

# Utjecaj parametara EPP zavarivanja na svojstva zone utjecaja topline čelika S690

---

**Despetović, Hrvoje**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2021**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:086914>

*Rights / Prava:* [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-07-10**

*Repository / Repozitorij:*

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **DIPLOMSKI RAD**

**Hrvoje Despetović**

Zagreb, 2021.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Ivica Garašić, dipl. ing.

Student:

Hrvoje Despetović

Zagreb, 2021.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se svom mentoru, izv. prof. dr. sc. Ivici Garašiću za stručnu pomoć i savjete za izradu ovog rada.

Zahvaljujem asistentima, mag. Ing. Mislavu Štefoku te dr. sc. Maji Jurici na velikoj pomoći, sugestijama i strpljenju tijekom izrade rada.

Zahvaljujem djelatnicima Laboratorija za zavarivanje Fakulteta strojarstva i brodogradnje na pruženim savjetima i pomoći pri izradi eksperimentalnog dijela ovog rada.

Također se zahvaljujem obitelji i prijateljima na neiscrpoj podršci i povjerenju tijekom cijelog studija.

Hrvoje Despetović





SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
Povjerenstvo za diplomske radove studija strojarstva za smjerove:  
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment,  
inženjerstvo materijala te mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum:	Prilog:
Klasa: 602-04/21-6/1	
Ur. broj: 15-1703-21	

## DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **HRVOJE DESPETOVIĆ** Mat. br.: 0035209518

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Utjecaj parametara EPP zavarivanja na svojstva zone utjecaja topline čelika S690**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Influence of SAW parameters on properties of heat affected zone on S690 steel**

Opis zadatka:

Analizirati zavarljivost čelika S690 te dati pregled primjenjivih postupaka s naglaskom na EPP zavarivanje. Objasniti način odabira kombinacija žice i praška pri EPP zavarivanju čelika S690. Detaljno definirati utjecaj parametara EPP zavarivanja na svojstva i geometriju zavarenog spoja te klasificirati karakteristične nepravilnosti. Prikazati razvoj EPP zavarivanja uključujući inačice s više žica kao i primjenu izmjenične struje.

U eksperimentalnom dijelu na limovima kvalitete S690 provesti zavarivanje uzoraka EPP postupkom na više razina unosa topline. Zavarivanje provesti za kutni i sučeljeni spoj odgovarajuće debljine u jednom prolazu. Na zavarenim uzorcima provesti ispitivanja prema zahtjevima norme HRN EN ISO 15614-1 Razina 2 te ocijeniti prikladnost odabranih parametara. Za područje zone utjecaja topline provesti detaljna mikrostrukturna ispitivanja za sva stanja pokusa. Analizirati karakteristike zone utjecaja topline ovisno o parametrima zavarivanja i procijeniti rizik nastanka pukotina.

Zaključno, ocijeniti utjecaj parametara na značajke zone utjecaja topline te dati preporuke za primjenu EPP zavarivanja čelika S690 na realnoj konstrukciji.

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:  
30. rujna 2021.

Rok predaje rada:  
2. prosinca 2021.

Predviđeni datum obrane:  
13. prosinca do 17. prosinca 2021.

Zadatak zadao:  
prof. dr. sc. Ivica Garašić

Predsjednica Povjerenstva:  
prof. dr. sc. Biserka Runje

## SADRŽAJ

SADRŽAJ .....	I
POPIS SLIKA .....	III
POPIS TABLICA.....	VI
POPIS OZNAKA .....	VII
SAŽETAK.....	VIII
SUMMARY .....	IX
1. UVOD.....	1
2. Čelik S690QL .....	2
2.1. Kemijski sastav čelika S690QL .....	2
2.2. Mehanička svojstva čelika S690QL.....	3
2.3. Primjena čelika S690QL .....	4
2.4. Zavarljivost čelika S690QL .....	6
2.4.1. Pojava hladnih pukotina.....	7
2.4.2. Utjecaj vodika na mehanička svojstva .....	9
2.4.3. Čvrstoća zavara čelika S690QL.....	10
2.4.4. Tvrdoća zavara čelika S690QL.....	11
2.4.5. Mikrostruktura zavara .....	12
3. Elektrolučno zavarivanje taljivom elektrodom pod zaštitom praška.....	13
3.1. Parametri kod EPP zavarivanja.....	15
3.2. Prašak za EPP zavarivanje .....	19
3.3. Žice za EPP zavarivanje.....	22
3.4. Podloge za EPP zavarivanje korijenskog zavara .....	23
3.5. Izvedbe EPP postupka za povećanje učinkovitosti .....	24
3.5.1. Zavarivanje s dvije ili više žica.....	24
3.5.2. Tandem tehnika EPP zavarivanja .....	25
3.5.3. Zavarivanje s više kontaktnih vodilica .....	27
3.5.4. Punjene žice za EPP zavarivanje .....	28
3.5.5. EPP zavarivanje izmjeničnom strujom .....	28
3.6. Karakteristične nepravilnosti kod EPP zavarivanja .....	29
3.7. Izbor dodatnog materijala za zavarivanje čelika S690QL EPP postupkom.....	31

---

4. Eksperimentalni dio .....	33
4.1. Određivanje parametara zavarivanja.....	33
4.2. Odabir dodatnog materijala.....	34
4.3. Oprema za zavarivanje.....	34
4.4. Priprema uzoraka za zavarivanje .....	36
4.5. Zavarivanje ispitnih uzoraka .....	39
4.6. Ispitivanje uzoraka .....	42
4.6.1. Ispitivanje površinskih pukotina .....	43
4.6.2. Analiza mikrostrukture .....	47
4.6.3. Analiza makrostrukture zavara .....	54
4.6.4. Mjerenje tvrdoće zavara.....	58
5. Zaključak .....	64
LITERATURA.....	66

---

**POPIS SLIKA**

Slika 1.	Mikrostruktura čelika S690QL [4] .....	3
Slika 2.	Dijagram naprezanje- istezanje za čelik S690 [6] .....	3
Slika 3.	Cijevni jarbol za transport betona [8] .....	5
Slika 4.	Dizalica od čelika S690QL [9] .....	6
Slika 5.	Dijagrami naprezanje-istezanje za uzorke sa i bez vodika u sastavu [2] .....	9
Slika 6.	Razlika loma ovisno o prisustvu vodika u metalu[2] .....	10
Slika 7.	Mikrostruktura osnovnog materijala i zavara čelika S690QL [2] .....	12
Slika 8.	Shema elektrolučnog zavarivanja taljivom elektrodom pod zaštitom praška [1] .	13
Slika 9.	Shema opreme za EPP zavarivanje [1] .....	14
Slika 10.	Utjecaj struje zavarivanja na geometriju zavara [15] .....	15
Slika 11.	Utjecaj napona električnog luka na oblik zavara [15] .....	16
Slika 12.	Utjecaj parametara zavarivanja na oblik zavara[1] .....	16
Slika 13.	Utjecaj polariteta elektrode na geometriju zavara[15] .....	17
Slika 14.	Preporuke za slobodni kraj žice [1] .....	18
Slika 15.	Utjecaj tehnike zavarivanja na oblik zavara [16] .....	19
Slika 16.	Aglomerirani prašak [16] .....	20
Slika 17.	Taljivi prašak [16] .....	21
Slika 18.	Uređaj za sušenje praška [19] .....	22
Slika 19.	Žica i traka za EPP zavarivanje [20] .....	23
Slika 20.	Keramika- Prašak za zavarivanje kao podloga [21] .....	24
Slika 21.	EPP zavarivanje s dvije žice [16] .....	25
Slika 22.	Tandem tehnika EPP zavarivanja [16] .....	26
Slika 23.	Dvostruka tandem tehnika [16] .....	26
Slika 24.	EPP zavarivanje s 4 vodilice [24] .....	27
Slika 25.	Usporedba produktivnosti inačica EPP zavarivanja [16] .....	27
Slika 26.	Utjecaj dodatnog materijala na tvrdoću zavara [29] .....	32
Slika 27.	Izvor struje korišten za EPP zavarivanje .....	35
Slika 28.	Specifikacije uređaja za zavarivanje .....	35
Slika 29.	Upravljačka jedinica uređaja za zavarivanje .....	36
Slika 30.	Priprema sučeljenog spoja sa zazorom [30] .....	37
Slika 31.	Keramička podloga za zavarivanje .....	37

---

Slika 32.	Pripremljeni uzorci: lijevo uzorak 1; desno uzorak 2.....	37
Slika 33.	Lijevo: priprema kutnog spoja[32]; Desno, PA položaj [33].....	38
Slika 34.	Priprema kutnog spoja.....	38
Slika 35.	Iznosi struje i napona zavarivanja.....	39
Slika 36.	Postupak EPP zavarivanja 4 ispitna uzorka.....	40
Slika 37.	Uzorak 1: lijevo lice, desno korijen.....	41
Slika 38.	Uzorak 2: lijevo lice, desno korijen.....	41
Slika 39.	Prikaz korijenskog zavara uzorka 3.....	42
Slika 40.	Prikaz korijenskog zavara uzorka 4.....	42
Slika 41.	Čistač, penetrant i razvijatelj proizvođača Magnaflux.....	44
Slika 42.	Ispitni uzorci s nanesenim penetrantom Magnaflux Spotcheck SKL-WP2.....	45
Slika 43.	Ispitivanje površinskih pukotina, uzorak 1; lijevo lice, desno korijen.....	46
Slika 44.	Ispitivanje površinskih pukotina, uzorak 2; lijevo lice, desno korijen.....	46
Slika 45.	Ispitivanje površinskih pukotina, uzorak 3.....	46
Slika 46.	Ispitivanje površinskih pukotina, uzorak 4.....	47
Slika 47.	Pozicije za izrezivanje uzoraka iz zavarenih spojeva [13].....	48
Slika 48.	Uređaj za mokro brušenje.....	48
Slika 49.	Mikroskop OLYMPUS GX51.....	49
Slika 50.	Mikrostruktura čelika S690QL.....	50
Slika 51.	Mikrostruktura metala zavara, Uzorak 1.....	53
Slika 52.	Mikrostruktura metala zavara, Uzorak 2.....	53
Slika 53.	Nagrizanje uzoraka u otopini nitala.....	54
Slika 54.	Mjerenje dubine zajedna na uzorku 4.1.....	56
Slika 55.	Nadvišenje zavara 2.....	56
Slika 56.	Ispupčenost zavara 4.1.....	57
Slika 57.	Kutovi nadvišenja, uzorak 2.....	58
Slika 58.	Kutovi nadvišenja, uzorak 3.1.....	58
Slika 59.	Položaj nizova otisaka za sučeljeni spoj [38].....	59
Slika 60.	Položaj redova mjerenja za kutni spoj [38].....	59
Slika 61.	Grafički prikaz tvrdoće uzorka 1.....	60
Slika 62.	Položaji otisaka, uzorak 1.....	60
Slika 63.	Grafički prikaz tvrdoće uzorka 2.....	61
Slika 64.	Položaji otisaka, uzorak 2.....	61

---

Slika 65.	Grafički prikaz tvrdoće uzorka 3.1.....	62
Slika 66.	Položaji otisaka, uzorak 3.1.....	62
Slika 67.	Grafički prikaz tvrdoće uzorka 4.1.....	63
Slika 68.	Položaji otisaka, uzorak 4.1.....	63

---

**POPIS TABLICA**

Tablica 1. Kemijski sastav čelika S690QL [3].....	2
Tablica 2. Udarni rad loma za čelik S690QL [7] .....	4
Tablica 3. Čvrstoća osnovnog materijala i zavara [2] .....	11
Tablica 4. Greške kod EPP zavarivanja [27].....	30
Tablica 5. kemijski sastav osnovnog materijala [30] .....	33
Tablica 6. Parametri zavarivanja .....	34
Tablica 7. Unos topline za pojedine ispitne uzorke.....	40
Tablica 8. Potrebna ispitivanja prema HRN EN ISO 15614-1 [13].....	43
Tablica 9. Mikrostruktura zone utjecaja topline.....	50
Tablica 10. Makrostruktura zavara snimljena pomoću foto-aparata Canon 1000D.....	54

---

**POPIS OZNAKA**

<b>Oznaka</b>	<b>Jedinica</b>	<b>Opis</b>
$C_{ekv}$	%	Ekvivalentni udio ugljika
$CET$	%	Ekvivalentni udio ugljika
$d$	mm	Debljina osnovnog materijala
DM		Dodatni materijal
EN		Europska norma
EPP		Elektrolučno zavarivanje taljivom elektrodom pod zaštitom praška
$HD$	mL/100g	Udio vodika u zavaru
$HNO_3$		Dušična kiselina
HRN		Hrvatska norma
$I$	A	Jakost struje
ISO		Međunarodna organizacija za normizaciju
$k$		Toplinska iskoristivost postupka zavarivanja
LS		Linija staljivanja
MAG		Elektrolučno zavarivanje u zaštiti aktivnog plina
MZ		Metal zavara
OM		Osnovni materijal
PA		Vodoravni položaj zavarivanja
$Q$	J/mm	Unos topline u zavar
$R$	$\Omega$	Električni otpor
$R_{p0,2}$	N/mm <sup>2</sup>	Granica tečenja
$s$	mm <sup>2</sup>	Poprečni presjek žice
$t_{8/5}$	s	Vrijeme hlađenja od 800 °C do 500 °C
$T_p$	°C	Temperatura predgrijavanja
$U$	V	Napon
$v$	cm/min	Brzina zavarivanja
ZUT		Zona utjecaja topline
$\rho$	$\Omega$ mm	Specifični otpor



---

**SAŽETAK**

U ovom radu opisano elektrolučno zavarivanje taljivom elektrodom pod zaštitom praška (EPP) te je prikazana njegova primjena za zavarivanje čelika S690QL. U teorijskom dijelu su opisana svojstva, primjena i zavarljivost čelika S690QL. Opisan je postupak EPP zavarivanja, potrebna oprema, dodatni materijali i parametri zavarivanja te njihov utjecaj na zavar.

U eksperimentalnom dijelu rada su zavarivani kutni i sučeljeni spoj čelika S690QL EPP postupkom u jednom prolazu. Ispitivao se utjecaj unosa topline na svojstva zavara s naglaskom na mikrostrukturu.

Ključne riječi: zavarivanje; EPP; čelik S690QL; unos topline; mikrostruktura

**SUMMARY**

This paper describes submerged arc welding (SAW) and presents its application for welding S690QL steel. The theoretical part describes the properties, applications and weldability of S690QL steel. The SAW welding procedure, equipment, added materials and welding parameters as well as their influence on the weld are described.

In the experimental part of the work, one pass T - joints and butt joints of S690QL steel were welded by the SAW process. The influence of heat input on the properties of welds with emphasis on microstructure was investigated.

Key words: welding; SAW; S690QL steel; heat input; microstructure

## **1. UVOD**

Zavarivanje je široko rasprostranjen i nezamjenjiv postupak spajanja 2 ili više materijala s ili bez dodatnog materijala. Unatoč velikoj rasprostranjenosti u proizvodnji, radi se o složenom metalurškom procesu zagrijavanja, taljenja te hlađenja metala u kojem dolazi do brojnih promjena u mikrostrukturi materijala. Zbog sve veće primjene metalnih materijala u brojnim odgovornim konstrukcijama, uvedene su brojne norme kako bi se osiguralo da zavareni spojevi kvalitetom zadovoljavaju određene zahtjeve. Za kontrolu kvalitete zavara koriste metode nerazornih ispitivanja, a kako bi se greške smanjile na minimum prije zavarivanja na konstrukciji se izrađuje specifikacija postupka zavarivanja. Taj dokument se izrađuje na temelju atesta postupka zavarivanja koji obuhvaća razorna i nerazorna ispitivanja ispitnih uzoraka i dokazuje pogodnost parametara za određeni zavareni spoj.

Elektrolučno zavarivanje taljivom elektrodom pod zaštitom praška je postupak koji je razvijen za zavarivanje debljih materijala velikim brzinama. Kod zavarivanja se električni luk ne vidi jer se nalazi ispod praška i tekuće troske te se upravo po tome razlikuje od ostalih elektrolučnih postupaka. Postupak je potpuno automatiziran i kod zavarivanja nije potreban zavarivač već operater koji prati parametre. [1]

Smanjenje mase proizvoda je učestali zahtjev tržišta u 21. stoljeću što se na većini proizvoda postiže zamjenom čeličnih dijelova polimernima ili aluminijskima. Kod velikih čeličnih konstrukcija primjerice u brodogradnji i mostogradnji masa se smanjuje korištenjem čelika povišene ili visoke čvrstoće. Smanjenjem mase proizvoda se smanjuje potreba za materijalima od kojih se proizvod izrađuje te je manipulacija proizvodima olakšana. [2]

## 2. Čelik S690QL

Smanjenje mase proizvoda uglavnom podrazumijeva zamjenu čeličnih dijelova aluminijskim, polimernim ili kompozitnim. U izgradnji čeličnih konstrukcija, teških industrijskih vozila, brodogradnji ili u proizvodnji tlačne opreme se smanjenje mase postiže ugradnjom čelika povišene ili visoke čvrstoće. Lakše konstrukcije značajno smanjuju potrošnju resursa, a time i trošak proizvodnje. Čelici povišene čvrstoće uz sebe vežu i nedostatke, prvenstveno u okviru zavarljivosti i smanjene istežljivosti. [2]

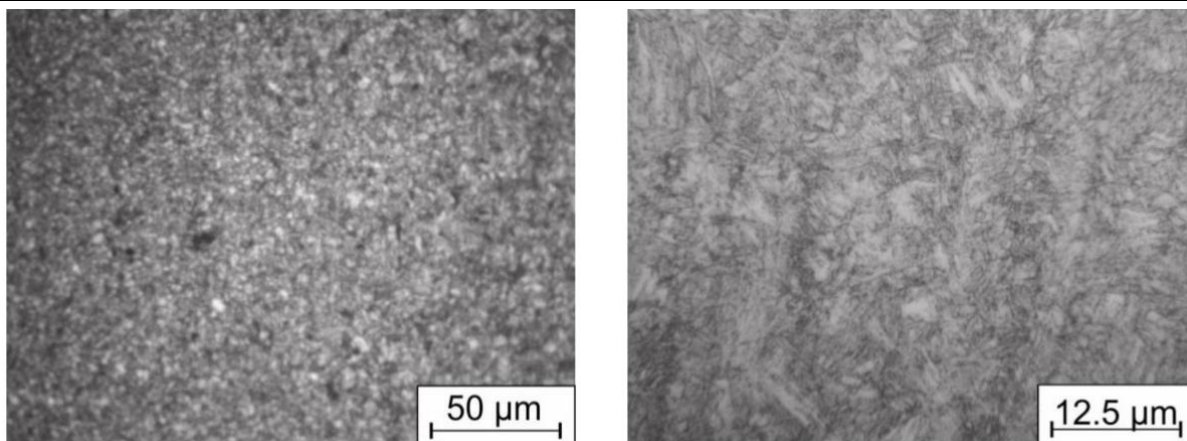
### 2.1. Kemijski sastav čelika S690QL

Prema normi EN 10025-6 koja propisuje tehničko stanje isporuke za limove od konstrukcijskog čelika s visokom granicom razvlačenja u poboljšanome propisan je udio za 15 legirnih elemenata kako bi se u metalu dobio sitnozrnati martenzit. Najveći dopušteni udjeli svakog pojedinog legirnog elementa su navedeni u tablici 1.

**Tablica 1. Kemijski sastav čelika S690QL [3]**

C	Si	Mn	P	S	N	B	Cr	Cu
0,22	0,86	1,8	0,025	0,012	0,016	0,006	1,6	0,55
Mo	Nb	Ni	Ti	V	Zr			
0,7	0,07	2,1	0,07	0,14	0,17			

Osim maksimalnog udjela pojedinih metala u čeliku, normom EN 10025-6 je ograničen i najveći dopušteni ekvivalentni udio ugljika ( $C_{ekv}$ ). Tako je za ploče do debljine 50 mm propisan  $C_{ekv}$  do 0,56 %, između 50 i 100 mm je 0,77 %, a od 100 mm do 150 mm najviše 0.83 %. [3] Konačna struktura metala se dobiva kaljenjem te popuštanjem na temperaturi oko 700 °C. Martenzitno bainitna struktura koja nastaje je pogodna za dobivanje zadovoljavajućeg odnosa čvrstoće i žilavosti, slika 1.

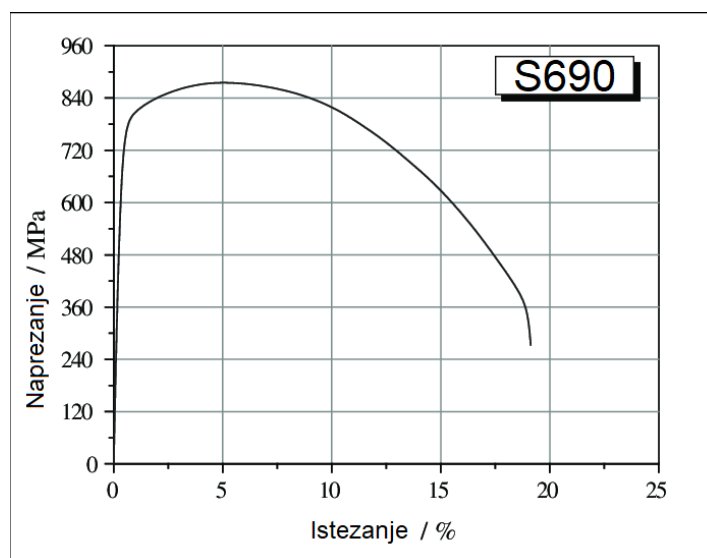


Slika 1. Mikrostruktura čelika S690QL [4]

Martenzitno bainitna mikrostruktura je neosjetljiva na krhki lom. Mikrolegiranjem dolazi do povišenja temperature početka formiranja martenzita tako da pri hlađenju dolazi do popuštanja martenzita u površinskim slojevima zbog utjecaja topline jezgre. Dodatno, još se postiže smanjenje utjecaja debljine čelika tako da se postiže bolja prokaljenost. Izbjegava se i stvaranje ferita prilikom hlađenja na zraku zbog utjecaja kroma, molibdena i bora. [5]

## 2.2. Mehanička svojstva čelika S690QL

Ponašanje materijala pri naprezanju najbolje opisuju dijagrami naprezanje- istezanje. Taj dijagram za čelik S690QL je prikazan na slici 2.



Slika 2. Dijagram naprezanje- istezanje za čelik S690 [6]

U dijagramu granica rastezanja nije jasno istaknuta što znači da se ona određuje kao naprezanje kod kojeg dolazi do plastične deformacije u iznosu od 0,2% odnosno  $R_{p0,2}$ .

Minimalna propisana granica razvlačenja za čelik S690 je  $690 \text{ N/mm}^2$  za debljine od 3 mm do 50 mm. Najmanja dopuštena Vlačna čvrstoća prema normi EN 10025-6 za istu debljinu materijala je 770- 940  $\text{N/mm}^2$ . Najmanja istezljivost je neovisna o debljini materijala i treba biti 14 % ili više. [7]

Osim čvrstoće i istezljivosti, važno mehaničko svojstvo je i udarni rad loma. Udarni rad loma se ispituje kako ne bi došlo do krhkog loma materijala kod eksploatacije na niskim temperaturama. Za čelik S690QL je specificiran minimalni udarni rad loma na temperaturama  $0 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $-20 \text{ }^\circ\text{C}$  i  $-40 \text{ }^\circ\text{C}$  prema normi EN 10025-6. Najmanji zadovoljavajući iznosi su navedeni u tablici 2.

**Tablica 2. Udarni rad loma za čelik S690QL [7]**

Temperatura u $^\circ\text{C}$	0	-20	-40
Udarni rad loma u J	50	40	30

### 2.3. Primjena čelika S690QL

Čelik S690QL nije široko prisutan u proizvodnji kao standardni konstrukcijski čelici. On se koristi kada čvrstoća običnih konstrukcijskih čelika nije dovoljna ili kada je potrebno smanjiti masu proizvoda. Jedan od primjera konstrukcije izgrađene od čelika S690QL je cijevni jarbol za transport betona na gradilištima. Jarbol služi za vertikalni transport betona i prikazan je na slici 3. Jarbol se proizvodi zavarivanjem dijelova od čelika visoke čvrstoće kako bi mu se smanjila masa radi lakšeg transporta. [8]



**Slika 3. Cijevni jarbol za transport betona [8]**

Još jedan primjer konstrukcije gdje se koristi čelik S690QL zbog smanjenja mase su kranovi dizalica. Na slici 4. je offshore dizalica kapaciteta 5000 tona. Ukupna nosivost dizalice povećava se smanjenjem mase dizalice što se postiže primjenom čelika S690QL jer ona sama ima manju masu, a i troškovi zavarivanja su manji jer se koristi materijal manje debljine te je potrebno manje prolaza pri zavarivanju. Zavari na dizalici su zavarivani elektrolučnim postupkom korištenjem prahom punjene žice[9].



Slika 4. Dizalica od čelika S690QL [9]

#### 2.4. Zavarljivost čelika S690QL

Za zavarljivost čelika S690QL se razmatra zavarljivost mikrolegiranih čelika. Mikrolegirajući elementi sa ugljikom i dušikom formiraju i luče karbide, nitride i karbonitride te olakšavaju stvaranje sitnozrnate mikrostrukture. Ujedno i sami karbidi, nitridi i karbonitridi svojim izlučivanjem povisuju čvrstoću čelika. Neki od njih su: AlN, TiC, TiCN, TiN, V<sub>4</sub>C<sub>3</sub>, VC, NbC, NbCN. Niobij i vanadij se dodaju u leguru kako bi se poboljšala čvrstoća bez dodavanja ugljika i/ili magnezija. Povećanje njihovih udjela u leguri ima loš utjecaj na zavarljivost i udarni rad loma. [10]



Zavarljivost materijala se ne može ispitati izravno jednim testom nego se izvodi više ispitivanja na temelju kojih se zaključuje o zavarljivosti materijala u aspektu:

- pojava hladnih pukotina,
- pojava toplih pukotina,
- raslojavanje,
- krhki lom,
- porast tvrdoće,
- starenje materijala,
- nastajanje pukotina u materijalima visoke čvrstoće.

