavarenih spojeva na metalnim materijalima – Ispitivanja zavarenih spojeva na hladne prsline – Postupci elektrolučnog zavarivanja– Deo 3: Ispitivanja sa spoljašnjim opterećenjem	×								
161	SRPS CEN ISO/TR 16060:2015	Ispitivanje razaranjem zavarenih spojeva metalnih materijala – Sredstva za nagrizanje za makroskopsko i mikroskopsko ispitivanje	×	×	×	×	×		×		
162	SRPS EN ISO 9017:2018	Ispitivanje sa razaranjem zavarenih spojeva metalnih materijala – Ispitivanje loma	×	×	×	×	×		×		
163	SRPS EN ISO 9015–1:2013	Ispitivanje sa razaranjem zavarenih spojeva metalnih materijala – Ispitivanje tvrdoće – Deo 1: Ispitivanje tvrdoće elektrolučno zavarenih spojeva	×								
164	SRPS EN ISO 9015–2:2017	Ispitivanje sa razaranjem zavarenih spojeva metalnih materijala – Ispitivanje tvrdoće – Deo 2: Ispitivanje mikrotvrdoće zavarenih spojeva	×	×	×	×	×		×		

Tabela 9.1 Pregled standarda

R.b.	Standard	Naziv	ISO 4063 –								
			1	2	3	4	5	6	7	8	9
165	SRPS EN ISO 22826:2020	Ispitivanje sa razaranjem zavarenih spojeva metalnih materijala – Ispitivanje tvrdoće uskog spoja zavarenog laserom i elektronskim snopom (Ispitivanje tvrdoće po Vickersu i Knupu)					×				
166	SRPS EN ISO 17641–1:2011	Ispitivanje sa razaranjem zavarenih spojeva na metalnim materijalima – Ispitivanje zavarenih spojeva na tople prsline – Elektrolučno zavarivanje –Deo 1: Opšte	×								
167	SRPS EN ISO 17641–2:2017	Ispitivanje sa razaranjem zavarenih spojeva na metalnim materijalima – Ispitivanje sklonosti ka toplim prslinama – Elektrolučno zavarivanje – Deo 2: Ispitivanje sopstvenim ukrućenjem	×								
168	SRPS CEN ISO/TR 17641–3:2011	Ispitivanje sa razaranjem zavarenih spojeva na metalnim materijalima – Ispitivanje zavarenih spojeva na tople prsline – Elektrolučni postupci zavarivanja–Deo 3: Ispitivanja sa spoljašnjim opterećenjem	×								
169	ISO/DIS 9016	Destructive tests on welds in metallic materials – Impact tests – Test specimen location, notch orientation and examination	×	×	×	×	×		×		
170	SRPS EN ISO 9016:2013	Ispitivanje sa razaranjem zavarenih spojeva metalnih materijala – Ispitivanje udarom – Postavljanje epruveta, orijentacija zareza i ispitivanje	×	×	×	×	×		×		
171	SRPS EN ISO 5178:2019	Ispitivanje sa razaranjem zavarenih spojeva metalnih materijala – Ispitivanje zatezanjem u podužnom pravcu metala šava spojeva zavarenih topljenjem	×	×	×	×	×		×		
172	ISO/DIS 17639	Destructive tests on welds in metallic materials – Macroscopic and microscopic examination of welds	×	×	×	×	×		×		
173	SRPS EN ISO 17639:2014	Ispitivanje sa razaranjem zavarenih spojeva metalnih materijala – Makroskopsko i mikroskopsko ispitivanje zavarenih spojeva	×	×	×	×	×		×		
174	SRPS EN ISO 9018:2017	Ispitivanje sa razaranjem – Ispitivanje zatezanjem krstastih i preklopnih spojeva	×	×	×	×	×		×		
175	ISO/DIS 4136	Destructive tests on welds in metallic materials – Transverse tensile test	×	×	×	×	×		×		
176	SRPS EN ISO 4136:2013	Ispitivanja sa razaranjem zavarenih spojeva metalnih materijala – Ispitivanje poprečnim zatezanjem	×	×	×	×	×		×		
177	ISO 693:1982	Dimensions of seam welding wheel blanks		×							
178	SRPS EN 20693:2009	Mere zavarenih praznih kalemova		×							

Tabela 9.1 Pregled standarda

R.b.	Standard	Naziv	ISO 4063 –								
			1	2	3	4	5	6	7	8	9
179	SRPS EN 50525–2–81:2011	Električni kablovi – Niskonaponski energetski kablovi naznačenih napona do i uključujući 450/750 V (U _o /U) – Deo 2–81: Kablovi za opštu primenu – Kablovi sa umreženom prekrivkom od elastomera za elektrolučno zavarivanje	×								
180	SRPS EN IEC 62822–1:2019	Oprema za električno zavarivanje – Ocenjivanje zabrana koje se odnose na izlaganje ljudi elektromagnetskom polju (od 0 Hz do 300 GHz) – Deo 1: Standard za familiju proizvoda	×								
181	SRPS EN IEC 62822–3:2019	Oprema za električno zavarivanje – Ocenjivanje zabrana koje se odnose na izlaganje ljudi elektromagnetskom polju (od 0 Hz do 300 GHz) – Deo 3: Oprema za otporno zavarivanje		×							
182	SRPS EN 21089:2015	Konusne elektrode za tačkasto zavarivanje – Mere		×							
183	SRPS EN 50240:2009	Elektromagnetna kompatibilnost (EMC) – Standard za opremu za otporničko zavarivanje		×							
184	SRPS EN ISO 13919–1:2020	Zavarivanje – Zavareni spojevi izvedeni elektronskim i laserskim snopom– Uputstvo za nivo kvaliteta nepravilnosti – Deo 1: Čelik					×				
185	ISO 13919–2:2021	Electron and laser–beam welded joints – Requirements and recommendations on quality levels for imperfections – Part 2: Aluminium, magnesium and their alloys and pure copper					×				
186	SRPS EN ISO 16321–2:2018	Zaštita očiju i lica za rad na radu – Doo 2: Dodatni zahtevi za tehnike zavarivanja i zavarivanja	×	×	×	×	×	×	×	×	×
187	SRPS EN 12943:2011	Punila za termoplastične materijale – Područje primene, označavanje, zahtevi, ispitivanja						×			
188	SRPS EN ISO 3677:2017	Dodatni materijali za meko i tvrdo lemljenje – Označavanje									×
189	SRPS EN 16750:2017+A1:2021	Instalacije za gašenje požara– Sistemi za redukciju kiseonika– Projektovanje, ugradnja, planiranje i održavanje	×	×	×	×	×	×	×	×	×
190	SRPS EN ISO 18785–1:2020	Tačkasto zavarivanje trenjem sa mešanjem – Aluminium – Deo 1: Rečnik				×					
191	SRPS EN ISO 18785–2:2020	Tačkasto zavarivanje trenjem sa mešanjem – Aluminium –Deo 2: Projekat zavarenih spojeva				×					
192	SRPS EN ISO 18785–3:2020	Tačkasto zavarivanje trenjem sa mešanjem – Aluminium – Deo 3: Kvalifikacija operatera zavarivanja				×					
193	SRPS EN ISO 18785–4:2020	Tačkasto zavarivanje trenjem sa mešanjem – Aluminium – Deo 4: Specifikacija i kvalifikacija tehnologije zavarivanja				×					
194	SRPS EN ISO 18785–5:2020	Tačkasto zavarivanje trenjem sa mešanjem – Aluminium –Deo 5: Zahtevi kvaliteta i kontrolisanja				×					
195	SRPS EN ISO 25239–1:2021	Zavarivanje trenjem sa mešanjem – Aluminium – Deo 1: Rečnik				×					

Tabela 9.1 Pregled standarda

R.b.	Standard	Naziv	ISO 4063 –								
			1	2	3	4	5	6	7	8	9
196	SRPS EN ISO 25239–2:2021	Zavarivanje trenjem sa mešanjem – Aluminijum – Deo 2: Proračun zavarenih spojeva				×					
197	SRPS EN ISO 25239–3:2021	Zavarivanje trenjem sa mešanjem – Aluminijum – Deo 3: Kvalifikacija operatera zavarivanja				×					
198	SRPS EN ISO 25239–4:2021	Zavarivanje trenjem sa mešanjem – Aluminijum – Deo 4: Specifikacija i kvalifikacija tehnologije zavarivanja				×					
199	SRPS EN ISO 25239–5:2021	Zavarivanje trenjem sa mešanjem – Aluminijum – Deo 5: Zahtevi kvaliteta i kontrolisanja				×					
200	SRPS EN 12732:2014	Gasna infrastruktura – Zavarivanje čeličnih cevovoda – Funkcionalni zahtevi	×	×	×	×	×		×		
201	SRPS EN ISO 9090:2017	Ispitivanje zaptivenosti opreme za gasno zavarivanje i srodne postupke			×					×	×
202	SRPS EN ISO 14114:2018	Oprema za gasno zavarivanje – Sistemi za snabdevanje acetilenom za zavarivanje, rezanje i srodne postupke – Opšti zahtevi			×					×	×
203	ISO/DIS 15615	Gas welding equipment – Acetylene manifold systems for welding, cutting and allied processes – Safety requirements in high-pressure devices			×					×	×
204	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			×					×	×
205	SRPS EN ISO 9012:2012	Oprema za gasno zavarivanje – Ručni gorionici sa usisavanjem vazduha – Specifikacije i ispitivanja			×					×	
206	SRPS EN ISO 5172:2012/A1:2013	Oprema za gasno zavarivanje – Gorionici za gasno zavarivanje, grejanje i rezanje – Specifikacije i ispitivanja – Izmena 1			×					×	
207	SRPS EN ISO 5172:2012/A2:2017	Oprema za gasno zavarivanje – Gorionici za gasno zavarivanje, grejanje i rezanje – Specifikacije i ispitivanja – Izmena 2			×					×	
208	SRPS EN ISO 5172:2012	Oprema za gasno zavarivanje – Gorionici za gasno zavarivanje, grejanje i rezanje – Specifikacije i ispitivanja			×					×	
209	SRPS EN 560:2018	Oprema za gasno zavarivanje – Priklučci creva za opremu za zavarivanje, rezanje i srodne postupke			×					×	×
210	ISO/TR 28821:2012	Gas welding equipment – Hose connections for equipment for welding, cutting and allied processes – Listing of connections which are either standardised or in common use			×					×	×
211	SRPS CEN/TR 13259:2014	Oprema za gasno zavarivanje – Industrijski ručni i mašinski gorionici za grejanje i lemljenje plamenom i srodne postupke			×					×	×
212	SRPS EN ISO 10225:2021	Gas welding equipment – Marking for equipment used for gas welding, cutting and allied processes (ISO 10225:2013)			×					×	×

