

Primjena EPP postupka pri zavarivanju čelika SA516 Gr70

Vusić, Filip

Master's thesis / Diplomski rad

2015

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:235:691762>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-28**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Filip Vusić

Zagreb, 2015.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Doc. dr. sc. Ivica Garašić

Student:

Filip Vusić

Zagreb, 2015.

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

Zahvaljujem se mentoru doc. dr. sc. Ivici Garašiću na korisnim savjetima i primjedbama tijekom izrade ovog rada.

Zahvaljujem se firmi Monter Strojarske Montaže d.d. na ustupljenom uzorku i provedbi kompletnog procesa zavarivanja, te gospodinu Tomislavu Kelavi dipl. ing. stroj. na vrlo korisnim savjetima tijekom provedbe eksperimentalnog dijela rada.

Zahvaljujem se laborantima s Katedre za zavarene konstrukcije Zdenku Batiniću, Krešimiru Sukobljeviću i Mati Šokičiću na velikoj pomoći oko izrade eksperimentalnog dijela rada, na svim savjetima i podršci.

Zahvaljujem se profesorima, asistentima i laborantima sa sljedećih katedra na velikoj pomoći oko provedbe radiografskog ispitivanja, te izradi uzoraka za mehanička ispitivanja i provedbe mehaničkih ispitivanja: Katedra za nerazorna ispitivanja, Katedra za alatne strojeve, Katedra za materijale i tribologiju, Katedra za zaštitu materijala.

Veliko hvala mojim roditeljima, kao i cijeloj obitelji, prijateljima i kolegama na izuzetnoj podršci i motivaciji tijekom studiranja kao i tijekom izrade ovog rada.

Filip Vusić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



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

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **FILIP VUSIĆ**

Mat. br.: **0035183526**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **PRIMJENA EPP POSTUPKA PRI ZAVARIVANJU ČELIKA SA516 Gr70**

Naslov rada na engleskom jeziku: **APPLICATION OF SAW PROCESS IN WELDING OF STEEL SA516 Gr70**

Opis zadatka:

Detaljno proučiti elektrolučno zavarivanje pod praškom i definirati osnovne parametre, vrste prašaka i žica kao i izvedbene inačice postupka. Opisati osnovnu opremu od izvora struje do sustava za dodavanje žice i rekuperaciju praška te dati pregled rješenja za mehanizaciju i automatizaciju zavarivanja. Obzirom na produktivnost postupka i moguću penetraciju prikazati osnovne načine pripreme zavarenog spoja. Specificirati čelik SA 516 Gr 70 sa stanovišta mehaničkih svojstava, kemijskog sastava i zavarljivosti te odrediti područje primjene.

U eksperimentalnom dijelu analizirati tehnologiju EPP zavarivanja na odgovarajućem proizvodu od osnovnog materijala SA 516 Gr 70. Odrediti unose topline i izračunati količinu depozita za dane parametre. Klasificirati primijenjene dodatne materijale i provjeriti način pripreme praška. Provjeriti potrebu za primjenom toplinske obrade nakon zavarivanja ovisno o debljini materijala i odrediti okvirne parametre. U konačnici donijeti zaključke o mogućim unaprjeđenjima analizirane tehnologije u kontekstu povećanja produktivnosti.

Zadatak zadan:

24. rujna 2015.

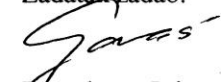
Rok predaje rada:

26. studenog 2015.


Predviđeni datum obrane:

2., 3. i 4. prosinca 2015.

Zadatak zadao:


Doc.dr.sc. Ilica Garašić

Predsjednik Povjerenstva:


Prof. dr. sc. Franjo Cajner

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA.....	VI
POPIS OZNAKA	VII
POPIS KRATICA	VIII
SAŽETAK.....	IX
SUMMARY	X
1. UVOD.....	1
2. ELEKTROLUČNO ZAVARIVANJE POD PRAŠKOM (EPP).....	2
2.1. Osnovni parametri kod EPP zavarivanja.....	4
2.2. Prašak kod EPP zavarivanja.....	8
2.3. Podloge pri EPP zavarivanju prvog sloja.....	13
2.4. Izvedbene inačice EPP postupka zavarivanja	15
2.4.1. Zavarivanje s dvije i više žica	15
2.4.2. Tandem tehnika EPP zavarivanja.....	19
2.4.3. Dvostruka tandem tehnika EPP zavarivanja	20
2.4.4. Inačica EPP zavarivanja s više kontaktnih vodilica.....	21
3. OPREMA ZA ELEKTROLUČNO ZAVARIVANJE POD PRAŠKOM (EPP).....	22
3.1. Izvori struje za EPP zavarivanje.....	22
3.1.1. Ispravljački izvori struje za zavarivanje.....	22
3.1.2. Transformatorski izvori struje za zavarivanje.....	24
3.1.3. Inverterski izvor struje za zavarivanje	25
3.2. Uređaji za dodavanje žice kod EPP zavarivanja	27
3.3. Sustav za rekuperaciju praška kod EPP zavarivanja	29
3.4. Rješenja za mehanizaciju i automatizaciju EPP postupka zavarivanja.....	31
4. TEHNIKE RADA I PRIPREMA SPOJEVA KOD EPP –a.....	34
5. ČELIK SA516 Gr70	37
5.1. Proizvodnja čelika SA516 Gr70.....	37
5.2. Kemijski sastav i mehanička svojstva čelika SA516 Gr70	38

6. EKSPERIMENTALNI RAD.....	42
6.1. Opis eksperimenta	42
6.2. Oprema za zavarivanje	43
6.3. Dodatni materijal i prašak za zavarivanje	46
6.4. Osnovni materijal	47
6.5. Specifikacija postupka i proces zavarivanja.....	47
6.6. Nerazorno ispitivanje zavara – radiografija	57
6.7. Ispitivanje mehaničkih svojstva zavarenog spoja	60
6.7.1. Statičko vlačno ispitivanje	62
6.7.2. Analiza makroizbruska i izračun brzine dodavanja žice kod EPP zavarivanja.....	67
6.7.3. Mjerenje tvrdoće prema HV10.....	70
6.7.4. Mjerenje žilavosti – udarni rad loma.....	74
6.7.5. Ukupni rezultati ispitivanja	79
7. ZAKLJUČAK.....	80
LITERATURA.....	82
PRILOZI.....	85

POPIS SLIKA

Slika 1.	Shematski prikaz procesa taljenja kod EPP zavarivanja [2].....	2
Slika 2.	Shematski prikazan proces EPP zavarivanja [2].....	3
Slika 3.	Utjecaj jakosti struje na oblik zavarenog spoja [5].....	4
Slika 4.	Utjecaj napona zavarivanja na oblik zavarenog spoja [5].....	5
Slika 5.	Približan izgled zavara kod pojedinih utjecajnih parametara zavarivanja [4].....	6
Slika 6.	Utjecaj vrste struje i polariteta na izgled zavara [5].....	7
Slika 7.	Preporuke za dužinu slobodnog kraja žice kod EPP zavarivanja [4].....	8
Slika 8.	Aglomerirani prašak [3].....	10
Slika 9.	Taljivi prašak [3].....	10
Slika 10.	Spremnik za sušenje i skladištenje praška kod EPP zavarivanja [3].....	12
Slika 11.	Podloge za zavarivanje prvog sloja [4].....	14
Slika 12.	Podloga od praška [4].....	14
Slika 13.	Shematski prikaz EPP postupka zavarivanja s dvije žice [3].....	16
Slika 14.	Raspodjela žica kod zavarivanja s četverostrukom i trostrukom elektrodom [12].....	16
Slika 15.	Količina nataljenog dodatnog metala u odnosu na razmak između žica [12].....	17
Slika 16.	EPP zavarivanje s dvije žice i isporukom metalnog praha ispred glave za zavarivanje [13].....	18
Slika 17.	Inačice postupka EPP zavarivanja [13].....	19
Slika 18.	Shematski prikaz tandem tehnike EPP zavarivanja [3].....	20
Slika 19.	Shematski prikaz dvostruke tandem tehnike EPP zavarivanja [3].....	20
Slika 20.	EPP zavarivanje s više kontaktnih vodilica [3].....	21
Slika 21.	Grafički prikaz količine nataljenog dodatnog materijala za pojedine inačice EPP postupka zavarivanja [3].....	21
Slika 22.	Blok dijagram poluvalnog ispravljača [16].....	22
Slika 23.	Blok dijagram punovalnog ispravljača sa Graetzovim spojem [1].....	23
Slika 24.	Ispravljački izvor struje za EPP zavarivanje DC – 655 [15].....	23
Slika 25.	Transformatorski izvor struje za EPP zavarivanje AC – 1200 [15].....	25
Slika 26.	Inverterski izvor struje za EPP zavarivanje PowerWawe AC/DC – 1000 [15].....	26

Slika 27.	Sinusni i kvadratni valovi dobiveni korištenjem izmjenične struje zavarivanja [15].....	27
Slika 28.	Automatizirani sustav za dodavanje žice „Lincoln electric NA – 3S“ [17].....	28
Slika 29.	Shematski prikaz spajanja automatiziranog sustava za dodavanje žice u sustav EPP zavarivanja [17].....	29
Slika 30.	Tipovi filtera korišteni kod principa rekuperacije praška pomoću komprimiranog zraka [22].....	30
Slika 31.	„Traktor“ za EPP zavarivanje s pripadajućim dimenzijama (mm) [23].....	31
Slika 32.	„Traktor“ za EPP zavarivanje bez i s vodilicom [2].....	31
Slika 33.	Shematski prikaz okretaljke za cilindrične dijelove [15].....	32
Slika 34.	Shematski prikaz okretnog stola za cilindrične dijelove [15].....	33
Slika 35.	Automatizacija EPP zavarivanja korištenjem naprava [24].....	33
Slika 36.	Proces proizvodnje čelika SA516 Gr70 [26].....	38
Slika 37.	Povećanje vlačne čvrstoće u ovisnosti o porastu ekvivalenta ugljika [26].....	39
Slika 38.	Utjecaj toplinske obrade na povišenje žilavosti [26].....	40
Slika 39.	Pad čvrstoće kod čelika SA516 uslijed toplinske obrade nakon zavarivanja [26].....	41
Slika 40.	Pad žilavosti kod čelika SA516 uslijed toplinske obrade nakon zavarivanja [26].....	41
Slika 41.	Uređaj za EPP zavarivanje Lincoln Electric, Idealarc – DC 1000 [29].....	43
Slika 42.	Identifikacijska pločica uređaja Lincoln Electric, Idealarc – DC 1000 [29].....	44
Slika 43.	Konzolni nosač na stupu na kojem se nalazi oprema za EPP zavarivanje [29].....	45
Slika 44.	Vođenje glave i priprema za zavarivanje EPP postupkom [29].....	50
Slika 45.	Uspostava električnog luka kod EPP zavarivanja [29].....	51
Slika 46.	Vrijednosti struje i napona prilikom EPP zavarivanja [29].....	51
Slika 47.	Prikaz EPP zavarivanja sučeljenog spoja iz osnovnog materijala SA516 Gr70 [29].....	52
Slika 48.	Zavareni spoj nakon 5. prolaza, popuna spoja vrši se u dva prolaza [29].....	53
Slika 49.	Kontrola međuslojne temperature [29].....	53
Slika 50.	Radnje između procesa EPP zavarivanja [29].....	54
Slika 51.	Izgled zavarenog spoja nakon završetka procesa EPP zavarivanja [29].....	55
Slika 52.	Radni komad pripremljen za radiografsko ispitivanje [29].....	58

Slika 53.	Rezultat radiografskog ispitivanja zavara [29].....	59
Slika 54.	Shematski prikaz mjesta vađenja uzoraka za mehanička ispitivanja [35].....	60
Slika 55.	Priprema uzoraka za mehanička ispitivanja [29].....	61
Slika 56.	Uzorci nakon završenog procesa rezanja [29].....	61
Slika 57.	Shematski prikaz i dimenzije epruvete za statičko vlačno ispitivanje.....	62
Slika 58.	Epruvete za statičko vlačno ispitivanje, strojno obrađene na zadane mjere [29].....	62
Slika 59.	Ispitni uzorak u čeljustima kidalice [29].....	63
Slika 60.	Epruvete nakon procesa kidanja [29].....	64
Slika 61.	Dijagram sila – produljenje za uzorak 2 [29].....	64
Slika 62.	Makroizbrusak slikan digitalnim fotoaparatom [29].....	67
Slika 63.	Makroizbrusak s naznačenim površinama za računanje depozita nataljenog materijala [29].....	68
Slika 64.	Skica penetratora i otiska kod Vickersove metode [36].....	70
Slika 65.	Raspored mjerenja tvrdoće metodom HV10 na makroizbrusku [29].....	71
Slika 66.	Grafički prikaz tvrdoće izmjerene na licu zavara metodom HV10.....	72
Slika 67.	Grafički prikaz tvrdoće izmjerene u korijenu zavara metodom HV10.....	73
Slika 68.	Charpy – ev bat na kojem je mjeren udarni rad loma [29].....	74
Slika 69.	Oblik i dimenzije epruvete za ispitivanje udarnog rada loma [29].....	75
Slika 70.	Način udarnog djelovanja bata na epruvetu [36].....	75
Slika 71.	Uzorci za ispitivanje udarne radnje loma [29].....	76
Slika 72.	Prikaz načina vađenja epruvete u slučaju V utora u metalu zavara [39].....	77
Slika 73.	Prikaz vađenja epruvete u slučaju V utora u ZUT – u [39].....	77
Slika 74.	Pothlađivanje uzoraka u smjesi suhog leda i alkohola [29].....	77

POPIS TABLICA

Tablica 1. Usporedba EPP zavarivanja s jednom i dvije žice [11].....	15
Tablica 2. Najčešće primjenjivani oblici sučeljenih spojeva kod EPP zavarivanja [4].....	35
Tablica 3. Kemijski sastav za čelike skupine ASTM A516 [28].....	38
Tablica 4. Mehanička svojstva za čelike skupine ASTM A516 [28].....	39
Tablica 5. Kemijski sastav dodatnog materijala BOEHLER EMK 6 [30].....	46
Tablica 6. Mehanička svojstva dodatnog materijala BOEHLER EMK 6 [30].....	46
Tablica 7. Kemijski sastav dodatnog materijala BOEHLER Ti 52 – FD [30].....	46
Tablica 8. Mehanička svojstva dodatnog materijala BOEHLER Ti 52 – FD [30].....	46
Tablica 9. Kemijski sastav dodatnog materijala UNION S 3 [30].....	46
Tablica 10. Mehanička svojstva dodatnog materijala UNION S 3 [30].....	47
Tablica 11. Kemijski sastav praška za EPP zavarivanje BOEHLER BB24 [30].....	47
Tablica 12. Kemijski sastav osnovnog materijala čelika SA516 Gr70 [31].....	47
Tablica 13. Mehanička svojstva osnovnog materijala čelika SA516 Gr70 [31].....	48
Tablica 14. Granični maseni udjeli elemenata koji odjeljuju nelegirane od legiranih čelika [32].....	48
Tablica 15. Vrijednosti produljenja za uzorke 1 i 2.....	66
Tablica 16. Vrijednosti sila i naprezanja za uzorke 1 i 2.....	66
Tablica 17. Vremena zavarivanja EPP postupkom za svaki prolaz i ukupno.....	69
Tablica 18. Vrijednosti mjerenja HV10.....	72
Tablica 19. Rezultati ispitivanja udarnog rada loma.....	78