Kod zavarivanja čelika visoke čvrstoće najčešće dolazi do pojave hladnih pukotina. [10]

#### **2.4.1. Pojava hladnih pukotina**

Pojava hladnih pukotina kod zavarivanja konstrukcijskih čelika pretežito ovisi o kemijskom sastavu osnovnog i dodatnog materijala. Osjetljivost na hladne pukotine se određuje ovisno o kritičnim strukturama poput martenzita, debljini osnovnog materijala, udjelu vodika u metalu zavara, o unosu topline pri zavarivanju i o stanju unutarnjih naprezanja u konstrukciji. U suštini, veći udio legiranih elemenata, veća debljina materijala, povišeni udio vodika u zavaru i naprezanja imaju negativan utjecaj, dok povećani unos topline smanjuje vjerojatnost pojave hladnih pukotina. [11]

Prema normi HRN EN 1011-2, pojava hladnih pukotina se izbjegava primjenom 2 metode. U ovom radu će se obraditi metoda B koja se uspješno primjenjuje za visokočvrste niskolegirane čelike, a za izračunavanje temperature predgrijavanja  $T_p$  se koriste sljedeći ulazni podatci [12]:

- kemijski sastav,
- debljina osnovnog materijala,
- udio vodika,
- unos topline.

Temperatura predgrijavanja je najniža temperatura u zavaru prije prvog prolaza i mora se postići prije zavarivanja kako bi se izbjegla pojava hladnih pukotina. Kod zavarivanja u više prolaza se može i izostaviti predgrijavanje, ali uz dovoljno visoku međuprolaznu temperaturu  $T_i$ . Prema normi HRN EN 1011-2 temperatura predgrijavanja se izračunava po sljedećoj formuli [12]:

$$T_p = 697 \cdot CET + 160 \cdot \tanh\left(\frac{d}{35}\right) + 62HD^{0,35} + (53 \cdot CET - 32) \cdot Q - 328[^\circ C]. \quad (1)$$

U jednadžbi (1)  $CET$  je ekvivalentni udio ugljika izražen u postotku,  $d$  je debljina osnovnog materijala u mm,  $HD$  je udio vodika u mL/100 g i  $Q$  je unos topline u kJ/mm. Ekvivalentni udio ugljika se računa prema jednadžbi (12).

$$CET = C + \frac{Mn+Mo}{10} + \frac{Cr+Cu}{20} + \frac{Ni}{40} [\%] \quad (2)$$

Ove formule su važeće za čelike koji ispunjavaju sljedeće kriterije, a to su: čvrstoća do 1000MPa i za ekvivalentni udio ugljika  $CET$  od 0,2 % do 0,5 %, za debljine osnovnog materijala od 10 do 90 mm, udio vodika od 1 mL/100 g do 20 mL/100 g i unos topline između 0,5 i 4 kJ/mm. Također, podatke o potrebnom predgrijavanju može dati i proizvođač osnovnog materijala. [10]

Dodatna metoda za izbjegavanje hladnih pukotina je toplinska obrada nakon zavarivanja u svrhu difuzije vodika iz zavara. Primjerice je prema normi HRN EN 1011-2 za elektrolučno zavarivanje pod prahom čelika čvrstoće preko 460 MPa i debljine 30 mm propisano držanje na 250 °C u trajanju od 120 minuta. [12]

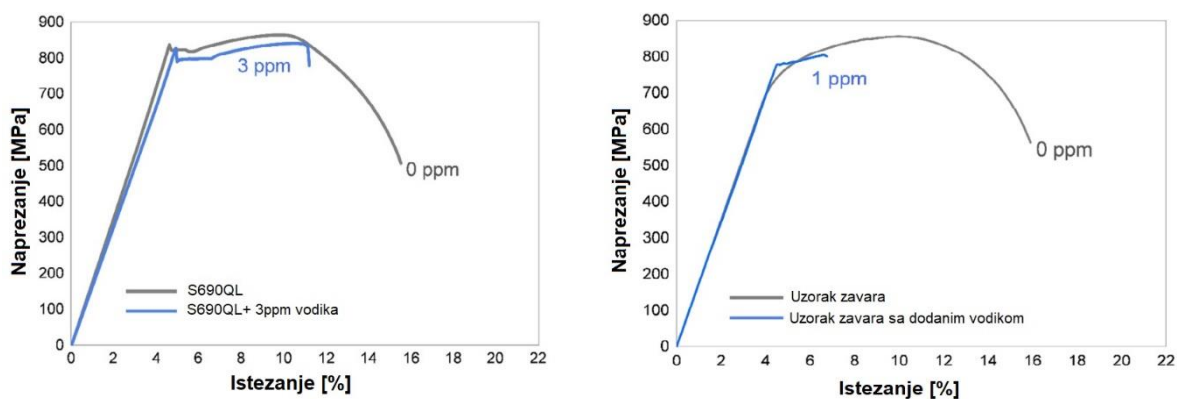
Opasnost od pojave hladnih pukotina uzrokovanih vodikom raste sa čvrstoćom materijala. Osim pojave pukotina, kod materijala visoke čvrstoće dolazi i do smanjenja duktilnosti. U odnosu na nelegirane čelike, otopljeni vodik u mikrostrukturi ima do deset puta veći utjecaj na mehanička svojstva. [11]

Do otapanja vodika u zavaru dolazi uslijed termičke disocijacije vodikovih spojeva u električnom luku uz dodatni udio vodika iz dodatnog materijala. Pritom metal na povišenim temperaturama može otopiti i do 30 puta više vodika u odnosu na sobnu temperaturu. Za vrijeme brzog hlađenja, kao što je kod zavarivanja, vodik ostaje prisilno otopljen u kristalnoj rešetki.[11] Iako točan mehanizam nastajanja hladnih pukotina nije poznat, postoji nekoliko teorija od kojih nijedna ne nudi potpuno objašnjenje.

### 2.4.2. Utjecaj vodika na mehanička svojstva

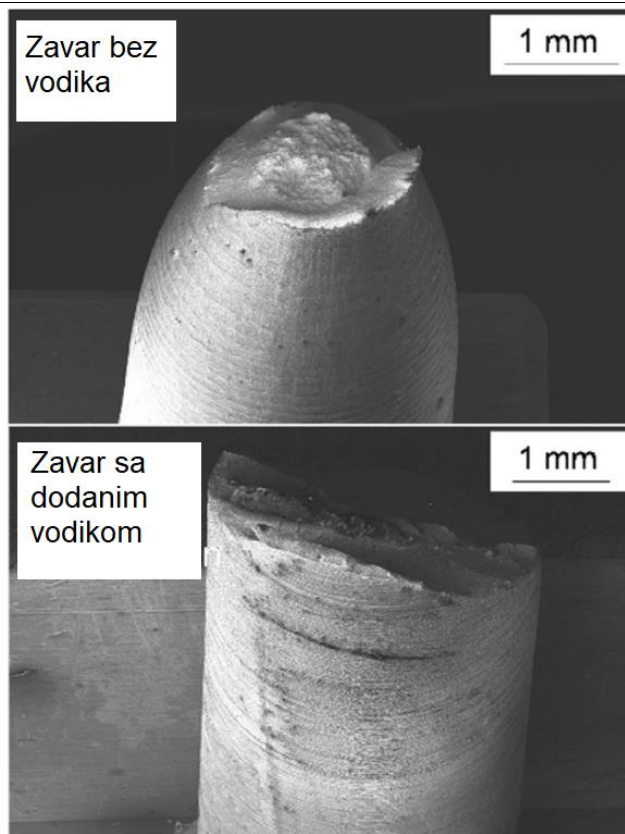
Poboljšani čelik S690QL se već neko vrijeme koristi u zavarenim konstrukcijama i već su provedena razna ispitivanja njegovih zavarenih spojeva. Među njima je i ispitivanje utjecaja vodika na pojavu krhkosti čelika S690QL objavljeno u [2]. U okviru istraživanja zavarivane su ploče debljine 15 mm MAG postupkom te su ispitivana svojstva za uzorak bez vodika te uzorak sa dodanim vodikom. Uzorci su zavarivani u više prolaza bez predgrijavanja uz kontrolu međuprolazne temperature te nisu naknadno toplinski obrađivani. Kao zaštitni plin korištena je mješavina 82 % Ar i 18 % CO<sub>2</sub>. [2]

Budući da zavari prvotno nisu imali vodika u sastavu, elektrokemijskim postupkom je difundirano 1- 3 ppm vodika u uzorke osnovnog metala te uzorke izrezane iz zavara. Kako bi se vidjela razlika u čvrstoći uzoraka sa i bez otopljenog vodika, proveden je statički vlačni pokus, a rezultati su prikazani na slici 5. [2]



Slika 5. Dijagrami naprezanje-istezanje za uzorke sa i bez vodika u sastavu [2]

Na slici 5. su dva dijagrama naprezanje- istezanje za osnovni materijal prikazan na lijevoj slici te za metal zavara na desnoj. Na oba dijagrama se može uočiti da je površina ispod plave krivulje znatno manja od one ispod sive što znači manju plastičnu rezervu, odnosno istežljivost. U eksploataciji materijala se to očituje kao krhki lom bez značajne deformacije. Na slici 6. je prikazano da se manja deformacija očituje u lomu pri većem presjeku epruvete. Dakle, ako u metalu ima otopljenog vodika, lom nastaje nakon manje deformacije nego li je to slučaj za metal bez vodika u sastavu.



Slika 6. Razlika loma ovisno o prisustvu vodika u metalu[2]

### 2.4.3. Čvrstoća zavora čelika S690QL

U okviru istraživanja navedenog u 2.4.2. provedeno je ispitivanje čvrstoće zavora za 2 uzorka s različitim iznosima unosa topline. Za uzorke istih dimenzija koristila se ista struja zavarivanja i isti broj prolaza, a razlika unosa topline se dobila smanjenjem brzine zavarivanja za uzorak B. Unos topline za uzorak A je bio približno  $10 \text{ kJ cm}^{-1}$ , a za uzorak B oko  $1,5 \text{ kJ cm}^{-1}$ . Osim unosa topline kao dodatna referentna vrijednost je mjereno vrijeme hlađenja zavora od  $800$  do  $500^\circ\text{C}$  ( $t_{8/5}$ ) te je utvrđeno da za zavar A iznosi  $7 \text{ s}$ , a za zavar B s većim unosom topline  $15 \text{ s}$ . U tablici 3. su prikazane vrijednosti čvrstoće za osnovni materijal te za epruvete izrezane okomito na smjer zavarivanja. [2]

**Tablica 3. Čvrstoća osnovnog materijala i zavara [2]**

	Granica tečenja [MPa]	Vlačna čvrstoća [MPa]	Istezljivost [%]
Osnovni materijal	841	880	12,5
Zavar A	718	820	10,4
Zavar A + 3 ppm vodika	728	759	1,9
Zavar B	625	764	12,1
Zavar B + 2 ppm vodika	643	735	1,9

Oba zavara nakon provedenog statičkog vlačnog ispitivanja pokazuju smanjenu čvrstoću u odnosu na osnovni materijal. Za zavar A vrijednosti granice tečenja i vlačne čvrstoće su niže od izmjerenih za osnovni materijal, ali i dalje u okviru granica propisanih za taj čelik. Granice prihvatljivosti za zavare čelika S690QL su propisane normom EN ISO 15614-1, a za statički vlačni pokus vrijednosti trebaju biti u skladu s onima koje su propisane za osnovni materijal, koji su iznosi za čelik S690QL propisani normom EN 10025-6. [13] Za zavar B je čvrstoća značajno manja odnosu na zavar A, a to ne zadovoljava kriterije čvrstoće iz norme EN 10025-6. Osim toga, analizom rezultata statičkog vlačnog pokusa iz tablice 3. se može zaključiti da vodik otopljen u metalnoj rešetki u maloj mjeri povećava granicu tečenja, ali smanjuje vlačnu čvrstoću. Značajna razlika se vidi u istezljivosti gdje uzorci s vodikom imaju 3 do 8 puta manju istezljivost. Kada se u perspektivu stavi utjecaj unosa topline i vodika u zavar, utjecaj vodika na krhkost je veći za zavar s većim unosom topline. [2]

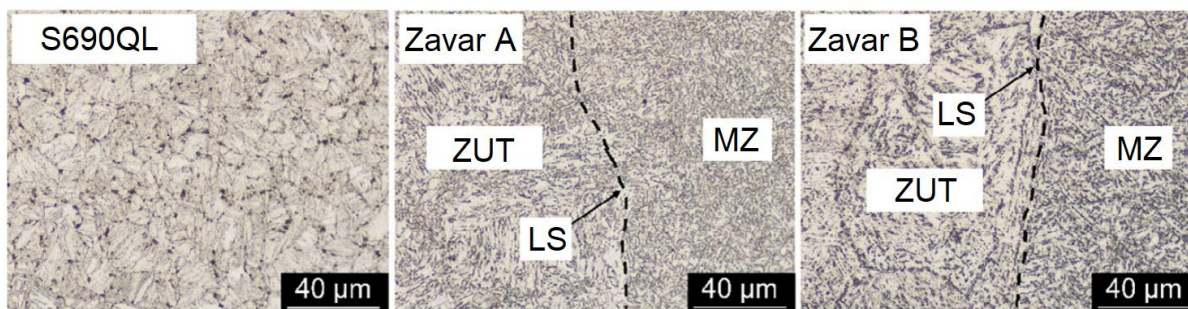
#### **2.4.4. Tvrdoća zavara čelika S690QL**

Prema normi EN ISO 15614-1 tvrdoća u zavaru se ispituje Vickers metodom HV10 u skladu s EN 1043-1. Otisci za mjerenje tvrdoće se uzimaju se u području osnovnog materijala (OM), u području zone utjecaja topline (ZUT) i u metalu zavara (MZ). U svakom području je potrebno napraviti po 3 mjerenja. Za uzorke debljine manje od 5 mm se uzima i niz tvrdoće, a za veće debljine uzoraka tvrdoću treba mjeriti u 2 niza. Dodatno, za dvostrane zavare se tvrdoća ispituje u još jednoj liniji koja prolazi kroz korijenski zavar. Pri mjerenju tvrdoće u zoni utjecaja topline je bitno da prvi otisak bude smješten što bliže liniji staljivanja. Za zavare čelika S690QL tvrdoća ne smije prijeći 450 HV10 odnosno 380 HV10 ako je nakon zavarivanja provedena toplinska obrada. [13] Prema istraživanju iz literature [2] tvrdoća je prosječno veća za zavar s manjim

unosom topline. U zavaru s većim unosom topline dolazi do većeg skoka tvrdoće za mjerenje blizu linije staljivanja. [2]

#### 2.4.5. Mikrostruktura zavora

U znanstvenom radu [2] također je ispitivana mikrostruktura zavora čelika S690QL. Struktura osnovnog materijala je prvenstveno sitnozrnata martenzitno-bainitna mikrostruktura prikazana na slici 7. lijevo. Slike 7. u sredini i desno prikazuju mikrostrukturu oko linije staljivanja (LS) za zavora s različitim unosima topline. U ZUT-u oba zavora formirala se grubozrnata austenitna struktura s precipitatima na rubu zrna. Jasno je vidljiva povezanost unosa topline i veličine zrna u ZUT-u. Za zavor s većim unosom topline zrna austenita su značajno veća. Mikrostrukturu metala zavora u oba uzorka čini acikularni ferit, a mikrostruktura je nešto grublja u zavaru s većim unosom topline. Acikularni ferit je povoljna mikrostruktura kod zavarivanja konstrukcijskih čelika povišene i visoke čvrstoće jer ima dobar utjecaj na sprječavanje pukotina u zavaru te dobru žilavost. [2]

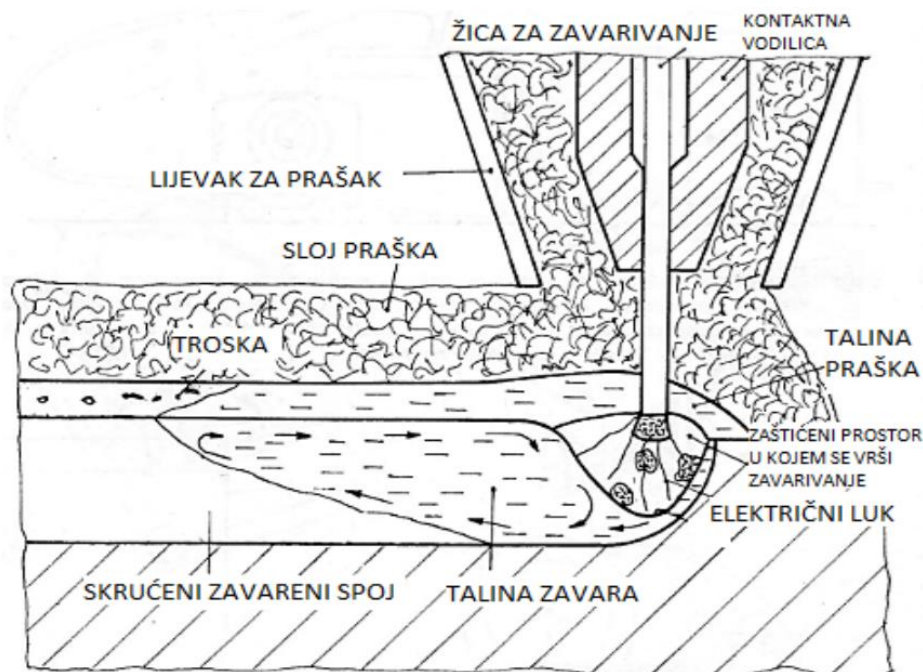


Slika 7. Mikrostruktura osnovnog materijala i zavora čelika S690QL [2]

### 3. Elektrolučno zavarivanje taljivom elektrodom pod zaštitom praška

Elektrolučno zavarivanje taljivom elektrodom pod zaštitom praška (EPP) se ubraja pod elektrolučne postupke zavarivanja. To znači da toplina potrebna za taljenje osnovnog i dodatnog materijala dolazi od električnog luka. Električni luk nastaje između taljive elektrode i radnog komada i ispod praška koji se nanosi na osnovni materijal. [1]

Razvoj EPP postupka je započeo 1930. ih godina mehaniziranjem dodavanja žice u zavar. U počecima se nije koristio zaštitni prašak što je rezultiralo poroznim zavarima loše kvalitete. Iako je obložena elektroda u to vrijeme bila već razvijena, nije bila prikladna za namatanje u kalemove i stoga nije omogućavala potpuno mehanizirano zavarivanje dugih zavara. Budući da velike struje nisu omogućavale zavarivanje u prisilnim položajima, razvoj EPP zavarivanja je pratila konstrukcija pozicionera i okretaljki koji su služili postavljanju zavara u povoljne položaje. Najbitnije unaprjeđenje postupka je nasipavanje mineralnog praška na mjesto zavarivanja. Prašak je kao i obloga elektrode služio zaštiti zavara od atmosfere kako bi zavari bili kvalitetniji te se na zavarima formirala troska. [1]



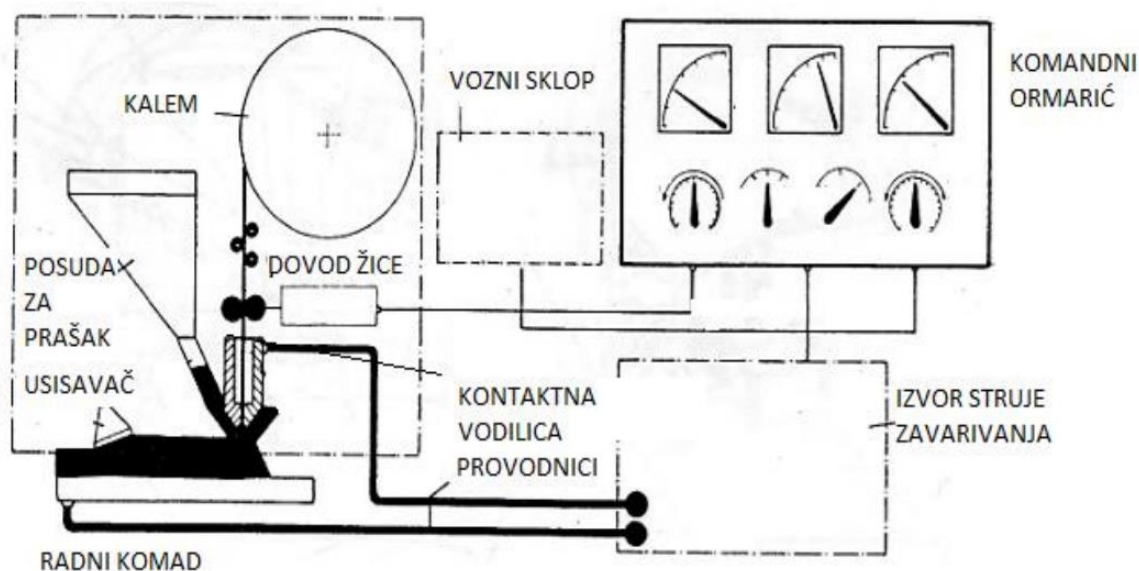
**Slika 8.** Shema elektrolučnog zavarivanja taljivom elektrodom pod zaštitom praška [1]

Na slici 8. je shematski prikaz EPP postupka zavarivanja. Električni luk se formira između radnog komada i dodatnog materijala koji je na ovoj shemi žica. Električni luk se nalazi ispod praška tako da se ne vidi u toku zavarivanja što onemogućuje vizualnu kontrolu zavarivanja,



ali štiti okolinu od svjetlosnog zračenja i plinova koji nastaju zavarivanjem. Glava za zavarivanje se sastoji od kontaktne vodilice koja prenosi električnu struju na dodatni materijal te lijevka kroz koji se dodaje zaštitni prašak. Međusobno kretanje glave za zavarivanje i radnog komada je u većini slučajeva mehanizirano zbog velike mase. Po zavarivanju na površini zavara ostaje troska staklastog oblika koja se u pravilu lako skida te neotopljeni višak praška koji se može ponovno koristiti. [1]

Za EPP zavarivanje je potrebna i odgovarajuća oprema koja uz izvor struje za zavarivanje uključuje sustav za dovod žice, opremu za pogon glave za zavarivanje ili radnog komada, upravljačku kutiju te sustav za dovod praška. Shema potrebne opreme je prikazana na slici 9. [1]



Slika 9. Shema opreme za EPP zavarivanje [1]

Struja za zavarivanje se dovodi provodnicima iz izvora struje tako da je jedan kabel spojen na kontaktnu vodilicu, a drugi na radni komad. Na komandnom ormariću ili upravljačkoj ploči se nalaze sklopke za pokretanje, zaustavljanje i regulaciju procesa zavarivanja. Uključivanjem sklopke se uspostavlja električni luk i pokreće vozni sklop glave za zavarivanje ili kreće gibanje radnog komada. Žica se dodaje iz kalema pomoću sustava za dovod žice pomoću kotačića.

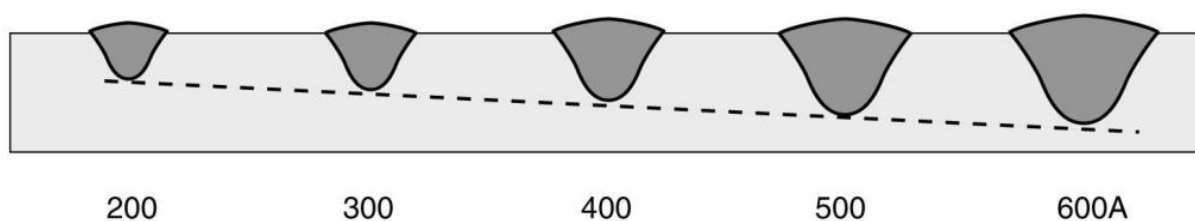
Kada počne zavarivanje operater prati struju i napon na ampermetru i voltmetru te po potrebi vrši podešavanje parametra. Po zavarivanju se višak praška skuplja ručno ili sustavom za usisavanje, a troska se odstranjuje sa zavara. [1]



### 3.1. Parametri kod EPP zavarivanja

Osnovni parametri EPP zavarivanja su jakost struje, napon električnog luka te brzina zavarivanja. Struja zavarivanja najviše utječe na dubinu penetracije i učinak zavarivanja. Za konstantan napon i brzinu zavarivanja, veća struja će rezultirati dubljom penetracijom i većim učinkom to jest većom količinom nanesenog dodatnog materijala. Za EPP postupak se okvirno uzima da je učinak zavarivanja 15 grama nanesenog dodatnog materijala na sat po jednom amperu (15 g/Ah). Za penetraciju se uzima da se za svakih 100 A struje prodire u osnovni materijal za 1 mm. To vrijedi ako se zavaruje spoj s malim presjekom žlijeba. [1]

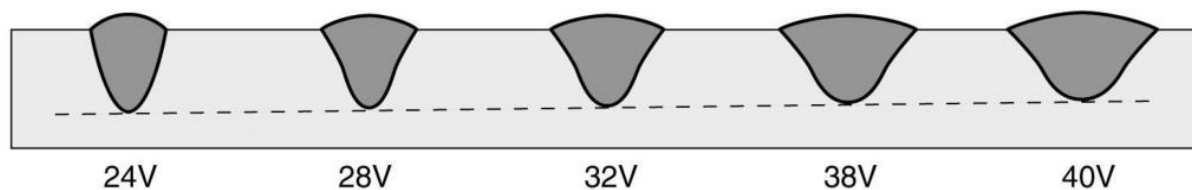
Na slici 10. je prikazana ovisnost jakosti struje zavarivanja i geometrije zavara. Uočljivo je da povećanje struje uzrokuje bolju penetraciju i veći presjek zavara tj. veći depozit materijala.