Tabela 9.1 Pregled standarda

R.b.	Standard	Naziv	ISO 4063 –								
			1	2	3	4	5	6	7	8	9
213	SRPS EN ISO 9539:2012	Oprema za gasno zavarivanje – Materijali za opremu koja se koristi u gasnom zavarivanju, rezanju i srodnim postupcima			×					×	×
214	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			×					×	×
215	SRPS CEN/TR 15068:2017	Oprema za gasno zavarivanje – Merenje emitovane buke gorionika pri zavarivanju, rezanju, grejanju, tvrdom i mekom lemljenju – Metode merenja			×					×	×
216	SRPS EN ISO 5171:2019	Oprema za gasno zavarivanje – Merači pritiska koji se koriste kod zavarivanja, rezanja i srodnih postupaka			×					×	×
217	SRPS EN ISO 2503:2012/A1:2017	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) – Izmena 1			×					×	×
218	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)			×					×	×
219	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)			×					×	×
220	SRPS EN ISO 7291:2011/A1:2017	Oprema za gasno zavarivanje – Regulatori pritiska kod centralnog razvoda gasova za zavarivanje, rezanje i srodne postupke do 30 MPa (300 bar) – Izmena 1			×					×	×
221	SRPS EN 561:2009	Oprema za gasno zavarivanje – Brzorastavljivi priključci sa zapornim ventilom za zavarivanje, rezanje i srodne postupke			×					×	×
222	ISO 7289:2018	Gas welding equipment – Quick-action couplings with shut-off valves for welding, cutting and allied processes			×					×	×
223	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)			×					×	×
224	SRPS EN ISO 3821:2020	Oprema za gasno zavarivanje – Gumena creva koja se koriste za zavarivanje, rezanje i srodne postupke			×					×	×
225	SRPS EN ISO 5175-1:2018	Oprema za gasno zavarivanje – Bezbednosni uređaji – Deo 1: Uređaji sa ugrađenim hvatačem plamena (povratnog plamena)			×					×	×
226	SRPS EN ISO 5175-2:2018	Oprema za gasno zavarivanje – Bezbednosni uređaji – Deo 2: Uređaji bez ugrađenog hvatača plamena (povratnog plamena)			×					×	×

Tabela 9.1 Pregled standarda

R.b.	Standard	Naziv	ISO 4063 –								
			1	2	3	4	5	6	7	8	9
227	SRPS EN 1326:2012	Oprema za gasno zavarivanje – Mali kompleti za gasno tvrdo lemljenje i zavarivanje			×						×
228	ISO 14112:1996	Gas welding equipment – Small kits for gas brazing and welding			×						×
229	SRPS EN 1256:2012	Oprema za gasno zavarivanje – Specifikacija za spajanje creva za zavarivanje, rezanje i srodne postupke			×					×	×
230	ISO 8207:1996	Gas welding equipment – Specification for hose assemblies for equipment for welding, cutting and allied processes			×					×	×
231	ISO/PWI 8207	Gas welding equipment – Specification for hose assemblies for equipment for welding, cutting and allied processes			×					×	×
232	SRPS EN 1327:2009	Oprema za gasno zavarivanje – Termoplastična creva za zavarivanje i srodne postupke			×					×	×
233	ISO 12170:1996	Gas welding equipment – Thermoplastic hoses for welding and allied processes			×					×	×
234	SRPS EN ISO 15296:2018	Oprema za gasno zavarivanje – Terminologija – Termini koji se odnose na opremu za gasno zavarivanje			×					×	×
235	ISO/TS 20273:2017	Guidelines on weld quality in relationship to fatigue strength	×	×	×	×	×		×		×
236	ISO/TR 18786:2014	Health and safety in welding – Guidelines for risk assessment of welding fabrication activities	×	×	×	×	×	×	×	×	×
237	ISO/TR 13392:2014	Health and safety in welding and allied processes – Arc welding fume components	×								
238	SRPS EN ISO 21904–1:2020	Zdravlje i bezbednost u zavarivanju i srodnim postupcima – Oprema za uzimanje i odvajanje dima prilikom zavarivanja – Deo 1: Opšti zahtevi	×	×	×	×	×	×	×	×	×
239	SRPS EN ISO 21904–2:2020	Zdravlje i bezbednost u zavarivanju i srodnim postupcima – Oprema za uzimanje i odvajanje dima prilikom zavarivanja – Deo 2: Zahtevi za ispitivanje i označavanje efikasnosti odvajanja	×	×	×	×	×	×	×	×	×
240	SRPS EN ISO 21904–4:2017	Health and safety in welding and allied processes – Equipment for capture and separation of welding fume – Part 4: Determination of the minimum air volume flow rate of capture devices	×	×	×	×	×	×	×	×	×
241	SRPS EN ISO 15011–1:2011	Zdravlje i bezbednost pri zavarivanju i srodnim postupcima – Laboratorijske metode za uzorkovanje dima i gasova – Deo 1: Određivanje brzine emisije dima pri elektrolučnom zavarivanju i sakupljanje dima za analizu	×								

Tabela 9.1 Pregled standarda

R.b.	Standard	Naziv	ISO 4063 –								
			1	2	3	4	5	6	7	8	9
251	SRPS EN ISO 25980:2015	Zdravlje i bezbednost pri zavarivanju i srodnim postupcima – Providni paravani, trake i zaklони za elektrolučne postupke zavarivanja	×								
252	SRPS EN 14728:2019	Nepravilnosti u termoplastičnim varovima – Klasifikacija						×			
253	SRPS EN 16296:2013	Nepravilnosti u termoplastičnim zavarenim spojevima – Nivoi kvaliteta						×			
254	SRPS EN 746–1:2011	Oprema za termičke postupke u industriji – Deo 1: Opšti zahtevi za bezbednost opreme za termičke	×	×	×	×	×	×	×	×	×
255	SRPS EN 746–2:2011	Oprema za termičke postupke u industriji – Deo 2: Zahtevi za bezbednost sistema za sagorevanje i dovod goriva	×	×	×	×	×	×	×	×	×
256	SRPS EN 27931:2017	Izolacione kape i zatavarači na opremi za elektroporno zavarivanje		×							
257	SRPS C.T3.058:1985	Dodatni i pomoćni materijali za zavarivanje – Ispitivanje lemljivosti pomoću epruvete sa promenljivim zazorom									×
258	SRPS EN 10359:2016	Poluproizvodi dobijeni laserskim zavarivanjem – Tehnički zahtevi za isporuku					×				
259	SRPS EN ISO 15653:2018	Metalni materijali – Metoda ispitivanja pri određivanju kvazistatičke udarne žilavosti zavarenih spojeva	×	×	×	×	×		×		
260	SRPS EN 13100–1:2017	Ispitivanje bez razaranja zavarenih spojeva termoplastičnih poluproizvoda – Deo 1: Vizuelno ispitivanje						×			
261	ISO 24497–2:2020	Non-destructive testing – Metal magnetic memory – Part 2: Inspection of welded joints	×	×	×	×	×		×		
262	SRPS EN ISO 9712:2013	Ispitivanje bez razaranja – Kvalifikacija i sertifikacija osoblja za IBR	×	×	×	×	×	×	×		×
263	SRPS EN ISO 17405:2016	Ispitivanje bez razaranja – Ultrazvučno ispitivanje – Tehnika ispitivanja obloga dobijenih zavarivanjem, valjanjem i eksplozijom	×	×	×	×	×	×	×		
264	ISO/DIS 10675–1	Non-destructive testing of welds – Acceptance levels for radiographic testing – Part 1: Steel, nickel, titanium and their alloys	×	×	×	×	×		×		
265	SRPS EN ISO 10675–1:2017	Ispitivanje bez razaranja zavarenih spojeva – Nivoi prihvatljivosti za radiografsko ispitivanje – Deo 1: Čelik, nikl, titanijum i njihove legure	×	×	×	×	×		×		
266	ISO/DIS 10675–2	Non-destructive testing of welds – Acceptance levels for radiographic testing – Part 2: Aluminium and its alloys	×	×	×	×	×		×		
267	SRPS EN ISO 10675–2:2018	Ispitivanje bez razaranja zavarenih spojeva – Nivoi prihvatljivosti za radiografsko ispitivanje – Deo 2: Aluminium i njegove legure	×	×	×	×	×		×		
268	SRPS EN ISO 17643:2016	Ispitivanje zavarenih spojeva metodama bez razaranja – Ispitivanje zavarenih spojeva vrtložnim strujama putem analize kompleksne ravni	×	×	×	×	×		×		

Tabela 9.1 Pregled standarda

R.b.	Standard	Naziv	ISO 4063 –								
			1	2	3	4	5	6	7	8	9
269	SRPS EN ISO 17635:2017	Ispitivanje bez razaranja zavarenih spojeva – Opšta pravila za metalne materijale	x	x	x	x	x		x		
270	SRPS EN ISO 17638:2017	Ispitivanje bez razaranja zavarenih spojeva – Ispitivanje magnetskim česticama	x	x	x	x	x		x		
271	SRPS EN ISO 23278:2016	Ispitivanje zavarenih spojeva metodama bez razaranja – Ispitivanje magnetskim česticama – Nivoi prihvatljivosti	x	x	x	x	x		x		
272	SRPS EN ISO 23277:2016	Ispitivanje zavarenih spojeva metodama bez razaranja – Ispitivanje penetrantima – Nivoi prihvatljivosti	x	x	x	x	x		x		
273	SRPS EN ISO 19285:2017	Ispitivanje bez razaranja zavarenih spojeva – „Phased array” ultrazvučno ispitivanje (PAUT) – Nivoi prihvatljivosti	x	x	x	x	x		x		
274	ISO/DIS 4761	Non-destructive testing of welds – Phased array ultrasonic testing (PAUT) for thin-walled steel components – Acceptance levels	x	x	x	x	x		x		
275	SRPS EN ISO 17636–1:2014	Ispitivanje bez razaranja zavarenih spojeva – Radiografsko ispitivanje – Deo 1: Tehnike sa X i gama zracima pomoću filma	x	x	x	x	x		x		
276	SRPS EN ISO 17636–2:2014	Ispitivanje bez razaranja zavarenih spojeva – Radiografsko ispitivanje – Deo 2: Tehnike sa X i gama zracima pomoću digitalnih detektora	x	x	x	x	x		x		
277	SRPS EN ISO 15626:2019	Ispitivanje bez razaranja zavarenih spojeva – Tehnika ultrazvučne difrakcije (TOFD) – Nivoi prihvatljivosti	x	x	x	x	x		x		
278	SRPS EN ISO 11666:2018	Ispitivanje bez razaranja zavarenih spojeva – Ultrazvučno ispitivanje – Nivoi prihvatljivosti	x	x	x	x	x		x		
279	SRPS EN ISO 23279:2017	Ispitivanje bez razaranja zavarenih spojeva – Ultrazvučno ispitivanje – Karakterizacija indikacija u zavarenim spojevima	x	x	x	x	x		x		
280	SRPS EN ISO 17640:2019	Ispitivanje bez razaranja zavarenih spojeva – Ultrazvučno ispitivanje – Tehnike, nivoi ispitivanja i ocenjivanje	x	x	x	x	x		x		
281	SRPS EN ISO 22825:2017	Ispitivanje bez razaranja zavarenih spojeva – Ultrazvučno ispitivanje – Ispitivanje zavarenih spojeva austenitnih čelika i legura na bazi nikla	x	x	x	x	x		x		
282	SRPS EN ISO 13588:2019	Ispitivanje bez razaranja zavarenih spojeva – Ultrazvučno ispitivanje – Primena automatske "phased array" tehnike	x	x	x	x	x		x		
283	SRPS EN ISO 20601:2019	Ispitivanje bez razaranja zavarenih spojeva – Ultrazvučno ispitivanje – Primena automatske „phased array” tehnike na delove od čelika sa malom debljinom zida	x	x	x	x	x		x		
284	ISO 23864:2021	Non-destructive testing of welds – Ultrasonic testing – Use of automated total focusing technique (TFM) and related technologies	x	x	x	x	x		x		