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
R	Ω	Električni otpor
ρ	Ωmm	Specifični otpor
l	mm	Dužina slobodnog kraja žice
s	mm^2	Poprečni presjek žice
η	/	Iskoristivost
$R_{p0.2}$	N/mm^2	Konvencionalna granica razvlačenja
R_m	N/mm^2	Vlačna čvrstoća
A	%	Istezljivost
KV	J	Udarni rad loma
t	$^{\circ}\text{C}$	Temperatura
I	A	Struja zavarivanja
U	V	Napon zavarivanja
v_{zav}	cm/min	Brzina zavarivanja
q	kJ/cm	Unos topline
η	/	Koeficijent iskorištenosti električnog luka
σ	N/mm^2	Naprezanje
ε	mm/mm	Istezanje
F	N	Sila

POPIS KRATICA

EPP	Elektrolučno zavarivanje pod praškom
DC	<i>Direct current</i>
AC	<i>Alternating current</i>
CV	<i>Constant Voltage</i>
CC	<i>Constant Current</i>
IGBT	<i>Insulated gate bipolar transistor</i>
REL	Ručno elektrolučno zavarivanje
MAG	Elektrolučno zavarivanje u zaštiti aktivnog plina
CE	C ekvivalent prema IIW
IIW	<i>International Institute of Welding</i>
MAG – STT	<i>MAG - Surface Tension Transfer</i>
PPŽ	Praškom punjena žica
pWPS	<i>Preliminary Welding Procedure Specification</i>
WPS	<i>Welding Procedure Specification</i>
OM	Osnovni materijal
ZUT	Zona utjecaja topline
MZ	Metal zavara
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
EN	<i>Euro - Norm</i>

SAŽETAK

U ovom radu opisan je postupak elektrolučnog zavarivanja pod praškom (EPP), te je prikazana primjena ovog postupka pri zavarivanju čelika SA516 Gr70. U teorijskom dijelu detaljno je opisan postupak EPP zavarivanja, opisani su osnovni parametri kod ovog postupka zavarivanja, oprema, dodatni materijali i prašci korišteni kod ovog postupka. Opisana je proizvodnja, kemijski sastav, mehanička svojstva te zavarljivost čelika SA516 Gr70.

U eksperimentalnom dijelu rada provodi se EPP zavarivanje sučeljenog spoja iz osnovnog materijala čelika SA516 Gr70. Nakon zavarivanja spoj je ispitan radiografskom kontrolom, a na pripremljenim uzorcima provodila su se mehanička ispitivanja (statički vlačni pokus, udarni rad loma i ispitivanje tvrdoće).

Ključne riječi: EPP zavarivanje; čelik SA516 Gr70; mehanička ispitivanja

SUMMARY

This piece of work describes the process of submerged arc welding (SAW), and shows the use of this procedure for welding steel SA516 Gr70. In the theoretical part, SAW process is described in detail along with basic parameters of the welding process, equipment, materials and powders used in this procedure. The manufacture, chemical composition, mechanical properties and weldability of steel SA516 Gr70 are also described.

In the experimental part of the work, submerged arc welding of butt joint is carried out with base material steel SA516 Gr70. After welding, joint is put to the radiographic test and prepared samples are put to the mechanical tests (tensile test, impact tests and hardness testing).

Key words: submerged arc welding (SAW); steel SA516 Gr70; mechanical tests

1. UVOD

Zavarivanje je spajanje dvaju ili više, istorodnih ili raznorodnih materijala, taljenjem ili pritiskom, sa ili bez dodavanja dodatnog materijala, na način da se dobije homogeni zavareni spoj. Iz ove, opće prihvaćene definicije zavarivanja, zaključuje se da se radi o vrlo složenoj proizvodnoj tehnologiji. Tehnologija zavarivanja zahtijeva poznavanje osnovnog materijala koji se zavaruje, dodatnog materijala, primjenjenog postupka zavarivanja te eksploatacijskih uvjeta u kojima će se nalaziti dio koji se zavaruje.

Elektrolučni postupci zavarivanja međusobno se dosta razlikuju, ali svima je svojstveno da postoji električni luk. Električni luk se uspostavlja između dvije elektrode, a to su kod zavarivanja u pravilu dodatni materijal i radni komad. Kod električnog luka događa se pretvorba električne energije u toplinsku prilikom kratkog spoja vrha elektrode s radnim komadom, nastupa ionizacija molekula i atoma, te se postiže vrlo visoka temperatura pogodna za taljenje osnovnog i dodatnog materijala [1].

Zavarivanje pod zaštitom praška (EPP) razlikuje se od drugih elektrolučnih postupaka zbog činjenice da se električni luk u toku procesa ne vidi jer je prekriven slojem praška i troske koja nastaje taljenjem dijela tog praška. Ovaj postupak zavarivanja vrlo je produktivan, a najčešće se primjenjuje za zavarivanje limova srednjih i većih debljina. Takve debljine limova koriste se kod izrade posuda pod tlakom, petrokemijskoj industriji, industriji nafte i plina te u brodogradnji.

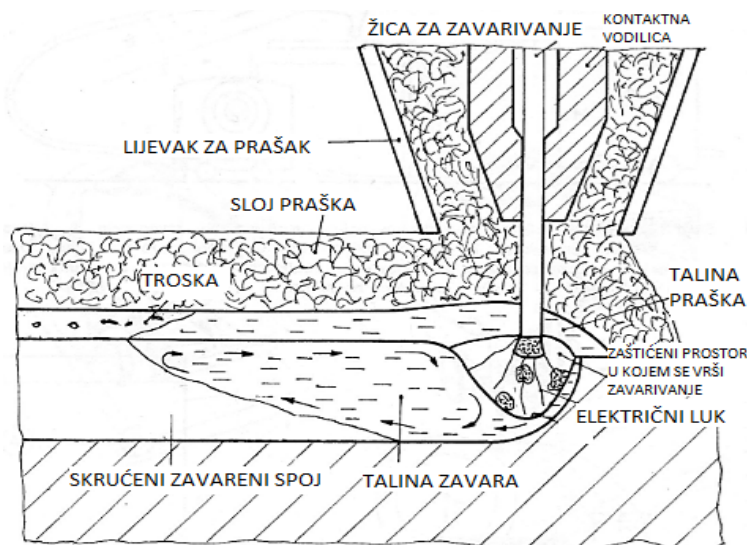
U ovom radu biti će opisana i eksperimentalno prikazana primjena EPP postupka pri zavarivanju čelika SA516 Gr70 koji se koristi kod izrade posuda pod tlakom. Cilj je pravilno projektirati tehnologiju zavarivanja EPP postupkom ovog čelika, izračunati sve važne parametre koji utječu na kvalitetu zavarenog spoja, izraditi specifikaciju postupka zavarivanja za zadani slučaj te provesti naknadna ispitivanja kako bi se ustanovilo zadovoljava li zavareni spoj tehnološke i eksploatacijske uvjete.

2. ELEKTROLUČNO ZAVARIVANJE POD PRAŠKOM (EPP)

Zavarivanje pod zaštitom praška (EPP) ubraja se u elektrolučne postupke [1]. Ovaj postupak zavarivanja razvio se tridesetih godina prošlog stoljeća. Razvoj ovog postupka počeo je mehanizacijom dodavanja žice iz kalema s ručnim kolom, da bi kasnije ručno kolo zamijenilo mehanizirano dodavanje žice elektromotorom. Uz mehanizme dodavanja žice razvijali su se i ostali pristroji, okretaljke i pozicioneri. Zavarivalo se najprije golom žicom, bez ikakve zaštite procesa pa je zavareni spoj bio porozan i loše kvalitete. Elektroda s oblogom za ručno zavarivanje već je bila razvijena, međutim nije se mogla izrađivati tako da bi se namatala na kalem, pa je u daljnjem razvoju bila logična upotreba mineralne obloge elektrode nasipavanjem u obliku praška, na mjesto zavarivanja [2]. Tako je razvijeno EPP zavarivanje kakvo danas poznajemo.

Električni luk se uspostavlja i održava između elektrode i radnog komada, ispod sloja praška, tako da se električni luk u toku procesa ne vidi. Električna energija luka pretvara se u toplinsku, tali osnovni materijal, dodatni materijal i prašak, uz mehanizirano dodavanje žice i kretanje luka određenom brzinom po sloju kojeg se zavaruje ili po površini radnog komada kojeg se navaruje. Talina osnovnog i dodatnog materijala spaja se u jednu cjelinu koja se skrućuje i čini zavareni spoj. Sam proces taljenja odvija se u zatvorenom prostoru kojeg čini talina troske nastala taljenjem praška, štiteći tako od štetnih plinova iz okolne atmosfere [2].

Slika 1 shematski prikazuje proces taljenja kod EPP zavarivanja, a slika 2 prikazuje cjelokupni proces EPP zavarivanja.

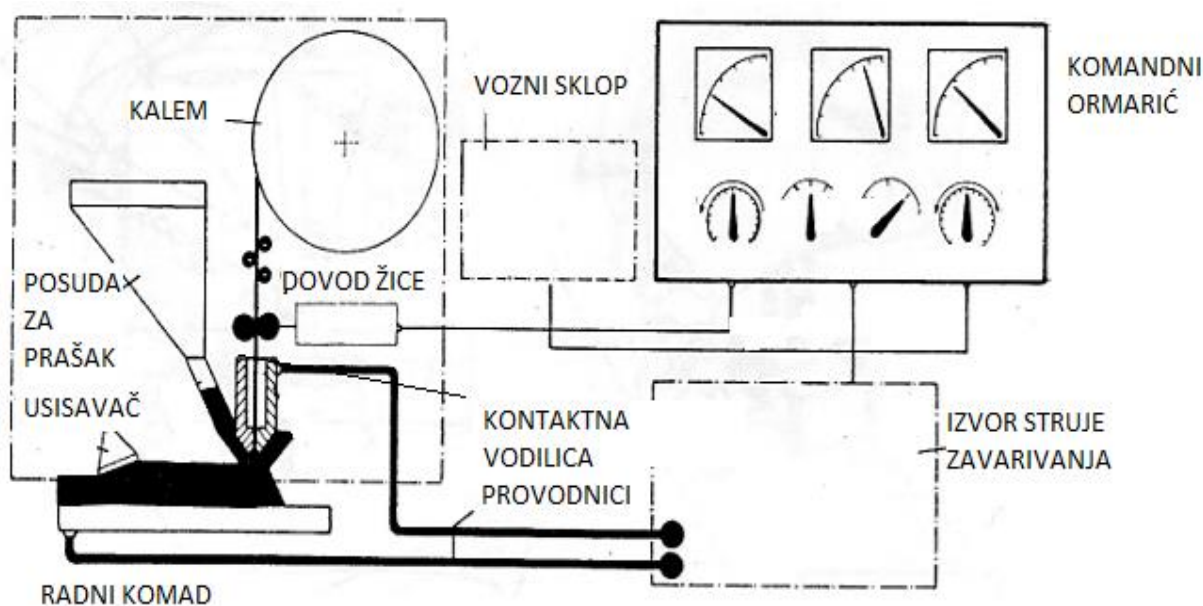


Slika 1. Shematski prikaz procesa taljenja kod EPP zavarivanja [2]

Kroz kontaktnu vodilicu prolazi žica za zavarivanje, a iz posude za prašak, kroz lijevak, nanosi se sloj praška na mjesto zavarivanja. Pod utjecajem topline električnog luka tale se žica, osnovni materijal i prašak, na mjestu zavarivanja. Proces se odvija u zaštićenom prostoru okružen talinom praška koji se djelomično rastaljuje. Električni luk se određenom brzinom zavarivanja neprestano pomiče u pravcu zavarivanja, a rastaljeni materijal žice i osnovnog materijala se sjedinjuje u jednu cjelinu i skrućuje u trosku staklastog oblika [2].

Proces koji se događa neposredno uz sam električni luk, ne bi bio moguć bez svih strojeva i uređaja koji su neophodni kod EPP zavarivanja. Električna struja dolazi iz izvora struje zavarivanja, prolazi kroz provodnike, od kojih je jedan spojen na radni komad, a drugi na kontaktnu vodilicu koja se nalazi na glavi uređaja. Žica za zavarivanje dovodi se iz kalema sistemom za dovod žice. Uključivanjem procesa zavarivanja na preklopku na komandnom ormariću, koji je spojen s provodnicima struje za komande, uspostavi se električni luk i pokrene vozni sklop kojim se pomiče električni luk po mjestu zavarivanja ili se okreće radni komad, a luk miruje. Tako započinje zavarivanje [2].

Na ampermetru i na voltmetru zavarivač prati jakost struje i napon luka. Može smanjivati ili povećavati jakost struje preklopkom ili brzinom dodavanja žice ovisno o vrsti izvora struje zavarivanja. Na indikatoru brzine prati brzinu kretanja voznog sklopa i podešava je regulatorom. Dio praška koji se nije rastalio kupi se usisavačem ponovno u posudu za prašak, a skrućena troska skida se sa zavarenog spoja i odstranjuje [2].



Slika 2. Shematski prikazan proces EPP zavarivanja [2]

Prednosti elektrolučnog zavarivanja pod praškom su [3]:

- visoka kvaliteta zavara
- nema prskanja električnog luka
- mali rizik od nedovlnog protaljivanja i sigurna penetracija
- visoki učin (depozit) materijala
- nema zračenja električnog luka
- nema potrebe za odvođenjem štetnih plinova zavarivanja

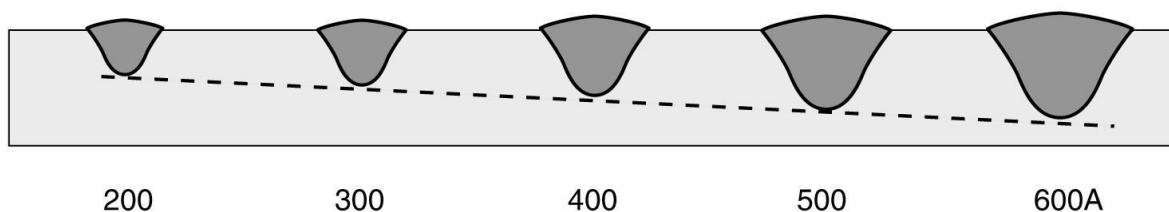
Ograničenja (nedostaci) elektrolučnog zavarivanja pod praškom su [3]:

- potrebna je precizna priprema spoja
- samo PA i PB (PC) pozicije zavarivanja
- nije moguće praćenje električnog luka u toku zavarivanja
- potrebna je velika vještina operatera

2.1. Osnovni parametri kod EPP zavarivanja

Najvažniji parametri kod EPP zavarivanja su jakost struje zavarivanja, napon luka i brzina zavarivanja. Jakost struje zavarivanja najviše utječe na učinak i dubinu protaljivanja. Povećanjem jakosti struje kod istog napona luka i brzine zavarivanja povećava se učinak (količina nataljenog materijala u jedinici vremena) i dubina protaljivanja (penetracija) [4].