Slika 10. Utjecaj struje zavarivanja na geometriju zavara [15]

Kod određivanja struje zavarivanja je važno paziti na odnos jakosti struje i presjeka žice za zavarivanje odnosno gustoću električne struje. Gustoća električne struje se izražava u amperima (A) po presjeku žice u  $\text{mm}^2$ . Za istu jakost struje, tanja žica će dati veću gustoću struje, bolju penetraciju, uži zavar i nešto bolji učinak zavarivanja jer žica dolazi u zavar bolje predgrijana. Preporuke za gustoću struje se razlikuju od autora do autora pa se preporučuje uzimati srednje vrijednosti.

Da bi se dobio kvalitetan zavar, uz jakost struje potrebno je odrediti i odgovarajući napon te brzinu zavarivanja. Kod EPP zavarivanja napon električnog luka utječe na širinu i nadvišenje zavara, utrošak praška i metalurške reakcije. Napon je izravno povezan s duljinom električnog luka tako da uz istu struju zavarivanja veći napon uzrokuje dulji električni luk. Za istu struju i brzinu zavarivanja, veći napon će dati veću širinu zavara, nešto manju penetraciju te veću potrošnju praška. Utjecaj napona na geometriju zavara je shematski prikazan na slici 11. [1]

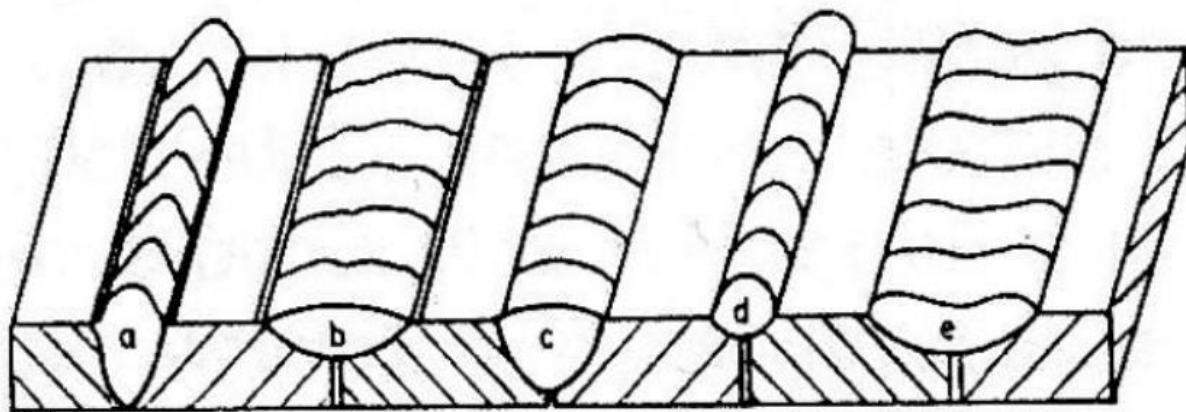


**Slika 11. Utjecaj napona električnog luka na oblik zavara [15]**

Takav utjecaj napona na zavar se objašnjava većim prostornim rasipanjem energije kod dužeg električnog luka što daje širi zavar. Sukladno tome, za dulji luk je koncentracija energije luka manja pa se smanjuje protaljšivanje.

Uz struju i napon zavarivanja, brzina zavarivanja ima značajan utjecaj na kvalitetu zavarenog spoja. Za istu struju zavarivanja i napon električnog luka, veća brzina zavarivanja daje manju penetraciju i manju širinu zavara. Dubina protaljšivanja se smanjuje jer je pri većoj brzini zavarivanja unos topline u zavar manji, a ujedno je manja i količina dodatnog materijala nanesenog u zavar pa je i presjek zavara manji. [1]

Na slici 12. je prikazana shema od 5 zavara izvedenih pri različitim parametrima kao objedinjeni prikaz utjecaja brzine, struje i napona zavarivanja.



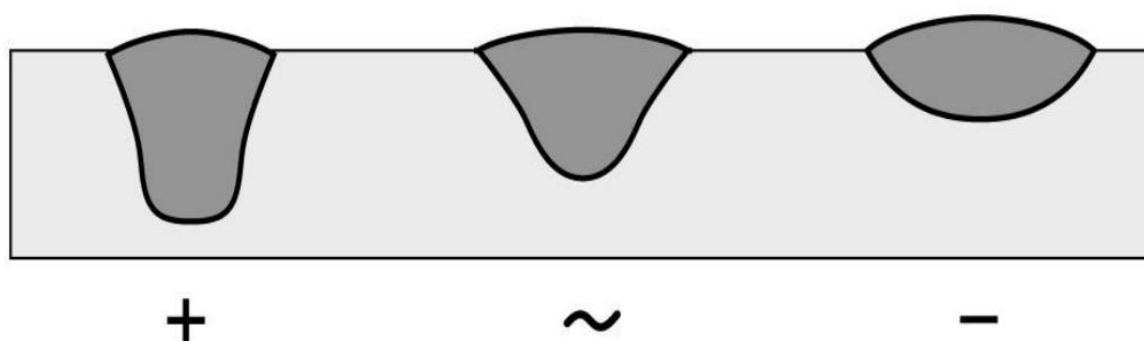
**Slika 12. Utjecaj parametara zavarivanja na oblik zavara[1]**

Zavar a ima preveliko nadvišenje što upućuje na preveliku struju zavarivanja ili premali napon električnog luka. Suprotno tomu, zavar b ima preveliku širinu i nedostatnu penetraciju. Takav zavar je posljedica prevelikog napona električnog luka ako su struja i brzina zavarivanja bili odgovarajući. Zavar izveden optimalnim parametrima je zavar s oznakom c. Zavar d ima

preveliko nadvišenje i nedovoljno protaljivanje. Metal zavara je gotovo samo nalijepljen na osnovni materijal što je izraženije za deblje osnovne materijale, a uzrok tomu je prevelika brzina zavarivanja odnosno nedovoljan unos topline. Suprotno zavaru d, za zavar e je brzina zavarivanja bila premala (manje od 10 m/h). Iako kontradiktorno, kod premalih brzina zavarivanja se penetracija smanjuje. Razlog tomu je stvaranje previše taline koja „bježi“ ispred i ispod električnog luka te onemogućuje prodiranje električnog luka dublje u materijal. Rezultat toga je smanjeno protaljivanje, prevelika širina zavara, uključci troske te naljepljivanje taline na nedovoljno zagrijani osnovni materijal. [1]

Uobičajeno se uzima da su brzine ispod 10 m/h premale za zavarivanje jednom žicom, a brzine iznad 90 m/h prevelike. Kod EPP zavarivanja jednom žicom za nelegirane čelike je optimalna brzina od 20 do 50 m/h, a za legirane i sitnozrnate čelike 40 do 60 m/h. Kod zavarivanja optimalnim brzinama električni luk zadržava talinu iza sebe i neometano prodire u osnovni materijal. [1]

Vrsta i polaritet struje također utječu na penetraciju i geometriju zavara. Za EPP zavarivanje se najčešće koristi istosmjerna struja s elektrodom na plus polu (DC+) jer daje najbolju penetraciju i najpovoljniji oblik zavara. Kod takvog zavarivanja se dobije najveći unos topline u zavar. Zavarivanje sa žicom na minus polu (DC-) daje širi zavar i manje protaljivanje uslijed različitog razvijanja topline na katodi i anodi električnog luka. Zavarivanje izmjeničnom strujom (AC) rezultira geometrijom zavara koja je između one dobivene DC+ i DC- strujama. [1] Prikaz utjecaja vrste struje na oblik zavara je na slici 13.



Slika 13. Utjecaj polariteta elektrode na geometriju zavara[15]

Na dubinu protaljivanja također utječe duljina slobodnog kraja žice. To je udaljenost kontaktne vodilice od radnog komada. Kod većih duljina slobodnog kraja žice penetracija je nešto manja

za iste parametre jer se dio električne energije pretvara u toplinu uslijed otpora žice. Otpor žice se može izračunati sljedećom formulom:

$$R = \rho \frac{l}{s} \quad (3)$$

Gdje je:

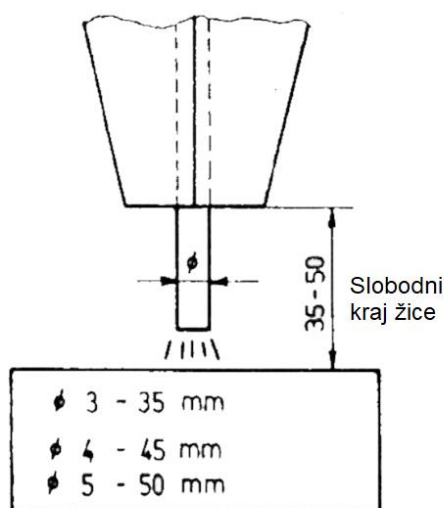
$R$  [ $\Omega$ ] – električni otpor,

$\rho$  [ $\Omega\text{mm}$ ] – specifični otpor,

$l$  [mm] – duljina slobodnog kraja žice,

$s$  [ $\text{mm}^2$ ] – poprečni presjek žice.

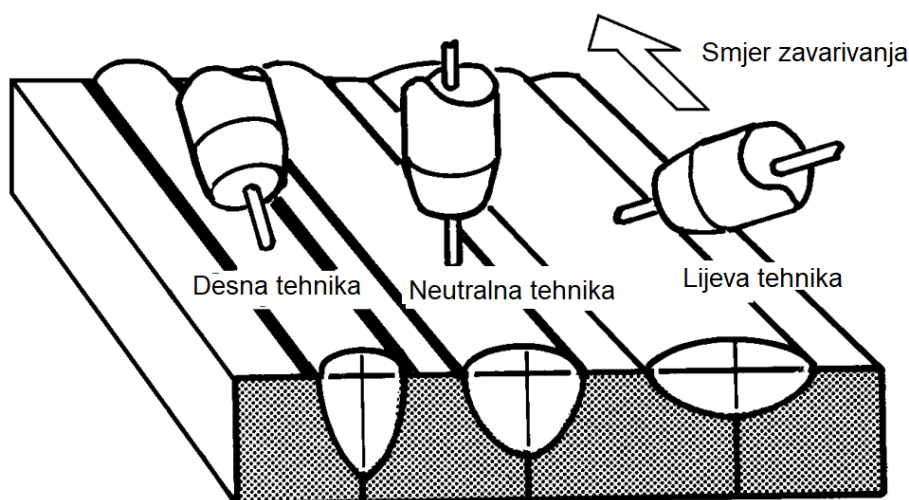
Prolaskom struje kroz slobodni kraj žice dio se električne energije utroši na svladavanje otpora te se manifestira kao toplina koja predgrijava žicu prije ulaska u zavar. Kako je taj dio energije utrošen na otpor, manje energije se oslobađa u električnom luku pa je penetracija lošija, ali je učinak veći zbog predgrijavanja dodatnog materijala. Utjecaj slobodnog kraja žice je značajniji kada se radi s većim gustoćama struje. Preporučena dužina slobodnog kraja žice za EPP zavarivanje je 11 x promjer žice za zavarivanje. Od toga se može odstupati kada se zavaruje manjim gustoćama struje (30- 40 A/ $\text{mm}^2$ ) kada su struje male ili je žica za zavarivanje deblja. Tada je prema gore navedenoj jednadžbi otpor manji i ne utječe značajno na zavarivanje, slobodni kraj žice je tada manje toplinski opterećen te se sa žicom promjera 4 mm i više može zavarivati i slobodnim krajem žice preko 100 mm. [1]



Slika 14. Preporuke za slobodni kraj žice [1]

Na slici 14. dane su preporuke za duljinu slobodnog kraja žice za nekoliko uobičajenih debljina dodatnog materijala.

EPP zavarivanje se može provoditi lijevom, desnom ili neutralnom tehnikom. Kod zavarivanja „pull“ ili desnom tehnikom dobiva se bolja penetracija i konveksniji zavar, ali je veća opasnost pojave zajeda na rubovima zavara. Suprotno tome lijeva ili „push“ tehnika daje manju penetraciju i manji rizik pojave zajeda. Neutralna tehnika je kompromis lijeve i desne. Slika 15. pokazuje utjecaj položaja glave za zavarivanje na oblik zavara. [16]



**Slika 15. Utjecaj tehnike zavarivanja na oblik zavara [16]**

### **3.2. Prašak za EPP zavarivanje**

Prašak kod EPP zavarivanja ima više uloga, a to su sljedeće[17]:

- uspostava i održavanje stabilnog električnog luka,
- stvaranje troske koja štiti i formira zavar,
- stvaranje plinova koji štite talinu od atmosfere,
- reakcija s talinom u svrhu izvlačenja nečistoća iz zavara,
- mikrolegiranje zavara.

Različiti materijali te različiti oblici spojeva za dobru zaštitu osnovnog metala i zavara zahtijevaju različite vrste prašaka. Prašci se mogu razlikovati po sastavu, načinu dobivanja ili po granulaciji. Sastoje se od minerala kao kvarc, vapnenac, manganovi i aluminijevi oksidi. [17]

Prema stupnju legiranja manganom i silicijem prašci se dijele u 3 skupine [16]:

- neutralni: nemaju značajan utjecaj na metalurgiju zavara, koriste se za zavarivanje debljih materijala u više prolaza, kod zavarivanja u jednom prolazu ili bez čišćenja površine može doći do pojave poroznosti,
- aktivni: Mn i Si iz praška metalurški utječu na izbjegavanje poroznosti posebno kod hrđavih materijala, koriste se za jednoslojno (višeslojno samo 3-5 slojeva) zavarivanje pri velikim brzinama, a troska se lako uklanja,
- legirani: legirni elementi se iz praška dodaju u zavar, a stupanj legiranja ovisi o parametrima.

Prema načinu dobivanja prašci se dijele na aglomerirane, taljene i miješane. ,

Aglomerirani prašci za zavarivanje se dobivaju tehnologijom rotacije uz dodatak silikata. Sirovine se na početku usitne na fine čestice koje se u procesu miješaju i formiraju granulu s odgovarajućim sastavom što je prikazano na slici 16. Na posljetku se granule peku na temperaturi između 600 i 850°C i dobije se kemijski nehomogeni aglomerat. Kako ti prašci kemijski ne reagiraju u postupku proizvodnje, u njih se mogu dodati legirni elementi koji potiču deoksidiranje taline. To je glavna prednost aglomeriranih prašaka u odnosu na taljene jer deoksidiranje taline daje zavar veće žilavosti, pogotovo pri sniženim temperaturama. Aglomerirani prašak pri zavarivanju ima manju potrošnju jer u odnosu na taljene ima manju gustoću, a često ima i povoljniji utjecaj na oblik zavara. Iz tih razloga aglomerirani prašci nerijetko zamjenjuju taljene. Nedostatak aglomeriranih prašaka u odnosu na taljenje je njihovo higroskopsko ponašanje pa se prije upotrebe za metale osjetljive na hladne pukotine moraju sušiti. [16]



**Slika 16. Aglomerirani prašak [16]**

Prašci za EPP zavarivanje koji se dobivaju taljenjem oblikom podsjećaju na usitnjeno staklo kao na slici 17. U procesu proizvodnje se svi sastojci rastapaju u peći na temperaturi oko 1300°C te se talina izlijeva i solidificira. Nakon toga se materijal usitnjava, suši i prosijava na potrebnu granulaciju. Za razliku od aglomeriranih, taljeni prašci su kemijski homogeni. Taljeni prašci su tvrdi od aglomeriranih što je povoljnije za primjene s dugim dovodnim kanalima ili kada se prašak provodi stlačenim zrakom. Osim toga, ovi prašci ne upijaju vlagu i nije potrebno sušenje prije upotrebe. Kod zavarivanja velikim strujama i brzinama taljeni prašci daju bolje rezultate u odnosu na aglomerirane. [16]



**Slika 17. Taljeni prašak [16]**

Zbog upijanja vlage prašak za zavarivanje se preporučuje skladištiti u određenim atmosferskim uvjetima. To podrazumijeva da je prašak zaštićen od oborina, na temperaturama ispod 15°C i pri relativnoj vlazi ispod 50%. Također je važno paziti na redoslijed potrošnje praška na način da se najprije troši prašak koji je najdulje na skladištu jer s vremenom dolazi do kemijskog raspadanja. Pri tome su sva pravila nešto stroža za aglomerirane praške jer su podobniji upijanju vlage. Ako se prašak ne koristi odmah nakon otvaranja, potrebno je njegovo sušenje. Za taljene praške je preporučeno sušenje na temperaturi 200- 400 °C u trajanju od 2 do 10 sati, dok se aglomerirani suše na temperaturama između 300 i 400 °C također od 2 do 10 sati. Kod dugotrajnog zavarivanja treba paziti na stanje praška u lijevku za dobavu praška, po preporukama se on treba kontinuirano grijati ili se nakon 8 sati premješta u posudu za sušenje. Primjer uređaja za sušenje praška prikazan je primjer na slici 18. [18]



**Slika 18. Uređaj za sušenje praška [19]**

Prašci za zavarivanje se mogu dijeliti i kao neutralni, rutilni i bazični. Neutralni prašci ne sadrže puno silicija, silikata ili glinice te nemaju značajan utjecaj u vidu legiranja zavara. Sukladno tomu, ne utječu na svojstva zavara. [17]

Rutilni prašci za zavarivanje sadrže značajan udio silicija, silikata i manganovih oksida. Takav prašak reagira s talinom te ju legira silicijem i manganom, ali ostavlja značajne količine kisika u zavaru. Iz tog razloga zavari imaju lošu žilavost, ali je moguće zavarivanje hrđavih površina i izgled zavara je povoljan. Troska se lako odvaja, a prašak je pogodan za zavarivanje kutnih spojeva u jednom prolazu velikom brzinom. [17]

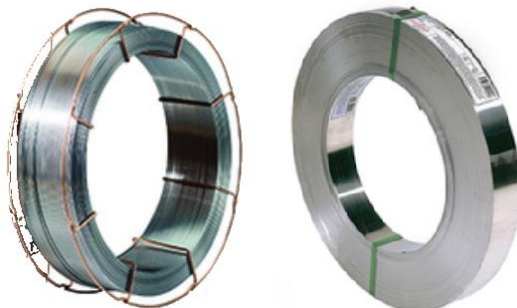
Najbolja mehanička svojstva zavara se postižu korištenjem bazičnih prašaka. Sadrže mali udio silicija te razne udjele kalcijevog karbonata, i/ili fluorida, aluminijskog oksida, kalcija, mangana, magnezijevog oksida i rutila. Takva mješavina daje čist zavar sa smanjenim udjelom sumpora i oksida. Rezultat toga je zavar s odličnom žilavosti. Takvi prašci su prvi izbor za zavarivanje čelika povišene čvrstoće, tlačne opreme ili u brodogradnji, pogotovo za konstrukcijske čelike kod kojih je potrebna dobra žilavost na sniženim temperaturama. [17]

### **3.3. Žice za EPP zavarivanje**

Dodatni materijal za EPP zavarivanje dolazi u obliku žice ili trake namotan u kolute kao što je prikazano na slici 19. Žica za zavarivanje najčešće dolazi u debljinama od 1,2 do 6,4 mm. Žice za zavarivanje nelegiranih i niskolegiranih čelika najčešće dolaze obložene tankom prevlakom bakra kako bi se produžio vijek trajanja kontaktne vodilice, a ujedno štiti dodatni materijal od korozije. Žice za zavarivanje nehrđajućih čelika nemaju metalnu prevlaku. Trake za EPP



navarivanje imaju standardiziranu debljinu od 0,5mm i dolaze u širinama od 15 do 240mm. [17]



Slika 19. Žica i traka za EPP zavarivanje [20]

### 3.4. Podloge za EPP zavarivanje korijenskog zavara

Podloge za zavarivanje su različito profilirani dijelovi koji se postavljaju s donje strane žlijeba za zavarivanje korijenskog zavara i osiguravaju oblikovanje korijena zavara. Zavarivanje korijena se inače smatra najzahtjevnijim procesom u zavarivanju. Kod zavarivanja korijena zavara je potrebno ujednačiti sve sile koje djeluju na talinu kako ne bi došlo do protaljivanja ili nepotpunog provara. Podloge olakšavaju određivanje odgovarajućih parametara zavarivanja tako da sprječavaju protaljivanje odnosno curenje metala iz zavara. Osim toga podloge donose i druge povoljne utjecaje na zavarivanje:

- mogućnost zavarivanja samo s jedne strane što smanjuje troškove okretanja,
- mogućnost zavarivanja debljih materijala u samo jednom prolazu,
- mogućnost zavarivanja gdje je jedna strana zavara nedostupna za zavarivanje,
- mogućnost rada povećanim parametrima uz veću učinkovitost.

Podloge se proizvode od različitih materijala za razne primjene. Materijali za izradu podloga su staklo, keramika i metali, a kod EPP zavarivanja se koriste i podloge od praška.

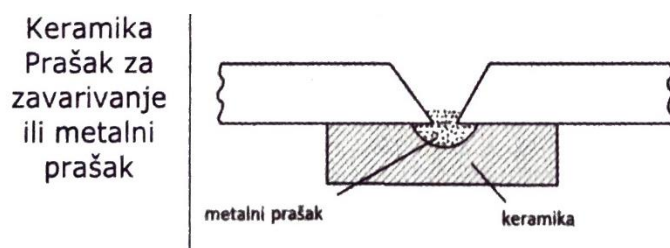
Metalne podloge se dijele na taljive i netaljive. Taljive podloge se mogu potpuno rastaliti te postaju dio zavara ili se djelomično tale i ostaju privarene na zavar. Takve podloge se najčešće koriste za čelične materijale, a spojevi imaju lošiju dinamičku izdržljivost. Druga vrsta metalnih podloga su netaljive podloge koje se nakon zavarivanja uklanjaju. To su u pravilu podloge izrađene od bakra i mogu biti hladene. Iznimka je aluminij za čije se zavarivanje koriste podloge od nehrđajućeg čelika jer bakrene podloge uzrokuju koroziju zavara.

Podloge od prašaka mogu biti rastresite, rastresite i omotane tkanjem, povezane vezivom u želatinastu masu ili kompaktne. Ograničenje za rastresite podloge je primjena u vodoravnom položaju. Krute podloge nerijetko imaju više sojeva i svaki ima svoju ulogu, a fleksibilne podloge imaju prednost kod primjene na zakrivljenim spojevima.

Keramičke podloge se proizvode u nizu oblika i dimenzija. Razlikujemo higroskopne podloge i one otporne na vlagu, a kod higroskopnih se mogu pojaviti poroznosti u zavaru. Načini pričvršćivanja su razni i ovise o dimenzijama i proizvođaču.

Podloge od stakla mogu biti krute ili tkane elastične. Tkane podloge su uglavnom višeslojne sa slojevima keramike ili praška za zavarivanje, a njihova primjena je ograničena na manje debljine materijala. Glavna prednost im je elastičnost zbog čega su pogodne za rad na terenu. [21]

U praksi je moguće i korištenje 2 sustava podloga, to je primjerice keramička podloga s nasipanim praškom za EPP zavarivanje prikazana na slici 20. [21]



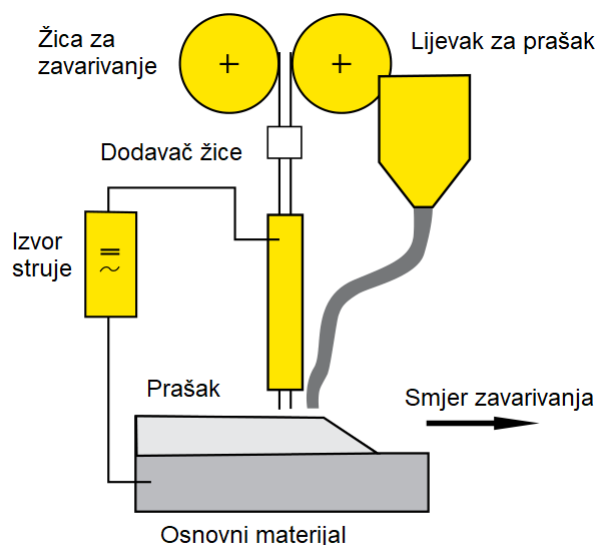
Slika 20. Keramika- Prašak za zavarivanje kao podloga [21]

### 3.5. Izvedbe EPP postupka za povećanje učinkovitosti

U svrhu postizanja bolje učinkovitosti zavarivanja, uz zavarivanje jednom punom žicom su se razvile dodatne varijante EPP postupka. Kod zavarivanja jednom žicom najčešće se koristi istosmjerna struja i prisutan je jedan električni luk. Maksimalni učinak je do 12 kg/h. [16]

#### 3.5.1. Zavarivanje s dvije ili više žica

Zavarivanje s dvije ili više žica je povoljno rješenje za poboljšanje učinkovitosti EPP zavarivanja. Na uređaj za zavarivanje se dodaje još jedan pogon za dodavanje žice i ugrađuje se kontaktna vodilica s dva provrta za dvije žice. Shema sustava s dvije žice je prikazana slikom 21. Obje žice koriste zajednički izvor energije i zajednički regulacijski sustav. Produktivnost se podiže za 30 do 40 % jer je gustoća struje manja pa se može zavarivati većim strujama. Kako žice prolaze istom kontaktnom vodilicom, međusobno dijele električnu struju. [22]

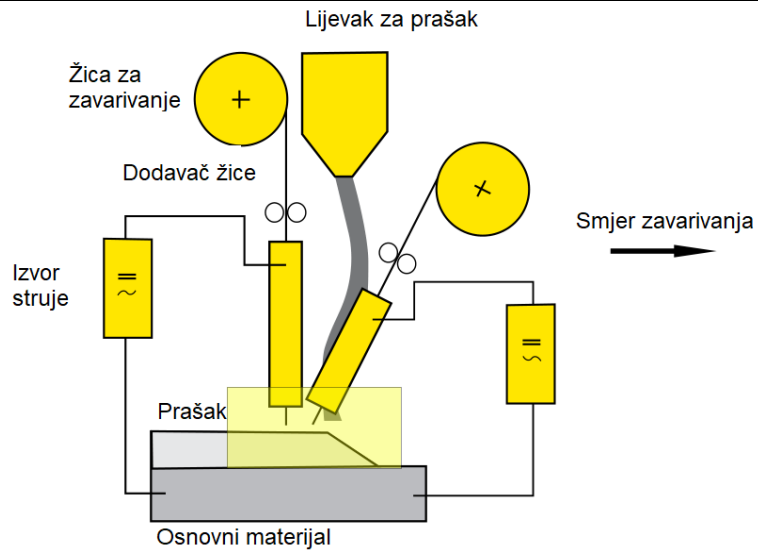


**Slika 21. EPP zavarivanje s dvije žice [16]**

Promjer žice je najčešće 2, 2,5 ili 3 mm s razmakom između žica oko 8 mm. Kako bi se izbjegla poroznost te kako bi se postigla što bolja stabilnost električnog luka se koristi istosmjerna struja s elektrodom na + polu. [22] Žice se mogu postaviti tako da stoje paralelno sa zavarom odnosno jedna iza druge, jedna pored druge tj. okomito na zavar ili pod određenim kutom. Različiti položaji se koriste ovisno o geometriji i pripremi spoja. [23]

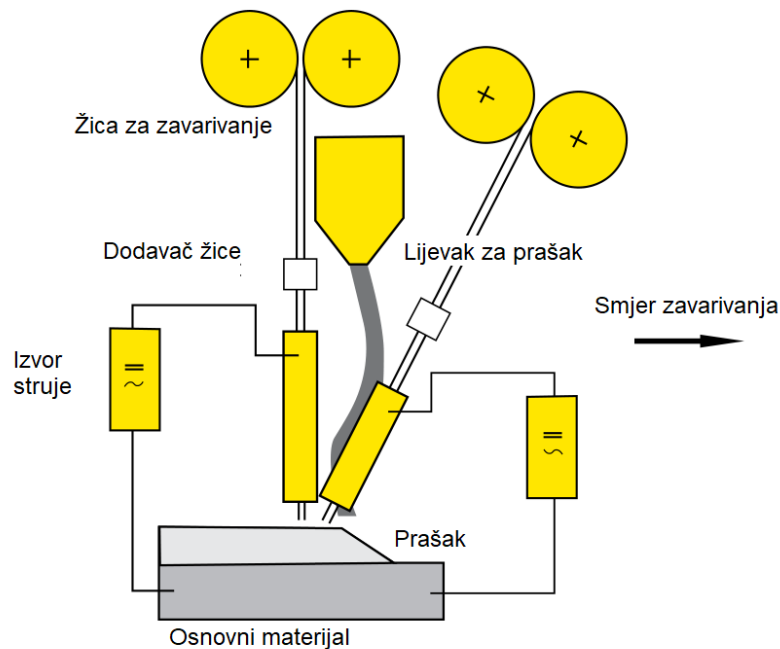
### 3.5.2. Tandem tehnika EPP zavarivanja

Tandem tehnika zavarivanja koristi dvije žice koje koriste odvojene izvore struje te odvojenu regulaciju. Za tandem tehniku su potrebne dvije glave za zavarivanje te svaka žica ima vlastitu kontaktnu vodilicu. Kod ove tehnike se koriste žice debljine 3 do 5 mm i zavaruju se deblji limovi kod kojih je potrebno popuniti velike presjeke zavara [22]. Za prvu žicu se koristi istosmjerna struja s elektrodom na plus polu radi bolje penetracije, a druga žica radi na izmjeničnoj struji radi boljeg izgleda zavara i sprječavanja puhanja luka koji se javlja kod istosmjernih struja. [16] Shema tandem tehnike je prikazana na slici 22.