Tabela 9.1 Pregled standarda

R.b.	Standard	Naziv	ISO 4063 –								
			1	2	3	4	5	6	7	8	9
285	SRPS EN ISO 10863:2020	Ispitivanje bez razaranja zavarenih spojeva – Ultrazvučno ispitivanje – Primena tehnike vremenske difrakcije (TOFD)	×	×	×	×	×		×		
286	SRPS EN ISO 17637:2017	Ispitivanje bez razaranja zavarenih spojeva – Vizuelno ispitivanje spojeva zavarenih topljenjem	×	×	×	×	×		×		
287	SRPS CEN ISO/TS 18166:2017	Numeričke simulacije zavarivanja – Izvođenje i dokumentacija	×	×	×	×	×		×		
288	SRPS EN 379:2011	Lična zaštita očiju – Automatski filtri za zavarivanje	×	×	×	×	×	×	×	×	×
289	SRPS EN 169:2008	Lična zaštita očiju – Filtri za zavarivanje i srodne tehnike – Zahtevi u pogledu koeficijenta transmisije i preporučena upotreba	×	×	×	×	×	×	×	×	×
290	SRPS EN ISO 20349–1:2017	Lična zaštitna oprema – Obuća koja štiti od rizika u livnicama i pri zavarivanju – Deo 1: Zahtevi i metode ispitivanja za zaštitu od rizika u livnicama	×	×	×	×	×	×	×	×	×
291	SRPS EN ISO 20349–1:2017/A1:2021	Lična zaštitna oprema – Obuća koja štiti od rizika u livnicama i pri zavarivanju – Deo 1: Zahtevi i metode ispitivanja za zaštitu od rizika u livnicama – Izmena 1	×	×	×	×	×	×	×	×	×
292	SRPS EN ISO 20349–2:2017	Lična zaštitna oprema – Obuća koja štiti od rizika u livnicama i pri zavarivanju – Deo 2: Zahtevi i metode ispitivanja za zaštitu od rizika pri zavarivanju i sličnim procesima	×	×	×	×	×	×	×	×	×
293	SRPS EN ISO 20349–2:2017/A1:2021	Lična zaštitna oprema – Obuća koja štiti od rizika u livnicama i pri zavarivanju – Deo 2: Zahtevi i metode ispitivanja za zaštitu od rizika pri zavarivanju i sličnim procesima – Izmena 1	×	×	×	×	×	×	×	×	×
294	ISO 13847:2013	Petroleum and natural gas industries – Pipeline transportation systems – Welding of pipelines	×	×	×	×	×		×		
295	SRPS EN 14163:2010	Industrija nafte i prirodnog gasa – Sistemi cevovodnog transporta – Zavarivanje cevovoda	×	×	×	×	×		×		
296	SRPS CEN/TS 16892:2016	Plastične mase – Zavarivanje termoplastičnih materijala – Specifikacija postupaka zavarivanja						×			
297	SRPS EN 13067:2020	Osoblje za zavarivanje plastičnih masa – Kvalifikacija zavarivača – Zavareni sklopovi od termoplasta						×			
298	SRPS CEN/TR 16862:2016	Nadzornik pri zavarivanju plastike – Zadatak, odgovornosti, znanje, veštine i kompetentnosti						×			
299	SRPS EN ISO 7285:2020	Pneumatski cilindri za mehanizovano zavarivanje sa više tačaka		×							
300	ISO 8167:1989	Projections for resistance welding		×							
301	SRPS EN ISO 11611:2016	Zaštitna odeća koja se upotrebljava prilikom zavarivanja i srodnih procesa	×	×	×	×	×	×	×	×	×
302	SRPS EN 12477:2007	Zaštitne rukavice za zavarivače	×	×	×	×	×	×	×	×	×
303	SRPS EN ISO 9606–2:2009	Kvalifikacioni ispit zavarivača – Zavarivanje topljenjem – Deo 2: Aluminijum i legure aluminijuma	×	×	×	×	×		×		

Tabela 9.1 Pregled standarda

R.b.	Standard	Naziv	ISO 4063 –								
			1	2	3	4	5	6	7	8	9
304	SRPS EN 287–6:2018	Ispit za kvalifikaciju zavarivača – Zavarivanje topljenjem – Deo 6: Liveno gvožđe	×	×	×	×	×		×		
305	ISO 9606–1:2012/Cor 1:2012	Qualification testing of welders – Fusion welding – Part 1: Steels – Technical Corrigendum 1	×	×	×	×	×		×		
306	ISO 9606–1:2012/Cor 2:2013	Qualification testing of welders – Fusion welding – Part 1: Steels – Technical Corrigendum 2	×	×	×	×	×		×		
307	SRPS EN ISO 9606–1:2017	Kvalifikaciono ispitivanje zavarivača – Zavarivanje topljenjem – Deo 1: Čelici	×	×	×	×	×		×		
308	SRPS EN ISO 15618–1:2017	Kvalifikacija zavarivača za podvodno zavarivanje – Deo 1: Hiperbarično mokro zavarivanje	×	×	×	×	×		×		
309	SRPS EN ISO 15618–2:2008	Kvalifikacija zavarivača za podvodno zavarivanje – Deo 2: Ronioci–zavarivači i operateri zavarivanja za hiperbarično suvo zavarivanje	×	×	×	×	×		×		
310	ISO/DIS 3834–1	Quality requirements for fusion welding of metallic materials – Part 1: Criteria for the selection of the appropriate level of quality requirements	×	×	×	×	×		×		
311	SRPS EN ISO 3834–1:2008	Zahtevi kvaliteta kod zavarivanja topljenjem metalnih materijala – Deo 1: Kriterijumi za izbor odgovarajućeg nivoa zahteva kvaliteta	×	×	×	×	×		×		
312	SRPS EN ISO 3834–2:2008	Zahtevi kvaliteta kod zavarivanja topljenjem metalnih materijala – Deo 2: Opšti zahtevi kvaliteta	×	×	×	×	×		×		
313	SRPS EN ISO 3834–3:2008	Zahtevi kvaliteta kod zavarivanja topljenjem metalnih materijala – Deo 3: Standardni zahtevi kvaliteta	×	×	×	×	×		×		
314	SRPS EN ISO 3834–4:2008	Zahtevi kvaliteta kod zavarivanja topljenjem metalnih materijala – Deo 4: Osnovni zahtevi kvaliteta	×	×	×	×	×		×		
315	ISO/DIS 3834–5	Quality requirements for fusion welding of metallic materials – Part 5: Documents with which it is necessary to conform to claim conformity to the quality requirements of ISO 3834–2, ISO 3834–3 or ISO 3834–4	×	×	×	×	×		×		
316	SRPS EN ISO 3834–5:2017	Zahtevi za kvalitet koji se odnose na zavarivanje topljenjem metalnih materijala – Deo 5: Dokumenti sa kojima je neophodno usaglasiti tvrdnju o usaglašenosti sa zahtevima za kvalitet ISO 3834–2, ISO 3834–3 ili ISO 3834–4	×	×	×	×	×		×		
317	SRPS CEN ISO/TR 3834–6:2009	Zahtevi kvaliteta kod zavarivanja topljenjem metalnih materijala – Deo 6: Uputstva za primenu ISO 3834	×	×	×	×	×		×		
318	SRPS EN ISO 14554–1:2014	Zahtevi za kvalitet zavarivanja – Elektrootporno zavarivanje metalnih materijala – Deo 1: Sveobuhvatni zahtevi za kvalitet		×							
319	SRPS EN ISO 14554–2:2014	Zahtevi za kvalitet zavarivanja – Elektrootporno zavarivanje metalnih materijala – Deo 2: Elementarni zahtevi za kvalitet		×							

Tabela 9.1 Pregled standarda

R.b.	Standard	Naziv	ISO 4063 –								
			1	2	3	4	5	6	7	8	9
320	SRPS EN 16771:2017	Primene na železnici – Infrastruktura – Aluminotermijsko zavarivanje šina sa žlebom							×		
321	SRPS EN 14587–1:2019	Primene na železnici – Infrastruktura – Sučeono zavarivanje novih šina varničenjem – Deo 1: Zavarivanje šina od čelika kvaliteta R220, R260, R260Mn, R320Cr, R350HT, R350LHT, R370CrHT i R400HT u stacionarnom postrojenju		×							
322	SRPS EN 14730–1:2017	Primene na železnici – Kolosek – Aluminotermijsko zavarivanje šina – Deo 1: Odobrenje postupka zavarivanja							×		
323	SRPS EN 14730–2:2018	Primene na železnici – Kolosek – Aluminotermijsko zavarivanje šina – Deo 2: Kvalifikacija zavarivača za postupak aluminotermijskog zavarivanja, sertifikacija izvođača radova i prihvatanje varova							×		
324	SRPS EN 14587–2:2012	Primene na železnici – Kolosek – Sučeono zavarivanje šina varničenjem – Deo 2: Sučeono zavarivanje novih šina od čelika kvaliteta R220, R260, R260Mn i R350HT varničenjem pomoću mobilne mašine za zavarivanje na mestima izvan stacionarnog postrojenja za zavarivanje		×							
325	SRPS EN 14587–3:2013	Primene na železnici – Kolosek – Sučeono zavarivanje šina varničenjem – Deo 3: Zavarivanje novih šina sa srcem skretnice		×							
326	SRPS EN 16725:2017	Primene na železnici – Kolosek – Održavanje i popravka manganskih srca	×	×	×	×	×		×		
327	SRPS EN 15594:2011	Primene na železnici – Kolosek – Reparacija šinskih profila elektrolučnim navarivanjem	×								
328	SRPS EN 15085–1:2014	Primene na železnici – Zavarivanje konstrukcija železničkih vozila i njihovih komponenata – Deo 1: Opšte	×	×	×	×	×		×		
329	SRPS EN 15085–2:2021	Primene na železnici – Zavarivanje konstrukcija železničkih vozila i njihovih komponenti – Deo 2: Zahtevi za zavarivanje za proizvođače	×	×	×	×	×		×		
330	SRPS EN 15085–3:2011	Primene na železnici – Zavarivanje konstrukcija železničkih vozila i njihovih komponenata – Deo 3: Konstrukcioni zahtevi	×	×	×	×	×		×		
331	SRPS EN 15085–4:2011	Primene na železnici – Zavarivanje konstrukcija železničkih vozila i njihovih komponenata – Deo 4: Zahtevi u proizvodnji	×	×	×	×	×		×		
332	SRPS EN 15085–5:2011	Primene na železnici – Zavarivanje konstrukcija železničkih vozila i njihovih komponenata – Deo 5: Kontrola, ispitivanje i dokumentacija	×	×	×	×	×		×		
333	SRPS N.H9.201:1978	Ispravljači za elektrolučno zavarivanje – Opšti tehnički uslovi	×								
334	SRPS EN ISO 14324:2011	Elektrotoporno tačkasto zavarivanje – Ispitivanje sa razaranjem – Metoda ispitivanja zamorom tačkasto zavarenih spojeva		×							