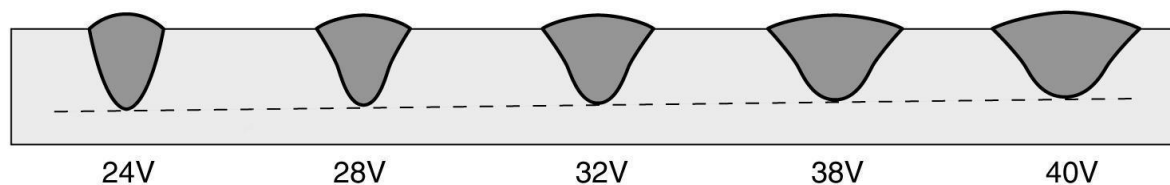
Učinak mjeren kroz količinu nataljene žice u jedinici vremena kod EPP zavarivanja u praksi se obično uzima 15 grama u jednom satu po jednom amperu jakosti struje zavarivanja (15 gr/Ah). Dubina protaljivanja orijentacijski se može uzeti jedan mm na svakih 100 A jakosti struje zavarivanja, pri zavarivanju čelika na spoju bez većeg razmaka u grlu žlijeba [4]. Na slici 3 shematski je prikazana ovisnost jakosti struje o dubini protaljivanja i depozitu nataljenog materijala. Na slici se vidi da s povećanjem jakosti struje raste penetracija i količina nataljenog materijala.



Slika 3. Utjecaj jakosti struje na oblik zavarenog spoja [5]

Vrlo je važno da određenu jakost struje zavarivanja prate odgovarajući napon luka i brzina zavarivanja. Gustoća struje zavarivanja ili jakost struje u odnosu na promjer žice prikazuje se u amperima po mm^2 presjeka žice (A/mm^2). Veća gustoća struje znači manji promjer žice kod iste jakosti struje, daje veću dubinu protaljivanja osnovnog materijala, uži zavar i nešto veći učinak (veći je koeficijent taljenja). Preopterećenje žice prevelikim jakostima struje nije preporučljivo. Preporuke opterećenja pojedinih promjera čelične žice su često različite prema različitim autorima pa zato ne treba primjenjivati najveće i najmanje vrijednosti, već koristiti prosječne vrijednosti [4].

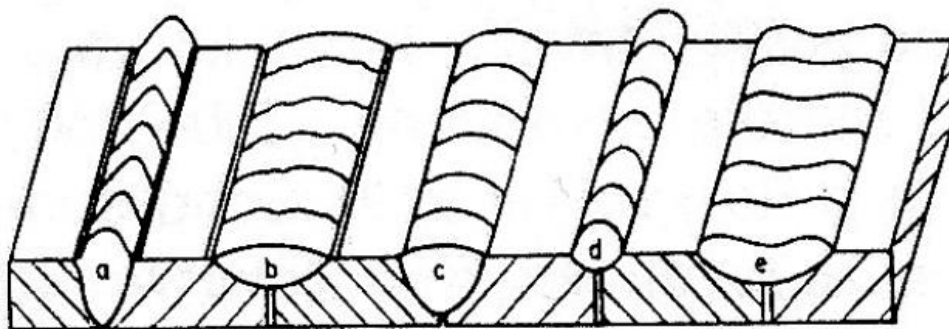
Napon električnog luka kod EPP zavarivanja utječe na dubinu protaljivanja, širinu i nadvišenje zavara, utrošak praška i metalurške reakcije. Dužina električnog luka je proporcionalna naponu. Veći napon prouzrokuje povećanje dužine luka. Kod iste jakosti struje i brzine zavarivanja povećanjem napona luka smanjuje se dubina protaljivanja, dobiva se širi zavar te je veća potrošnja praška [4]. Na slici 4 prikazana je ova ovisnost.



Slika 4. Utjecaj napona zavarivanja na oblik zavarenog spoja [5]

Ova ovisnost se tumači sljedećim: kod većeg napona luka, veća je dužina luka te je prostorno rasipanje energije veće uslijed čega je manje protaljivanje i šira kupka taline [4].

Brzina zavarivanja, odnosno brzina pomicanja električnog luka utječe na dubinu protaljivanja, širinu zavara i izgled zavara. Kod iste jakosti struje zavarivanja i napona luka povećanjem brzine zavarivanja smanjuje se dubina protaljivanja i širina zavara. Ovo se tumači time što se kod povećane brzine smanjuje dovođenje energije po jedinici dužine u osnovni materijal. Stoga je razumljivo manje protaljivanje, manja količina istaljenog materijala po jedinici dužine zavara, prema tome i manja širina zavara [4]. Na slici 5 vidi se približan izgled pet zavara kod pojedinih utjecajnih parametara zavarivanja.



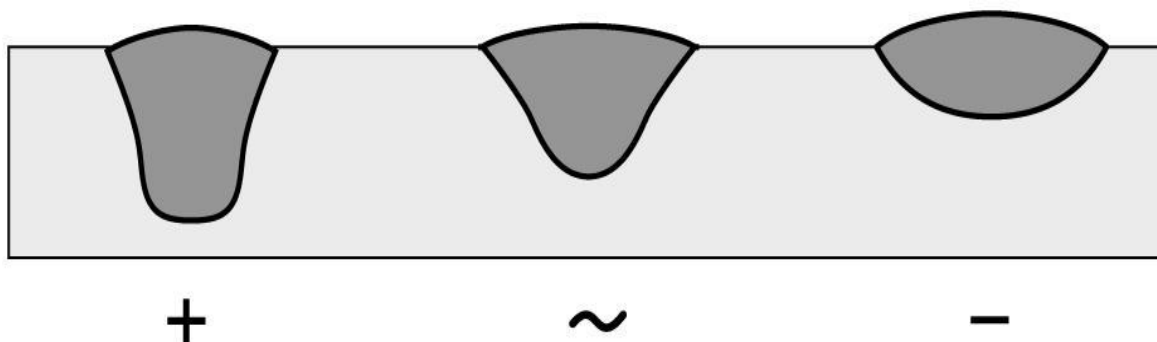
Slika 5. Približan izgled zavara kod pojedinih utjecajnih parametara zavarivanja [4]

Zavar označen slovom a suviše je nadvišen, te je kruškastog oblika. Takav zavar je indikacija da je korištena ili prevelika jakost struje zavarivanja ili premali napon luka. Zavar označen slovom b je preširok zavar, ako su korištene optimalne brzine zavarivanja, te takav izgled zavara ukazuje na prevelik napon luka. Zavar označen slovom c je pravilno izveden zavar. To znači da su struja i napon bili odgovarajućih vrijednosti, te je korištena optimalna brzina zavarivanja. Zavar d izveden je s prevelikom brzinom zavarivanja. Na slici se vidi da protaljivanja praktički nema, a ova pojava još je izraženija u slučaju debljih materijala. Rastaljeni metal žice je samo nanesen na površinu osnovnog materijala, gotovo „nalijepljen“, uzak i vrlo nadvišen. Za razliku od zavara d, zavar e zavaren je s premalom brzinom zavarivanja (ispod 10 m/h). Kod premalih brzina također se smanjuje protaljivanje, što na prvi pogled izgleda nelogično, no to se tumači stvaranjem velike količine taline koja „bježi“ ispod i ispred luka i spriječava njegovo prodiranje u osnovni materijal. Tako se smanjuje dubina protaljivanja, povećava širina zavara, dolazi do uključaka troske i do „nalijepljivanja“, odnosno hladnog nalijeganja taline na nedovoljno zagrijani osnovni materijal [4].

Generalno gledano, brzine zavarivanja ispod 10 m/h s jednom žicom smatraju se premale, a iznad 90 m/h brzine zavarivanja smatraju se prevelike. Kod optimalnih brzina zavarivanja električni luk „drži“ talinu iza sebe i nesmetano prodire u osnovni materijal. Optimalne brzine zavarivanja s jednom žicom kreću se između 20 i 50 m/h, kod nelegiranih čelika, odnosno između 40 i 60 m/h kod sitnozrnatih i legiranih čelika [4].

Vrsta struje i polaritet utječu na dubinu protaljivanja i oblik zavara. Najbolje protaljivanje i oblik zavara dobiva se zavarivanjem istosmjernom strujom sa žicom na plus polu. Kod takvog načina zavarivanja unosi se najveća energija u zavar i najveći je unos topline.

Ovakav polaritet koristi se pretežno uvijek kad je riječ o EPP zavarivanju. Žica na minus polu daje manje protaljivanje i veće nadvišenje zavora. To se objašnjava različitom količinom topline koja se razvija na katodi i anodi električnog luka. Rezultati zavarivanja izmjeničnom strujom negdje su na sredini između plus i minus pola istosmjerne struje [4]. Slikom 6 shematski je prikazano kako vrsta struje i polaritet utječu na izgled zavora.



Slika 6. Utjecaj vrste struje i polariteta na izgled zavora [5]

Dužina slobodnog kraja žice, koja izlazi iz kontaktne vodilice utječe na dubinu protaljivanja. Kod dužeg slobodnog kraja žice nešto je manja dubina protaljivanja kod istih parametara zavarivanja. To se tumači povećanim otporom prolaza struje kod dužeg slobodnog kraja žice. Navedena teza može se iskazati sljedećom jednačinom:

$$R = \rho \frac{l}{s} \quad (1)$$

R [Ω] – električni otpor

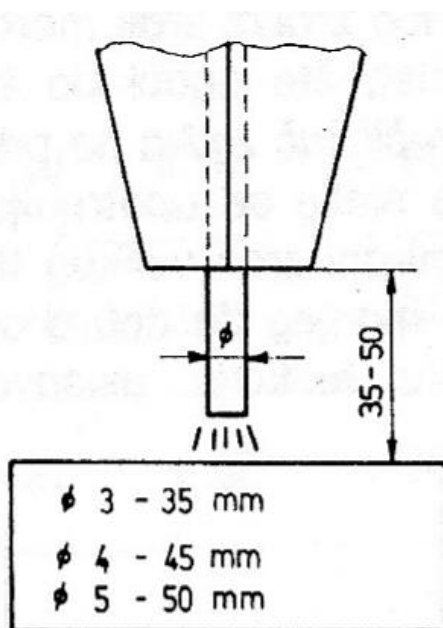
ρ [Ωmm] – specifični otpor

l [mm] – dužina slobodnog kraja žice

s [mm^2] – poprečni presjek žice

Jedan se dio energije troši na prekomjerno zagrijavanje žice i radi toga je manji utjecaj iste energije na protaljivanje. Što je veća gustoća struje veći je utjecaj dužine slobodnog kraja žice na smanjivanje dubine protaljivanja, a povećani je učinak jer se žica brže tali. Optimalna dužina slobodnog kraja žice iznosi približno 11 x promjer žice. Od ovih preporuka može se odstupiti uz uvjet da se zavaruje manjim gustoćama struje zavarivanja ($30 - 40 \text{ A/mm}^2$), što znači s manjim jakostima struje ili većim promjerom žice. Tada slobodni kraj žice nije bitnije opterećen i može se zavarivati čak do 100 mm slobodnog kraja žice, žicom promjera 4 mm i više [4].

Slika 7 prikazuje orijentacijske preporuke za dužinu slobodnog kraja žice kod EPP zavarivanja.



Slika 7. Preporuke za dužinu slobodnog kraja žice kod EPP zavarivanja [4]

2.2. Prašak kod EPP zavarivanja

Prašci koji se upotrebljavaju kod EPP zavarivanja i navarivanja su mješavine različitih komponenata u obliku zrnastog (praškastog) minerala, određenih veličina zrna. Funkcija praška u EPP zavarivanju je: zaštita taline, stabilizacija električnog luka i metalurški utjecaj u procesu zavarivanja. Pod zaštitom taline podrazumijeva se fizička zaštita procesa zavarivanja od štetnih plinova iz okolne atmosfere. Dobra zaštita ovisi o vrsti praška, visini nanosa i veličini zrna u odnosu na parametre zavarivanja. Pod metalurške utjecaje podrazumijevaju se metalurške reakcije elemenata iz taline praška s talinom zavara, odnosno utjecaj pojedinih sastavnih elemenata praška na procese otplinjavanja, rafinacije i legiranja metala zavara u procesu zavarivanja. Stabilizirajuća svojstva praška su djelovanje pojedinih elemenata iz praška na stabilnost električnog luka tako da je moguće zavarivanje golom žicom, izmjeničnom i istosmjernom strujom [6]. Povrh toga, neke od zadaća praška su i sljedeće: stvaranje šljake koja prekriva i formira zavar, utječe na oblik kapljice i formira završnu površinu, štiti talinu od oksida i utječe na brzinu hlađenja zavara [3].

Prašci se razlikuju prema kemijskom sastavu, načinu proizvodnje, obliku i veličini zrna [1]. Prašak se sastoji od minerala kao što su: kvarc, vapnenac, manganovi i aluminijski oksidi. Ove komponente dobivene su od prirodnih izvora [3]. Prašci se prema stupnju legiranja Si i Mn dijele na [7]:

neutralne: nemaju veliki utjecaj na promjene sadržaja Mn i Si, obično prouzrokuju sniženje sadržaja Cr, mali je utjecaj parametara zavarivanja na kemijski sastav i mehaničke osobine metala zavara, pogodni su za višeslojno zavarivanje, pogotovo za debljine iznad 25 mm, kod jednoslojnog zavarivanja i pri zavarivanju preko zahrđalih površina može doći do poroznosti metala zavara.

aktivne: kroz prašak se dodaju male količine Mn i Si što smanjuje pojavu poroznosti posebno kod zavarivanja preko zahrđalih površina, ovi prašci su pogodni za jednoslojno zavarivanje, parametri zavarivanja moraju biti kontrolirani, najčešće se koriste pri naponu luka do 36 V, koriste se za velike brzine zavarivanja, troska se lako uklanja.

legirane: legirajući elementi se dodaju kroz prašak, na stupanj legiranja veliki utjecaj imaju parametri zavarivanja.

Prema načinu proizvodnje razlikujemo [1]:

- aglomerirane praške,
- taljene praške,
- miješane praške.

Aglomerirani prašci proizvedeni su uz dodatak silikata, tehnologijom rotacije. Za takvu proizvodnju prije navedene sirovine samljevene su u male čestice. Mnoge od tih malih čestica čine zrna koja zadrže ispravan omjer pojedinih komponenti. Zrna se osuše i peku na temperaturi između 600 °C i 800 °C. Aglomerirani prašci su kemijski heterogeni. Budući da takav prašak (njegovi minerali) nisu reagirali za vrijeme proizvodnje mogu se u prašak dodati i legirajući elementi. Ovo je jedna od glavnih prednosti pred taljivim prašcima iz razloga jer je metal zavara efikasnije zaštićen od oksida. Također, žilavost koja se postiže na temperaturama ispod 0 °C je veća od one kod korištenja taljivih praškova. Tijekom zavarivanja potrošnja praška je manja iz razloga manje gustoće praška. Aglomerirani prašci dizajnirani su za širok raspon primjena.