**Slika 22. Tandem tehnika EPP zavarivanja [16]**

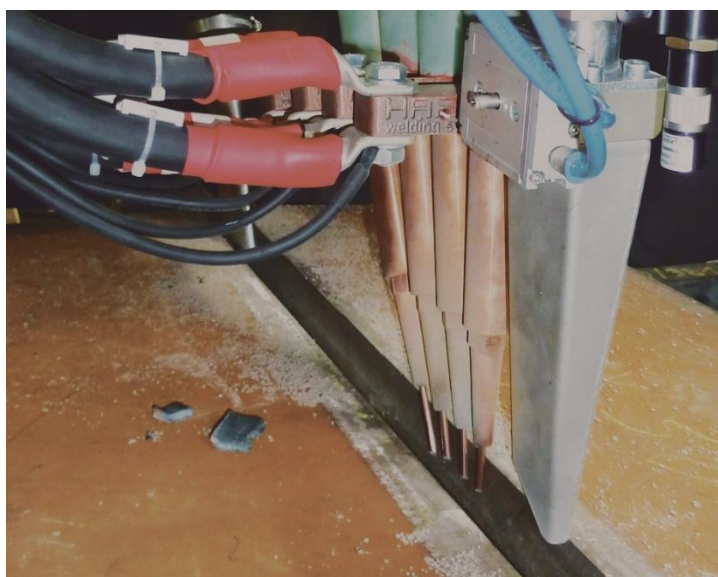
Za postizanje još većeg učinka razvijena je i dvostruka tandem tehnika koja koristi dvije glave za zavarivanje kao tandem tehnika, ali kroz svaku od njih prolaze dvije žice za zavarivanje. koriste se 4 žice manjeg presjeka (npr. 2,5 mm), a produktivnost je do 38 kg/h. Ova tehnika se primjenjuje za zavarivanje velikih kružnih zavora. [16] Shema opreme je prikazana na slici 23.



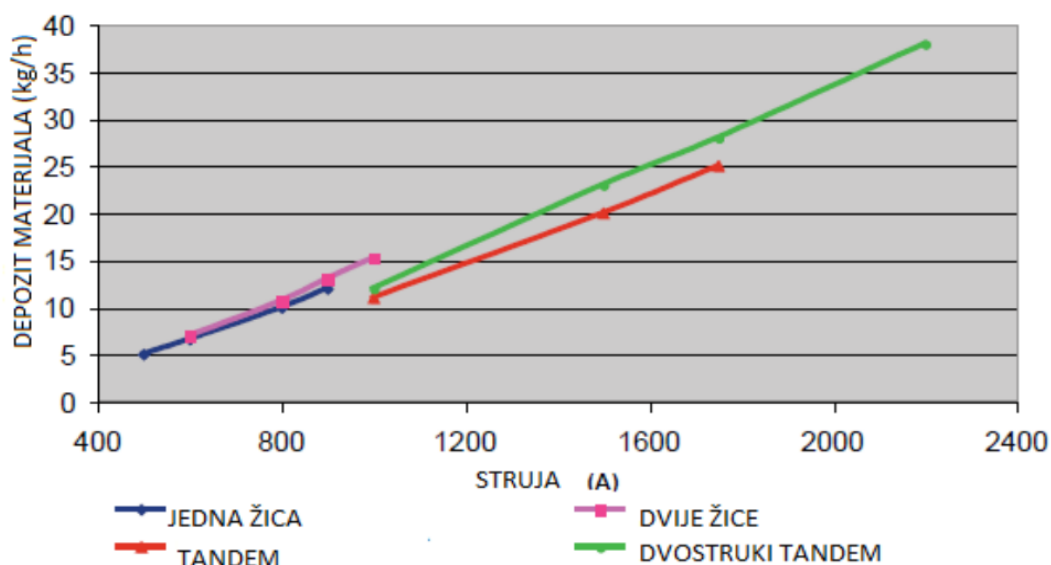
**Slika 23. Dvostruka tandem tehnika [16]**

### 3.5.3. Zavarivanje s više kontaktnih vodilica

Maksimalne učinkovitosti EPP zavarivanja se postižu zavarivanjem s više kontaktnih vodilica od kojih svaka ima par žica, a svaka kontaktna vodilica ima zaseban izvor struje. Prva kontaktna vodilica je spojena na istosmjerni izvor struje sa žicom na plus polu, a ostale koriste izmjeničnu struju. Moguće je koristiti do 6 kontaktnih vodilica s brzinama zavarivanja do 2,5 m/min. Produktivnost ove inačice EPP zavarivanja doseže i do 90 kg/h i pogodna je za uzdužno zavarivanje cijevi [16]. Na slici 24. je izvedba s 4 kontaktne vodilice.



Slika 24. EPP zavarivanje s 4 vodilice [24]



Slika 25. Usporedba produktivnosti inačica EPP zavarivanja [16]

Na slici 25. je dijagram koji prikazuje učinkovitosti za nekoliko inačica EPP zavarivanja. Vidljivo je da se tandem tehnikom postiže veći depozit materijala u odnosu na tehnike s jednom i dvije žice. Najveća učinkovitost je za zavarivanje dvostrukom tandem tehnikom, ali ona zahtjeva i veća ulaganja u opremu. Također je vidljiv utjecaj jakosti struje na rast učinkovitosti EPP postupka.

#### **3.5.4. Punjene žice za EPP zavarivanje**

Zavarivanje prahom punjenom žicom je najjednostavnija metoda povećanja produktivnosti EPP zavarivanja. Punjene žice za zavarivanje se dobivaju punjenjem šuplje žice prahom koji zavaru daje određena kemijska ili mehanička svojstva. Najveća prednost ovakvih žica je veća učinkovitost i nešto manji unos topline, ali se mogu koristiti i za mikrolegiranje zavara. Dodavanje bazičnih elemenata u žicu za zavarivanje pomaže u smanjivanju udjela vodika u zavara što poboljšava žilavost.

Za istu struju i napon zavarivanja prahom punjene žice trebaju veću brzinu dodavanja žice zbog veće gustoće struje i zagrijavanja žice uslijed električnog otpora. Zbog toga je za iste parametre depozit veći u odnosu na pune žice za EPP zavarivanje i treba povećati brzinu zavarivanja. Samim time je unos topline manji i smanjuju se deformacije i zaostala naprezanja. Uz to, za iste parametre se dobiva nešto plići i širi zavar. Takav profil zavara je bolji za zavarivanje korijenskih prolaza jer smanjuje opasnost od provarivanja i curenja taline, a daje i vizualno ljepši zavar.

Za zavarivanje spojeva gdje se potrebna dobra penetracija koju prahom punjena žica ne može postići može se zavarivati tandem tehnikom tako da se penetracija postigne punom žicom, a za njom prolazi prahom punjena žica koja popunjava zavar i daje bolju geometriju. [25]

#### **3.5.5. EPP zavarivanje izmjeničnom strujom**

Izmjenična struja kod EPP zavarivanja uglavnom je vezana za tandem tehniku zavarivanja jer sprječava međusobni utjecaj električnih lukova u zavaru. Suvremeni izvori struje omogućuju podešavanje omjera pozitivnog i negativnog polariteta struje te izmjenu polariteta u jako kratkom vremenu.

Podešavanjem trajanja pojedinog polariteta utječe se na geometriju zavara. Vrijeme pozitivnog pola na elektrodi daje bolju penetraciju, a zavarivanje s negativnim polom daje veći depozit metala u zavar. Osim trajanja polariteta, moguće je postaviti i različite jakosti struje svaki polaritet, a utjecaj je jednak kao i za trajanje polariteta struje.

Velika prednost digitalno upravljanih izvora struje je u mogućnosti njihovog međusobnog povezivanja i upravljanja. Kod tandem tehnike zavarivanje gdje je više žica s izmjeničnom strujom moguće je sinkronizirati struje tako da su puhanje luka i loš utjecaj na zavar minimalni. [26]

### 3.6. Karakteristične nepravilnosti kod EPP zavarivanja

Greške u zavaru se mogu pojaviti kod svih postupaka zavarivanja, bilo ručnih ili automatiziranih. Kod svih elektro-lučnih postupaka se javljaju iste nepravilnosti, a njihovo sprječavanje je nešto teže kod automatiziranog zavarivanja jer nema utjecaja zavarivača. Ako se greške kvalitetno analiziraju te se odredi njihov uzrok, lakše je prilagoditi parametre da se greška izbjegne. Treba uzeti u obzir da se za određene spojeve parametri mogu mijenjati samo u određenim rasponima. Greške zavara koje se javljaju kod EPP zavarivanja su sljedeće:

- naljepljivanje ili nepotpuno popunjavanje žlijeba,
- tople pukotine,
- površinske pore,
- poroznost,
- uključci troske,
- zajedni.

Naljepljivanje ili nepotpuno popunjavanje žlijeba se na radiografskim snimkama vidi kao oštra ravna linija, te takvi zavari ne prolaze kontrolu kvalitete. Ako se korijen zavaruje s obje strane, nepotpuno protaljivanje korijena je posljedica ili neodgovarajuće brzine ili neadekvatne pripreme spoja. Najveći utjecaj na pojavu grešaka korijena ima brzina zavarivanja. [22]

Tople pukotine su dobile naziv zbog njihove pojave pri temperaturama oko 1200°C. Pojavljuju se kao ravne pukotine u smjeru zavarivanja. Uzrok nastanka toplih pukotina je pojava segregacije pri procesu solidifikacije taline zavara. U procesu kristalizacije ugljik i sumpor se nakupljaju na sredini zavara pa je pri visokoj temperaturi čvrstoća metala u toj zoni snižena. Ta pojava je izraženija ako je omjer širine i dubine zavara manji od 1 jer se tada zavar hladi od bočnih rubova prema sredini vertikalno. Za izbjegavanje toplih pukotina treba postići hlađenje zavara od dna prema vrhu tako da se kristali ne formiraju vertikalno već dijagonalno pa nakupine ugljika i sumpora među kristalima ne utječu na svojstva zavara. Kod debelih limova može doći do pojave toplih pukotina zbog prebrzog hlađenja, a kako bi se to spriječilo potrebno je predgrijavanje osnovnog materijala.

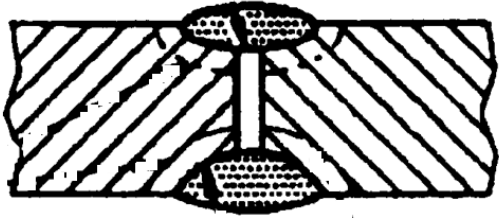
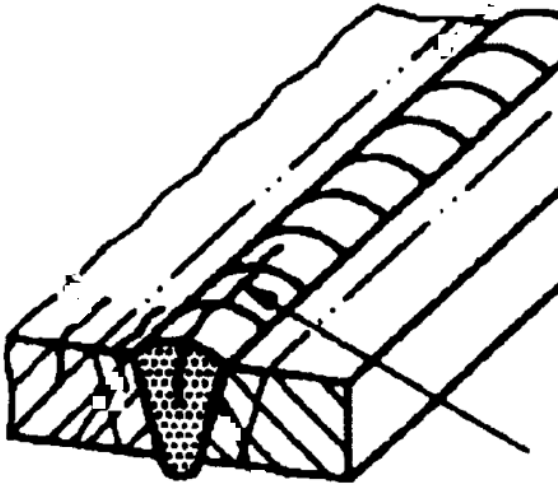
Površinske pore se pojavljuju po sredini zavora zbog izlaska plinova (najčešće vodika) iz zavora prilikom solidifikacije. Do pojave pora dolazi kada plinovi ne stignu izaći iz metala prije skrućivanja. To je najčešće posljedica prebrze kristalizacije, vlage na osnovnom metalu ili u prašku ili zbog nečistoća na osnovnom materijalu. Prebrza solidifikacija se događa ako je brzina zavarivanja prevelika te je za izbjegavanje pora potrebno smanjiti brzinu zavarivanja. Isto tako je potrebno očistiti metal prije zavarivanja te odgovarajuće osušiti prašak. Pojava površinskih pora je češća kod zavarivanja izmjeničnom strujom.

Pore u zavaru se mogu pojaviti i ispod površine. Nastaju stvaranjem plinova prilikom skrućivanja. To se može dogoditi kada priprema spoja nije idealna i troska se nakuplja kraterima iz kojih ne može izaći i pri skrućivanju ispušta plinove koji ostaju u metalu zavora. Poroznost se izbjegava adekvatnom pripremom i čišćenjem spoja prije zavarivanja.

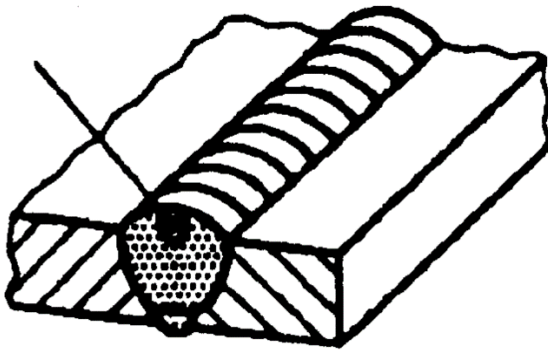
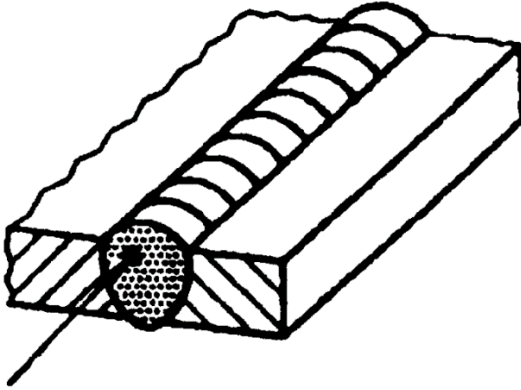
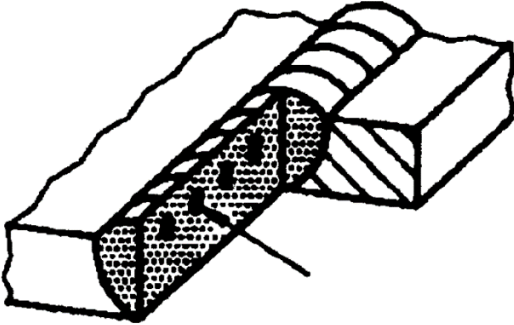
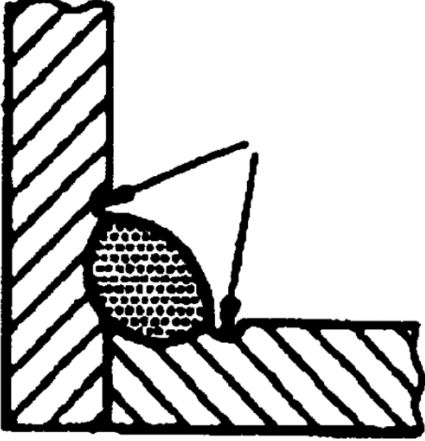
Zajedi se pojavljuju kada je brzina zavarivanja prevelika, a kod EPP zavarivanja se najčešće pojavljuju kod kutnih zavora u PB položaju. Ako se pojave zajedni na zavaru, potrebno je smanjiti brzinu zavora i napon električnog luka. [22]

U tablici 4. su prikazane učestale greške koje se pojavljuju kod EPP zavarivanja.

**Tablica 4. Greške kod EPP zavarivanja [27]**

	
<p> Greške korijena </p>	<p> Tople pukotine </p>



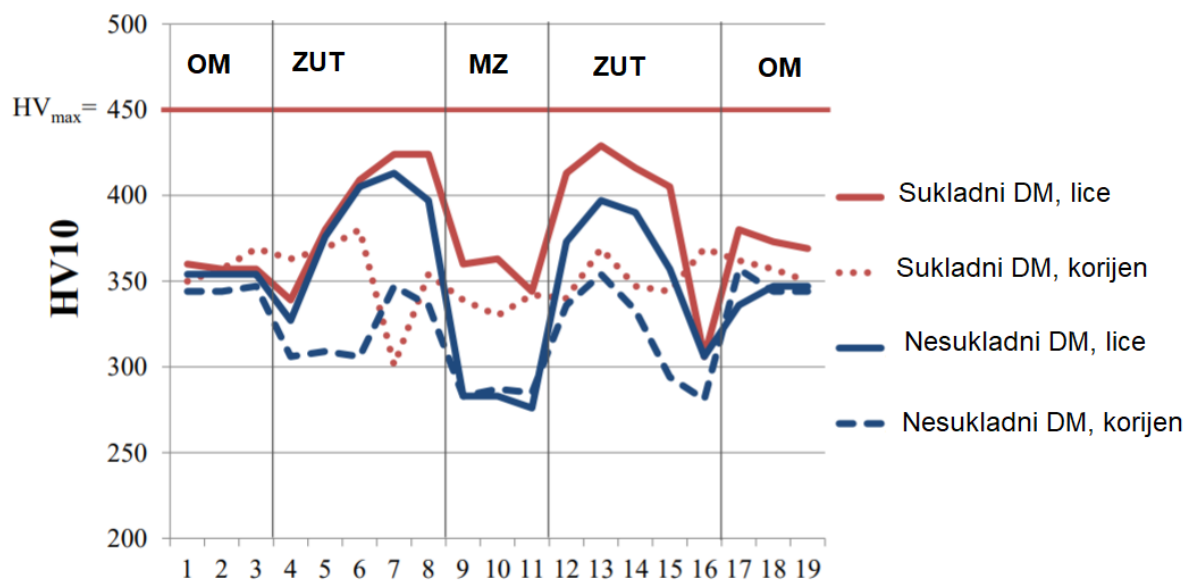
	
<p> Površinske pore </p>	<p> Poroznost </p>
	
<p> Uključci troske </p>	<p> Zajedi </p>

### 3.7. Izbor dodatnog materijala za zavarivanje čelika S690QL EPP postupkom

Kod zavarivanja čelika S690QL je važno zadržati žilavost zavarenog spoja pri sniženim temperaturama. Odgovarajući dodatni materijali za zavarivanje čelika S690QL su oni koji imaju granicu razvlačenja preko 690 MPa. Ipak, kada je za eksploataciju važnija žilavost i otpornost na pukotine, kod čelika povišene čvrstoće (preko 480 Mpa) se mogu koristiti dodatni materijali s lošijim mehaničkim svojstvima od osnovnog. Takav izbor se ne preporučuje za odgovorne konstrukcije poput zgrada ili okvira radnih strojeva koji štite od prevrtanja te su dizajnirani da podnesu plastične deformacije. [28]

Korištenje slabijeg dodatnog materijal je prihvatljivo i u konstrukcijama kod kojih nosivost zavara nije od velikog značaja. To su sučeljeni i kutni zavari s nepotpunim provarom. Takvi zavari još mogu biti zadovoljavajući ako se nalaze na mjestu u konstrukciji gdje je naprezanje

značajno manje od maksimalnog dopuštenog. Zavarivanje s nesukladnim dodatnima materijalom je posebno povoljno za tehnologiju zavarivanja jer smanjuje vjerojatnost pojave pukotina. Zavari imaju nešto nižu čvrstoću, ali bolju deformabilnost i žilavost. Povoljan utjecaj se vidi i u manjem porastu tvrdoće u ZUT-u što je vidljivo na dijagramu na slici 26. [29]



Slika 26. Utjecaj dodatnog materijala na tvrdoću zavara [29]

Čelik S690QL je osjetljiv na hladne pukotine i stoga je potrebno koristiti bazične praške za zavarivanje uz adekvatno sušenje. Točnu vrstu praška se može odrediti i po preporukama proizvođača žice za zavarivanje. Za čelike povišene čvrstoće treba koristiti aktivne praške da ne dođe do pojave poroznosti.

## 4. Eksperimentalni dio

U eksperimentalnom dijelu rada ispitivana je zavarljivost čelika S690QL EPP postupkom. Zavarivan je sučeljeni i kutni spoj limova debljine 8 mm u jednom prolazu. Zavarivanje je provedeno u vodoravnom PA položaju, a zavari su ispitivani prema normi HRN EN ISO 15614-1 za razinu kvalitete 2. Zavarivanje te ispitivanja dobivenih uzoraka provedena su u laboratoriju za zavarivanje katedre za zavarene konstrukcije Fakulteta strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu.

Na zavaru su provedena sljedeća ispitivanja:

- vizualna kontrola,
- nerazorno ispitivanje penetrantima,
- analiza makrostrukture,
- analiza mikrostrukture,
- ispitivanje tvrdoće.

### 4.1. Određivanje parametara zavarivanja

Tehnologiju za zavarivanje čelika S690QL se određuje po smjernicama norme HRN EN ISO 1101. Kako bi se odredila temperatura predgrijavanja potrebno je izračunati ekvivalentni udio ugljika za što se koristi jednadžba (2) iz 2.4.1. Kako bi se izračunao ekvivalentni udio ugljika potrebno je uvrstiti pojedine udjele legirnih elemenata iz atesta osnovnog materijala u jednadžbu (2). Pojedini udjeli su prikazani u tablici 5. Kao osnovni materijal koristio se čelik S690QL proizvođača Thyssenkrupp iz šarže 655800. [30]

**Tablica 5. kemijski sastav osnovnog materijala [30]**

C	Si	Mn	P	S	N	B	Cr	Cu
0,16	0,18	0,9	0,009	0,001	0,005	0,0027	0,32	0,03
Mo	Nb	Ni	Ti	V	Zr			
0,2	0,025	0,05	0,004	0	0			

Uvrštavanjem legirnih elemenata čelika S690QL u jednadžbu (4) dobije se  $CET = 0,28875 \%$ . Temperatura predgrijavanja se izračunava prema formuli (1) iz 2.4.1., a prvo je potrebno odrediti udio vodika u zavaru i željeni unos topline. Unos topline određivan je nakon zavarivanja jer je bilo važnije odrediti parametre za zavarivanje limova debljine 8 mm u jednom

prolazu pa se ovom metodom ne može odrediti temperatura predgrijavanja. Na temelju iskustva je zaključeno za da limove debljine 8 mm nije potrebno predgrijavanje.

Provedeno je nekoliko eksperimentalnih zavarivanja kod kojih su se mijenjali brzina, struja i napon zavarivanja te je zaključeno da se potpuno provarivanje postiže sa strujom 600 A i naponom električnog luka 33 V. Razlika unosa topline postigla se mijenjanjem brzina zavarivanja koje su iznosile 50 cm/min i 60 cm/min. Parametri za pojedine uzorke su prikazani u tablici 6.