Tabela 9.1 Pregled standarda

R.b.	Standard	Naziv	ISO 4063 –								
			1	2	3	4	5	6	7	8	9
335	SRPS EN ISO 5829:2020	Elektrootporno tačkasto zavarivanje – Adapteri za elektrode, ženski konus 1:10		×							
336	SRPS EN ISO 5183–2:2012	Elektrootporno tačkasto zavarivanje – Adapteri elektroda, muški konus 1:10 – Deo 2: Paralelni držač za fiksiranje krajnjeg uboda elektrode		×							
337	SRPS EN ISO 8430–1:2017	Elektrootporno tačkasto zavarivanje – Držači elektroda – Deo 1: Fiksiranje konusa 1:10		×							
338	SRPS EN ISO 8430–2:2017	Elektrootporno tačkasto zavarivanje – Držači elektroda – Deo 2: Fiksiranje Morzeovog konusa		×							
339	SRPS EN ISO 8430–3:2017	Elektrootporno tačkasto zavarivanje – Držači elektroda – Deo 3: Fiksiranje paralelnih držača i krajeva pod pritiskom		×							
340	SRPS EN ISO 5830:2020	Elektrootporno tačkasto zavarivanje – Muški vrhovi elektroda		×							
341	SRPS EN 29313:2016	Oprema za tačkasto elektrootporno zavarivanje – Rashladni vodovi		×							
342	SRPS EN ISO 18594:2012	Elektrootporno tačkasto, bradavičasto i šavno zavarivanje – Metoda za određivanje prelazne otpornosti aluminijumskog i čeličnog materijala		×							
343	SRPS EN ISO 18592:2020	Elektrootporno zavarivanje – Ispitivanje sa razaranjem zavarenih spojeva – Metoda ispitivanja zamorom epruveta sa više tačkastih zavarenih spojeva		×							
344	SRPS EN ISO 14272:2017	Elektrootporno zavarivanje – Ispitivanje sa razaranjem zavarenih spojeva – Mere epruvete i procedura za ispitivanje poprečnim zatezanjem elektrootporno tačkastih i ispučeno bradavičastih zavarenih spojeva		×							
345	SRPS EN ISO 14323:2015	Elektrootporno zavarivanje – Ispitivanje razaranjem – Mere epruveta i procedura za udarno ispitivanje smicanjem i poprečnim zatezanjem elektrootporno–tačkastih i ispučeno – bradavičastih zavarenih spojeva		×							
346	SRPS EN ISO 14270:2017	Elektrootporno zavarivanje – Ispitivanje sa razaranjem zavarenih spojeva – Mere epruvete i procedura za mehanizovano ispitivanje ljuštenjem elektrootporno tačkastih, šavnih i ispučeno bradavičastih zavarenih spojeva		×							
347	SRPS EN ISO 14273:2017	Elektrootporno zavarivanje – Ispitivanje sa razaranjem zavarenih spojeva – Mere epruvete i procedura za ispitivanje smicanjem elektrootporno tačkastih, šavnih i ispučeno bradavičastih zavarenih spojeva		×							
348	SRPS EN ISO 14329:2011	Elektrootporno zavarivanje – Ispitivanje sa razaranjem – Tipovi loma i geometrijsko merenje elektrootporno tačkastih, šavnih i bradavičasto zavarenih spojeva		×							

Tabela 9.1 Pregled standarda

R.b.	Standard	Naziv	ISO 4063 –								
			1	2	3	4	5	6	7	8	9
349	SRPS EN ISO 17654:2012	Elektrootporno zavarivanje – Ispitivanje sa razaranjem zavarenih spojeva – Ispitivanje pritiskom šavnih elektrootporno zavarenih spojeva		×							
350	SRPS EN ISO 17653:2013	Elektrootporno zavarivanje – Ispitivanje sa razaranjem zavarenih spojeva metalnih materijala – Torziono ispitivanje elektrootporno tačkasto zavarenog spoja		×							
351	SRPS EN ISO 8167:2017	Ispupčenja prilikom elektrootpornog zavarivanja		×							
352	SRPS EN ISO 20168:2020	Elektrootporno zavarivanje – Konusi za zabavljanje za držače elektrode i vrhove elektroda		×							
353	SRPS EN ISO 5182:2017	Elektrootporno zavarivanje – Materijali za elektrode i pomoćnu opremu		×							
354	ISO/TR 23413:2019	Resistance welding – Overview of standards for resistance welding			×						
355	SRPS EN ISO 16432:2009	Elektrootporno zavarivanje – Postupak bradavičastog zavarivanja niskolegiranih čelika sa prevlakom i bez prevlake, korišćenjem ispupčenih bradavica		×							
356	SRPS EN ISO 16433:2009	Elektrootporno zavarivanje – Postupak šavnog zavarivanja niskolegiranih čelika sa prevlakom i bez prevlake		×							
357	SRPS EN ISO 14373:2015	Elektrootporno zavarivanje – Procedura za tačkasto zavarivanje niskougljeničnih čelika sa prevlakom i bez nje		×							
358	SRPS EN ISO 14327:2011	Elektrootporno zavarivanje – Procedura za određivanje zavarljivosti nastavaka za elektrootporno tačkasto, bradavičasto i šavno zavarivanje		×							
359	SRPS EN ISO 669:2017	Elektrootporno zavarivanje – Oprema za elektrootporno zavarivanje – Mehanički i električni zahtevi		×							
360	SRPS EN ISO 5821:2011	Elektrootporno zavarivanje – Vrhovi elektrode za tačkasto zavarivanje		×							
361	ISO 18595:2021	Resistance welding – Spot welding of aluminium and aluminium alloys – Weldability, welding and testing		×							
362	SRPS EN ISO 18595:2012	Elektrootporno zavarivanje – Tačkasto zavarivanje aluminijuma i njegovih legura – Zavarljivost, zavarivanje i ispitivanje		×							
363	SRPS EN ISO 10447:2015	Elektrootporno zavarivanje – Ispitivanje ljuštenjem i rezanjem dletom tačkasto i bradavičasto zavarenih spojeva		×							

Tabela 9.1 Pregled standarda

R.b.	Standard	Naziv	ISO 4063 –								
			1	2	3	4	5	6	7	8	9
364	SRPS EN ISO 14271:2018	Elektrootporno zavarivanje – Ispitivanje tvrdoće po Vickersu (malo opterećenje i mikrotvrdoća) elektrootporno tačkastih, bradavičastih i šavnih zavarenih spojeva		×							
365	SRPS EN ISO 17677–1:2020	Elektrootporno zavarivanje – Rečnik – Deo 1: Tačkasto, bradavičasto i šavno zavarivanje		×							
366	SRPS EN ISO 18278–1:2017	Elektrootporno zavarivanje – Zavarljivost – Deo 1: Opšti zahtevi za vrednovanje zavarljivosti za elektrootporno tačkasto, šavno i bradavičasto zavarivanje metalnih materijala		×							
367	SRPS EN ISO 18278–2:2017	Elektrootporno zavarivanje – Zavarljivost – Deo 2: Procedure za vrednovanje zavarljivosti pri tačkastom zavarivanju		×							
368	SRPS EN ISO 18278–3:2018	Elektrootporno zavarivanje – Zavarljivost – Deo 3: Procedure evaluacije zavarljivosti pri spajanju tačkastim zavarivanjem		×							
369	SRPS EN ISO 17657–1:2012	Elektrootporno zavarivanje – Merenje struje zavarivanja za elektrootporno zavarivanje – Deo 1: Uputstvo za merenje		×							
370	SRPS EN ISO 17657–2:2012	Elektrootporno zavarivanje – Merenje struje zavarivanja za elektrootporno zavarivanje– Deo 2: Aparat za merenje jačine struje zavarivanja sa strujno osetljivim namotajem		×							
371	SRPS EN ISO 17657–3:2012	Elektrootporno zavarivanje – Merenje struje zavarivanja za elektrootporno zavarivanje– Deo 3: Strujno osetljivi namotaj		×							
372	SRPS EN ISO 17657–4:2012	Elektrootporno zavarivanje – Merenje struje zavarivanja za elektrootporno zavarivanje– Deo 4: Sistem kalibracije		×							
373	SRPS EN ISO 17657–5:2012	Elektrootporno zavarivanje – Merenje struje zavarivanja za elektrootporno zavarivanje– Deo 5: Verifikacija sistema merenja jačine struje zavarivanja		×							
374	SRPS EN ISO 5183–1:2012	Elektrootporno zavarivanje – Adapteri elektroda, muški konusi 1:10 – Deo 1: Konično fiksiranje, konus 1:10		×							
375	ISO/DIS 1089	Resistance welding equipment – Electrode taper fits for spot welding equipment – Dimensions		×							
376	SRPS EN ISO 9312:2014	Oprema za elektrootporno zavarivanje – Izolovani klinovi koji se koriste za podizanje elektrode		×							
377	SRPS EN 62135–1:2017	Oprema za elektrootporno zavarivanje – Deo 1: Bezbednosni zahtevi za projektovanje, proizvodnju i instalisanje		×							
378	SRPS EN 62135–2:2017	Oprema za elektrootporno zavarivanje – Deo 2: Zahtevi za elektromagnetsku kompatibilnost (EMC)		×							

[illegible]

Tabela 9.1 Pregled standarda

R.b.	Standard	Naziv	ISO 4063 –								
			1	2	3	4	5	6	7	8	9
397	SRPS EN ISO 9455–16:2019	Topitelji za meko lemljenje – Metode ispitivanja – Deo 16: Ispitivanje efikasnosti topitelja, metoda ujednačenosti kvašenja									×
398	SRPS EN ISO 9455–17:2012	Topitelji za meko lemljenje – Metode ispitivanja – Deo 17: Kombinovano ispitivanje površinske otpornosti na izolaciju i ispitivanje pomeranja ostataka topitelja usled elektrohemijskog delovanja									×
399	SRPS EN ISO 9455–2:2012	Topitelji za meko lemljenje – Metode ispitivanja – Deo 2: Određivanje neisparljivih materija, ebulliometrijska metoda									×
400	SRPS EN ISO 9455–3:2021	Topitelji za meko lemljenje – Metode ispitivanja – Deo 3: Određivanje vrednosti kiselosti i vizuelne metode titracije									×
401	SRPS EN ISO 9455–5:2021	Topitelji za meko lemljenje – Metode ispitivanja – Deo 5: Ispitivanje preko bakarnog ogledala									×
402	SRPS EN ISO 9455–6:2012	Topitelji za meko lemljenje – Metode ispitivanja – Deo 6: Određivanje i otkrivanje sadržaja halida (izuzev fluorida)									×
403	ISO 9455–8:1991	Soft soldering fluxes – Test methods – Part 8: Determination of zinc content									×
404	SRPS EN 29455–8:2017	Topitelji za meko lemljenje – Metode ispitivanja – Deo 8: Određivanje sadržaja cinka									×
405	ISO 9455–9:2020	Soft soldering fluxes – Test methods – Part 9: Determination of ammonia content									×
406	SRPS EN ISO 9455–9:2017	Topitelji za meko lemljenje – Metode ispitivanja – Deo 9: Određivanje sadržaja amonijaka									×
407	SRPS EN 16602–70–38:2019	Obezbeđenje svemirskih proizvoda – Lemljenje visoke pouzdanosti za površinske i mešovite tehnologije									×
408	SRPS EN 16602–70–08:2016	Obezbeđenje svemirskih proizvoda – Ručno lemljenje visokopouzdanih električnih spojeva									×
409	SRPS EN 16602–70–07:2016	Obezbeđenje svemirskih proizvoda – Verifikacija i odobrenje za automatsko mašinsko talasno lemljenje									×
410	SRPS EN 16602–70–39:2019	Obezbeđenje svemirskih proizvoda – Zavarivanje metalnih materijala za letaćku opremu	×	×	×	×	×		×		
411	SRPS EN ISO 15607:2017	Specifikacija i kvalifikacija tehnologija zavarivanja metalnih materijala – Opšta pravila	×	×	×	×	×		×		
412	SRPS EN ISO 15613:2009	Specifikacija i kvalifikacija tehnologije zavarivanja metalnih materijala – Kvalifikacija tehnologije zavarivanja na bazi ispitivanja pre proizvodnje	×	×	×	×	×		×		
413	SRPS EN ISO 15611:2015	Specifikacija i kvalifikacija tehnologija zavarivanja metalnih materijala – Kvalifikacija na osnovu prethodnog iskustva u zavarivanju	×	×	×	×	×		×		
414	SRPS EN ISO 15609–4:2012	Specifikacija i kvalifikacija tehnologije zavarivanja metalnih materijala — Specifikacija tehnologije zavarivanja — Deo 4: Zavarivanje laserom					×				