Budući da su ovi prašci higroskopni, preporuča se ponovno sušenje praška prije korištenja u aplikacijama koje su osjetljive na vodik [3]. Slika 8 prikazuje aglomerirani prašak.



Slika 8. Aglomerirani prašak [3]

Taljivi prašci su proizvedeni taljenjem svih sastojaka u električnoj peći. Temperatura peći je između 1200 °C i 1400 °C. Nakon ulijevanja taline i skrućivanja materijal se trga u zrna koja se suše i prosijavaju. Taljivi prašci su kemijski homogeni, te ih se može usporediti s razbijenim staklom. Čvrstoća zrna veća je kod taljivih prašaka nego kod aglomeriranih. Ovi prašci nisu higroskopni i nije ih potrebno sušiti prije upotrebe. S visokim strujama i niskim brzinama zavarivanja neki taljivi prašci pokazuju se boljima od aglomeriranih prašaka. Ako se ne može primjeniti sušenje, taljivi prašci mogu biti bolje rješenje od aglomeriranih prašaka [3]. Slika 9 prikazuje taljivi prašak.



Slika 9. Taljivi prašak [3]

Prašak se ne bi trebao izlagati vlažnim uvjetima, poput kiše ili snijega [3]. Važno je napomenuti da osjetljivost praška na vlagu i higroskopnost nisu identični pojmovi. Pod higroskopnošću se podrazumijeva količina upijene vlage u jedinici vremena, a pod osjetljivošću štetan utjecaj vlage na kvalitetu zavarenog spoja. Osnovni uvjeti koje treba ispunjavati skladište prašaka za zavarivanje su preglednost i pristupačnost. Dobar pregled omogućava besprijekoran razmještaj kao i trošenje prašaka s najdužim stajanjem. Pristupačnost je također važna, tako da se prašak koji je u vrećama može transportirati transportnim sredstvima. Skladišni prostor mora biti čist i suh i određene temperature. Vreće praška morale bi se skladištiti u skladištima u kojima se održavaju sljedeći uvjeti temperature i vlage: temperatura ispod 15 °C, relativna vlažnost što niža moguća, ne viša od 50 %. Posebnu pažnju treba obratiti na skladištenje prašaka s obzirom na njihova kemijska i mehanička svojstva. Skladištenje prašaka je ograničeno jer dugotrajnim stajanjem dolazi do kemijskog raspadanja, što je opet ovisno o vrsti praška, načinu proizvodnje, kemijskom sastavu i pakovanju. Zbog svoje homogene i amorfne strukture taljivi prašci se mogu skladištiti neograničeno. Visokokvalitetni, specijalni taljeni prašci koji se posebno pakiraju, mogu stajati u skladištu najduže pet godina, a aglomerirani koji se pakiraju u vreće od umjetne mase tri godine. Ukoliko dođe do oštećenja vreća, odmah se moraju prikladnim sredstvima zatvoriti, a prašak koji je iscurio mora se baciti [8].

Za vrijeme skladištenja pojedina zrna praška mogu poprimiti vlagu, a naročito ako je prašak dugo vremena stajao u skladištu obavezno je potrebno sušenje. Visokokvalitetni prašak za posebne svrhe bez obzira na vrijeme stajanja u skladištu također moramo sušiti. Ovisno o načinu proizvodnje praška preporučuju se sljedeće temperature i vremena sušenja [8]:

- taljeni prašak se treba sušiti na temperaturi 200 – 400 °C u trajanju najmanje 2, a najduže 10 sati,
- aglomerirani prašak treba sušiti na temperaturi 300 – 400 °C u trajanju najmanje 2, a najduže 10 sati.

Sadržaj nezaštićenih lijevaka morao bi se nakon 8 – satne smjene prebaciti u posudu za sušenje ili grijani lijevak na temperaturu od 150 ± 25 °C. Prašak iz otvorenih vreća mora se sušiti prije uporabe na temperaturi od 150 ± 25 °C [3]. Slika 10 prikazuje spremnik za skladištenje i sušenje praška kod EPP zavarivanja.



Slika 10. Spremnik za sušenje i skladištenje praška kod EPP zavarivanja [3]

Kod recikliranja praška vlaga i ulje moraju biti uklonjeni s pomoću komprimiranog zraka, a strani materijali, kao što su kamenac ili šljaka moraju se odvojiti i odstraniti pomoću prikladnog sustava kao što je prosijavanje. Dodavanje novog praška u sustav mora se učiniti tako da na određenu količinu novog praška dolazi tri puta veća količina recikliranog praška [3].

Ako su u pitanju stroži zahtjevi kod zavarivanja, propisani specifikacijama materijala, preporuča se ponovno sušenje praška. Ponovnim sušenjem prašku će se vratiti početni sadržaj vlage. Ponovno sušenje se provodi kako slijedi: aglomerirani prašci 300 ± 25 °C oko 2 – 4 sata; taljivi prašci 200 ± 50 °C oko 2 – 4 sata. Ponovno sušenje se provodi u opremi koja okreće prašak, tako da vlaga može lako ispariti, ili u pećima u plitkim posudama u kojima visina praška ne smije biti iznad 5 cm [3].

Elektrodna žica je jedan od tri osnovna elementa koji određuju kvalitetu zavarenog spoja pri automatskom elektrolučnom zavarivanju pod praškom (materijal koji se zavaruje, žica i prašak). Stoga se žica bira tako da ima približan kemijski sastav kao i osnovni materijal koji se zavaruje [9].

Kod EPP postupka zavarivanja primjenjuje se žica namotana u kolut. Izrađuje se u standardnim promjerima 1,0; 1,6; 2,0; 3,0; 4,0; 5,0; 6,0; 8,0 i 10,0 mm. Najviše se primjenjuju promjeri žica 2,0 – 6,0 mm [6].

2.3. Podloge pri EPP zavarivanju prvog sloja

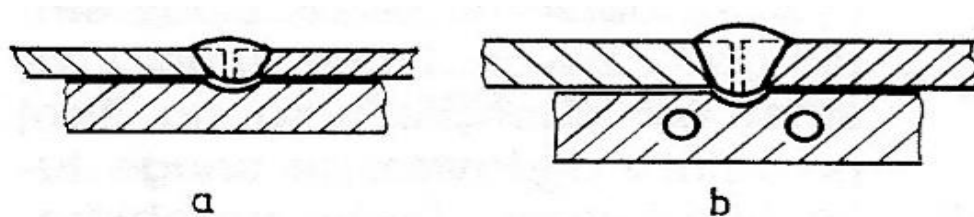
Izraz „podloge pri zavarivanju“ podrazumijeva primjenu različito profiliranih dijelova, postavljenih uz spoj, s donje strane žlijeba koji će biti zavaren, tako da osiguravaju pravilno oblikovanje prvog tzv. korijenskog sloja. Izvođenje korijenskog sloja smatra se najkritičnijom operacijom u proizvodnji zavarivanjem. Potrebno je uravnotežiti brojne sile koje djeluju na talinu, uz zahtjev da se osigura potpuna penetracija, bez prevelikog nadvišenja i ugorina. Podloga ispunjava ovu funkciju oblikujući korijen [1].

Osim ove funkcije, primjenom podloga, ostvaruju se i neke vrlo važne ekonomsko – tehnološke prednosti. Jedna od najvažnijih je svakako toplinska izolacija, koju osiguravaju nemetalne podloge, a povoljno utječe na smanjenje krutih deformacija spoja, jer se izjednačuje brzina hlađenja u licu i korijenu zavara. S ekonomskog gledišta to je mogućnost rada s povećanim parametrima, čime se spoj izvodi u manje slojeva i kraćem vremenu [1].

Prema vrsti materijala podloge se mogu razvrstati na [1]:

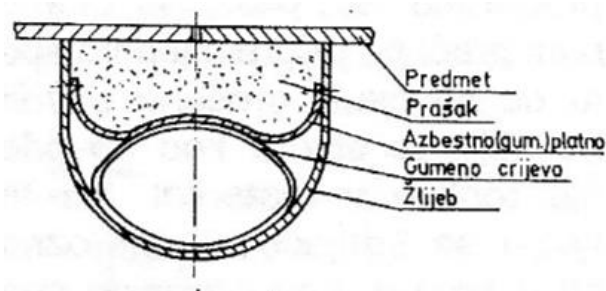
- metalne,
- podloge iz praška za zavarivanje,
- keramičke podloge,
- podloge iz stakla.

Metalne podloge dijele se u dvije osnovne grupe. U prvoj grupi su podloge koje nakon zavarivanja čine sastavni dio spoja i konstrukcije tj. pri zavarivanju potpuno se tale i ulaze u metal zavara. U drugoj grupi metalnih podloga su podloge koje pridržavaju talinu pri zavarivanju, a nakon zavarivanja uklanjaju se s mjesta spoja. Ta vrsta podloga je najčešće izrađena iz bakra [1]. Bakrene podloge u obliku letvi primjenjuju se kod EPP zavarivanja tanjih limova. Limovi su posebnim sistemom pritegnuti na podlogu tako da se ne mogu podizati od podloge prilikom zavarivanja. Budući da se takve bakrene letve jako zagrijavaju kod zavarivanja jačim strujama, obično su hlađene vodom kroz kanale u letvi ili kroz cjevčice priljubljene uz letvu [4]. Slika 11 a prikazuje bakrenu podlogu u obliku letve, a slika 11 b bakrenu podlogu hlađenu vodom.



Slika 11. Podloge za zavarivanje prvog sloja [4]
 a) bakrena podloga u obliku bakrene letve
 b) bakrena podloga hladena vodom

Podloga iz praška za zavarivanje izvedena je tako da na sloj praška djeluje armirano gumeno crijevo s komprimiranim zrakom i pritišće prašak uz radni komad. Podloge od praška nisu najpovoljnije za kvalitetno oblikovanje korijena zavara. Ova podloga dobro služi za pridržavanje taline kod zavarivanja spoja s većim zazorom u grlu žlijeba. Talina koja procuri, dođe do praška i tu se skrutne. Takav zavar mora se zavarivati i s druge strane [4]. Prašak kod ovih podloga može biti rastresit, rastresit omotan tkanjem, povezan vezivom u želatinastu masu ili kompaktan (briketiran, sinteriran). Nedostatak podloga iz rastresitog praška je u tome što se mogu primjenjivati samo za vodoravni položaj [1]. Slika 12 prikazuje podlogu od praška s gumenim crijevom.



Slika 12. Podloga od praška [4]

Keramičke podloge prema vrsti keramike i načinu proizvodnje podloge mogu biti higroskopne ili otporne na vlagu. Pri primjeni higroskopnih podloga mogu se pojaviti poroznosti u zavarenom spoju [1].

Podloge iz stakla mogu biti krute, na primjer obično prozorsko staklo ili elastične izrađene iz staklenog tkanja u više slojeva. Prednost ovih podloga je da ne postoji opasnost od privarivanja na konstrukciju te se zbog manjeg toplinskog kapaciteta upotrebljavaju uglavnom za tanje limove [1].

2.4. Izvedbene inačice EPP postupka zavarivanja

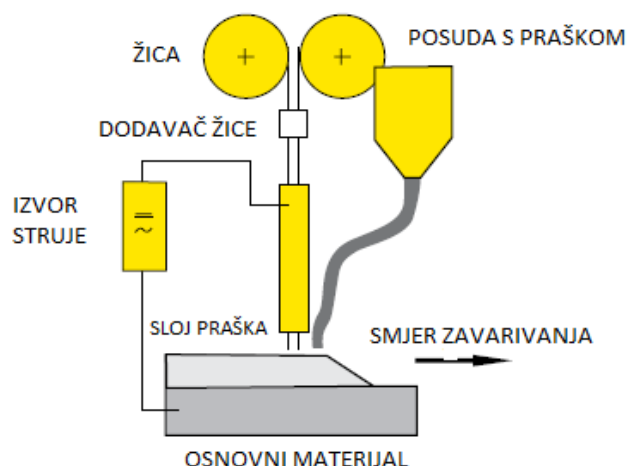
Zahtjevi za daljnjim povećanjem produktivnosti uvjetovali su razvoj većeg broja varijanti, kako drugih postupaka, tako i EPP-a. EPP pruža široke mogućnosti u mijenjanju elemenata procesa zavarivanja [10].

2.4.1. Zavarivanje s dvije i više žica

EPP zavarivanje s dvije žice ne razlikuje se mnogo od konvencionalnog postupka EPP zavarivanja. Zavarivanje s dvije žice realizira se ugradnjom dodatne kontaktne cjevčice u isti vodič elektrode. Ova tehnika se prvenstveno upotrebljava u interesu veće produktivnosti bez velikih ulaganja u postojeći EPP sustav zavarivanja. Zbog veće jakosti struje kod uporabe dvije žice povećava se depozit nataljenog materijala od 30 – 40 %. Struja zavarivanja dijeli se jednako između dvije žice. Promjeri žica koji se koriste kod EPP zavarivanja sa dvije žice iznose 2, 2.5 i 3 mm s razmakom između žica od 8 mm. Struja zavarivanja je istosmjerna s žicama na plus polu. Ovakav polaritet struje daje najveću stabilnost luka i najmanju opasnost od poroznosti [11]. Tablica 1 prikazuje usporedbu EPP zavarivanja s jednom i dvije žice. U tablici su dani podaci o korištenim strujama zavarivanja i depozitu materijala u ovisnosti o debljini žice i korištenom postupku EPP zavarivanja. Slika 13 shematski prikazuje EPP postupak zavarivanja s dvije žice. Kod zavarivanja s dvije žice prašak se dovodi kroz zasebnu cijev koja nije integrirana s kontaktnom vodilicom kao što je slučaj kod EPP zavarivanja s jednom žicom.