**Tablica 6. Parametri zavarivanja**

Broj uzorka	Struja, A	Napon, V	Brzina, cm/min
1	600	33	60
2	600	33	50
3	600	33	60
4	600	33	50

#### 4.2. Odabir dodatnog materijala

U svrhu zadržavanja žilavosti pri niskim temperaturama, u ovom eksperimentu odabran je dodatni materijal slabijih mehaničkih svojstava u odnosu na osnovni materijal. Izabrani su žica i prašak proizvođača Kiswel. Korištena je žica debljine 4 mm trgovačkog naziva KD-42 koja je sukladna normi EN ISO 14171 – 2010: S2Si. Broj šarže navedene žice je 2D445. S tom žicom proizvođač preporučuje korištenje praška prema normi EN ISO 14174 - 2012 : SA AB 1 77 AC. Prašak i žica se zajedno kupuju pod trgovačkim nazivom EF-100S×KD-42 odnosno prema normi EN ISO 14171 - 2010 : S 46 2 AB S2Si.

Žica s aktivnim praškom se koristi za zavarivanje u brodogradnji, čeličnim konstrukcijama, gradnji mostova... Minimalna granica tečenja metala zavara koji se dobije korištenjem ove žice prema normi EN ISO 14171 je 460 MPa, a najmanja istezljivost koju garantira proizvođač je 20 %. Udarni rad loma za metal zavara na -20 °C je preko 47 J. [31]

#### 4.3. Oprema za zavarivanje

Za EPP zavarivanje koriste se robusni i izdržljivi izvori struje s velikim intermitencijama. U ovom eksperimentu je korišten izvor struje za zavarivanje proizvođača Iskra BHKV – T – 1000

– U iz 1983. godine te je prikazan na slici 27. Prema podacima s nazivne pločice sa slike 28., uređaj daje izlaznu struju od 100 do 1000 A i napon od 24 do 44 V.



Slika 27. Izvor struje korišten za EPP zavarivanje

Type: BHKV-T-1000-U		MSZ-05 48 1402	
		Nr. und Baujahr 340195	
		1983	
	Leistungsgebiet		
	1000 A / 44 V - 100 A / 20 V		
	Schweisstrom u. Frequenz		
	$b_1 =$ 35% 60% 80% 100%	$I_2 =$ A A 100 A 900 A	$U_2 =$ V V 44 V 44 V
	$U_0 =$ 64 V	$U_2 =$	
Eingangstromkreis			
3-50 Hz	Nennleistung: 70 kVA	$I_1 =$ A A 105 A 93 A	
$U_1 =$ 3% 380 V	Max. Sicherung: 100 A	Leistungsfaktor: 0,8 B cos φ	Kühlweise: A F Schutzart: IP-23 Gewicht: 550 kg
		Wärmebeständigkeitsklasse: E	Berührungsschutzklasse: I

Slika 28. Specifikacije uređaja za zavarivanje

S pločice se može pročitati da uređaj ima 100 % intermitenciju za struju 900 A. To znači da uređaj može kontinuirano zavarivati strujom 900 A bez pregrijavanja. Radi se o transformatorskom izvoru struje s trofaznim napajanjem.

Osim izvora struje pri zavarivanju se koristio automat za pomicanje glave za zavarivanje s upravljačkom jedinicom za upravljanje i nadzor parametara koja je prikazana na slici 29.



Slika 29. Upravljačka jedinica uređaja za zavarivanje

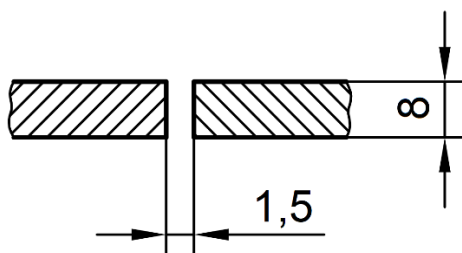
Lijevi pokazivač na uređaju prikazuje jakost struje zavarivanja, a desni pokazivač pokazuje napon električnog luka. Na prikazanoj jedinici se još s potenciometrima može podešavati jačina struje i napon luka te upravljati dodavačem žice neovisno o zavarivanju što se koristi za provođenje žice pri montaži ili u pripremi zavarivanja. U serijskoj proizvodnji taj uređaj služi za potpunu kontrolu procesa i na njemu operater prati parametre te pokreće i zaustavlja zavarivanje.

#### 4.4. Priprema uzoraka za zavarivanje

Za zavarivanje su pripremljena 4 uzorka, od toga 2 za sučeljeni te 2 za T- spoj. Prema normi HRN EN ISO 15614-1 izrezani su limovi duljine 350 mm i širine 150 mm[13]. Nakon plinskog rezanja, ploče su brušene u području zavora kako bi se uklonile nečistoće i oksidi s površine metala.

Za sučeljeni spoj je prema normi ISO 9692-1 izabrana „I“ priprema spoja sa zazorom 1,5 mm što je prikazano na slici 30. Budući da je EPP visokoproduktivan postupak i stvara se velika količina taline koristila se i keramička podloga za zadržavanje taline, slika 31. Na krajeve su navarene ulazne i izlazne pločice, a keramička podloga je na ploče nalijepljena aluminijskom ljepljivom trakom te dodatno pridržavana s donje strane.





**Slika 30. Priprema sučeljenog spoja sa zazorom [30]**



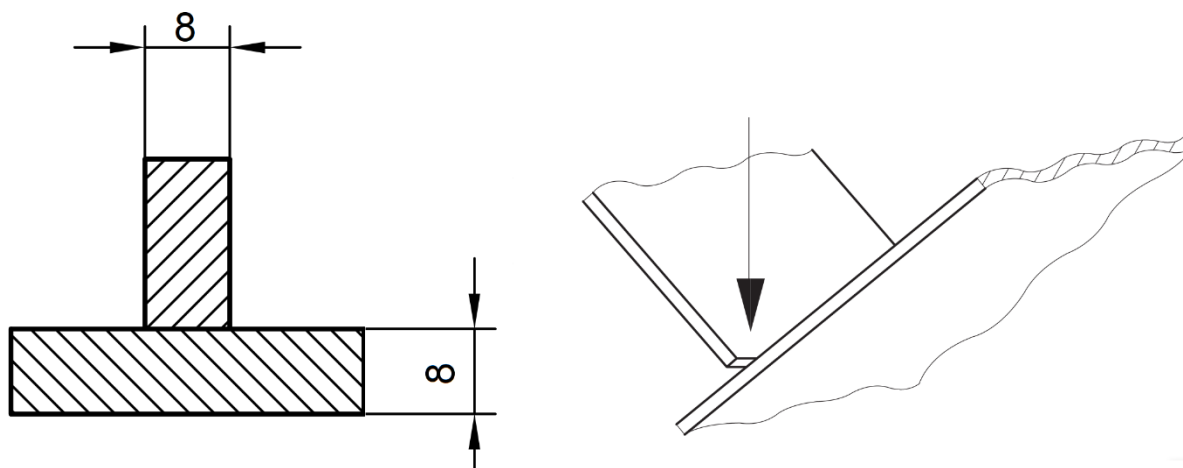
**Slika 31. Keramička podloga za zavarivanje**

Pripojene ploče su postavljane paralelno s vodilicom glave za zavarivanje te pričvršćene stezaljkom kako se pri zavarivanju ne bi pomaknule. Pripremljeni uzorci za zavarivanje su prikazani na slici 32.

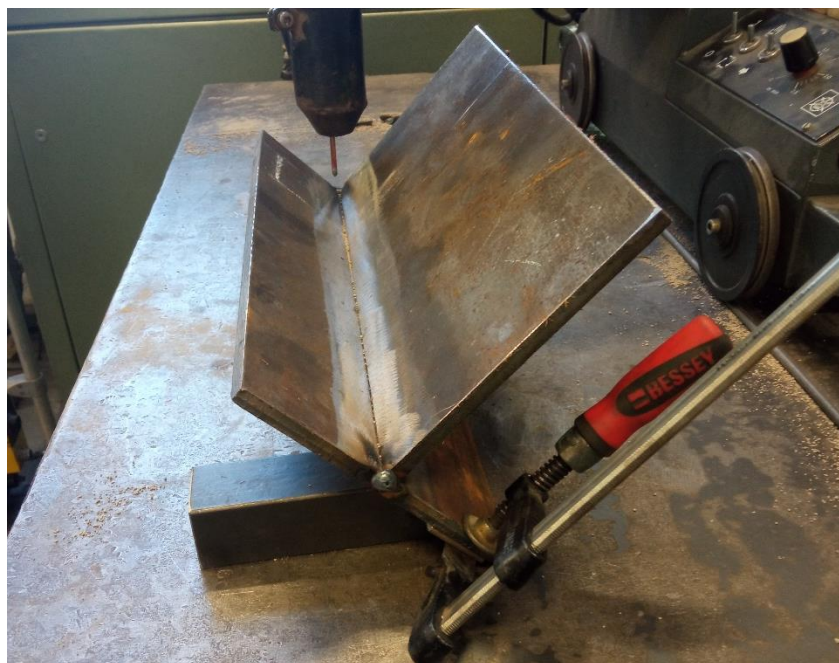


**Slika 32. Pripremljeni uzorci: lijevo uzorak 1; desno uzorak 2**

Kod zavarivanja kutnih spojeva zavarivano je bez kosina na limovima kao što pokazuje shema sa slike 33. lijevo. Zbog bolje kontrole taline uzorak je postavljen u vodoravni, PA položaj što je pogodno za izbjegavanje zajeda na rubovima zavora, slika 33. desno. Također se vodilo računa da se žica dovodi u sredinu zavora. Na slici 34. se vidi kako su pripremljeni uzorci za zavarivanje kutnog spoja.



Slika 33. Lijevo: priprema kutnog spoja[32]; Desno, PA položaj [33]



Slika 34. Priprema kutnog spoja



#### 4.5. Zavarivanje ispitnih uzoraka

Prilikom zavarivanja 4 uzorka korištene su jednake struje i naponi električnog luka koji su praćeni tijekom zavarivanja. Na slici 35. se može očitati da jakost struja iznosi približno 600 A, a napon 33 V. Brzina zavarivanja je varirana te je iznosila 60 cm/min za uzorke 1 i 3, a za uzorke 2 i 4 50 cm/min što je prikazano u tablici 6.



Slika 35. Iznosi struje i napona zavarivanja

Nakon zavarivanja sakupljan je višak praška te vraćan u lijevak za ponovnu upotrebu. Proces zavarivanja za sve uzorke je prikazan na slici 36. Troska sa zavara se lako uklanjala što je i karakteristika samog EPP postupka. Nakon zavarivanja je obavljena vizualna kontrola i uočeno je dobro provarivanje za sučeljene spojeve, a zadovoljavajuće nadvišenje za kutne spojeve. Uzorci su hlađeni preko 24 sata zbog mogućnosti pojave hladnih pukotina. Na slici 36. kod zavarivanja uzorka 4 se može uočiti da je unos topline velik jer se materijal zažario i s donje strane ploče.



**Slika 36. Postupak EPP zavarivanja 4 ispitna uzorka**

Na slikama 37.- 40. su prikazani zavari za sva 4 stanja pokusa. Osnovnim vizualnim pregledom se može zaključiti da su zavari jednolični, nadvišenje je odgovarajuće te se na sučeljenim zavarima zaključuje da je korijen potpuno provaren. Isto tako može se uočiti da je kod zavarivanja uzorka 2 prisutan višak taline koji je u zoni korijena izlazio van kanala keramičke podloge te ostao nalijepljen na osnovni materijal.

Unos topline se računao nakon zavarivanja prema formuli[34]:

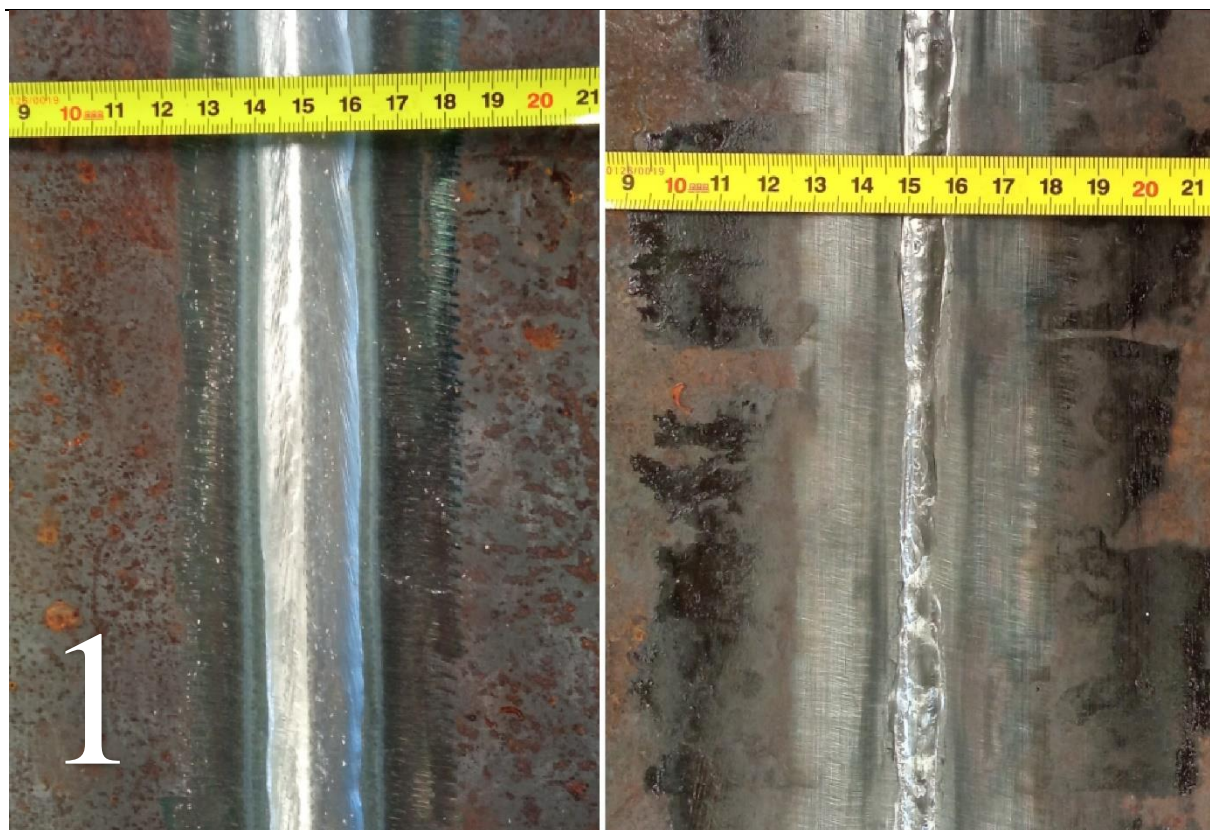
$$Q = k \frac{U \cdot I}{v} \cdot 10^{-3} [\text{kJ/mm}] \quad (3)$$

gdje je:  $Q$  iz jednadžbe unos topline u zavar,  $k$  je toplinska iskoristivost i za EPP zavarivanje iznosi 1,  $U$  i  $I$  su napon i struja zavarivanja, a  $v$  brzina zavarivanja[34]. Prema navedenoj formuli unos topline za uzorke 1 i 3 je 19,8 kJ/cm, a za zavare 2 i 4 23,7 kJ/cm, tablica 7.

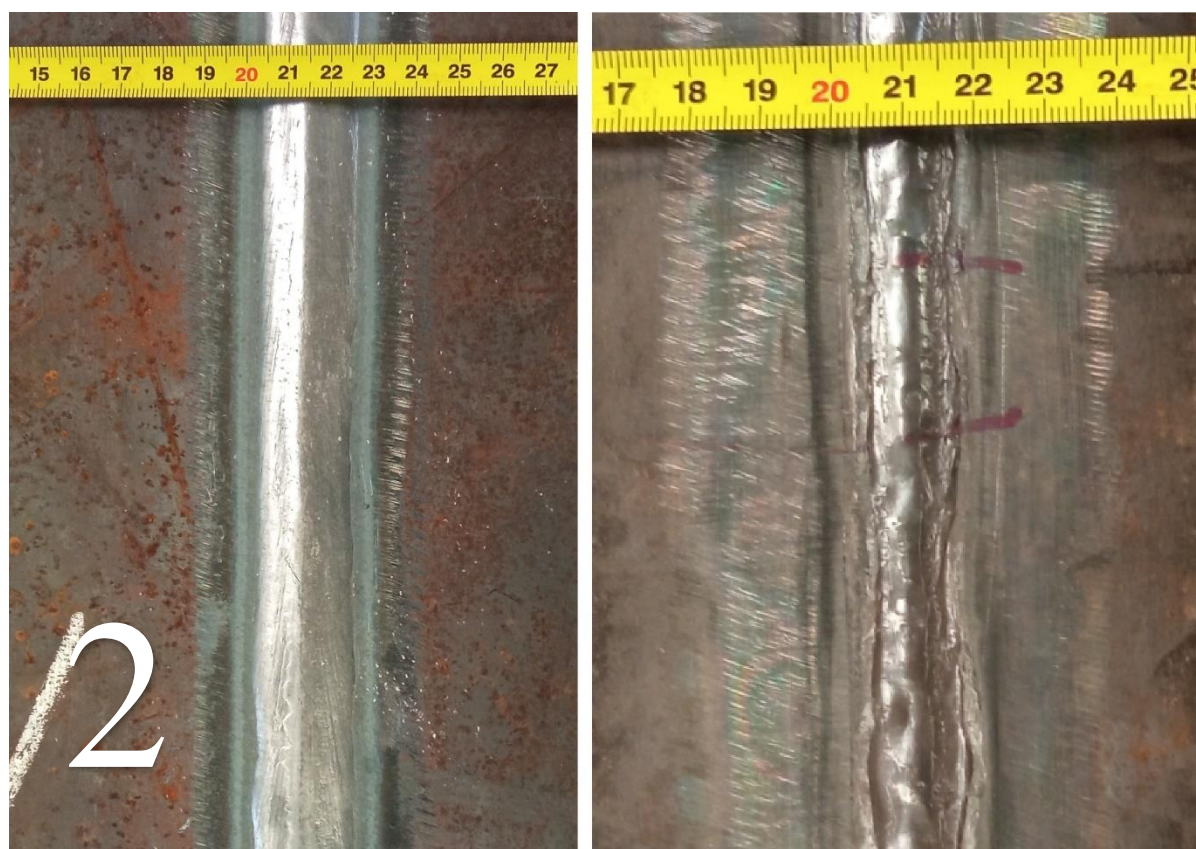
**Tablica 7. Unos topline za pojedine ispitne uzorke**

Broj uzorka	1	2	3	4
Unos topline, kJ/cm	19,8	23,7	19,8	23,7



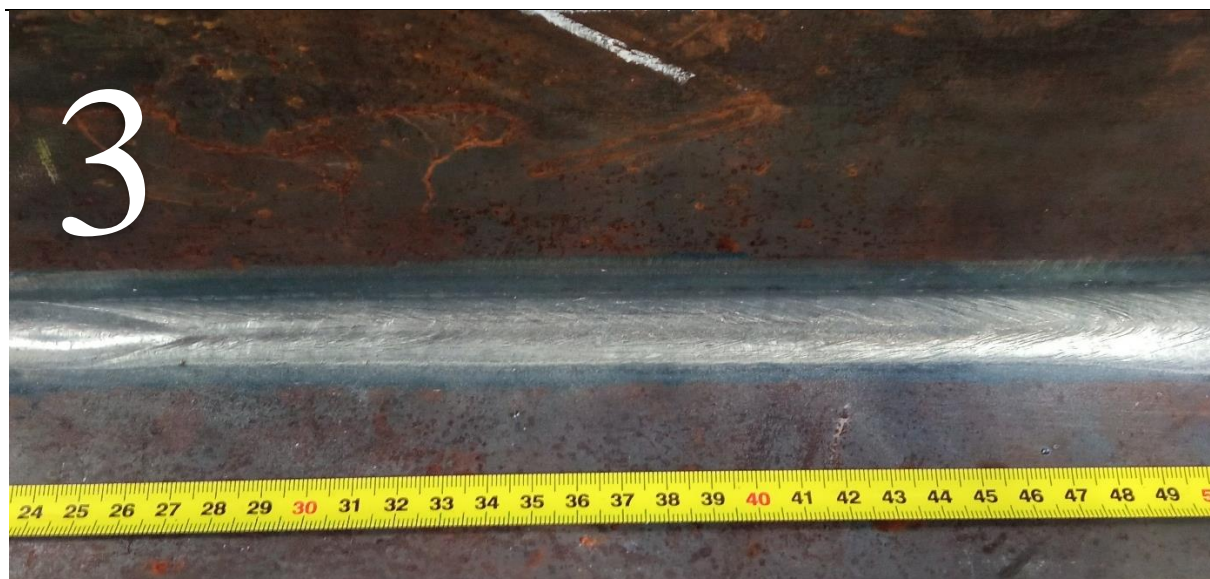


Slika 37. Uzorak 1: lijevo lice, desno korijen

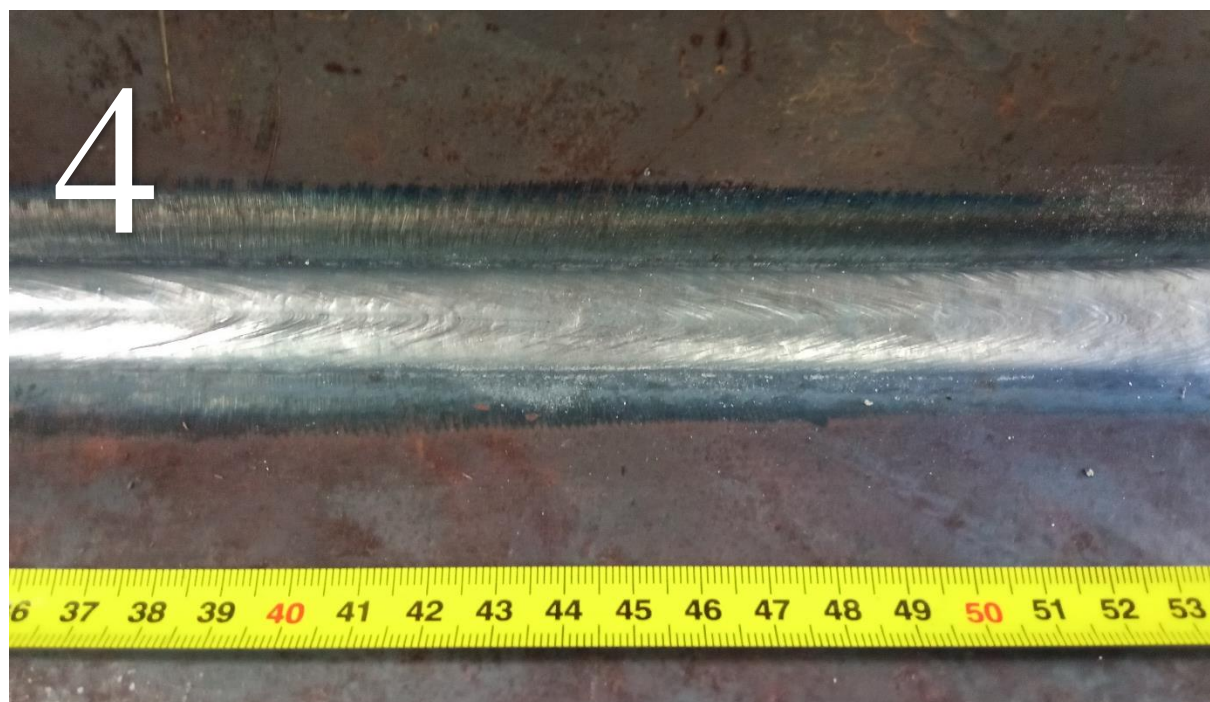


Slika 38. Uzorak 2: lijevo lice, desno korijen





Slika 39. Prikaz korijenskog zavora uzorka 3



Slika 40. Prikaz korijenskog zavora uzorka 4

#### 4.6. Ispitivanje uzoraka

Sva četiri uzorka su nakon zavarivanja ispitivana prema normi HRN EN ISO 15614-1. To je norma za specifikaciju i kvalifikaciju postupaka zavarivanja za metalne materijale, dio koji se odnosi na ispitivanje postupka zavarivanja za elektrolučno i plinsko zavarivanje čelika i elektrolučno zavarivanje nikla i njegovih legura. Ispitivanja koja propisuje norma su navedena u tablici 8. [13]

**Tablica 8. Potrebna ispitivanja prema HRN EN ISO 15614-1 [13]**

Uzorak	Vrsta ispitivanja	Opseg ispitivanja
Sučeljeni spoj s potpunim provarom	Vizualna kontrola	100%
	Radiografija ili ultrazvuk	100%
	Ispitivanje površinskih pukotina	100%
	Poprečni vlačni pokus	2 uzorka
	Poprečno savijanje	4 uzorka
	Udarni rad loma	2 sata
	Tvrdoća	Potrebno ispitivanje
	Makroskopsko ispitivanje	1 uzorak
Kutni spoj	Vizualna kontrola	100%
	Ispitivanje površinskih pukotina	100%
	Ultrazvuk ili radiografija	100%
	Tvrdoća	Potrebno ispitivanje
	Makroskopsko ispitivanje	2 uzorka

U ovom eksperimentu nisu napravljena sva ispitivanja, već samo vizualna kontrola, ispitivanje površinskih pukotina, ispitivanje tvrdoće, analiza makrostrukture, ali i analiza mikrostrukture koja nije na popisu potrebnih ispitivanja.

#### **4.6.1. Ispitivanje površinskih pukotina**

Ispitivanje površinskih pukotina je nerazorno ispitivanje te se može izvoditi magnetskim ispitivanjem ili pomoću penetranta. U ovom radu su uzorci ispitani penetrantskom metodom.

Prema normi EN 571-1 ispitivanje penetrantima se provodi u 7 koraka:

- priprema i čišćenje,
- nanošenje penetranta,
- uklanjanje viška penetranta,
- nanošenje razvijaača,
- pregled,
- snimanje,
- naknadno čišćenje.