Tabela 9.1 Pregled standarda

R.b.	Standard	Naziv	ISO 4063 –								
			1	2	3	4	5	6	7	8	9
415	SRPS EN ISO 15612:2018	Specifikacija i kvalifikacija tehnologije zavarivanja metalnih materijala – Kvalifikacija prihvatanjem standardne tehnologije zavarivanja	×	×	×	×	×		×		
416	SRPS EN ISO 15609–1:2018	Specifikacija i kvalifikacija tehnologije zavarivanja metalnih materijala – Specifikacija tehnologije zavarivanja – Deo 1: Elektrolučno zavarivanje	×								
417	SRPS EN ISO 15609–2:2020	Specifikacija i kvalifikacija tehnologije zavarivanja metalnih materijala – Specifikacija tehnologije zavarivanja – Deo 2: Gasno zavarivanje			×						
418	SRPS EN ISO 15609–5:2012	Specifikacija i kvalifikacija tehnologije zavarivanja metalnih materijala – Specifikacija tehnologije zavarivanja – Deo 5: Elektrootporno zavarivanje		×							
419	SRPS EN ISO 15609–6:2014	Specifikacija i kvalifikacija tehnologije zavarivanja metalnih materijala – Specifikacija tehnologije zavarivanja – Deo 6: Hibridno zavarivanje laserom					×				
420	SRPS EN ISO 15614–1:2017	Specifikacija i kvalifikacija tehnologije zavarivanja metalnih materijala – Kvalifikacija tehnologije zavarivanja – Deo 1: Elektrolučno i gasno zavarivanje čelika i elektrolučno zavarivanje nikla i legura nikla	×		×						
421	SRPS EN ISO 15614–1:2017/A1:2020	Specifikacija i kvalifikacija tehnologije zavarivanja metalnih materijala – Kvalifikacija tehnologije zavarivanja – Deo 1: Elektrolučno i gasno zavarivanje čelika i elektrolučno zavarivanje nikla i legura nikla – Izmena 1	×		×						
422	SRPS EN ISO 15614–10:2008	Specifikacija i kvalifikacija tehnologije zavarivanja metalnih materijala – Kvalifikacija tehnologije zavarivanja – Deo 10: Zavarivanje pod natpritiskom u kesonima	×	×	×	×	×		×		
423	SRPS EN ISO 15614–11:2008	Specifikacija i kvalifikacija tehnologije zavarivanja metalnih materijala – Kvalifikacija tehnologije zavarivanja – Deo 11: Zavarivanje elektronskim snopom i laserom					×				
424	SRPS EN ISO 15614–12:2015	Specifikacija i kvalifikacija tehnologije zavarivanja metalnih materijala – Kvalifikacija tehnologije zavarivanja – Deo 12: Tačkasto, šavno i bradavičasto zavarivanje		×							
425	SRPS EN ISO 15614–13:2013	Specifikacija i kvalifikacija tehnologije zavarivanja metalnih materijala – Kvalifikacija tehnologije zavarivanja – Deo 13: Čeono (elektrootporno sučeono) zavarivanje pritiskom i zavarivanje varničenjem		×							
426	SRPS EN ISO 15614–14:2014	Specifikacija i kvalifikacija tehnologije zavarivanja metalnih materijala – Ispitivanje tehnologije zavarivanja – Deo 14: Hibridno zavarivanje čelika, nikla i legura nikla laserom i električnim lukom	×				×				

Tabela 9.1 Pregled standarda

R.b.	Standard	Naziv	ISO 4063 –								
			1	2	3	4	5	6	7	8	9
427	ISO 15614–2:2005/Cor 1:2005	Specification and qualification of welding procedures for metallic materials – Welding procedure test – Part 2: Arc welding of aluminium and its alloys – Technical Corrigendum 1	×								
428	ISO 15614–2:2005/Cor 2:2009	Specification and qualification of welding procedures for metallic materials – Welding procedure test – Part 2: Arc welding of aluminium and its alloys – Technical Corrigendum 2	×								
429	SRPS EN ISO 15614–2:2008	Specifikacija i kvalifikacija tehnologije zavarivanja metalnih materijala – Kvalifikacija tehnologije zavarivanja – Deo 2: Elektrolučno zavarivanje aluminijuma i njegovih legura	×								
430	SRPS EN ISO 15614–2:2008/AC:2013	Specifikacija i kvalifikacija tehnologije zavarivanja metalnih materijala – Kvalifikacija tehnologije zavarivanja – Deo 2: Elektrolučno zavarivanje aluminijuma i njegovih legura	×								
431	SRPS EN ISO 15614–3:2009	Specifikacija i kvalifikacija tehnologije zavarivanja metalnih materijala – Kvalifikacija tehnologije zavarivanja – Deo 3: Zavarivanje topljenjem nelegiranog i niskolegiranog livenog gvožđa	×	×	×	×	×		×		
432	ISO 15614–4:2005/Cor 1:2007	Specification and qualification of welding procedures for metallic materials – Welding procedure test – Part 4: Finishing welding of aluminium castings – Technical Corrigendum 1	×	×	×	×	×		×		
433	SRPS EN ISO 15614–4:2008	Specifikacija i kvalifikacija tehnologije zavarivanja metalnih materijala – Kvalifikacija tehnologije zavarivanja – Deo 4: Popravka zavarivanjem aluminijumskih odlivaka	×	×	×	×	×		×		
434	SRPS EN ISO 15614–4:2008/AC:2009	Specifikacija i kvalifikacija tehnologije zavarivanja metalnih materijala – Kvalifikacija tehnologije zavarivanja – Deo 4: Popravka zavarivanjem aluminijumskih odlivaka	×	×	×	×	×		×		
435	SRPS EN ISO 15614–5:2008	Specifikacija i kvalifikacija tehnologije zavarivanja metalnih materijala – Kvalifikacija tehnologije zavarivanja – Deo 5: Elektrolučno zavarivanje titana, cirkonijuma i njihovih legura	×								
436	SRPS EN ISO 15614–6:2008	Specifikacija i kvalifikacija tehnologije zavarivanja metalnih materijala – Kvalifikacija tehnologije zavarivanja – Deo 6: Elektrolučno i gasno zavarivanje bakra i njegovih legura	×		×						
437	SRPS EN ISO 15614–7:2020	Specifikacija i kvalifikacija tehnologije zavarivanja metalnih materijala – Kvalifikacija tehnologije zavarivanja – Deo 7: Navarivanje	×	×	×	×	×		×		
438	SRPS EN ISO 15614–8:2017	Specifikacija i kvalifikacija tehnologije zavarivanja metalnih materijala – Kvalifikacija tehnologije zavarivanja – Deo 8: Zavarivanje cevi za cevnu ploču	×	×	×	×	×		×		

Tabela 9.1 Pregled standarda

R.b.	Standard	Naziv	ISO 4063 –								
			1	2	3	4	5	6	7	8	9
439	ISO/NP 15614–9	Specification and qualification of welding procedures for metallic materials – Welding procedure test – Part 9: Underwater hyperbaric wet welding	×	×	×	×	×		×		
440	SRPS EN ISO 15609–3:2009	Specifikacija i kvalifikacija tehnologije zavarivanja metalnih materijala – Specifikacija tehnologije zavarivanja – Deo 3: Zavarivanje elektronskim snopom					×				
441	SRPS EN ISO 11970:2016	Specifikacija i odobravanje postupaka zavarivanja u proizvodnji zavarenih čeličnih odlivaka	×	×	×	×	×		×		
442	SRPS EN 25827:2012	Tačkasto zavarivanje – Zadnji delovi i steg elektroda		×							
443	SRPS EN 25822:2012	Oprema za tačkasto zavarivanje – Veličine konusnih zatvarača i prstenova		×							
444	SRPS EN 25184:2015	Ravne elektrode za elektrootporno tačkasto zavarivanje		×							
445	SRPS EN 12811–2:2009	Privremena radna oprema – Deo 2: Informacije o materijalima	×	×	×	×	×	×	×	×	×
446	SRPS CEN/TR 14599:2009	Termini i definicije u zavarivanju koji se odnose na EN 1792	×	×	×	×	×	×	×	×	×
447	SRPS EN 12814–3:2014	Ispitivanje zavarenih spojeva termoplastičnih poluproizvoda – Deo 3: Ispitivanje puzanja pri zatezanju						×			
448	SRPS EN 12814–1:2011	Ispitivanje zavarenih spojeva termoplastičnih poluproizvoda – Deo 1: Ispitivanje savijanja						×			
449	SRPS EN 12814–2:2021	Ispitivanje zavarenih spojeva termoplastičnih poluproizvoda – Deo 2: Ispitivanje zatezanjem						×			
450	SRPS EN 12814–5:2012	Ispitivanje zavarenih spojeva termoplastičnih poluproizvoda – Deo 5: Makroskopsko ispitivanje						×			
451	SRPS EN 12814–6:2012	Ispitivanje zavarenih spojeva termoplastičnih poluproizvoda – Deo 6: Ispitivanje zatezanjem na niskoj temperaturi						×			
452	SRPS EN 12814–7:2012	Ispitivanje zavarenih spojeva termoplastičnih poluproizvoda – Deo 7: Ispitivanje zatezanjem ispitnih uzoraka sa suženjem						×			
453	SRPS EN 50504:2009	Validacija opreme za elektrolučno zavarivanje	×								
454	SRPS EN 2574:2012	Vazduhoplovstvo – Zavareni spojevi – Informacije na crtežima	×	×	×	×	×	×	×		
455	SRPS EN ISO 8205–1:2011	Vodeno hlađeni sekundarno vezani kablovi za elektrootporno zavarivanje–Deo 1: Mere i zahtevi za dvoprovodničke kablove za povezivanje		×							
456	SRPS EN ISO 8205–2:2011	Vodeno hlađeni sekundarno vezani kablovi za elektrootporno zavarivanje–Deo 2: Mere i zahtevi za jednovodničke kablove za povezivanje		×							
457	SRPS EN ISO 8205–3:2013	Vodeno hlađeni, sekundarno vezani kablovi za elektrootporno zavarivanje – Deo 3: Zahtevi za ispitivanja		×							