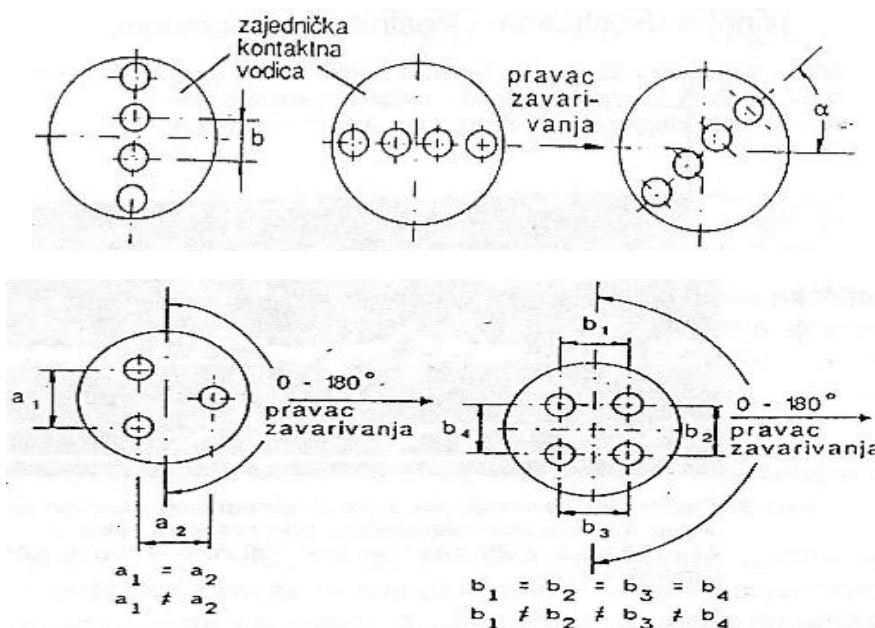
Tablica 1. Usporedba EPP zavarivanja s jednom i dvije žice [11]

TIP ŽICE	PROMJER mm	METAL ZAVARA mm ²	STRUJA A max	DEPOZIT MATERIJALA kg/h
JEDNA ŽICA	3.0	7.06	650	8.0
	4.0	12.56	850	11.5
	5.0	19.62	1100	14.5
DVIJE ŽICE	2.0	6.28	1000	14.0
	2.5	9.81	1200	17.0
	3.0	14.13	1500	21.0



Slika 13. Shematski prikaz EPP postupka zavarivanja s dvije žice [3]

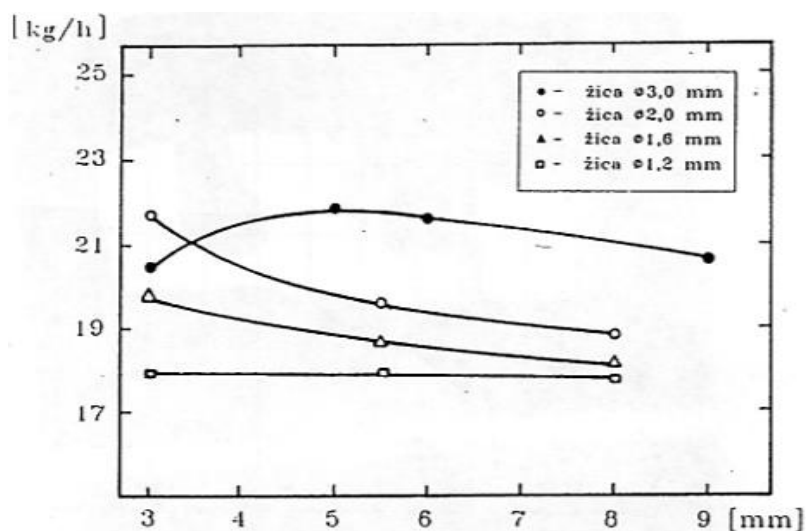
Uz zavarivanje s dvije žice, rjeđe se upotrebljava i zavarivanje s više žica u jednoj vodilici. Uređaj s više žica se sastoji iz jedne zajedničke vodilice (kontaktna cjevčica) za žice, zajedničkog pogonskog i ispravljačkog mehanizma, jednog izvora struje i jedinstvenog sustava za regulaciju. Žice u bakrenoj vodilici su raspoređene u liniji jedna za drugom u pravcu zavarivanja, pravokutno ili pod određenim kutom na pravac zavarivanja. Druga mogućnost je da su žice raspoređene u obliku trokuta kod zavarivanja s trostrukom ili četverokuta kod zavarivanja sa četverostrukom žicom [12]. Navedene načine raspodjele žica u vodilici shematski prikazuje slika 14.



Slika 14. Raspodjela žica kod zavarivanja s četverostrukom i trostrukom elektrodom [12]

Kod tehnike EPP zavarivanja s više žica količina nataljenog dodatnog materijala se povećava s jačinom struje eksponencijalno, a povećanjem broja žica N povećava se s čimbenikom N^n ($n > 1$). Također je količina nataljenog dodatnog materijala veća pri zavarivanju s minus polom u usporedbi s plus polom na elektrodi. Ova činjenica proizlazi iz toga da je katodna mrlja puno pokretljivija nego anodna. Zbog toga je štrcanje metala kod zavarivanja s minus polom veće u usporedbi s plus polom na elektrodi [12].

Vrlo značajan utjecaj na količinu nataljenog metala EPP postupkom s više žica ima razmak između žica. Bez obzira na broj žica najvažnije je da je razmak između žica optimalan. To znači da se žice ne dotiču među sobom i da razmak iznosi samo toliko da sve žice stvaraju pod praškom samo jednu kupku, što je preduvjet za kvalitetan zavar. Grafom na slici 15 prikazano je kako razmak između žica utječe na količinu nataljenog dodatnog materijala. Zavarivanje se provodilo EPP postupkom s trostrukom elektrodom. Iz grafa se vidi da se sa smanjenjem razmaka između žica povećava količina nataljenog metala. To znači da je gubitak topline u okolinu kod manjih razmaka manji i da je iskorištenje energije bolje [12]

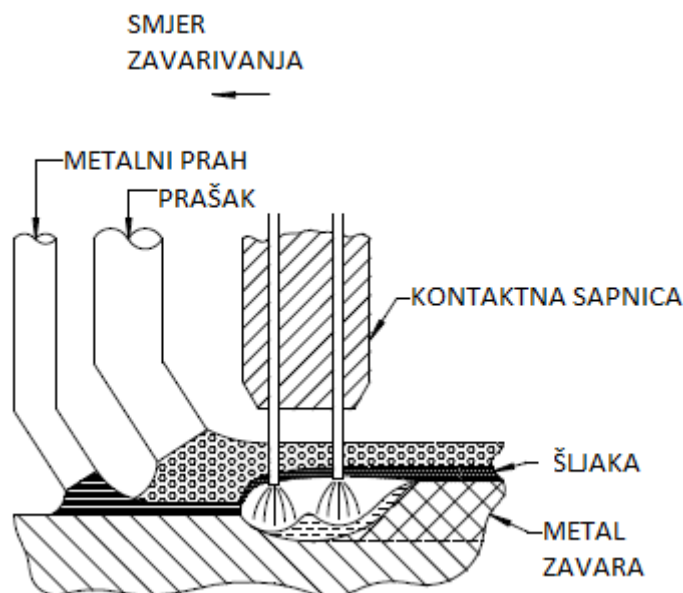


Slika 15. Količina nataljenog dodatnog metala u odnosu na razmak između žica [12]

Nadalje radi postizanja još većeg depozita nataljenog dodatnog materijala može se u metal zavara tijekom zavarivanja dodavati i metalni prah. Metalni prah moguće je dodavati na nekoliko načina.

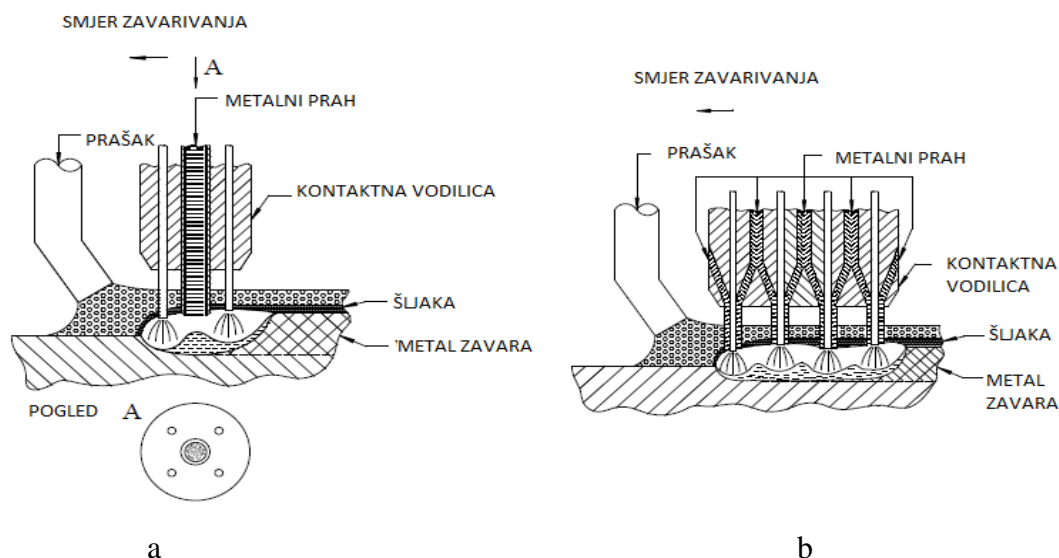
Najjednostavniji način je da ga se dodaje prije žice. Prvo se na područje zavarivanja dodaje metalni prah, a tak onda prašak. Prednost je ove metode u jednostavnom rješenju sustava za dodavanje metalnog praha i praška.

Nedostatak ove metode je u nešto manje preciznom dodavanju metalnog praha i nešto slabijem učinku taljenja [13]. Slika 16 shematski prikazuje ovu tehniku EPP zavarivanja s dvije žice.



Slika 16. EPP zavarivanje s dvije žice i isporukom metalnog praha ispred glave za zavarivanje [13]

U drugoj varijanti ovog postupka metalni prah se dovodi kroz cijev montiranu između žica. Zbog visokih temperatura cijev mora biti izrađena od keramike otporne na visoku temperaturu. Prednost ove tehnike je u tome da se metalni prah dovodi izravno u talinu zavora između električnih lukova. Ova tehnika je pogodna kada se četiri žice nalaze u kvadratnom rasporedu, zato jer električni lukovi od prve dvije žice gore između radnog komada i žica, a ne između metalnog praha i žica kako je slučaj u prethodno objašnjenjenu tehnici. Dakle kod ove tehnike postiže se veća penetracija u osnovni materijal. Električni lukovi druge dvije žice tope metalni prah koji se stapa u talinu zavora i oblikuje zavar. Osim kvadratnog rasporeda žice mogu biti poredane jedna iza druge i također se i kod takve izvedbe metalni prah dovodi direktno u talinu zavora, kroz kontaktnu sapnicu [13]. Slika 17 prikazuje inačicu postupka EPP zavarivanja s kvadratnim rasporedom žica i dovođenjem metalnog praha izravno u talinu zavora, te inačicu postupka s više žica poredanih jedna iza druge i dovođenjem metalnog praha izravno u talinu zavora. Kod jedne i druge inačice postupka zavarivanja prašak se dodaje kroz zasebnu cijev iz posude s praškom.



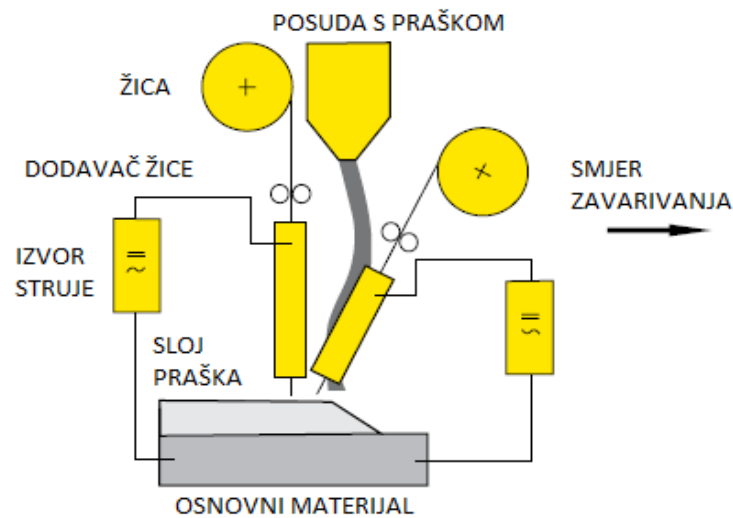
Slika 17. Inačice postupka EPP zavarivanja [13]

- a) EPP zavarivanje s kvadratnim rasporedom žica i dovođenjem metalnog praha izravno u talinu zavara
- b) EPP zavarivanje s više žica poredanih jedna iza druge i dovođenjem metalnog praha izravno u talinu zavara

2.4.2. Tandem tehnika EPP zavarivanja

Kada su žice spojene u odvojene sapnice za zavarivanje te su priključene na odvojene jedinice snage, a zavarivanje se vrši na istom spoju govorimo o tzv. tandem tehnici EPP zavarivanja [14]. Vodeći luk ima višu struju (najčešće DC+) i niži napon dajući veću penetraciju, dok prateći luk koristi nižu struju (najčešće AC da bi se izbjegao udarac luka) da izgladi površinu zavara. Žice su standardnih promjera (3 – 5 mm) i depozit nataljenog materijala je otprilike dva puta veći nego kod EPP postupka s jednom žicom [3]. Žice mogu biti raspoređene u liniji jedna iza druge u pravcu ili pod određenim kutom na pravac zavarivanja. Kod svih kombinacija najvažniji je optimalan razmak među žicama kako se ne bi međusobno doticale i kako bi, pod praškom, tvorile jednu kupku taline što je preduvjet za kvalitetan zavar [14].

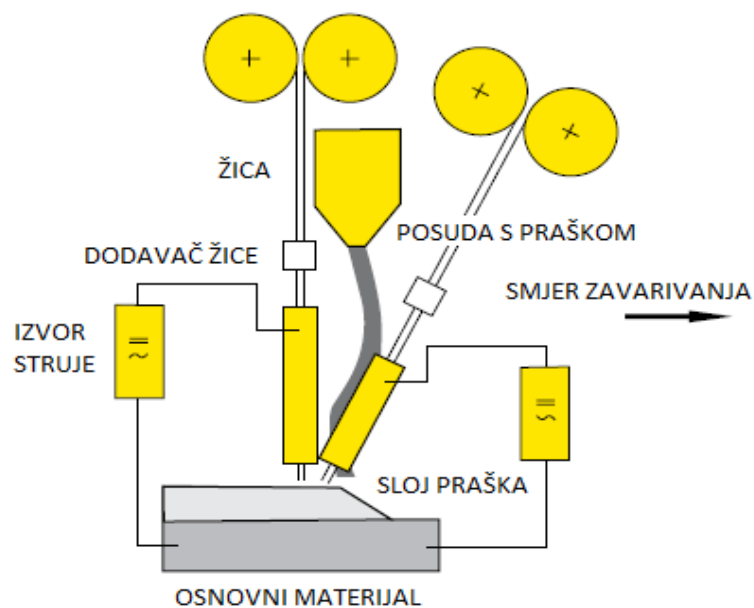
Dodatni izdaci za ovaj EPP postupak su dosta visoki, prvenstveni zbog potrebe dodatne jedinice snage. Ova inačica EPP postupka se naširoko koristi u brodogradnji, *off-shore* industriji, a depozit nataljenog dodatnog materijala prelazi 25 kg/h. Slika 18 shematski prikazuje tandem tehniku EPP zavarivanja.



Slika 18. Shematski prikaz tandem tehnike EPP zavarivanja [3]

2.4.3. Dvostruka tandem tehnika EPP zavarivanja

Ovaj proces uključuje dva uređaja, svaki sa po dvije žice koje se stavljaju u niz. Uz korištenje četiri žice, svaka promjera 2,5 mm, može se postići depozit nataljenog materijala veći od 38 kg/h. Ovaj proces može se koristiti kod spojeva koji omogućuju pristup opremi, npr. obodna zavarivanja različitih podnica velikih spremnika [3]. Slika 19 shematski prikazuje dvostruku tandem tehniku EPP zavarivanja.