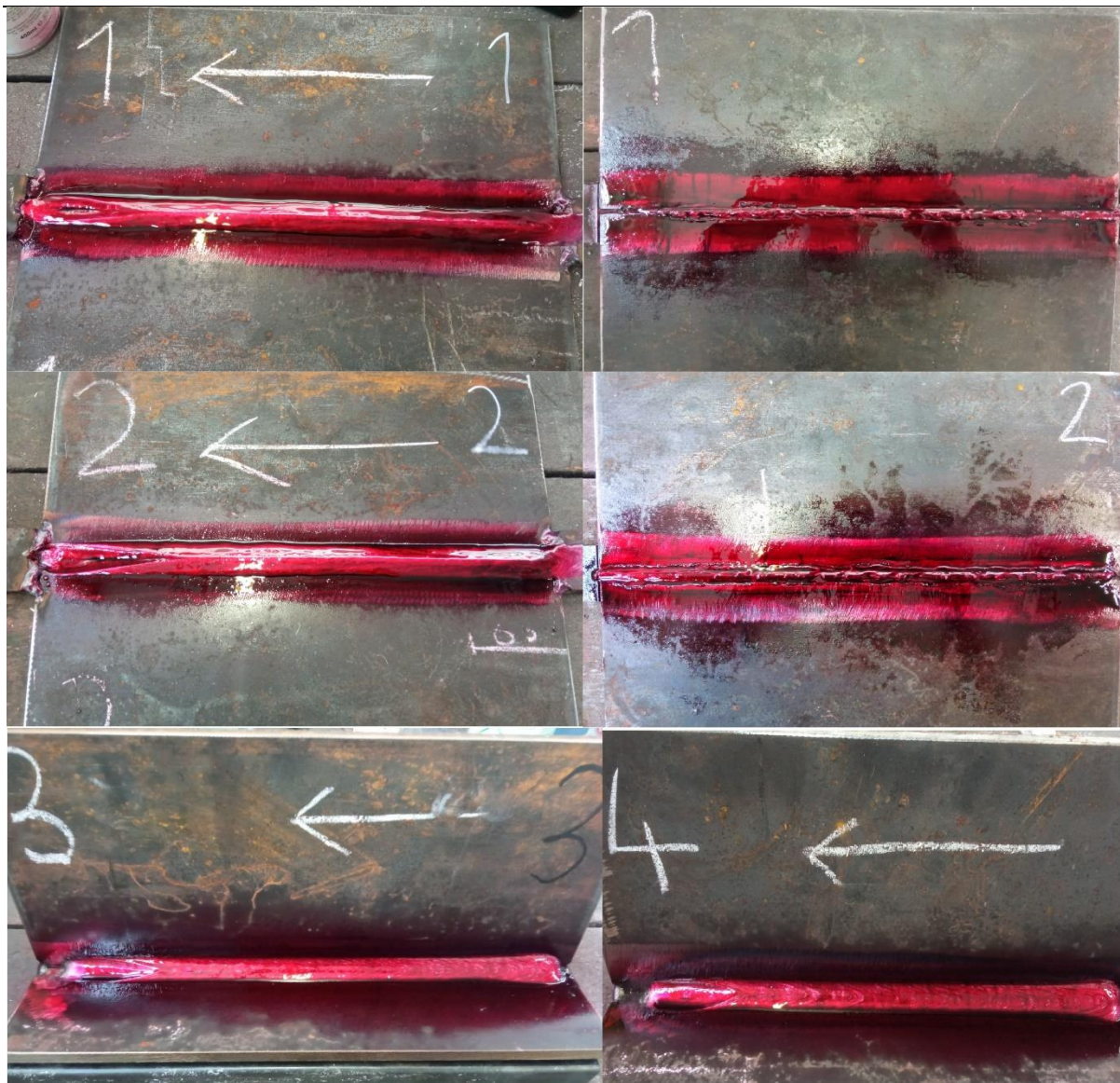
Prije nanošenje penetranta na površinu metala potrebno je skinuti sve nečistoće sa zavara. Najprije se mehaničkim putem uklanjaju ostaci troske ili korozija, a nakon toga se kemijskim čišćenjem skidaju masnoće, boje ili druge supstance koje se mogu nalaziti na površini metala. Pritom je važno pri čišćenju zavara potpuno ukloniti ostatke sredstva za čišćenje kako ono ne bi smanjilo vidljivost penetranta za vrijeme pregleda[35]. U ovom ispitivanju je korišten čistač Magnaflux Spotcheck SKC-S sa slike 41. lijevo.



Slika 41. Čistač, penetrant i razvijач proizvođača Magnaflux

Sljedeći korak je nanošenje penetranta koje ovisi o pakiranju penetranta, a može se nanositi prskanjem, valjkom ili uranjanjem. Koristio se obojeni crveni penetrant u spreju Magnaflux Spotcheck SKL-WP2 sa slike 41., sredina. Prema normi EN ISO 571-1 preporučuje se penetrante koristiti na temperaturama između 10 i 50°C, a vrijeme penetriranja u pukotine ovisi o atmosferskim uvjetima i vrsti materijala. Obično je između 5 i 60 minuta, a važno je da se penetrant ne osuši prije ispiranja.[35] Vrijeme penetriranja za ovo ispitivanje je bilo oko 15 minuta. Slika 42. prikazuje uzorke na koje je nanesen penetrant.





**Slika 42. Ispitni uzorci s nanesenim penetrantom Magnaflux Spotcheck SKL-WP2**

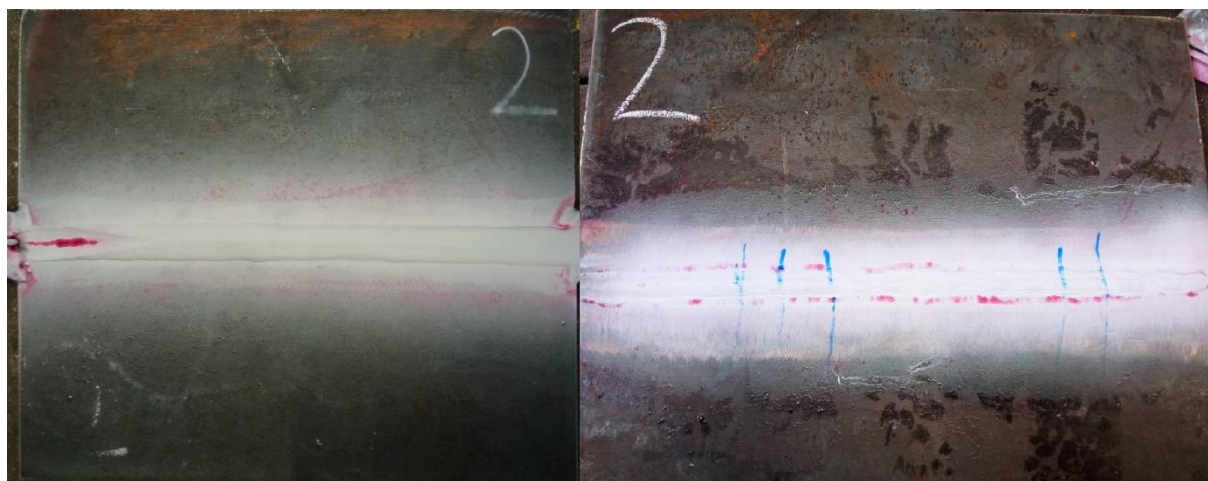
Nakon 15 minuta uzorci su isprani mlazom vode iz slavine te ostavljeni da se potpuno osuše na zraku. Penetrant se ispire sve dok na površini nema vidljivih tragova istog. Nakon sušenja na površinu se nanosi razvijatelj. Razvijatelj treba biti jednoličan i imati sitne čestice kako bi se jednoliko rasporedio na površini. [35] Pri ispitivanju je korišten razvijatelj proizvođača Magnaflux Spotcheck SKD-S2 koji se nanosi iz boce pod tlakom, a prikazan je na slici 41. desno. Udaljenost prskanja treba biti takva da razvijatelj na površinu dolazi blago vlažan.

Nakon što se razvijatelj osuši, započinje bilježenje rezultata. To može biti u obliku zapisa, skica, ljepljiva traka, fotografija ili fotokopija koji se arhiviraju. U ovom eksperimentu je rezultat ispitivanja pohranjen u obliku fotografija na slikama 43. do 46.

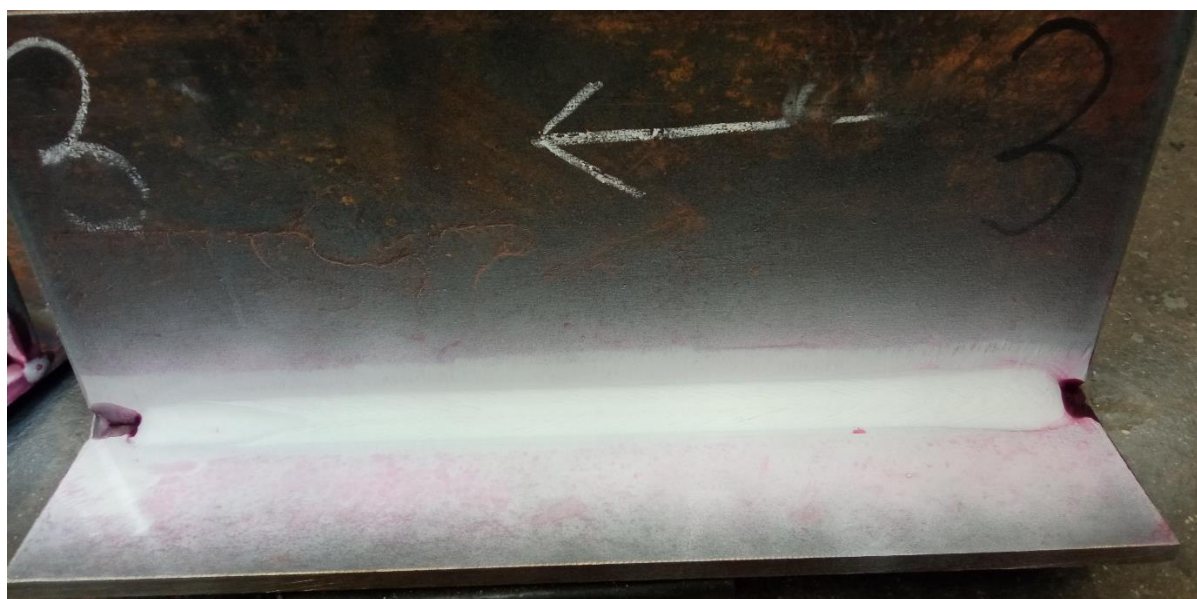




**Slika 43. Ispitivanje površinskih pukotina, uzorak 1; lijevo lice, desno korijen**



**Slika 44. Ispitivanje površinskih pukotina, uzorak 2; lijevo lice, desno korijen**



**Slika 45. Ispitivanje površinskih pukotina, uzorak 3**



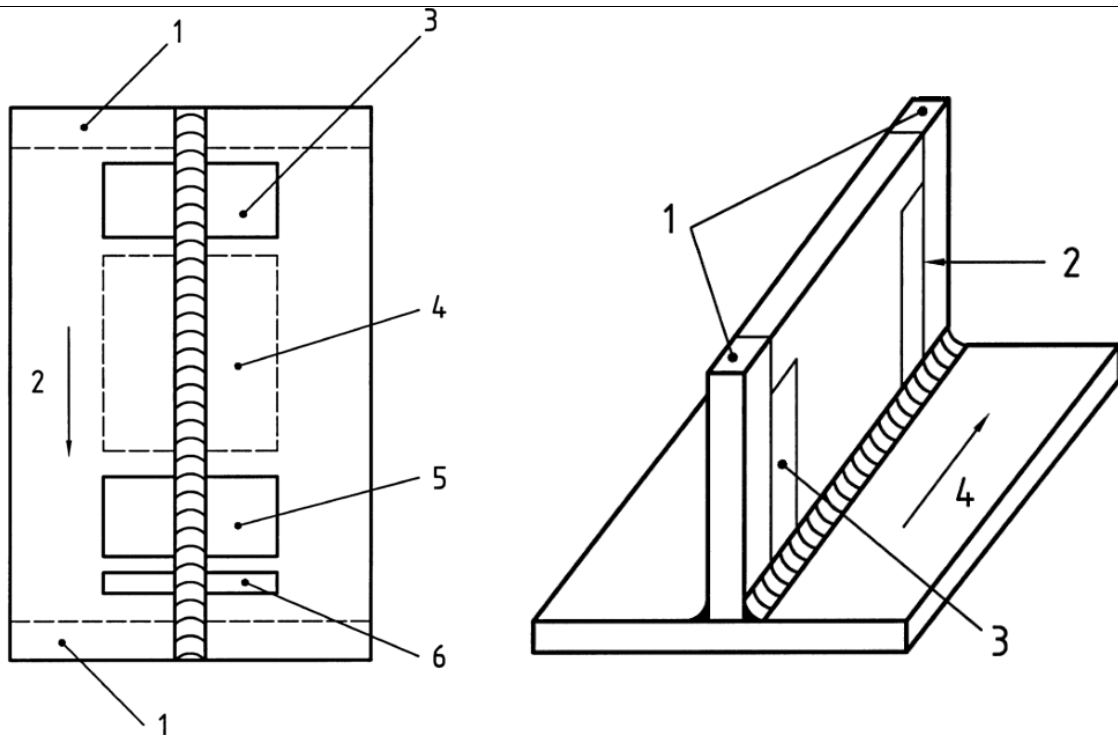


**Slika 46. Ispitivanje površinskih pukotina, uzorak 4**

Na uzorcima 1 i 2 se vidi uzdužna pukotina na kraju zavora koja se ne uzima kao indikacija jer se u praksi zavar završava na izlaznoj pločici koja se odrezuje. Na poleđini zavora 1 ima nekoliko indikacija koje se javljaju na mjestima gdje je metal zavora izašao van keramičke podloge te ostao nalijepljen na osnovni materijal. Ta pojava je značajno izraženija na zavaru 2 koji je imao veći unos topline. Na zavarima 3 i 4 nema nikakvih indikacija odnosno površinskih pukotina.

#### **4.6.2. Analiza mikrostrukture**

Za potrebe ispitivanja mikrostrukture potrebno je napraviti po jedan makroizbrusak za sučeljene zavare te po dva izbruska za kutne zavare. Mjesto izrezivanja uzoraka točno je definirano normom HRN EN ISO 15614-1. Položaji izrezivanja uzoraka su prikazani na slici 47. Lijevo na slici je uzorak za sučeljeni spoj, a uzorak za makrostrukturu i tvrdoću se izrezuje na poziciji 6. Na kutnom zavaru, slika 47. desno, izrezuju se 2 uzorka na položajima 2 i 3. Za oba spoja se najprije odrezuju početak i kraj zavora najmanje duljine 25 mm. Za sučeljeni spoj se uzorak za makrostrukturu odrezuje na kraju zavora, a za kutni spoj na početku i na kraju zavora. [13]



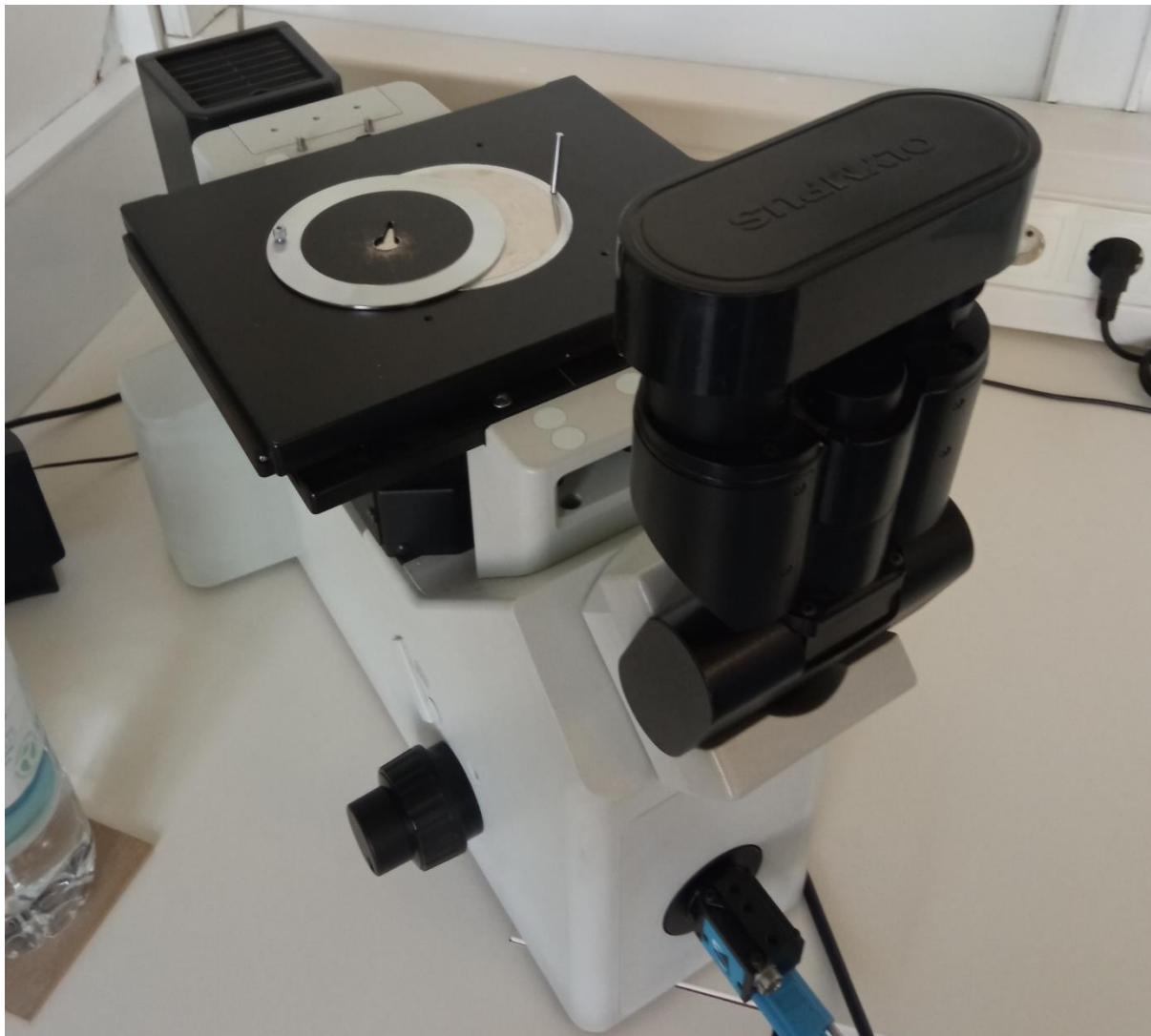
**Slika 47. Pozicije za izrezivanje uzoraka iz zavarenih spojeva [13]**

Nakon izrezivanja jedna strana uzorka se brusila kako bi se dobila ravna i glatka površina. Brusilo se s nekoliko gradacija brusnog papira, redom 80, 180, 240, 400 i 800. Nakon toga su uzorci strojno brušeni do gradacije 4000 na uređaju Minitech 233 sa slike 48. te dodatno polirani pastom od 3  $\mu\text{m}$ .



**Slika 48. Uređaj za mokro brušenje**

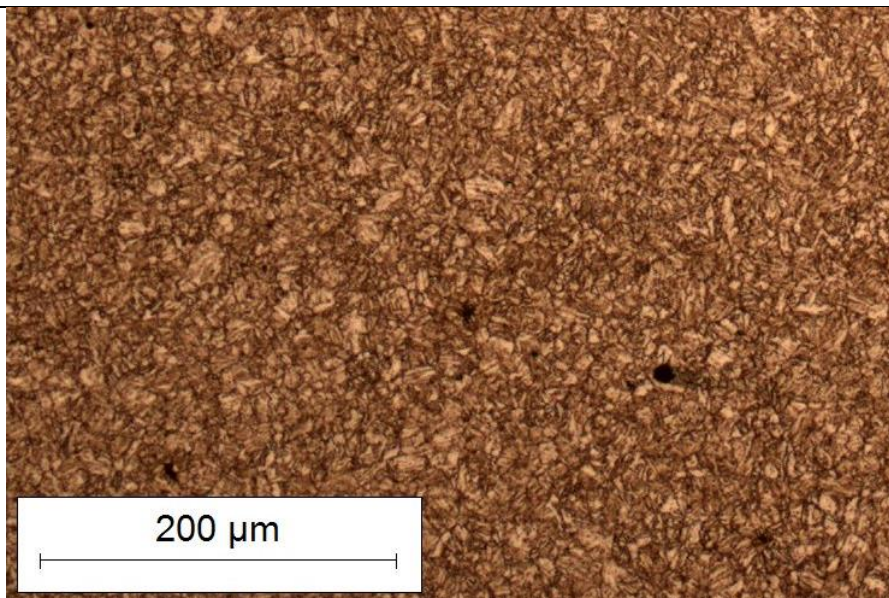
Na pripremljenim uzorcima se potom snimala mikrostruktura zavarenog spoja na svjetlosnom mikroskopu OLYMPUS GX51 prikazanom na slici 49.



**Slika 49. Mikroskop OLYMPUS GX51**

Mikroskop ima ugrađenu kameru te su napravljene fotografije mikrostrukture za sva stanja u ovom eksperimentu. Slika 50. pokazuje mikrostrukturu osnovnog materijala.

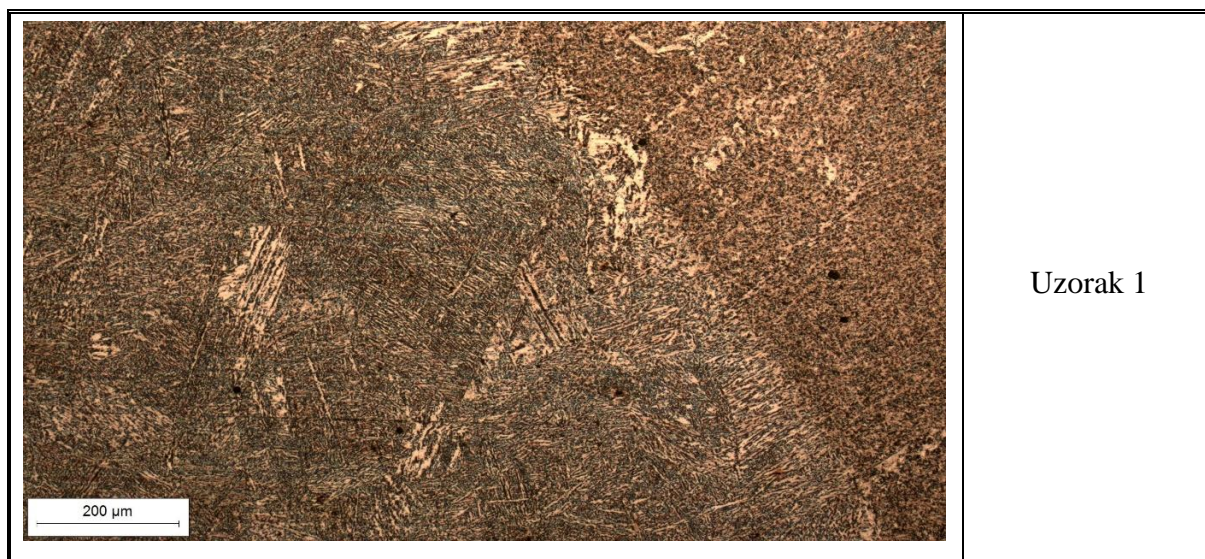




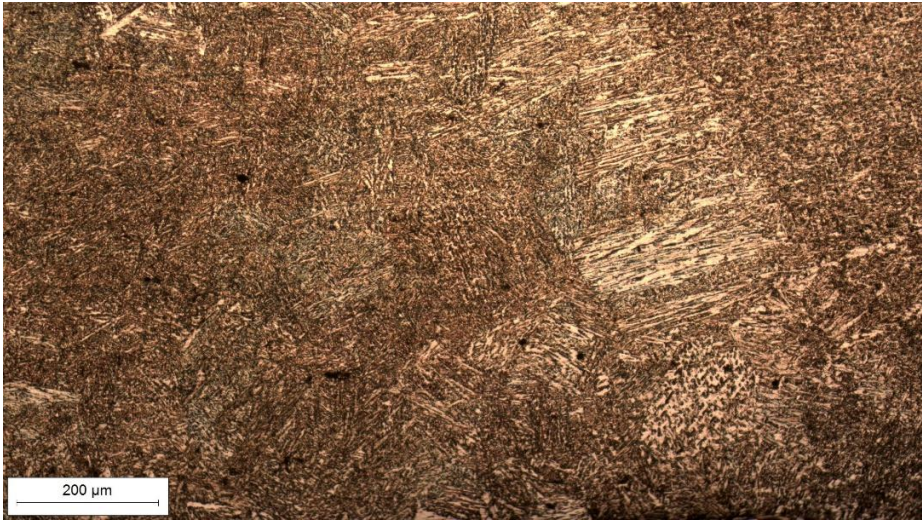


**Slika 50. Mikrostruktura čelika S690QL**

U tablici 8. su slike mikrostrukture zavara iz ovog eksperimenta. Uzorci 3.1. te 4.1. su uzorci bliži početku zavarivanja kod kutnog zavora, a 3.2. i 4.2. su analogno tomu bliži kraju zavora.