Tabela 9.1 Pregled standarda

R.b.	Standard	Naziv	ISO 4063 –								
			1	2	3	4	5	6	7	8	9
458	ISO/TR 581:2005	Weldability – Metallic materials – General principles	×	×	×	×	×	×	×		×
459	SRPS EN ISO 14744–1:2011	Zavarivanje – Kontrola prihvatljivosti mašina za zavarivanje elektronskim snopom – Deo 1: Principi i uslovi prihvatljivosti					×				
460	SRPS EN ISO 14744–2:2015	Zavarivanje – Kriterijumi kontrolisanja aparata za zavarivanje elektronskim snopom – Deo 2: Merenje karakteristika ubrzavajućeg napona					×				
461	SRPS EN ISO 14744–3:2011	Zavarivanje – Kontrola prihvatljivosti mašina za zavarivanje elektronskim snopom– Deo 3: Merenje strujnih karakteristika snopa					×				
462	SRPS EN ISO 14744–4:2011	Zavarivanje – Kontrola prihvatljivosti mašina za zavarivanje elektronskim snopom– Deo 4: Merenje brzine zavarivanja					×				
463	SRPS EN ISO 14744–5:2011	Zavarivanje – Kontrola prihvatljivosti mašina za zavarivanje elektronskim snopom– Deo 5: Merenje izlazne sigurnosti					×				
464	SRPS EN ISO 14744–6:2011	Zavarivanje – Kontrola prihvatljivosti mašina za zavarivanje elektronskim snopom– Deo 6: Merenje stabilnosti položaja tačke					×				
465	SRPS EN ISO 14555:2017	Zavarivanje – Elektrolučno zavarivanje vijaka na metalnim materijalima							×		
466	SRPS EN ISO 10042:2018	Zavarivanje – Elektrolučno zavarivanje aluminijuma i njegovih legura – Nivoi kvaliteta nepravilnosti	×								
467	SRPS EN 1708–2:2019	Zavarivanje – Osnovni detalji zavarenih čeličnih spojeva – Deo 2: Komponente bez unutrašnjeg pritiska	×	×	×	×	×	×	×		
468	SRPS EN 1708–3:2012	Zavarivanje – Osnovni detalji zavarenih čeličnih spojeva – Deo 3: Komponente pod pritiskom sa plakaturom, puferom i sa prevlakom (trakama)	×	×	×	×	×	×	×		
469	SRPS EN 1708–1:2013	Zavarivanje – Osnovni detalji zavarenih čeličnih spojeva – Deo 1: Komponente pod pritiskom	×	×	×	×	×	×	×		
470	SRPS EN ISO 17662:2017	Zavarivanje – Kalibracija, verifikacija i validacija opreme koja se koristi pri zavarivanju, uključujući i pomoćne aktivnosti	×	×	×	×	×	×	×		
471	SRPS CEN ISO/TR 17844:2008	Zavarivanje – Upoređivanje standardizovanih metoda sprečavanja hladnih prslina	×	×	×	×	×	×	×		
472	SRPS CEN/TR 15135:2008	Zavarivanje – Konceptija spoja i ispitivanje bez razaranja zavarenih spojeva	×	×	×	×	×	×	×		
473	SRPS EN ISO 8249:2018	Zavarivanje – Određivanje feritnog broja (FN) u metalu šava na austenitnim i dupleks austenitno–feritnim Cr–Ni nerđajućim čelicima	×	×	×	×	×		×		
474	SRPS EN ISO 13919–2:2011	Zavarivanje – Zavareni spojevi izvedeni elektronskim i laserskim snopom– Uputstvo o kvalitativnim nivoima nepravilnosti – Deo 2: Aluminijum i njegove zavarljive legure					×				

Tabela 9.1 Pregled standarda

R.b.	Standard	Naziv	ISO 4063 –								
			1	2	3	4	5	6	7	8	9
475	SRPS EN ISO 15620:2019	Zavarivanje – Zavarivanje trenjem metalnih materijala				×					
476	SRPS EN ISO 5817:2015	Zavarivanje – Spojevi zavareni topljenjem na čeliku, niklu, titanu i njihovim legurama (isključujući zavarivanje snopom) – Nivoi kvaliteta nepravilnosti	×	×	×	×	×		×		
477	SRPS EN ISO 13920:2008	Zavarivanje – Opšte tolerancije kod zavarenih konstrukcija – Mere za dužine i uglove – Oblik i položaj	×	×	×	×	×	×	×		
478	SRPS CEN ISO/TR 20173:2018	Zavarivanje – Sistemi grupisanja materijala – Američki materijali	×	×	×	×	×	×	×		
479	SRPS CEN ISO/TR 20172:2011	Zavarivanje – Sistemi grupisanja materijala – Evropski materijali	×	×	×	×	×	×	×		
480	SRPS CEN ISO/TR 20174:2021	Zavarivanje – Sistemi grupisanja materijala – Japanski materijali	×	×	×	×	×	×	×		
481	SRPS CEN ISO/TR 15608:2017	Zavarivanje – Uputstvo za sistem grupisanja metalnih materijala	×	×	×	×	×		×		
482	SRPS EN ISO 17658:2017	Zavarivanje – Nepravilnosti pri gasnom rezanju, rezanju laserskim snopom i plazmom – Terminologija								×	
483	SRPS EN ISO 12932:2014	Zavarivanje – Hibridno zavarivanje čelika, nikla i legura nikla laserom i električnim lukom – Nivoi kvaliteta nepravilnosti	×				×				
484	SRPS EN ISO 13916:2018	Zavarivanje – Uputstvo za merenje temperature predgrevanja, međuprolazne temperature i temperature održavanja predgrevanja	×	×	×	×	×	×	×		×
485	SRPS CEN/TR 15235:2008	Zavarivanje – Metode za ocenjivanje nepravilnosti u metalnim konstrukcijama	×	×	×	×	×		×		
486	SRPS EN ISO 17279–1:2018	Zavarivanje – Mikrosparanje visokotemperaturnih superprovodnika druge generacije – Deo 1: Opšti zahtevi za postupak	×	×	×	×	×		×		
487	SRPS EN ISO 17279–2:2018	Zavarivanje – Mikrosparanje visokotemperaturnih superprovodnika druge generacije – Deo 2: Kvalifikacija osoblja za zavarivanje i ispitivanje	×	×	×	×	×		×		
488	SRPS EN ISO 17279–3:2020	Zavarivanje – Mikrosparanje visokotemperaturnih superprovodnika druge generacije – Deo 3: Metode ispitivanja spojeva	×	×	×	×	×		×		
489	SRPS EN 1792:2012	Zavarivanje – Višejezična lista termina za zavarivanje i srodne postupke	×	×	×	×	×	×	×	×	×
490	SRPS EN ISO 17659:2012	Zavarivanje – Višejezični termini za zavarene spojeve sa ilustracijama	×	×	×	×	×	×	×		
491	SRPS CEN ISO/TR 14745:2016	Zavarivanje – Parametri termičke obrade posle zavarivanja na čelicima	×	×	×	×	×		×		
492	SRPS EN ISO 17663:2011	Zavarivanje – Zahtevi kvaliteta pri termičkoj obradi vezanoj za zavarivanje i srodne postupke	×	×	×	×	×	×	×	×	×
493	SRPS EN 1011–6:2019	Zavarivanje – Preporuke za zavarivanje metalnih materijala – Deo 6: Zavarivanje laserom					×				

Tabela 9.1 Pregled standarda

R.b.	Standard	Naziv	ISO 4063 –								
			1	2	3	4	5	6	7	8	9
529	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	×		×		×				
530	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	×								
531	ISO/TR 25901–1:2016	Welding and allied processes – Vocabulary – Part 1: General terms	×	×	×	×	×	×	×	×	×
532	ISO/DIS 25901–2	Welding and allied processes – Vocabulary – Part 2: Health and safety	×	×	×	×	×	×	×	×	×
533	ISO 857–2:2005	Welding and allied processes – Vocabulary – Part 2: Soldering and brazing processes and related terms									×
534	ISO/TR 25901–3:2016	Welding and allied processes – Vocabulary – Part 3: Welding processes	×	×	×	×	×	×	×	×	×
535	ISO/TR 25901–4:2016	Welding and allied processes – Vocabulary – Part 4: Arc welding	×								
536	SRPS EN ISO 6947:2020	Zavarivanje i srodni postupci – Položaji pri zavarivanju	×	×	×	×	×	×	×	×	×
537	SRPS EN ISO 2401:2018	Potrošni materijali za zavarivanje – Obložene elektrode – Određivanje stepena iskorišćenja, konstante topljenja i koeficijenta deponovanja	×								
538	SRPS EN ISO 17777:2017	Potrošni materijali za zavarivanje – Obložene elektrode za ručno elektrolučno zavarivanje bakra i legura bakra – Klasifikacija	×								
539	SRPS EN ISO 3580:2017	Potrošni materijali za zavarivanje – Obložene elektrode za ručno elektrolučno zavarivanje vatropostojanih čelika – Klasifikacija	×								
540	SRPS EN ISO 18275:2018	Potrošni materijali za zavarivanje – Obložene elektrode za ručno elektrolučno zavarivanje čelika povišene čvrstoće – Klasifikacija	×								
541	SRPS EN ISO 14172:2017	Potrošni materijali za zavarivanje – Obložene elektrode za ručno elektrolučno zavarivanje nikla i njegovih legura – Klasifikacija	×								
542	SRPS EN ISO 2560:2021	Potrošni materijali za zavarivanje – Obložene elektrode za ručno elektrolučno zavarivanje nelegiranih i finostrukturnih čelika – Klasifikacija	×								
543	SRPS EN ISO 3581:2017	Potrošni materijali za zavarivanje – Obložene elektrode za ručno elektrolučno zavarivanje nerđajućih i vatrootpornih čelika – Klasifikacija	×								

Tabela 9.1 Pregled standarda

R.b.	Standard	Naziv	ISO 4063 –								
			1	2	3	4	5	6	7	8	9
544	SRPS EN ISO 1071:2017	Potrošni materijali za zavarivanje – Obložene elektrode, žice, šipke i punjene žice za zavarivanje topljenjem sivog liva – Klasifikacija	×		×						
545	SRPS EN ISO 6847:2021	Potrošni materijali za zavarivanje – Izvođenje navara za određivanje hemijske analize	×	×	×	×	×	×	×		
546	SRPS EN ISO 14174:2019	Potrošni materijali za zavarivanje – Topitelji za elektrolučno zavarivanje pod praškom i pod troskom – Klasifikacija	×							×	
547	SRPS EN ISO 14175:2009	Potrošni materijali za zavarivanje – Gasovi i gasne mešavine za zavarivanje topljenjem i srodne postupke	×		×	×	×	×	×	×	×
548	SRPS EN 13479:2017	Potrošni materijali za zavarivanje – Opšti standard za dodatne materijale i praškove za zavarivanje topljenjem metalnih materijala	×		×		×		×		
549	ISO/TR 13393:2009	Welding consumables – Hardfacing classification – Microstructures	×	×	×	×	×	×	×		
550	ISO/TR 22281:2018	Welding consumables – International Institute of Welding (IIW) position statement on the use of trace element analyses in welding consumable specifications	×	×	×	×	×	×	×		
551	ISO/TR 22824:2003	Welding consumables – Predicted and measured FN in specifications – A position statement of the experts of IIW Commission IX	×	×	×	×	×		×		
552	SRPS EN ISO 14344:2012	Potrošni materijali za zavarivanje – Uputstva za nabavku dodatnih materijala i praškova	×	×	×	×	×	×	×		×
553	SRPS EN 12074:2007	Potrošni materijali – Zahtevi za kvalitet pri proizvodnji, isporuci i distribuciji potrošnih materijala za zavarivanje i srodne postupke	×	×	×	×	×	×	×		×
554	SRPS EN ISO 20378:2018	Potrošni materijali za zavarivanje – Šipke za gasno zavarivanje nelegiranih čelika i čelika otpornih na puzanje – Klasifikacija			×						
555	SRPS EN ISO 636:2017	Potrošni materijali za zavarivanje – Šipke, žice i depoziti za TIG zavarivanje nelegiranih i finozrnih čelika – Klasifikacija	×								
556	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	×	×	×	×	×		×		
557	SRPS EN ISO 19288:2017	Potrošni materijali za zavarivanje – Pune žičane elektrode, pune žice i šipke za zavarivanje topljenjem magnezijuma i legura magnezijuma – Klasifikacija	×	×	×	×	×		×		
558	SRPS EN ISO 24034:2021	Potrošni materijali za zavarivanje – Pune žičane elektrode, pune žice i pune šipke za zavarivanje topljenjem titana i legura titana – Klasifikacija	×	×	×	×	×		×		