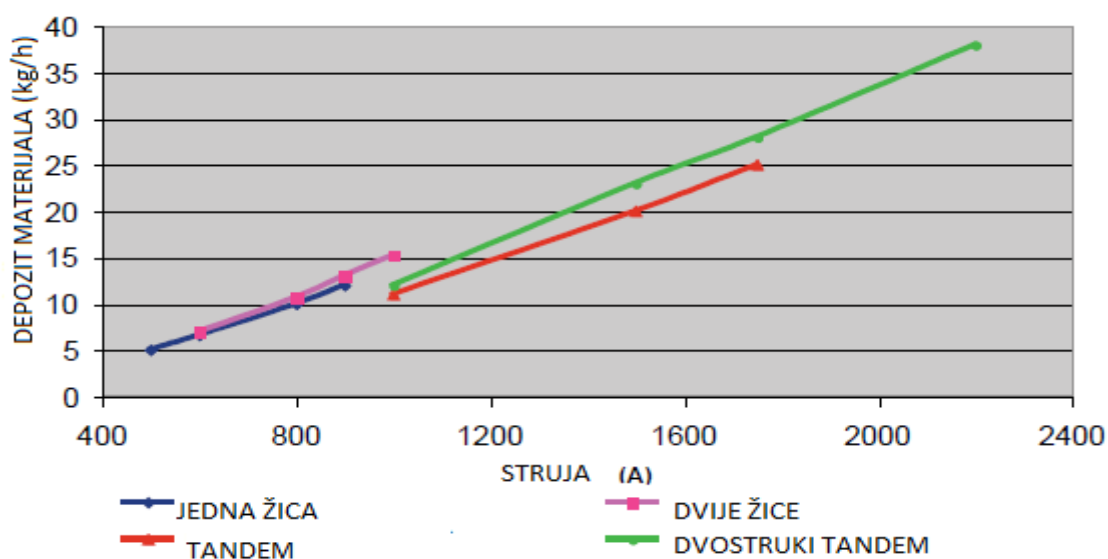
Slika 19. Shematski prikaz dvostruke tandem tehnike EPP zavarivanja [3]

2.4.4. Inačica EPP zavarivanja s više kontaktnih vodilica

Kod ove inačice postupka koristi se više kontaktnih vodilica, svaka s parom žica, te se svaki par žica napaja vlastitim izvorom struje. Prvi par žica obično je spojen na DC+ pol, dok su prateće žice spojene na izvor koji daje izmjeničnu struju. Brzinom zavarivanja većom od 2,5 m/min može se postići maksimalni mogući depozit od 90 kg/h i više [3]. Slika 20 prikazuje inačicu EPP zavarivanja s više kontaktnih vodilica. Slika 21 grafički prikazuje količinu nataljenog dodatnog materijala za pojedine inačice EPP postupka zavarivanja te raspon primjenjivanih jačina struja kod pojedinih inačica postupka. Najveći je depozit kod dvostruke tandem tehnike, a najmanji kod EPP postupka s jednom žicom. Također najveće struje se primjenjuju kod dvostruke tandem tehnike (iznad 2000 A), a najmanje kod zavarivanja s jednom žicom.



Slika 20. EPP zavarivanje s više kontaktnih vodilica [3]



Slika 21. Grafički prikaz količine nataljenog dodatnog materijala za pojedine inačice EPP postupka zavarivanja [3]

3. OPREMA ZA ELEKTROLUČNO ZAVARIVANJE POD PRAŠKOM (EPP)

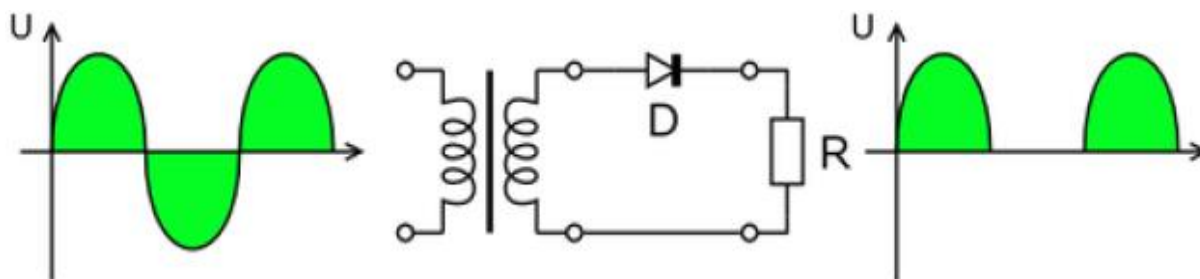
3.1. Izvori struje za EPP zavarivanje

Kao izvori struje kod EPP zavarivanja mogu se koristiti ispravljački izvori, transformatorski izvori i inverterski izvori struje za zavarivanje [15].

3.1.1. Ispravljački izvori struje za zavarivanje

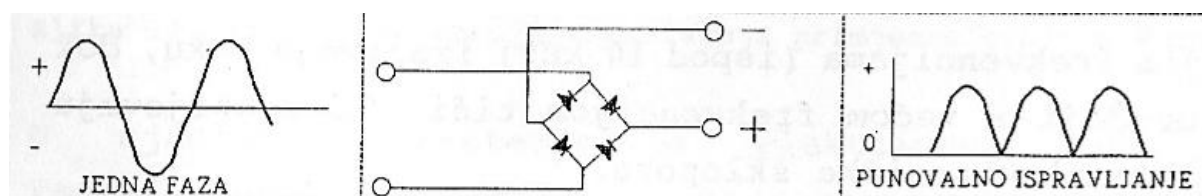
Istosmjerna struja za održavanje električnog luka može se proizvesti i uređajima koji ispravljaju izmjeničnu struju, standardno dostupnu u mreži. Uređaji se nazivaju ispravljači za zavarivanje [1]. Najčešće se u ispravljačima koriste poluvodičke diode kao glavni elektronički elementi kojima se vrši ispravljanje. Osim dioda, koriste se i tiristori. Pod ispravljanjem izmjenične struje (napona) u istosmjernu često se podrazumjeva i glađenje (filtraciju, smanjivanje valovitosti) izlaznog napona, te stabiliziranje napona. Često se u sklopu ispravljača nalazi i transformator koji smanjuje napon na pogodnu vrijednost (npr. mrežnih 230V na 15V) [16]. Poznato je poluvalno i punovalno ispravljanje, koje se može primijeniti na jednofaznu ili trofaznu mrežu [1].

Poluvalni ispravljač propušta samo jednu poluperiodu izmjeničnog napona. Poluvalni ispravljač predstavlja jedna dioda spojena serijski s trošilom. Jednofazno poluvalno ispravljanje je nepogodno za zavarivanje, jer je učinkovitost ovakvog sklopa manja od 50 % [1, 16]. Slika 22 prikazuje blok dijagram poluvalnog ispravljača.



Slika 22. Blok dijagram poluvalnog ispravljača [16]

Punovalni ispravljač je sklop koji služi za propuštanje obje poluperiode izmjeničnog napona, ali tako da pozitivnu poluperiodu propusti, a negativnu fazno pomakne za 180° tj. promijeni joj predznak napona. Radi poboljšanja energetske učinkovitosti kod punovalnog ispravljanja, često se za ispravljač koristi mosni ili Graetzov spoj dioda [16]. Najpovoljniji su trofazni izvori s punovalnim ispravljanjem jer daju gotovo konstantnu istosmjernu struju s jednolikim opterećenjem mreže [1]. Slika 23 prikazuje blok dijagram punovalnog ispravljača sa Graetzovim spojem.



Slika 23. Blok dijagram punovalnog ispravljača sa Graetzovim spojem [1]

Slika 24 prikazuje jedan ispravljački izvor struje za EPP zavarivanje. Raspon struja zavarivanja ovog uređaja je od 50 do 815 A, a zavarivanje se može vršiti s elektrodom na „+“ ili „-“, polu. Statička karakteristika (operativna karakteristika izvora struje mjerena pod konstantnim opterećenjem) ovog uređaja može biti ravna (eng. *Constant Voltage (CV)*) ili strmopadajuća (eng. *Constant Current (CC)*).



Slika 24. Ispravljački izvor struje za EPP zavarivanje DC – 655 [15]

Kod EPP zavarivanja s promjerom žice do 3 mm izvor struje je podešen da daje ravnu statičku karakteristiku. Takva statička karakteristika karakteristična je za postupke zavarivanja s mehaniziranim dodavanjem žice. Kod takve regulacije izvor struje održava napon struje konstantnim dok se jačina struje mijenja visinom električnog luka. Kod ravne karakteristike teži se održati visinu luka konstantnom, ali bilo kakva promjena visine luka povlači za sobom drastičnu promjenu jakosti struje što ujedno znači i veliku promjenu količine depozita koju polažemo na radni komad [16].

Duljina električnog luka je proporcionalna naponu i kao takva se podešava kao parametar zavarivanja kod EPP postupka zavarivanja. Geometrija zavara je ovisna o duljini električnog luka jer se njome definira širina područja interakcije električnog luka s osnovnim materijalom i time se prvenstveno utječe na širinu zavara, a u kombinaciji sa jakošću struje zavarivanja i na penetraciju. Pošto EPP zavarivanje spada u postupke s mehaniziranim dodavanjem žice, koristi se tzv. samoregulacija duljine električnog luka koja se zasniva na blagopadajućoj statičkoj karakteristici, te se u tom slučaju radi o unutarnjoj ili strujnoj regulaciji. Pri unutarnjoj ili strujnoj regulaciji postavljena brzina žice je konstantna neovisno o promjeni duljine električnog luka [16].

Pri većim debljinama žice (preko 3 mm) kod EPP zavarivanja primjenjuje se strmopadajuća karakteristika ali u sustavu vanjske ili naponske regulacije pri čemu brzina žice nije konstantna pri promjeni duljine električnog luka. Razlog je prevelika tromost sustava kod većih debljina žice pri unutarnjoj ili strujnoj regulaciji pa bi pri većim brzinama zavarivanja bilo potrebno više vremena pri vraćanju u optimalno podešeno stanje, a što bi u praksi značilo više zavara izvedenog s neodgovarajućim parametrima [16].

3.1.2. Transformatorski izvori struje za zavarivanje

Kao izvori izmjenične struje za zavarivanje primjenjuju se transformatori za zavarivanje. Primjenom zavarivačkih transformatora želi se osigurati pad napona pri porastu opterećenja odnosno struje zavarivanja. Ovakav zavarivački transformator ima strmopadajuću karakteristiku. Konstruktivno, transformator se u osnovi sastoji od primarnog i sekundarnog namotaja namotanih na željeznu jezgru. Broj zavoja i presjek vodića u zavojima tako je određen da se na sekundaru dobije relativno nizak napon, a presjek je dimenzioniran da propusti jaku struju zavarivanja. Padajuća karakteristika transformatora osigurava se ugradnjom npr. prigušnice, koja predstavlja induktivni otpor. S obzirom na praktične zahtjeve u radu, zavarivački transformator mora imati mogućnost regulacije struje zavarivanja [1].

Kod stvarnih izvedbi transformatora moraju se u obzir uzeti i gubici, to jest energija potrebna za magnetiziranje feromagnetske (ili druge) jezgre, gubici zbog vrtložnih struja, gubici u bakru (omski gubici u žicama od kojih su namotani namoti), itd. Zbog tih gubitaka je korisna sekundarna snaga nerijetko i nekoliko desetaka posto manja od utrošene primarne snage [16]. Slika 25 prikazuje zavarivački transformator AC – 1200. Raspon struja zavarivanja ovog uređaja je od 200 do 1500 A, a zavarivanje se vrši izmjeničnom strujom. Uređaj ima strmopadajuću karakteristiku, te se može koristiti jedino u slučaju EPP zavarivanja sa žicom promjera većeg od 3 mm kako je prethodno objašnjeno.



Slika 25. Transformatorski izvor struje za EPP zavarivanje AC – 1200 [15]

3.1.3. Inverterski izvor struje za zavarivanje

Inverterska tehnologija je razvijena korištenjem visoko energetske poluvodiča kao što su IGBT (*eng. Insulated gate bipolar transistor*) kako bi bilo moguće napraviti prekidački izvor napajanja koji ima mogućnost da podnese velika strujna opterećenja izazvana procesom zavarivanja [16].

Inverter najprije pretvara izmjeničnu struju u istosmjernu – prije procesa transformacije, a nakon pretvaranja struje, tranzistorske sklopke brzim prebacivanjem iz područja zapiranja u područje zasićenja stvaraju visokofrekventan napon. Tipične frekvencije izvora izmjenične struje ove vrste (od 10 000 Hz do 20 000 Hz) koje prolaskom kroz transformator (vrlo malih dimenzija) postaje izmjenične struje nižih frekvencija, ali znatno više jakosti struje.

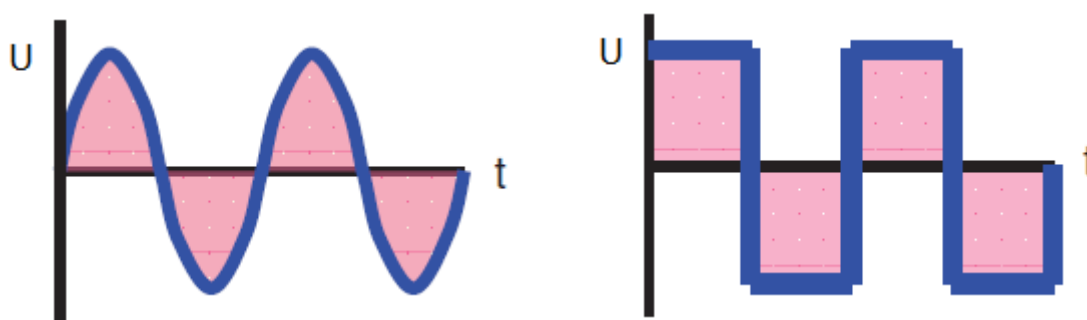
Razlog postavljanja invertera prije transformatora je linearno smanjivanje potrebnog broja zavoja s visinom frekvencije ulaznog signala (struje), što dovodi do zaključka da visokofrekventne struje traže izuzetno male transformatore koji daju sada novu vrijednost struje – nižih frekvencija, ali viših struja [16].

Neke od prednosti inverterske tehnologije su: vrlo visoka iskoristivost do $\eta = 0,90$, inverteri imaju mogućnost da se uključi impulsna struja za zavarivanje koja se može kontrolirati prema jakosti, gustoći struje, omjer na kojem je polu struja duže zadržana, ulazna i izlazna karakteristika te frekvencija impulsa. Također brzina „reakcije“ pri automatskom upravljanju parametrima ovakvih izvora je veća od običnih ispravljačkih zato što ispravljački izvori rade na frekvencijama od 50/60 Hz, pa je i vrijeme odaziva zbog korištenja transformatora sa željeznom jezgrom i zavojnicom mnogostruko duže. Kod invertera to nije slučaj jer se ne koriste transformatori sa željeznom jezgrom i zavojnice, a frekvencija je 100 puta veća, pa samim time i vrijeme reakcije je kraće [16]. Slika 26 prikazuje inverterski uređaj za EPP zavarivanje. Uređaj radi u području od 200 do 1000 A, zavarivati se može istosmjernom strujom na „+“ i „-“, polu te izmjeničnom strujom. Statička karakteristika ovog uređaja može biti ravna (*eng. Constant Voltage (CV)*) ili strmopadajuća (*eng. Constant Current (CC)*).