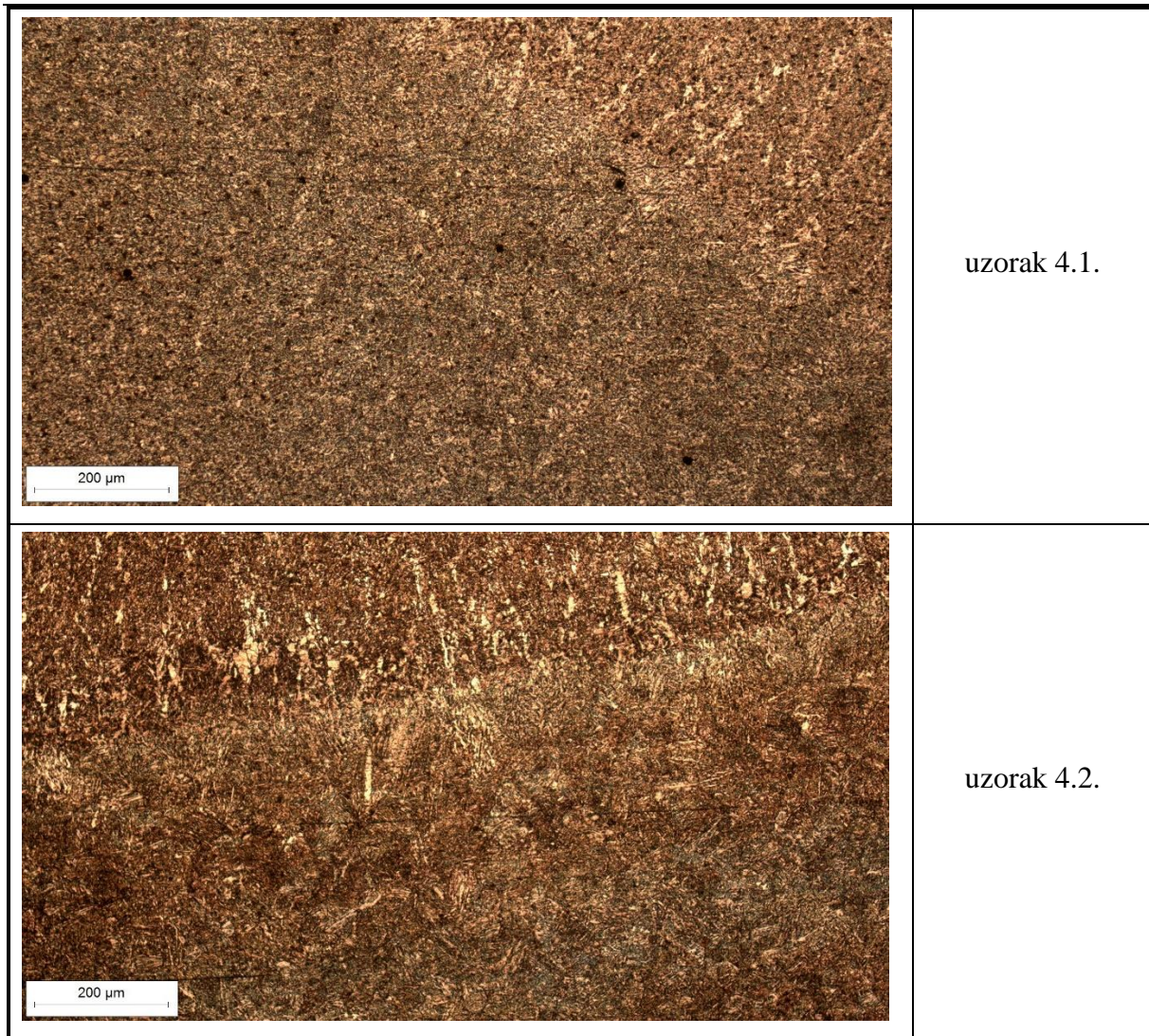
**Tablica 9. Mikrostruktura zone utjecaja topline**





	<p>uzorak 2</p>
	<p>uzorak 3.1.</p>
	<p>uzorak 3.2.</p>





U zoni utjecaja topline mijenja se mikrostruktura osnovnog materijala. Iz početne martenzitno-bainitne strukture nastaje austenitna s percipitatima. Na uzorcima 1 i 2 je jasan utjecaj topline na ZUT. Zrna u blizini linije staljivanja su veća, više izdužena i značajnije orijentirana okomito na liniju staljivanja kod uzorka 2 gdje je unos topline bio veći. Na uzorcima 3 i 4 vidi se razlika u mikrostrukturi ovisno o poziciji uzorka. Struktura je grublja na uzorcima koji su dalje od početka zavarivanja. Utjecaj unosa topline se jasno vidi usporedbom uzorka 3.2 i 4.2., na uzorku 4.2. koji ima veći unos topline zrna su veća, a veća je i prisutnost bijele faze odnosno karbida. Na svim uzorcima je vidljivo da je struktura najgrublja do linije staljivanja.

Mikrostrukturu metala zavara čini acikularni ferit. Takva struktura je poželjna za zavare čelika povišene čvrstoće zato što je otporna na stvaranje i propagaciju pukotina te shodno tomu ima izvrsnu žilavost.[2] Žilavost je važna kod čelika koji su kaljeni i popušteni kako bi se zadržala potrebna žilavost pri niskim temperaturama. Na slikama 50. i 51. se vidi utjecaj unosa topline



na mikrostrukturu metala zavara. Zrna u metalu zavara su sitnija, a cijela struktura je homogenija u odnosu na uzorak 2 koji ima veći unos topline.



**Slika 51. Mikrostruktura metala zavara, Uzorak 1**



**Slika 52. Mikrostruktura metala zavara, Uzorak 2**



**4.6.3. Analiza makrostrukture zavara**

Nakon ispitivanja mikrostrukture, isti uzorci su korišteni za analizu makrostrukture zavara. Ispolirano lice zavara je nagrizano u 3 %-tnoj otopini nitala ( 3 % HNO<sub>3</sub> + alkohol), a nakon toga ispirano u vodi te brisano papirom kako ne bi došlo do pojave korozije, slika 53.



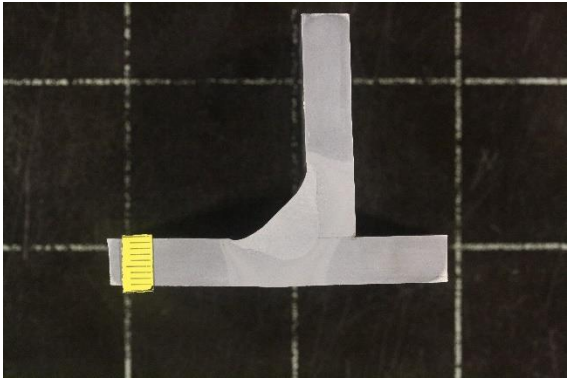
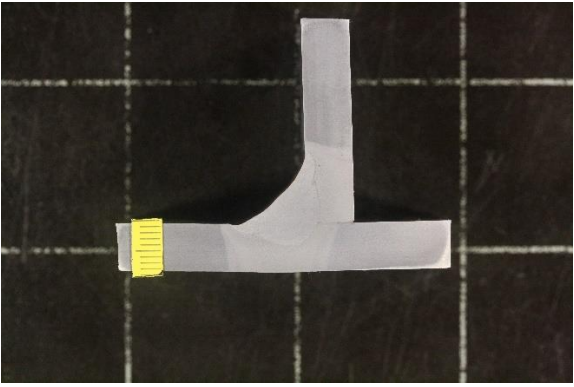
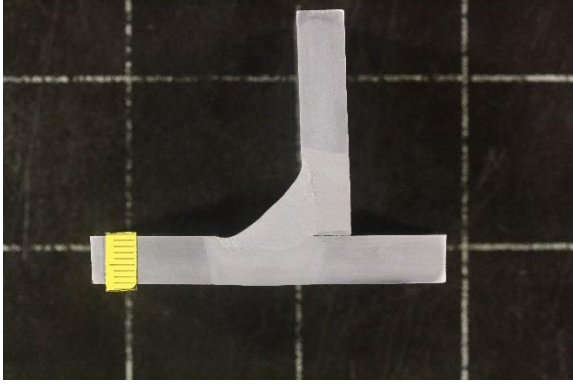
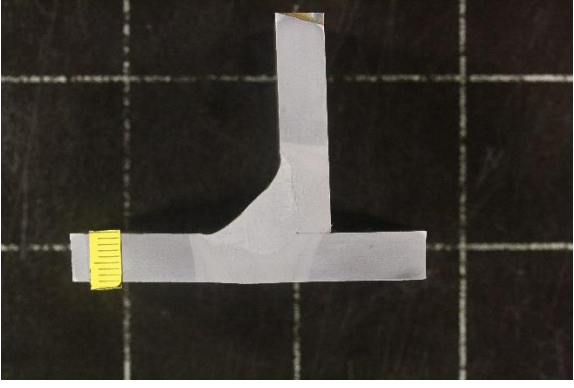
**Slika 53. Nagrizanje uzoraka u otopini nitala**

Ispitivanje makrostrukture se provodi prema normi ISO 5817. Nakon nagrizanja uzoraka snimljene su fotografije makrostrukture, a korišten je foto-aparat Canon 1000D.

**Tablica 10. Makrostruktura zavara snimljena pomoću foto-aparata Canon 1000D**

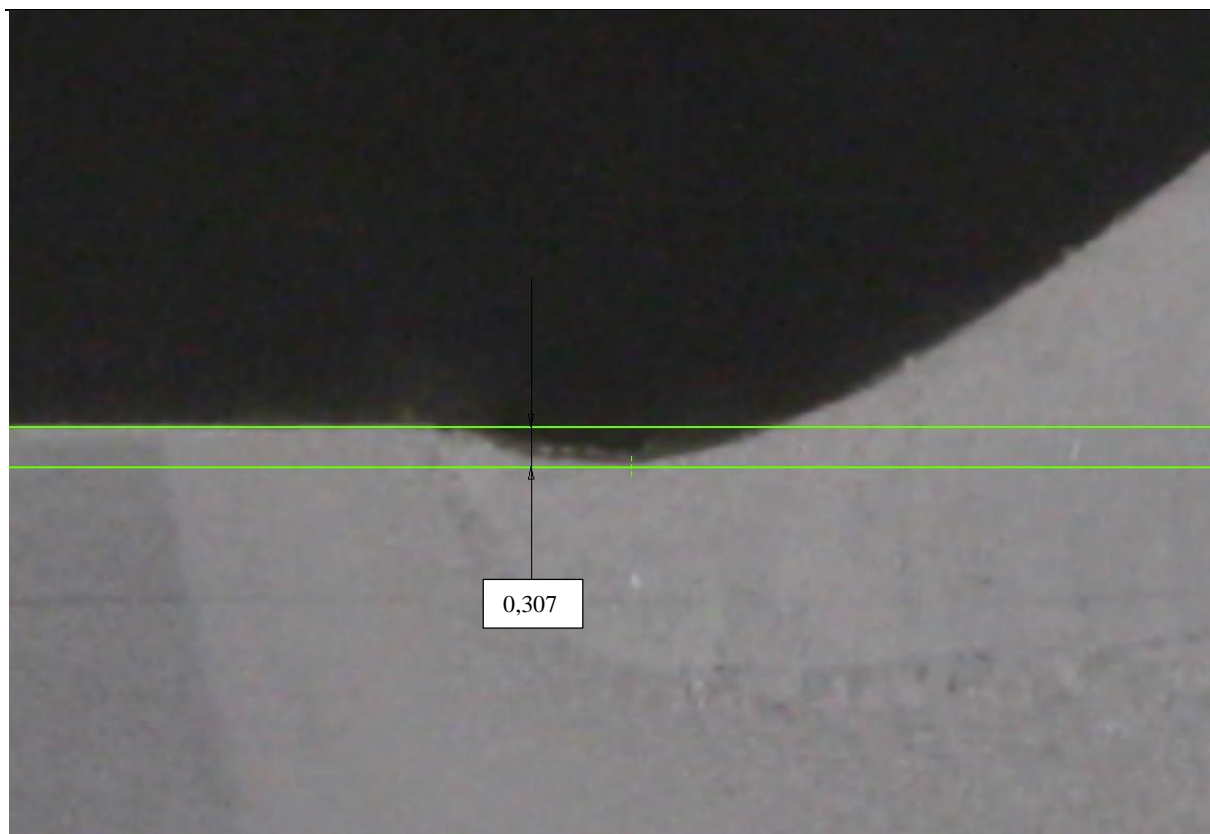
<p>uzorak 1</p>	<p>uzorak 2</p>



	
<p> uzorak 3.1. </p>	<p> uzorak 3.2. </p>
	
<p> uzorak 4.1. </p>	<p> uzorak 4.2. </p>

Tablica 10. prikazuje snimke makrostrukture za sve uzorke pokusa. Analiza makrostrukture sastoji se od kontrole pukotina, nepotpunog staljivanja, nepotpunog provarivanja korijena te analize geometrije zavara. U ovom eksperimentu se uzorci ispituju za razinu 2 norme HRN EN ISO 15614-1. Prema normi ISO 5817 to znači da nisu dozvoljene pukotine, naljepljivanje niti nepotpuno provarivanje korijena. Analizom dobivenih slika može se zaključiti kako na niti jednom od uzoraka u ovom ispitivanju nema indikacija pukotina ni naljepljivanja. Za sučeljene spojeve se može zaključiti da je provarivanje korijena potpuno. Dakle, po kriteriju pukotina, naljepljivanja i provarivanja korijena svi zavari su sukladni normi HRN EN ISO 15614-1.

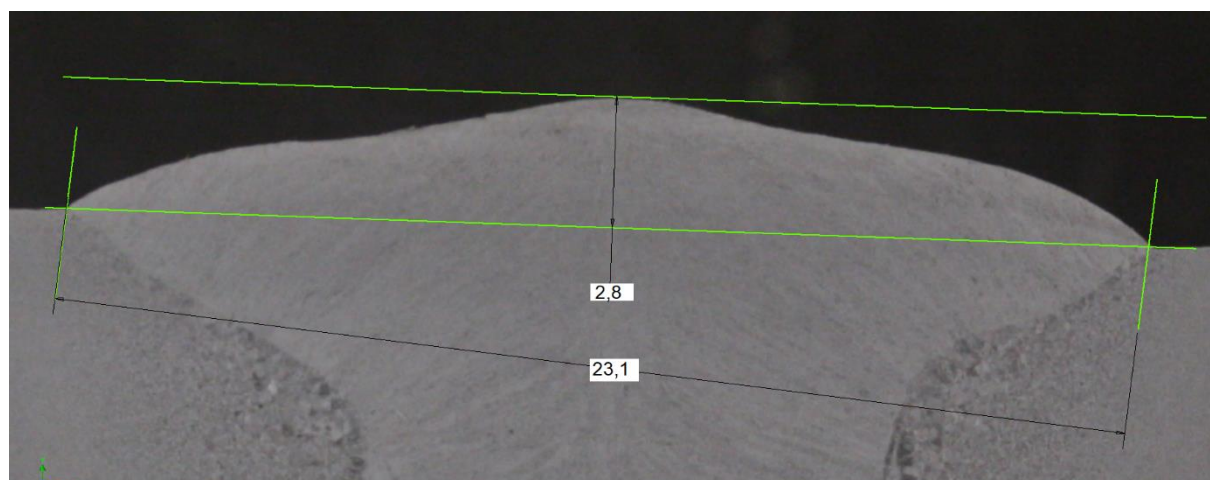
Sljedeća greška koja se ispituje su kontinuirani zajedni na rubovima zavara. Kod sučeljenih zavara se ne vide zajedni na rubovima te zadovoljavaju kriterije norme ISO 5817, razina C. Kod kutnih zavara zajedni je najizraženiji na uzorku 4.1. pa se najprije kontrolira je li dubina zajedni sukladna kriteriju norme, a to je manje od jedne desetine debljine osnovnog materijala[37]. Dubina zajedni je kontrolirana učitavanjem fotografije makrostrukture u program Autodesk Inventor te referenciranjem mjera pomoću mjerne skale s fotografije.



**Slika 54. Mjerenje dubine zajeda na uzorku 4.1.**

Izmjerena dubina zajeda na slici 54. je 0,3 mm. To je manje od jedne desetine debljine osnovnog materijala (0,8 mm) što znači da su zavari po tom kriteriju odgovarajuće kvalitete.

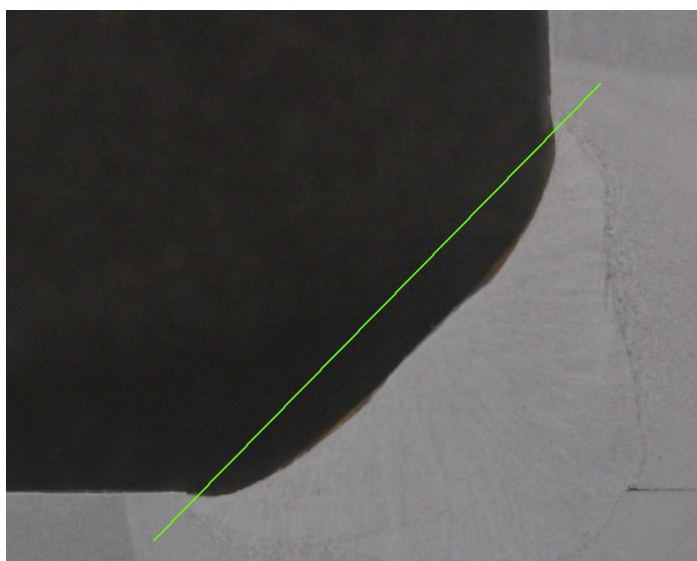
Kod sučeljenih spojeva je potrebno kontrolirati nadvišenje metala zavara. To je kontrolirano učitavanjem slike u Autodesk Inventor.



**Slika 55. Nadvišenje zavara 2**

Na slici 55. su izmjerene dimenzije nadvišenja zavora. Prema normi ISO 5817 za razinu C nadvišenje ne bi smjelo biti veće od 4,4 mm te se analizom može zaključiti kako zavar zadovoljava navedeni kriterij[37]. Kako je nadvišenje na uzorku 1 manje, analogno tomu i taj uzorak se smatra sukladnim.

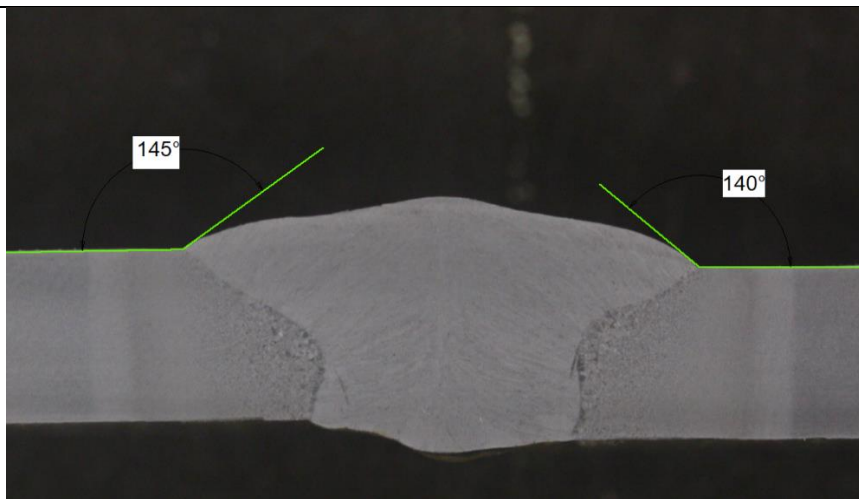
Za kutne zavarove prema normi HRN EN ISO 15614-1 potrebno je kontrolirati ispunjenost zavora. Za razinu kvalitete 2 zavar treba zadovoljiti kriterije razine C norme ISO 5817[13]. Među uzorcima kutnih zavora ispunjenje je jedino vidljivo na uzorku 4.2. te se isto izmjerilo u programu Inventor.



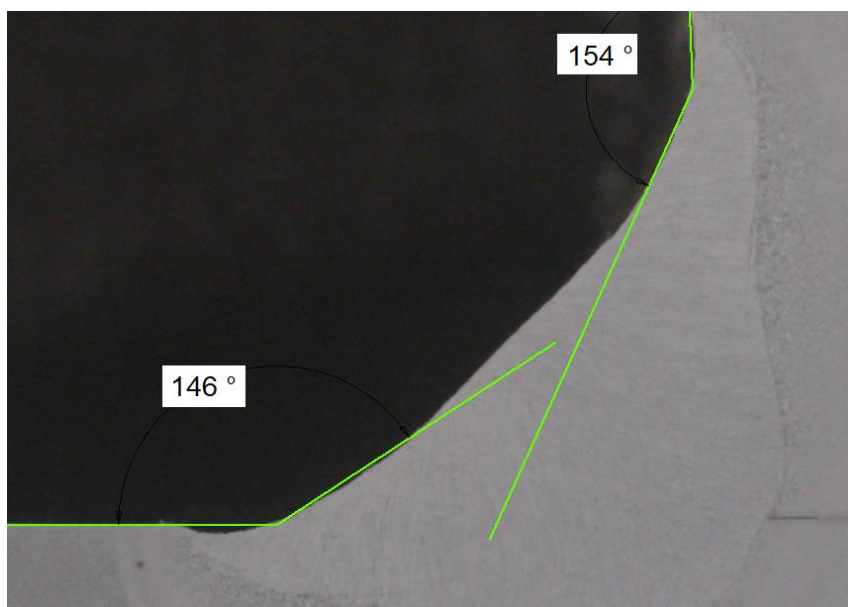
**Slika 56. Ispunjenost zavora 4.1.**

Analizom slike 56. je moguće zaključiti da kod kutnih zavora nema značajne ispunjenosti te su zavori prihvatljivi prema kriterijima norme ISO 5817. Prevelika ispunjenost bi loše utjecala na dinamičku izdržljivost zavora

Ispunjenost korijena nije mjerena jer su korištene podloge pa ispunjenost ne može biti prevelika i zadovoljava zahtjeve normi. Za uzorke 2 i 3.1 mjerio se kut nadvišenja koji isto utječe na dinamičku izdržljivost. Kutovi nadvišenja prema normi ISO 5817 trebaju biti veći od  $110^\circ$  što je dokazano kao zadovoljavajuće na slikama 57. i 58.



**Slika 57. Kutovi nadvišenja, uzorak 2**



**Slika 58. Kutovi nadvišenja, uzorak 3.1.**

Od preostalih ispitivanja makrostrukture kontrolira se asimetričnost i nadvišenje kutnog zavara. Kako su kutni zavari zavarivani u PA položaju, nije potrebno mjeriti simetričnost te se na snimkama makroizbrusaka jasno vidi da su simetrični. Norma ISO 5817 propisuje mjerenje prevelike debljine zavara za kutni spoj. U ovom eksperimentu nije bila zadana minimalna debljina te se zavar ne može ispitati po tom kriteriju. Izmjerene debljine zavara su bile između 7,8 i 8,2 mm.

#### **4.6.4. Mjerenje tvrdoće zavara**

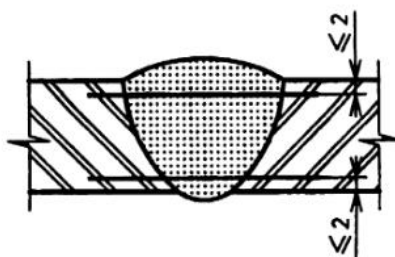
Ispitivanje tvrdoće provedeno je metodom HV10 u skladu s normom EN 1043-1. Mjerenja tvrdoće treba napraviti u metalu zavara, zoni utjecaja topline te osnovnom materijalu kako bi se prikazala promjena tvrdoće u pojedinim dijelovima zavara. Za materijale tanje od 5 mm

mjeri se tvrdoća u jednom redu na 2 mm ispod lica zavara. Kod ispitivanja debljih materijala tvrdoća se ispituje u dva reda, oko 2 mm od gornje i od donje površine zavara. Za zavare koji se zavaruju s dvije strane je potrebno napraviti još jedan niz mjerenja koji prolazi kroz korijen zavara. Za svaki red otisaka potrebno je napraviti minimalno 3 mjerenja u sljedećim zonama:

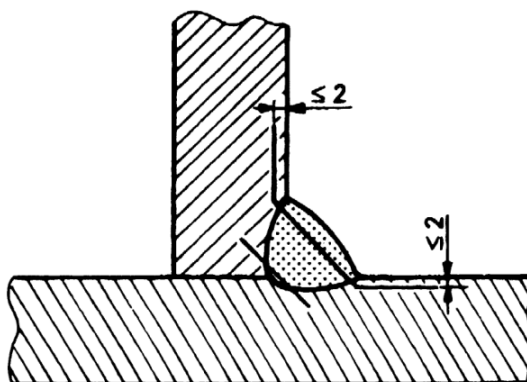
- metal zavara,
- obje zone utjecaja topline,
- oba osnovna materijala.

Norma HRN EN ISO 15614-1 propisuje maksimalne iznose tvrdoće za čelik S690QL to jest za grupu materijala 3. Ona iznosi 450 za zavare koji nemaju naknadnu toplinsku obradu ili 380 za zavare nakon toplinske obrade (žarenja za popuštanje vodika). [13]

Postupak mjerenja tvrdoće započinje određivanjem broja i mjesta nizova otisaka[38]. Lokacije otisaka trebaju biti priložene u rezultatima mjerenja tvrdoće. Slike 59. i 60. prikazuju preporučene lokacije ispitivanja tvrdoće za sučeljeni i kutni spoj.