Tabela 9.1 Pregled standarda

R.b.	Standard	Naziv	ISO 4063 –								
			1	2	3	4	5	6	7	8	9
559	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	×								
560	SRPS EN ISO 24598:2019	Potrošni materijali za zavarivanje – Pune žice, punjene žice i kombinacije elektrode/praška za zavarivanje pod praškom čelika otpornih na puzanje – Klasifikacija	×								
561	SRPS EN ISO 26304:2018	Potrošni materijali za zavarivanje – Pune elektrodne žice, cevaste punjene žice i kombinacije žica–prašak za EPP zavarivanje čelika povišene čvrstoće – Klasifikacija	×								
562	SRPS EN ISO 24373:2018	Potrošni materijali za zavarivanje – Pune žice i šipke za zavarivanje topljenjem bakra i legura bakra – Klasifikacija	×	×	×	×	×		×		
563	SRPS EN ISO 544:2018	Potrošni materijal za zavarivanje – Uslovi isporuke za dodatne materijale i praškove – Vrste proizvoda, mere, tolerancije i obeležavanja	×	×	×	×	×	×	×		×
564	SRPS EN ISO 15792–1:2021	Potrošni materijali za zavarivanje – Metode ispitivanja – Deo 1: Priprema ispitnog komada i uzorka od čelika, nikla i legura nikla	×	×	×	×	×		×		×
565	SRPS EN ISO 15792–2:2021	Potrošni materijali za zavarivanje – Metode ispitivanja – Deo 2: Priprema ispitnog komada i uzorka od čelika jednoslojnom i dvoslojnom tehnikom	×	×	×	×	×		×		×
566	SRPS EN ISO 15792–3:2012	Potrošni materijali za zavarivanje – Metode ispitivanja – Deo 3: Klasifikaciono ispitivanje mogućnosti zavarivanja u različitim položajima i uvarivanja korenog zavora potrošnih materijala na ugaonim spojevima	×	×	×	×	×	×	×		×
567	SRPS EN 14532–1:2008	Potrošni materijali za zavarivanje – Metode ispitivanja i zahtevi kvaliteta – Deo 1: Osnovne metode i ocena usaglašenosti potrošnih materijala za čelik, nikal i legure nikla	×	×	×	×	×		×		
568	SRPS EN 14532–2:2008	Potrošni materijali za zavarivanje – Metode ispitivanja i zahtevi kvaliteta – Deo 2: Dodatne metode i ocena usaglašenosti potrošnih materijala za čelik, nikal i legure nikla	×	×	×	×	×		×		
569	SRPS EN 14532–3:2008	Potrošni materijali za zavarivanje – Metode ispitivanja i zahtevi kvaliteta – Deo 3: Ocena usaglašenosti žičanih elektroda, žica i šipki za zavarivanje legura aluminijuma	×	×	×	×	×		×		
570	SRPS EN ISO 17633:2018	Potrošni materijali za zavarivanje – Punjene žice i šipke za elektrolučno zavarivanje sa zaštitnim gasom i bez zaštitnog gasa nerđajućih i vatrootpornih čelika – Klasifikacija	×								

Tabela 9.1 Pregled standarda

R.b.	Standard	Naziv	ISO 4063 –								
			1	2	3	4	5	6	7	8	9
587	ISO 17533:2015	Welding for aerospace applications – Welding information in design documents	×	×	×	×	×	×	×		
588	SRPS CEN/TR 15481:2017	Zavarivanje betonskog (armaturnog) čelika – Zavarljivost pripoja – Metode ispitivanja i zahtevi za izvođenje	×	×	×	×	×		×		
589	SRPS EN 13705:2013	Zavarivanje termoplastičnih masa – Mašine i oprema za zavarivanje vrelim gasom (uključujući zavarivanje ekstrudiranjem)						×			
590	SRPS EN ISO 14732:2014	Osoblje koje vrši zavarivanje – Kvalifikaciono ispitivanje zavarivača za automatizovano i automatsko zavarivanje metalnih materijala	×	×	×	×	×		×		
591	SRPS EN ISO 4063:2021	Zavarivanje, tvrdo lemljenje, meko lemljenje, rezanje, mehaničko spajanje i adheziono spajanje – Lista postupaka i njihovo označavanje	×	×	×	×	×	×	×	×	×
592	SRPS EN ISO 15610:2015	Specifikacija i kvalifikacija tehnologija zavarivanja metalnih materijala — Kvalifikacija na osnovu proverenih potrošnih materijala za zavarivanje	×	×	×	×	×		×		

10 PRILOZI



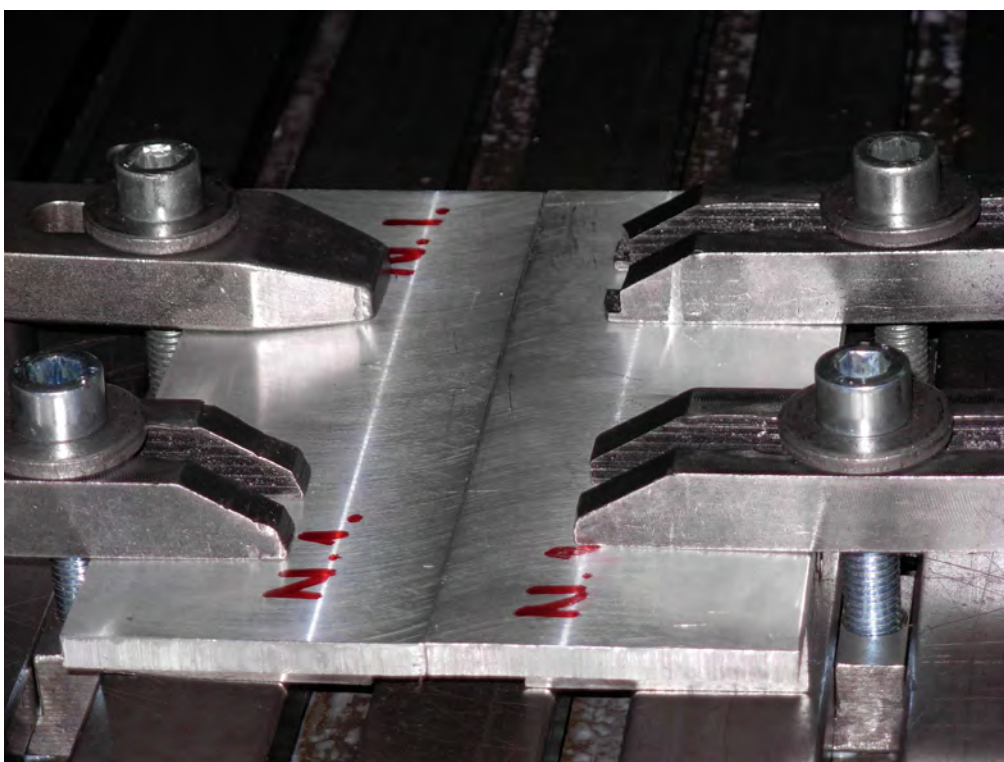
Slika 10.1 Početak prvog FSW zavarivanja u Srbiji, na slici, sa leva na desno: Miroslav Đurđanović, Dragan Mitić, Dragan Milčić, Slavoljub Milčić, Aleksandar Živković (foto: Miroslav Mijajlović, Niš, 13.03.2009)



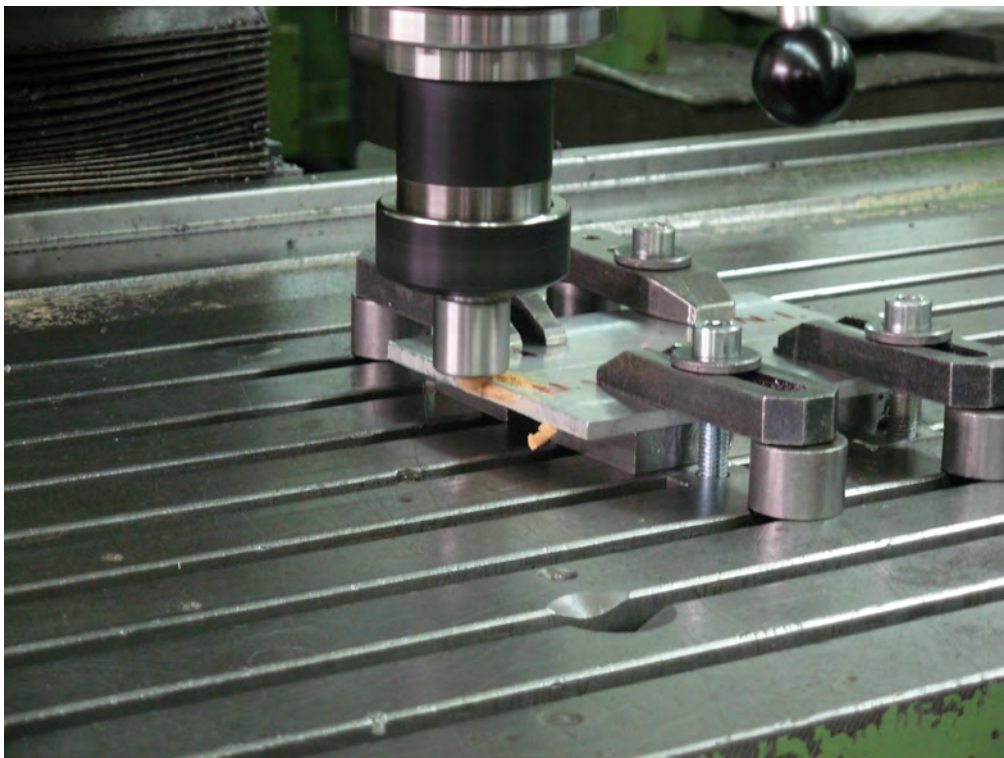
Slika 10.2 Radna mašina, radno mesto i pripreme (foto: Miroslav Mijajlović, Niš, 13.03.2009)



Slika 10.3 Radna mašina, radno mesto i pripremci (foto: Miroslav Mijajlović, Niš, 13.03.2009)



Slika 10.4 Radno mesto i pripremci (foto: Miroslav Mijajlović, Niš, 13.03.2009)



Slika 10.5 Radna mašina, radno mesto, alat i pripremci (foto: Miroslav Mijajlović, Niš, 13.03.2009)



Slika 10.6 Radna mašina, radno mesto, alat i pripremci (foto: Miroslav Mijajlović, Niš, 13.03.2009)