Slika 26. Inverterski izvor struje za EPP zavarivanje *PowerWawe AC/DC – 1000* [15]

Slika 27. prikazuje sinusne i kvadratne valove dobivene korištenjem zavarivačkih uređaja koji rade s izmjeničnom strujom. Korištenjem sinusnih impulsa dobiva se srednja penetracija i srednji depozit, dok je udarac luka u radni komad praktički eliminiran. Ovakvi impulsi se koriste kod aplikacija s više žica kada su dostupni samo transformatori. Korištenjem kvadratnih impulsa penetracija i depozit materijala mogu varirati ovisno od podešenog oblika impulsa. Udarac luka je također praktički eliminiran, a ovakav oblik valova poželjan je kod tehnike jednog luka, te kao vodeći i prateći luk kod aplikacija s više žica (glava) [15].



Slika 27. Sinusni i kvadratni valovi dobiveni korištenjem izmjenične struje zavarivanja [15]

3.2. Uređaji za dodavanje žice kod EPP zavarivanja

Uređaj za dodavanje žice služi za automatsko dodavanje žice – elektrode u EPP procesu zavarivanja. Glavni parametri na koje možemo posredno utjecati putem dodavača žice su: slobodni kraj žice i brzina dodavanja žice [16].

Dodavanje žice vrši se automatskom regulacijom pomoću izvora struje za zavarivanje prema visini napona struje. Izlazna karakteristika kod automatski reguliranih izvora struje je ravna – konstantan napon, a to je značajno jer se promjenom visine električnog luka napon mijenja u puno manjem intenzitetu. Elektromotor za dodavanje žice reguliran je izlaznim naponom izvora struje koji zbog slabijeg intenziteta promjene osigurava sporiju reakciju dodavanja žice što znači i veću stabilnost procesa, dok intenzivnija promjena jakosti struje utječe na brzinu taljenja žice [16].

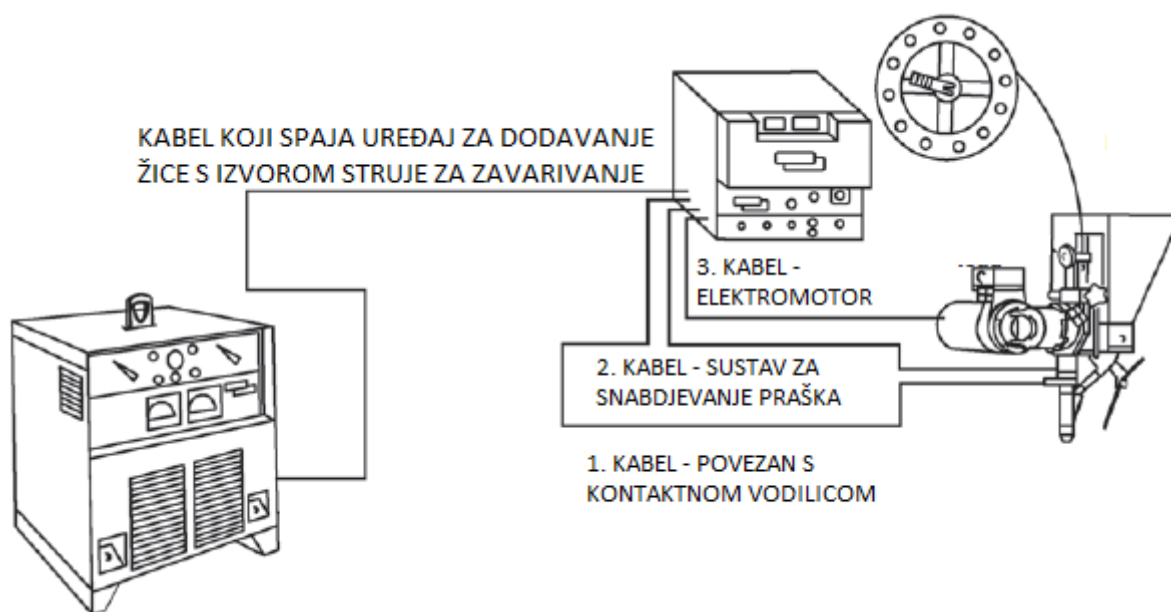
Ako bi građa bila izmjenjena, da brzina dodavača žice ovisi o intenzitetu promjene jakosti struje, tada bi svaka promjena visine električnog luka dovela do zabijanja žice u radni komad ili uvlačenja žice u pištolj za zavarivanje. Obje ove solucije su neprikladne za vođenje procesa zavarivanja [16].

Slika 28 prikazuje automatizirani sustav za dodavanje žice „Lincoln electric NA – 3S“ kod EPP zavarivanja s opisom pojedinih komadni na uređaju. Značajka ovog sustava je brza prilagodba različitim promjerima i brzinama žica. Promjeri žica koje podržava ovaj sustav su od 0,9 – 5,6 mm, a brzine dodavanja žice se kreću od 0,6 – 16,5 m/min [17].



Slika 28. Automatizirani sustav za dodavanje žice „Lincoln electric NA – 3S“ [17]

Uređaj omogućuje kontrolu električnog luka, te konstantnu brzinu dodavanja hladne ili predgrijane žice. Koristi se uz ispravljačke izvore struje za zavarivanje, te također podržava i ravnu i strmopadajuću statičku karakteristiku uređaja. Koristi se kod aplikacija s jednom i više žica kod EPP zavarivanja. Kao izvor napajanja koristi izmjeničnu struju napona 115 (110) V, te frekvencijom 50 ili 60 Hz [17]. Slika 29 shematski prikazuje kako se automatizirani sustav za dodavanje žice spaja u sustav EPP zavarivanja. Uređaj za dodavanje žice kablom je spojen s izvorom struje za zavarivanje, a iz njega izlaze tri kabela. Prvi kabel povezan je s kontaktnom vodilicom. Drugi kabel povezan je sa sustavom za snabdjevanje praška, a treći kabel spojen je s glavom elektromotora koji provodi žicu do kontaktne vodilice te pomoću zatvorene petlje kontrolira brzinu podešenu na sustavu za dodavanje žice [17]. Ovaj istosmjerni motor olakšava potpunu kontrolu nad pokretanjem, vođenjem i zaustavljanjem žice u procesu EPP zavarivanja [18].



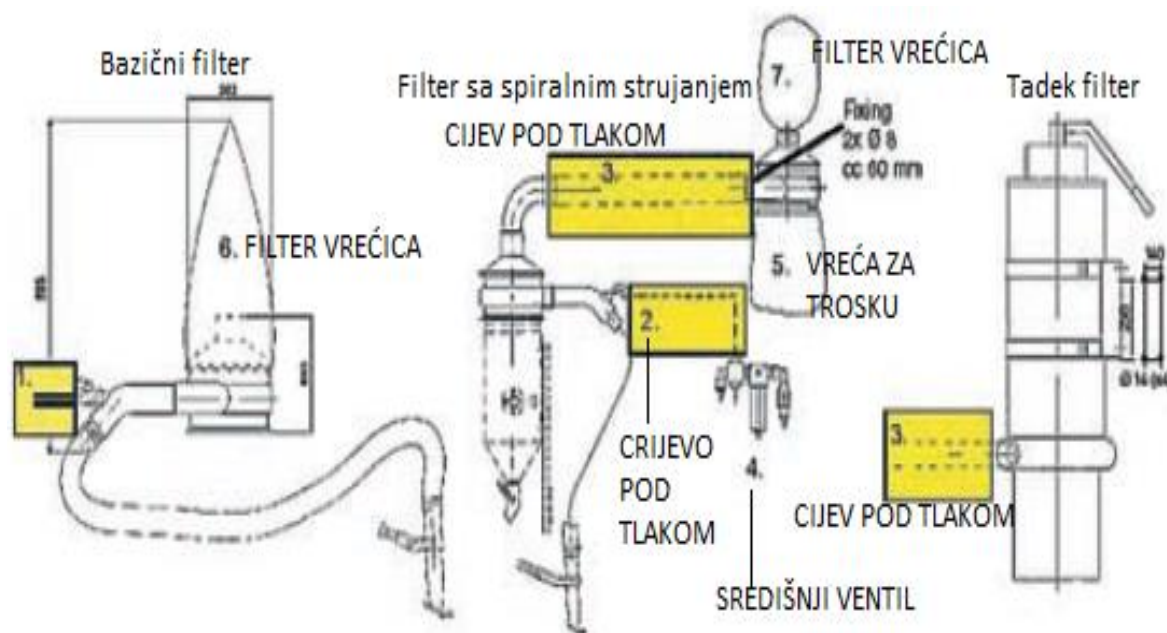
Slika 29. Shematski prikaz spajanja automatiziranog sustava za dodavanje žice u sustav EPP zavarivanja [17]

3.3. Sustav za rekuperaciju praška kod EPP zavarivanja

EPP postupak zahtjeva visok stupanj opreza kod rukovanja praškom. Ovo je pogotovo značajno za visokokvalitetne dijelove podvrgnute procesu EPP zavarivanja. To je razlog da su sistemi rekuperacije praška vrlo važni, jer jamče kvalitetu proizvoda. Sustav za rekuperaciju praška reciklira zavarivački prašak te tako povećava profitabilnost EPP zavarivanja [19].

Uređaj za rekuperaciju praška radi na principu ejektora koristeći komprimirani zrak. Prašak koji se rekuperirao vraća se u spremnik praška i spreman je za ponovnu upotrebu. Separator koji se postavlja na vrhu spremnika praška učinkovito odvaja prašak od prašine. Prašina se zatim skuplja u fini filter i odvaja iz procesa. Također, prašak prelazi kroz metalno sito da se makne šljaka prije nego se stavi natrag u posudu s praškom [20]. Sustavi recikliranja pomoću komprimiranog zraka koriste se uz garanciju da takvi sustavi koriste samo suhi zrak, kako bi se spriječilo da prašak navuče vlagu na sebe, te da se čestice ne oštećuju radi korištenja visokokomprimiranog zraka jer to može dovesti do stvaranja velike količine prašine [21].

Slika 30 prikazuje tri tipa filtera korištena kod principa rekuperacije praška pomoću komprimiranog zraka. Bazični filter koristi se kod „traktora“ za EPP zavarivanje i jednostavnijih aplikacija EPP zavarivanja. Filter sa spiralnim strujanjem koristi se također kod „traktora“, a „Tadek“ filter se montira na tipove konzolnih nosača (automata) za EPP zavarivanje koji obavljaju složene i kontinuirane aplikacije EPP zavarivanja [22].

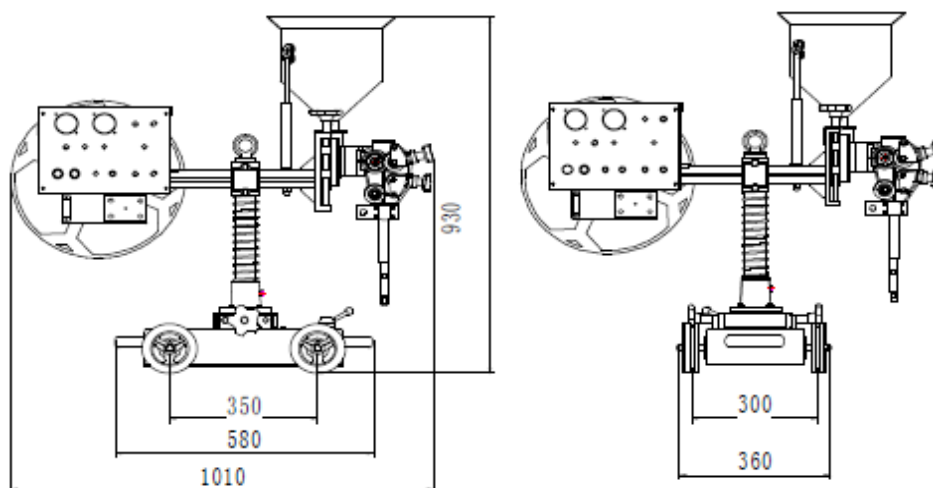


Slika 30. Tipovi filtera korišteni kod principa rekuperacije praška pomoću komprimiranog zraka [22]

Prilikom EPP zavarivanja proizvodi se puno troske. Troska uklonjena iz recikliranog praška prolazi prije ponovne upotrebe posebna sita sve dok se ne pretvori ponovno u male čestice. Tako usitnjena troska melje se u mlinovima da se ponovno pretvori u prašak. U ovako recikliran prašak dodaju se legirni elementi i deoksidansi, te se prašak mehanički mješa. Prije ponovne uporabe tako mljeveni prašak se stavlja u grijane komore na oko 250 °C u trajanju 2 – 4 sata [21].

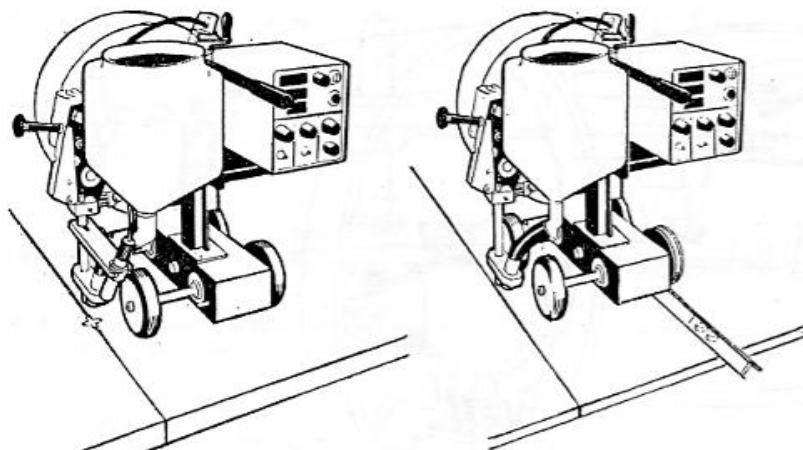
3.4. Rješenja za mehanizaciju i automatizaciju EPP postupka zavarivanja

Najjednostavniji i najjeftiniji automat za EPP zavarivanje je tzv. „traktor“. Sastoji se od izvora struje za zavarivanje i laganog voznog sklopa na kojem je smještena glava mehanizma za dovod žice, komandni ormarić, kalem sa žicom i posuda s praškom [2]. Slika 31 shematski prikazuje „traktor“ za EPP zavarivanje s pripadajućim izmjerama (mm).