Slika 59. Položaj nizova otisaka za sučeljeni spoj [38]

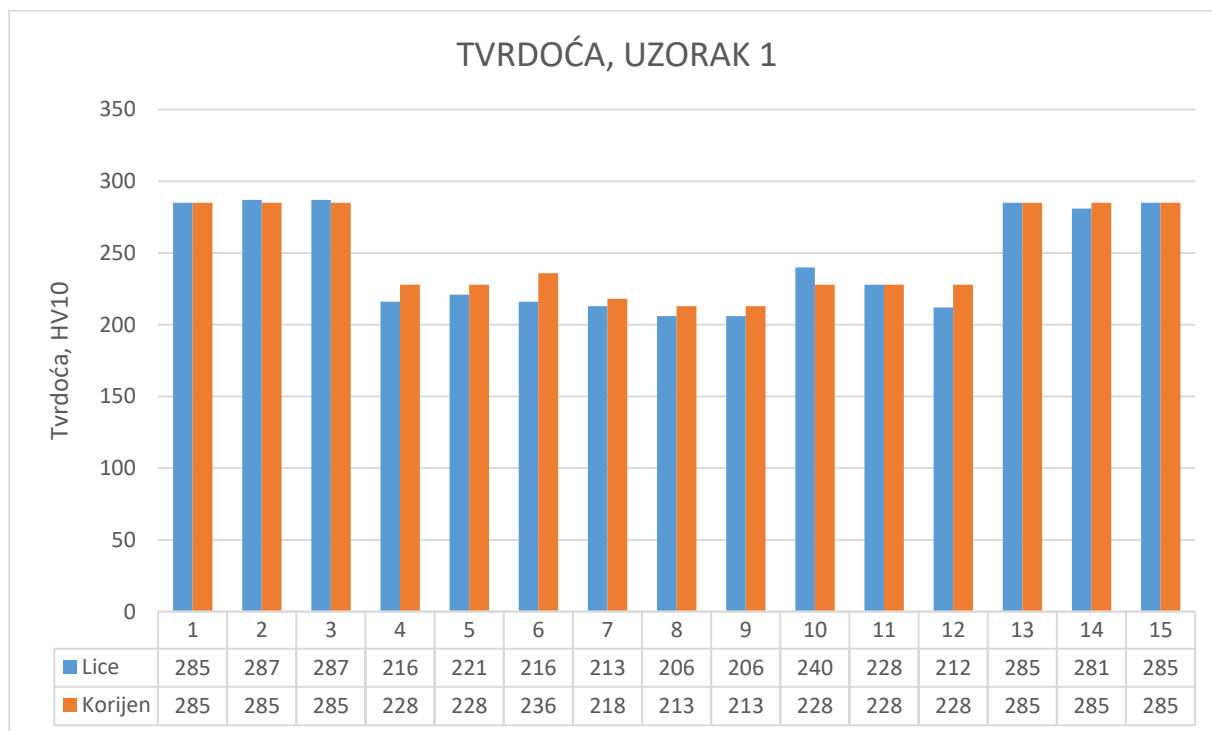


Slika 60. Položaj redova mjerenja za kutni spoj [38]

Razmak između otisaka generalno ne bi trebao biti manji od 2,5 mm osim u zoni utjecaja topline gdje je nužno uzeti barem 3 otiska od kojih jedan treba biti što je moguće bliže liniji staljivanja[33].



Rezultati mjerenja tvrdoće prikazani su u narednim dijagramima s pripadajućim slikama koji prikazuju položaje nizova mjerenja. Mjerenja tvrdoće su provedena na uzorcima 1, 2, 3.1. te 4.1.

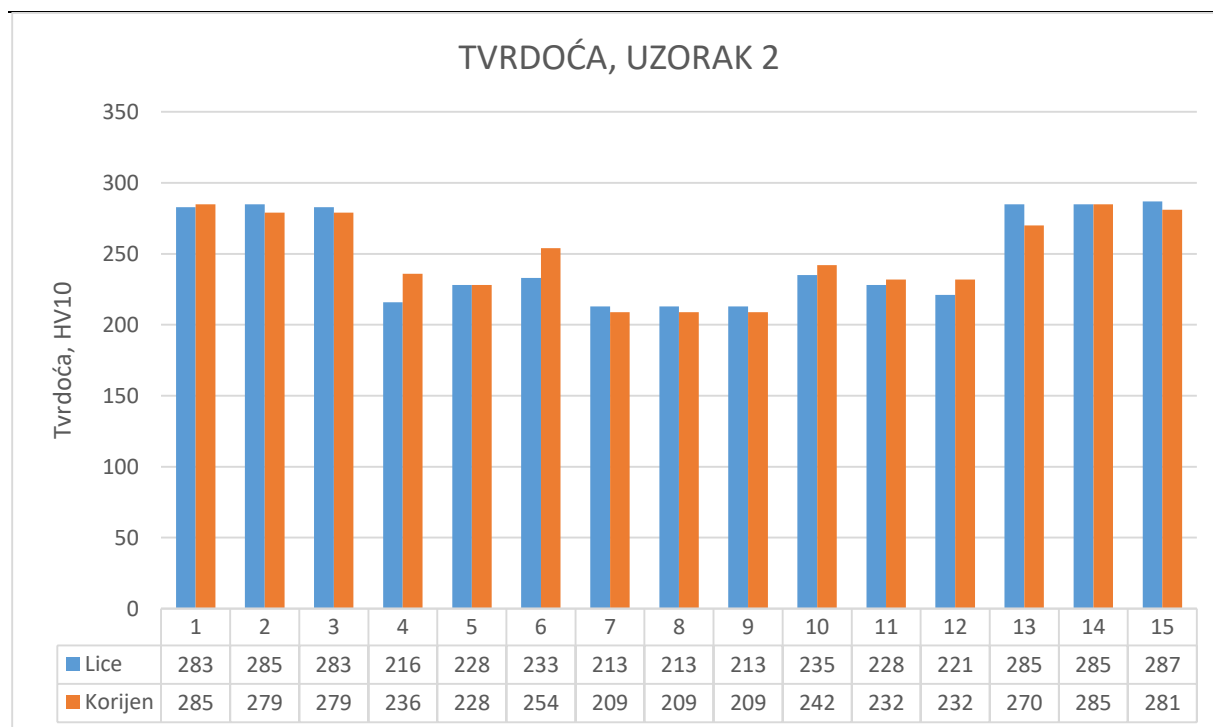


**Slika 61. Grafički prikaz tvrdoće uzorka 1**

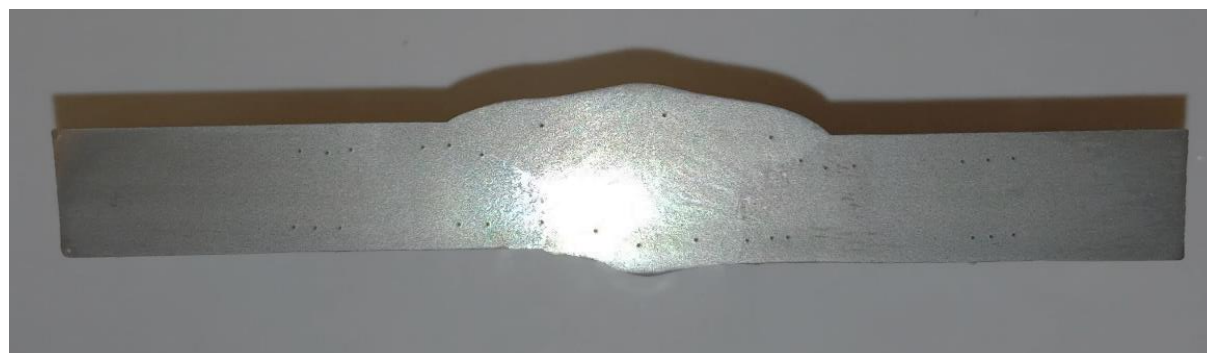


**Slika 62. Položaji otisaka, uzorak 1**

S grafičkog prikaza tvrdoće uzorka 1 može se uočiti pad tvrdoće u zoni utjecaja topline te još veći pad u metalu zavara. Niti jedno mjerenje ne prelazi granicu tvrdoće od 450 HV10 stoga je tvrdoća prihvatljiva.

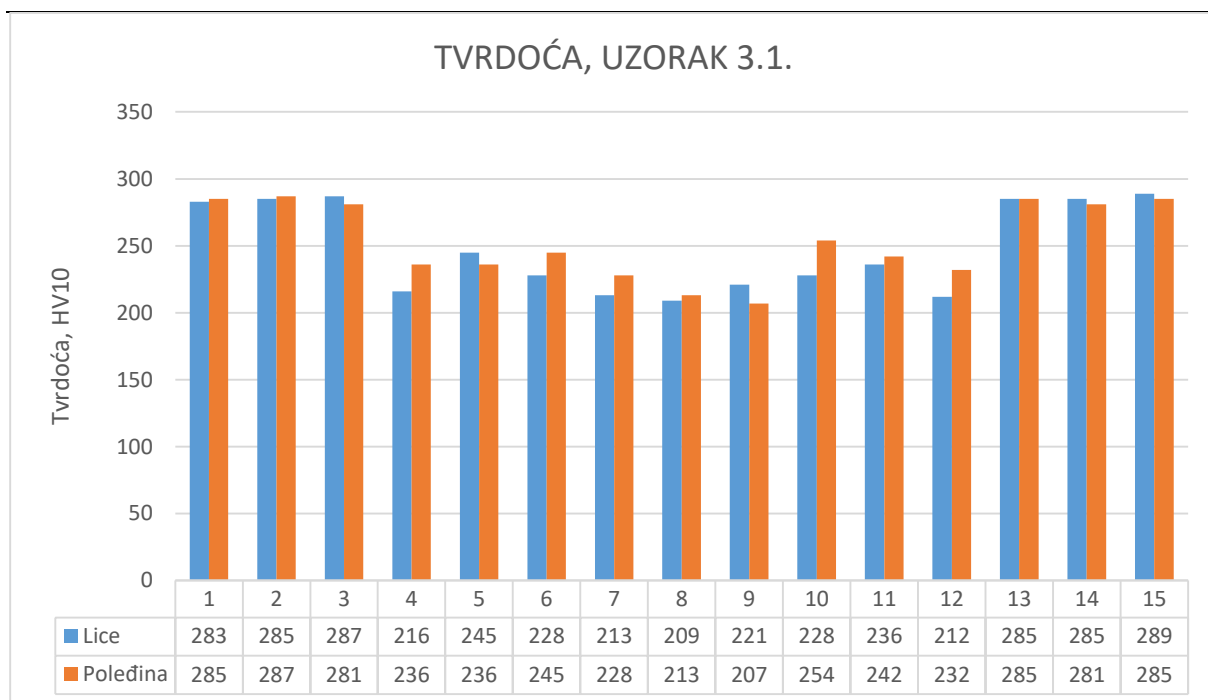


**Slika 63. Grafički prikaz tvrdoće uzorka 2**

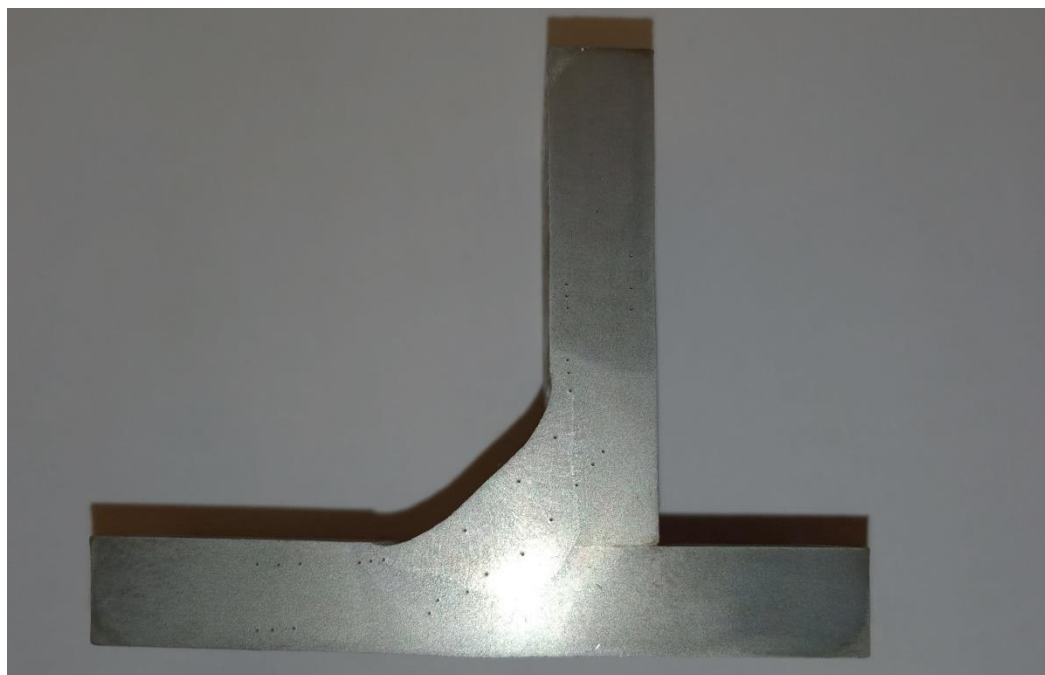


**Slika 64. Položaji otisaka, uzorak 2**

Tvrdoća izmjerena na uzorku 2. s većim unosom topline je u prosjeku nešto veća od one kod zavara 1. Posebno je izražen skok tvrdoće za otisak na rubu linije staljivanja što je i očekivano zbog lokalno grublje mikrostrukture. Tvrdoća ZUT-a i metala zavara je manja od tvrdoće osnovnog materijala kao i kod uzorka 1.



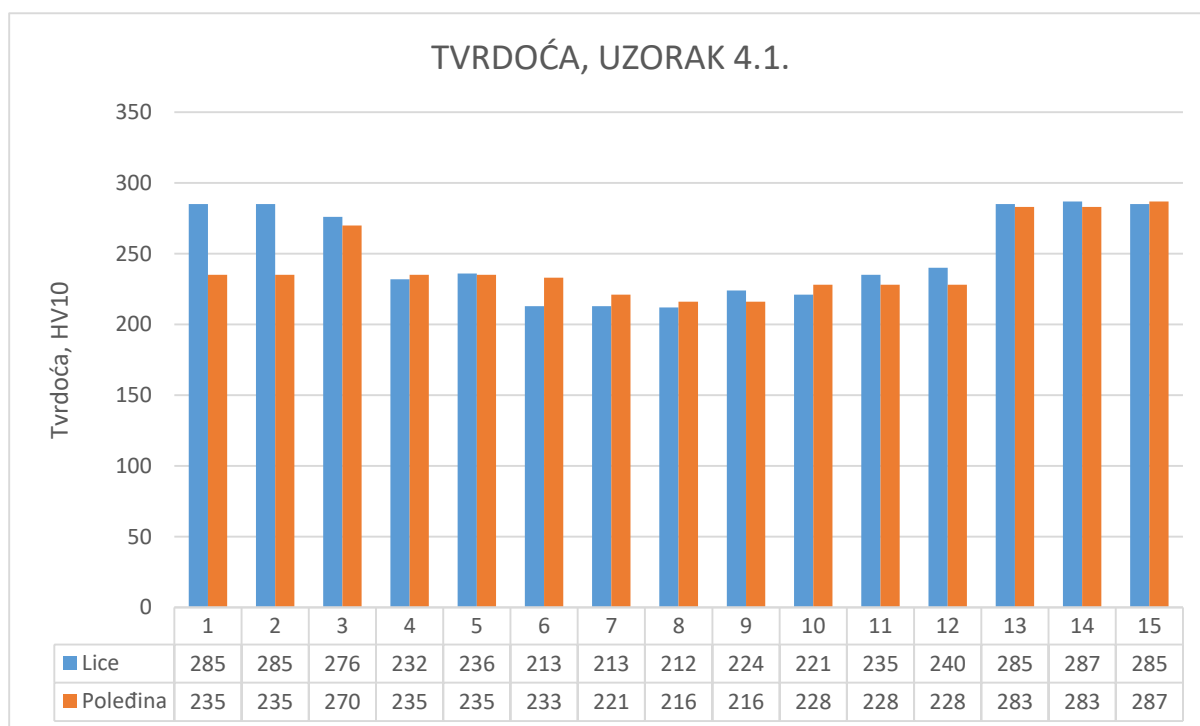
**Slika 65. Grafički prikaz tvrdoće uzorka 3.1.**



**Slika 66. Položaji otisaka, uzorak 3.1.**

Tvrdoća uzorka 3.1 bilježi pad od osnovnog materijala prema metalu zavara i skok tvrdoće u zoni gruboznate mikrostrukture na rubu linije staljivanja. Niti jedno mjerenje tvrdoće ne prelazi 450 HV10 te su rezultati prihvatljivi.





**Slika 67. Grafički prikaz tvrdoće uzorka 4.1.**



**Slika 68. Položaji otisaka, uzorak 4.1.**

Kod uzorka 4.1. zabilježen je najmanji porast tvrdoće u području zone utjecaja topline. Tvrdoća se ne razlikuje značajno od tvrdoće uzorka 3.1 iako je povećan unos topline pri zavarivanju. Također, tvrdoća ne prelazi 450 HV10 te zadovoljava zahtjeve norme.

## 5. Zaključak

Zavarivanje čelika povišene čvrstoće je značajno kompleksnije u odnosu na zavarivanje običnih konstrukcijskih čelika. Glavni izazovi u zavarivanju mikrolegiranih čelika su sprječavanje pojave hladnih pukotina i pada žilavosti. Važan čimbenik za pojavu ovih grešaka je udio vodika otopljenog u zavaru do čega dolazi ako osnovni i dodatni materijal nisu odgovarajuće pripremljeni za zavarivanje. Kod EPP zavarivanja, važno je adekvatno osušiti prašak te prema potrebi predgrijati osnovni materijal.

EPP postupak je razvijen za zavarivanje debljih i jednostavnijih materijala velikim brzinama. Postupak je jedinstven po primjeni praška zbog kojeg se električni luk ne vidi tijekom zavarivanja što je pogodno za radne uvjete u pogonu. Razvoj opreme za EPP dosegao je maksimum u primjeni više izvora struje te više kontaktnih vodilica s dvije ili više žica, a daljnji razvoj postupka je u smjeru razvoja dodatnih materijala. Za veću produktivnost EPP postupka koriste se prahom punjene žice koje omogućuju brže zavarivanje. Razvoj prašaka za zavarivanje omogućuje sve veće brzine kod zavarivanja prljavih i hrđavih materijala.

Prema istraženju literaturi, kod zavarivanja čelika povišene čvrstoće korištenje dodatnih materijala s lošijom čvrstoćom od osnovnog pozitivno utječe na žilavost zavara. Shodno tomu, porast tvrdoće u zoni utjecaja topline je manji, ali je vlačna čvrstoća manja u odnosu na osnovni materijal. Takvi dodatni materijali se mogu koristiti za zavare čije opterećenje je značajno manje od dozvoljenog opterećenja za osnovni materijal.

U eksperimentalnom dijelu ovog rada je potvrđeno da se limovi čelika S690QL mogu zavariti EPP postupkom u jednom prolazu. Kod zavarivanja sučeljenog i kutnog spoja je postignuta zadovoljavajuća geometrija zavara. Korištenjem nerazorne metode potvrđeno je da na zavarima nema površinskih pukotina. Metodom HV10 ispitana je tvrdoća za sve uzorke te dobiveni rezultati ne prelaze 450 HV10. Može se zaključiti da tvrdoća u zoni utjecaja topline nije prešla granicu dozvoljenu normom HRN EN ISO 15614-1 čemu je pogodovalo korištenje žice za zavarivanje s manjom čvrstoćom od osnovnog materijala. Prosječna tvrdoća je nešto veća za zavare sa većim unosom topline. Suprotno očekivanjima ,kod kutnih zavara, porast tvrdoće zone utjecaja topline kod linije staljivanja je izraženiji za zavar sa manjim unosom topline.

U zoni utjecaja topline dobiva se bolja mikrostruktura za zavarivanje s manjim unosima topline. Utjecaj unosa topline kod zavarivanja je izraženiji za sučeljeni spoji, a povećani unos topline uzrokuje grublju mikrostrukturu u zoni utjecaja topline. Ispitivanjem mikrostrukture kutnih zavara može se zaključiti da je mikrostruktura grublja na uzorcima koji su uzeti sa krajeva

---

zavara. Na uzorcima sa početka zavara se vidi odstupanje jer zavar sa manjim unosom topline ima grublju mikrostrukturu. Ostaje za istražiti kakva bi se svojstva zavara dobila kada bi se zavarivalo s odgovarajućim dodatnim materijalom za zavarivanje.

---

**LITERATURA**

- [1] M. Živčić: Elektrolučno zavarivanje pod zaštitom praška – EPP, Zavarivanje 26, 215 – 221, 1983.
- [2] Martin Christ, Xiaofei Guo, Rahul Sharma, Tianyi Li, Wolfgang Bleck, Uwe Reisinger: Hydrogen Embrittlement Susceptibility of Gas Metal Arc Welded Joints from a High-Strength Low-Alloy Steel Grade S690QL; WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, Njemačka, 2020.
- [3] EN 10025-6:2004: Toplo valjani proizvodi od konstrukcijskih čelika -- 6. dio: Tehnički uvjeti isporuke za plosnate proizvode od konstrukcijskih čelika s visokom granicom razvlačenja u poboljšanom stanju
- [4] D. Arsić, V. Lazić, R. R. Nikolić, S. Aleksandrović, P. Marinković, M. Djordjević, R. Čukić: Application of the S690QL class steels in responsible welded structures, Materials Engineering 20, 174-183, 2013.
- [5] Stjepan Kožuh: SPECIJALNI ČELICI –skripta-, Sveučilište u Zagrebu, Metalurški fakultet, Sisak, 2010.
- [6] M. Burzić, M. Manjgo, J. Bernetič, Z. Burzić, M. Arsić: Effect of variable load on crack initiation microalloyed steel S 690-QL, Metalurgija Sisak, 54. 55-58., Sisak, 2015.
- [7] J. R. Davis: Metals Handbook Desk Edition 2nd Edition, ASM, SAD, 1998.
- [8] Podgorski Leonardo: Tehnologije izrade cijevnog jarbola MAG postupkom zavarivanja, Završni rad, Sveučilište Sjever, Varaždin, 2015.
- [9] <https://certilas.nl/en/news/heavy-lifting-ofshore-crane-made-s690-steel> dostupno 4.11.2021
- [10] I. Garašić, A. Ćorić, Z. Kožuh, I. Samardžić: Pojava hladnih pukotina pri zavarivanju visokočvrstog čelika S960QL, Tehnički vjesnik, Vol. 17 No. 3, 2010.
- [11] Christoph Heinze: Untersuchung der Mikrorissbildung beim Schweißen hochfester Feinkornbaustähle, Fakultät Verkehrs- und Maschinensysteme der Technischen Universität Berlin zur Erlangung des akademischen Grades, Berlin, 2014.
- [12] HRN EN ISO 1101-2:2001: Zavarivanje – Preporuke za zavarivanje metalnih materijala – 2. dio: Elektrolučno zavarivanje feritnih čelika

- [13] EN ISO 15614-1:2004: Specifikacija i kvalifikacija postupaka zavarivanja za metalne materijale -- Ispitivanje postupka zavarivanja -- 1. dio: Elektrolučno i plinsko zavarivanje čelika i elektrolučno zavarivanje nikla i legura nikla
- [14] DVS Verlag: Fügetechnik Schweißtechnik, Düsseldorf, Njemačka, 2004.
- [15] „Hard Automation Equipment for Submerged Arc Welding“, Lincoln Electric Europe, 2008.
- [16] Technical handbook: Submerged arc welding, ESAB, Švedska
- [17] <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/job-knowledge/submerged-arc-welding-consumables-part-1-087> dostupno 14.11.2021.
- [18] J. Grgac: Rukovanje obloženim elektrodama i prašcima za zavarivanje, Zavarivanje 20, 337 – 339, 1977.
- [19] <https://www.esab.co.uk/gb/en/products/filler-metals/equipment-accessories/ovens-cabinets/jk-50-powder-drier.cfm> dostupno 14.11.2021.
- [20] <https://www.voestalpine.com/welding/Brands/UTP-Maintenance/Cladding> dostupno 15.11.2021.
- [21] S. Kralj, Z. Kožuh, S. Andrić: Zavarivački i srodni postupci, Hrvatsko društvo za tehniku zavarivanja : Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Katedra za zavarene konstrukcije, Zagreb, 2015.
- [22] ESAB: „Submerged Arc Welding“, Švedska, 2008.
- [23] J. Tušek, V. Kralj: „Zavarivanje pod praškom s dvostrukom, trostrukom i četverostrukom elektrodom“, Zavarivanje 35, 77 – 84, 1992.
- [24] <https://haane.de/en/fields-of-application/pipe-mill/#&gid=1&pid=1> dostupno 15.11.2021.
- [25] <https://www.millerwelds.com/resources/article-library/advantages-of-cored-wire-in-submerged-arc-welding-applications> dostupno 26.11.2021.
- [26] <https://ch-delivery.lincolnelectric.com/api/public/content/3485a01de44a4f11bb229a1df4cde6c4?v=369f4b80> dostupno 27.11.2021.
- [27] EN ISO 6520-1: Zavarivanje i srodni procesi -- Razredba geometrijskih nepravilnosti u metalnim materijalima -- 1. dio: Zavarivanje taljenjem (ISO 6520-1:2007; EN ISO 6520-1:2007)
- [28] R. Scott Funderburk: Key Concepts in Welding Engineering, Selecting Filler Metals: Matching Strength Criteria, Welding Innovation Vol. XVI, No. 2, 1999

- 
- [29] Marcell Gáspár, András Balogh: Behaviour Of Mismatch Welded Joints When Undermatching Filler Metal Is Used, Production Processes and Systems, Helsinki, 2014.
- [30] ThyssenKrupp Steel Europe, atest čelika S690, šarža 665800
- [31] KISWEL, katalog dodatnih materijala za zavarivanje, EF-100S X KD-42
- [32] HRN EN ISO 9692-1:2013: Zavarivanje i srodni postupci -- Vrste pripreme spoja -- 1. dio: Ručno elektrolučno zavarivanje, MIG/ MAG zavarivanje, plinsko zavarivanje, TIG zavarivanje i zavarivanje čelika elektronskim snopom
- [33] EN ISO 6947:2019: Zavarivanje i srodni postupci -- Položaji pri zavarivanju
- [34] HRN EN 1011-1:2009: Zavarivanje -- Preporuke za zavarivanje metalnih materijala -- 1. dio: Opće smjernice za elektrolučno zavarivanje
- [35] HRN EN 571-1:2002: Nerazorno ispitivanje -- Ispitivanje penetrantima -- 1. dio: Opća načela
- [37] ISO 5817: Zavarivanje -- Zavareni spojevi nastali taljenjem u čeliku, niklu, titanu i njihovim legurama (osim zavarivanja elektronskim snopom i laserom) -- Razina kvalitete s obzirom na nepravilnosti
- [38] HRN EN 1043-1:2002: Razorna ispitivanja zavara metalnih materijala -- Ispitivanje tvrdoće -- 1. dio: Mjerenje tvrdoće elektrolučno zavarenih spojeva