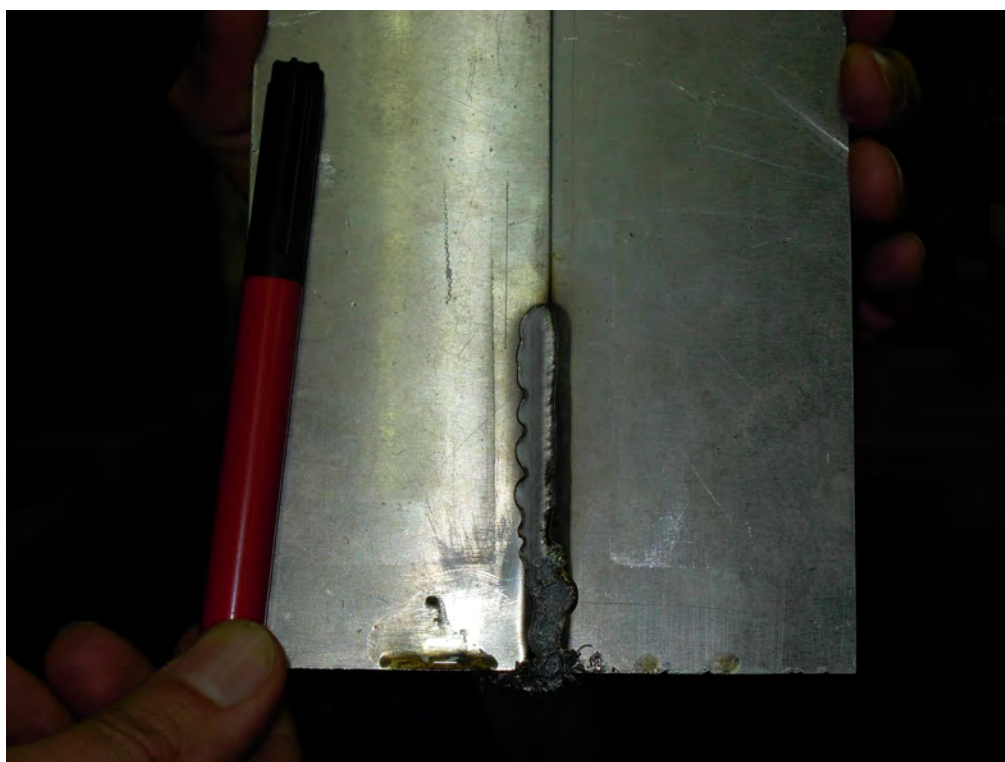
Slika 10.7 Radna mašina, radno mesto, alat i pripremci, neuspešan prvi pokušaj (foto: Miroslav Mijajlović, Niš, 13.03.2009)



Slika 10.8 Radna mašina, radno mesto, polomljeni alat i pripremci, neuspešan prvi pokušaj (foto: Miroslav Mijajlović, Niš, 13.03.2009)



Slika 10.9 Radna mašina, radno mesto, alat i pripremci, drugi pokušaj (foto: Miroslav Mijajlović, Niš, 13.03.2009)



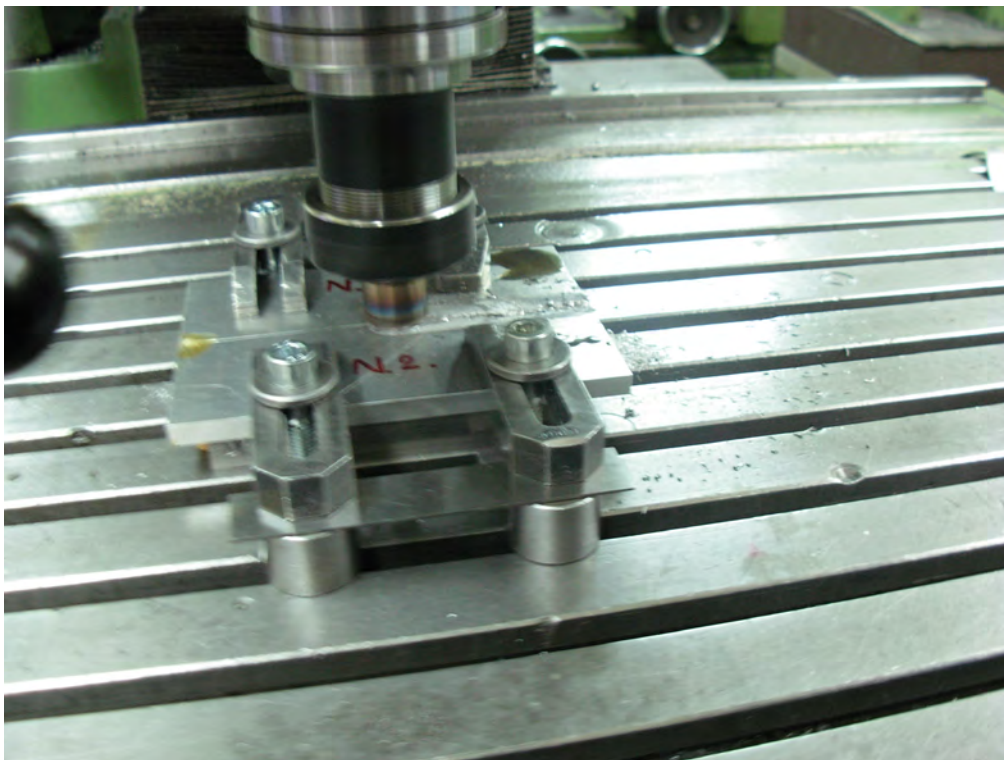
Slika 10.10 Naličje prvog „uspešno” FSW zavarenog šava (foto: Miroslav Mijajlović, Niš, 13.03.2009)



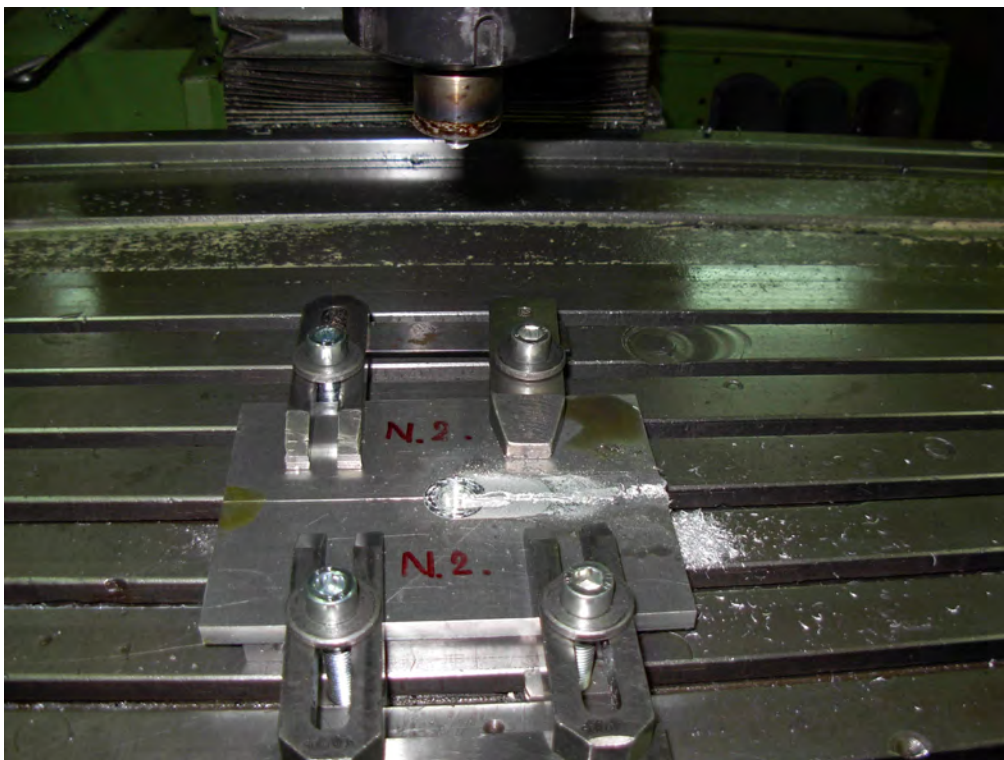
Slika 10.11 Lice prvog „uspešno” FSW zavarjenog šava (foto: Miroslav Mijajlović, Niš, 13.03.2009)



Slika 10.12 Radna mašina, radno mesto, alat i pripremci, treći pokušaj (foto: Miroslav Mijajlović, Niš, 13.03.2009)



Slika 10.13 Radna mašina, radno mesto, alat i pripremci, treći pokušaj (foto: Miroslav Mijajlović, Niz, 13.03.2009)



Slika 10.14 Radna mašina, radno mesto, alat i pripremci, treći pokušaj (foto: Miroslav Mijajlović, Niz, 13.03.2009)



Slika 10.15 Lice drugog „uspešno” FSW zavarenog šava (foto: Miroslav Mijajlović, Niš, 13.03.2009)



Slika 10.16 Naličje drugog „uspešno” FSW zavarenog šava (foto: Miroslav Mijajlović, Niš, 13.03.2009)

In Memoriam:
prof. dr Miroslav B. Đurđanović
(28.4.1940–12.01.2019)



Miroslav (od mилоšte prozvan Mirče i Mika) Đurđanović рођен је 28.04.1940. године у селу Grejač, општина Aleksinac, као прво дете Bogoljuba i Verice Đurđanović.

Osnovnu školu završio je u rodnom Grejaču a srednju tehničku školu i Mašinski fakultet završio je u Nišu. Diplomirao je 1970. године на Машином факултету у Нишу, магистарску тезу одбранио је 1982. године на Машином факултету у Лјубљани а докторску дисертацију одбранио је 1990. године на Машином факултету у Нишу.

Svoju prosvetnu, inženjersku i naučnu karijeru, Miroslav Đurđanović počeo je još kao student mašinstva. Od 17.10.1967. године до 31.08.1968. године, радио је као наставник у средњој школи ученика у привреди у Vranju. Od 15.01.1969. године до 31.08.1970. године, Miroslav Đurđanović је био ангажован као наставник у средњој техничкој саобраћајној школи на радничком Univerzitetu „Pavle Stojković” у Нишу. Nakon diplomiranja, био је запосљен у MIN-овој „Fabricsi odpresaka i otkivaka” као glavni inženjer (od 16.12.1970. до 31.10.1972. године). Od 01.11.1972. године до penzionisanja 01.10.2006. године, Miroslav Đurđanović је радио на Машином факултету у Нишу као asistent, docent, vanredni i redovni profesor. Osnovne oblasti naučnog interesovanja Miroslava Đurđanovića биле су mehanika, konstruisanje, tribologija i zavarivanje. Tokom svoje profesionalne karijere, objavio је preko osamdeset naučno-stručnih radova, tri priručnika i две monografije. Učestvovao је u realizaciji више од двадесет техничких projekata.

U okviru svoje magistarske teze, a kasnije i doktorske disertacije, prof. Miroslav Đurđanović је истраживао primenu trenja i toplote generisane trenjem. Tadašnja istraživanja profesora Đurđanovića била су pionirski rad u oblasti zavarivanja trenjem uz primenu slabe električne struje radi postizanja povoljnijih osobina zavarenog spoja. Ova oblast је i danas slabo istražena i u fokusu је svetskih istraživanja. Profesor Đurđanović је, prvi u Srbiji, истраживао

postupak zavarivanja trenjem sa mešanjem koji je trenutno najistraživaniji postupak zavarivanja na svetu.

U mladosti se aktivno bavio sportom, a kasnije i kulturno-umetničkim radom. Krajem šezdesetih godina dvadesetog veka, bio je omladinski reprezentativac Socijalističke Federativne Republike Jugoslavije u streljaštvu, a od sedamdesetih godina dvadesetog veka pa do penzionisanja, bio je predsednik nekoliko kulturno-umetničkih društava u Nišu. Bio je član udruženja ljubitelja železnice, član društva za zavarivanje, član društva za tribologiju, član asocijacije za konstruisanje, urednik nekoliko časopisa i predsednik brojnih odbora i konferencija vezanih za mašinstvo i istoriju.

Miroslav Đurđanović je bio veoma posvećen svojoj porodici, profesiji, svojim studentima, svom rodnom kraju, istoriji i tradiciji.