Slika 31. „Traktor“ za EPP zavarivanje s pripadajućim dimenzijama (mm) [23]

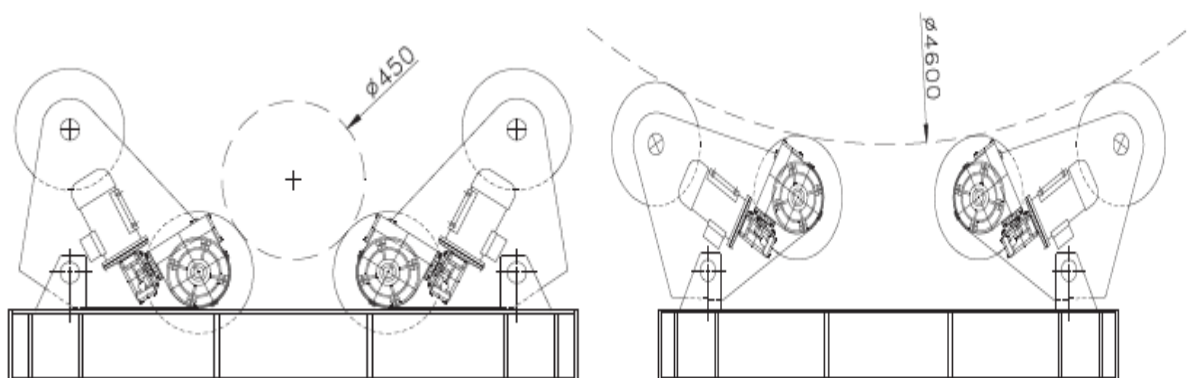
Po konstrukciji gradnje automata – „traktora“ ima raznih vrsta: manjih, većih, odnosno težih i laganijih. Najbolji su lagani, odnosno lako prenosivi. Prilagodivi su za sve operacije rada, zavarivanje ravnih limova, zavarivanje kutnih limova, zavarivanje cilindričnih dijelova itd. Mogu se kretati bez vodilice i s vodilicom ili uz pomoć kotača za vođenje [2]. Slika 32 shematski prikazuje „traktor“ za EPP zavarivanje vođen bez i sa vodilicom po kojoj se kreću kotači voznog sklopa.



Slika 32. „Traktor“ za EPP zavarivanje bez i s vodilicom [2]

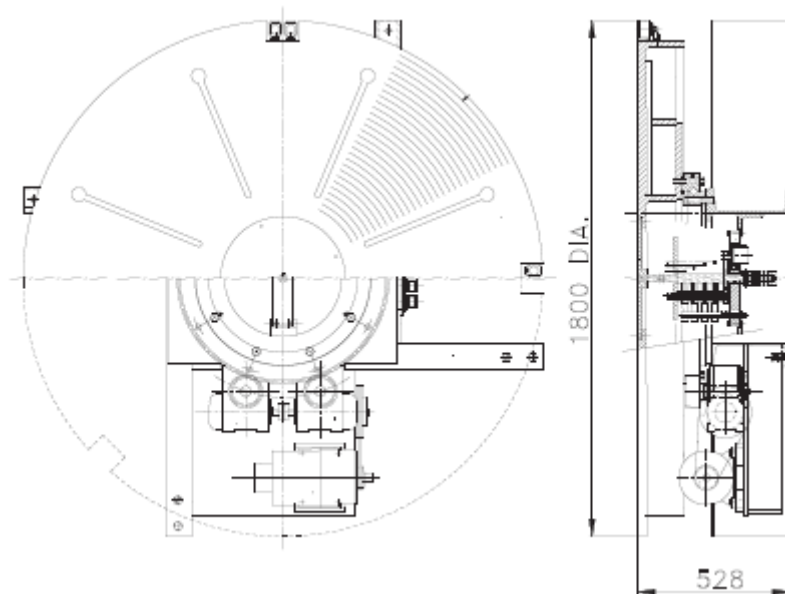
U zavarivanju cilindričnih dijelova najčešće se primjenjuje automat na stupu. To je uspravni stup na postolju koje je ujedno vozni sklop za kretanje po tračnicama. Poprečno na stupu je konzola na kojoj je smještena glava automata s komandnim ormarićem, posudom s praškom i kalem žice. Konzola se može po stupu spuštati i podizati, uvlačiti i izvlačiti, te je u stanju izvoditi linearne i kružne procese zavarivanja, prilagođavanjem glave automata za zavarivanje, naročito cilindričnih plašteva, koji bi bili teško izvedivi od strane operatera. Uz precizne horizontalne i vertikalne vodilice, pozicioniranje je uvijek vrlo precizno bez vibracija. Horizontalni i vertikalni pokreti ograničeni su zadanim mjerama voznog sklopa i stupa. Ovi automati se koriste kod aplikacija kod kojih se traži visoka kvaliteta zavarenog spoja kao što su tlačni spremnici, cijevi plinovoda i dijelovi vjetroelektrana. Zahvaljujući laserskom sustavu za kontrolu putanje pištolja odstupanje putanje zavarivanja mogu se odmah otkloniti i pištolj za zavarivanje automatski ispravlja svoju poziciju [2, 24].

Također kao pomoćne naprave kod automatizacije procesa EPP zavarivanja koriste se različite vrste okretaljki cilindričnih plašteva i okretni stolovi. Naprave za okretanje služe za olakšano EPP zavarivanje cilindričnih plašteva. Okretaljke se sastoje od potpornih valjaka (rolni), od kojih su dva valjka pogonjena, s kontinuiranom promjenom broja okretaja. Potporni valjci se oblažu gumom zbog boljeg trenja i zbog mirnijeg okretanja. Okretni stolovi služe za okretanje izradaka i zbog pozicioniranja zavara u najpovoljniji položaj koji daje najbolju kvalitetu i proizvodnost. Slika 33 shematski prikazuje jednu vrstu okretaljki cilindričnih dijelova. Maksimalna težina nošenja iznosi 10 000 kg, dok promjer cilindričnih dijelova koji se mogu prihvatiti iznosi od 450 do 4600 mm. Dva valjka su pogonjena elektromotorima, a brzina rotacije je od 150 do 1500 mm/min [15].



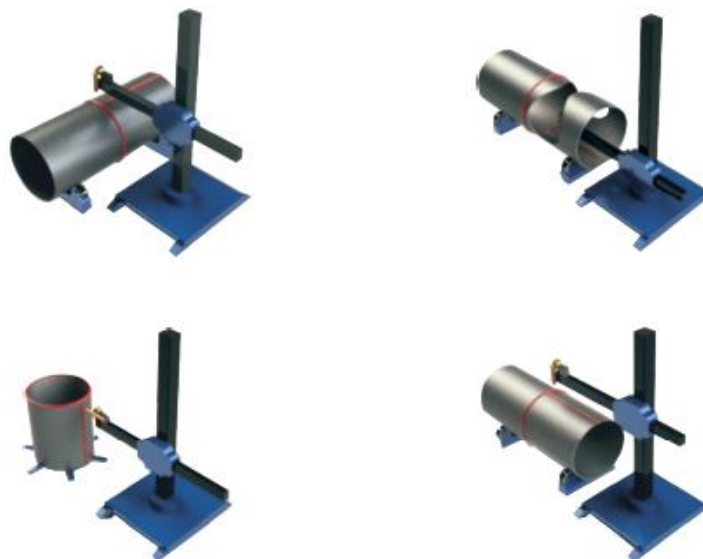
Slika 33. Shematski prikaz okretaljke za cilindrične dijelove [15]

Slika 34 shematski prikazuje okretni stol za cilindrične dijelove. Maksimalna nosivost ovog stola je 5000 kg, a promjer stola iznosi 1800 mm. S donje strane stola nalaze se elektromotori koji pokreću stol brzinom od 0,1 do 1 okretaj u minuti [15].



Slika 34. Shematski prikaz okretnog stola za cilindrične dijelove [15]

Uz pomoć automata za EPP zavarivanje na stupu, te pomoćnih naprava kao što su različite vrste okretaljki i okretnih stolova postiže se poboljšana razina automatizacije kod EPP zavarivanja. Slika 35 prikazuje mogućnosti EPP zavarivanja primjenom prije navedenih naprava.



Slika 35. Automatizacija EPP zavarivanja korištenjem naprava [24]

4. TEHNIKE RADA I PRIPREMA SPOJEVA KOD EPP –a

U tehnici rada kod EPP zavarivanja ima niz utjecajnih elemenata koji značajno utječu na kvalitetu zavarivanja i učinak. Neki od tih utjecajnih elemenata su položaj glave automata, nagib žice, nagib radnog komada te priprema spoja prije zavarivanja.

Položaj glave automata utječe na položaj izlazeće žice kod zavarivanja u odnosu na mjesto zavarivanja. Najbolje iskorištenje energije električnog luka i najkvalitetnije zavarivanje je kod okomitog položaja glave automata u vodoravnom položaju zavarivanja. Centriranje i vođenje glave automata obavlja se pomoću svjetlosne vodilice, koja se smješta na glavu ispred lijevka s praškom. Svjetlosna točka od lampice poravnava se s vrhom žice u ravnini sa spojem kojeg se zavaruje. Ovako, prethodno centrirana vodilica, pokazuje pravac kretanja vrha žice koji se ne vidi od praška za vrijeme zavarivanja [4].

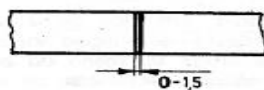
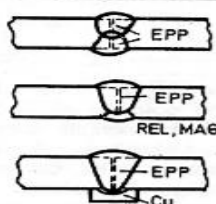
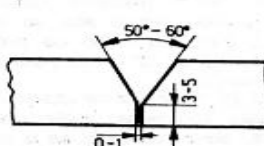
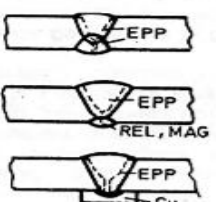
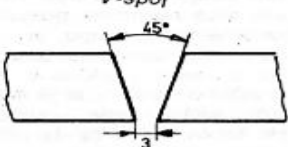

Bočni nagib glave automata usmjerava snagu električnog luka u smjeru bočnog protaljivanja u odnosu na spoj, prilikom zavarivanja. Ako je položaj glave okomit u odnosu na spoj kojeg se zavaruje i ako se žica vodi po sredini spoja, oblik zavara će potpuno simetrično zahvatiti jednu i drugu stranicu lima na spoju. Nagnutom glavom na jednu ili drugu stranu u odnosu na spoj, protaljivanje je usmjereno više na jednu ili drugu stranicu lima na spoju. Takvo nesimetrično protaljivanje uzrokuje greške neprovarivanja iako su parametri zavarivanja ispravni. Pri kutnom zavarivanju gdje je jedna stranica lima okomita, a druga položena nagib glave automata je neophodan. Takvim nagibom dobiva se simetrično protaljivanje kutnog spoja i savladava se utjecaj gravitacijske sile na talinu usmjeravanjem snage električnog luka. U tom slučaju glava automata, odnosno žica, se nagne pod kutom 30° - 40° u odnosu na okomitu stranicu, dok se u odnosu na pravac zavarivanja glava ne nagine. Nagib glave automata i položaj vrha žice kod zavarivanja kružnog spoja na cilindričnom plaštu koji se za vrijeme zavarivanja okreće značajno utječe na izgled površine zavara i protaljivanje. Vrh žice se u pravilu namješta nešto ispod najviše točke kruga suprotno od pravca okretanja. Veličina tog pomaka od vertikalne osi kruga iznosi blizu 2 % promjera cilindričnog plašta. Kada bi se vrh žice postavio u najvišu točku na cilindričnom plaštu zavarivalo bi se „uzbrdo“ jer tako djeluje snaga luka koja talinu „drži“ 10 – 30 mm iza luka, ovisno o jakosti struje zavarivanja. Kada se vrh žice neznatno pomakne od najviše točke kruga, suprotno od pravca okretanja, tada se talina oblikuje u najvišoj točki s lukom koji je nešto ispred taline. Tako će se dobiti lijep izgled zavara sa zadovoljavajućim protaljivanjem.

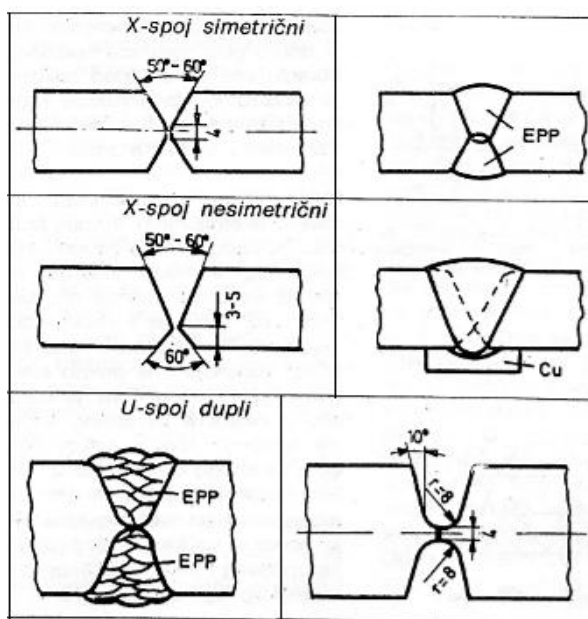
Nije dobro preći granicu opisanog pomaka jer se tada zavaruje „nizbrdo“ što uzrokuje „bježanje“ taline pod luk, slabo protaljivanje i uključke troske [4].

Nagib radnog komada utječe na dubinu protaljivanja, širinu i nadvišenje zavora. Kod zavarivanja nagnutog komada „odozgo na gore“ veća je dubina protaljivanja, uži je zavar s većim nadvišenjem. To se tumači time što talina zaostaje i ne ometa električni luk u njegovom prodiranju u osnovni materijal, kojeg luk gotovo reže, u uskoj zoni gdje je snaga luka najjača. Kod zavarivanja „odozgo dolje“ talina „bježi“ pod električni luk, čak i ispred luka te ne dozvoljava prodiranje luka u osnovni materijal. Ukoliko se i poveća struja zavarivanja ili smanji brzina zavarivanja, talina će biti sve viša, a time još više pokretljivija u „bježanju“ pod luk i ispred luka. Dubina protaljivanja je neznatna, dolazi čak do hladnog nalijepljivanja i uključaka troske, naročito kod zavarivanja u žlijeb [4].

Vrsta spoja određuje količinu nataljenog materijala koja je potrebna da se napuni zavareni spoj. Volumen materijala koji je potrebno nataliti i određena priprema spoja određuju produktivnost procesa koji definira cijenu EPP postupka zavarivanja [5]. Tablica 2 daje pregled najčešće primjenjivanih oblika sučeljenih spojeva kod EPP zavarivanja.

Tablica 2. Najčešće primjenjivani oblici sučeljenih spojeva kod EPP zavarivanja [4]

Oblik i dimenzije spoja	Izvedba
<p>I-spoj</p> 	
<p>V-spoj</p> 	
<p>V-spoj</p> 	



Priprema „I“ spoja je jednostavna uz male troškove. Volumen zavara je mali, a prema tome mala je i potrošnja dodatnog materijala, odnosno troškovi zavarivanja. Debljina lima kod „I“ spoja najčešće je do 14 mm, a zavarivanje se vrši u dva sloja (u nekim slučajevima i u jednom sloju). Ako se zavarivanje vrši u dva sloja, korijenski spoj se može zavariti koristeći MAG postupak zavarivanja. Kod zavarivanja u jednom prolazu stavlja se ispod spoja bakrena ploča koja štiti da talina ne curi [3,4].

„V“ spoj se primjenjuje kod debljih osnovnih materijala (do 30 mm debljine). Troškovi izrade žlijeba su mali, iako su nešto veći nego kod „I“ žlijeba. Površina zavara je ljepšeg izgleda nego kod „I“ žlijeba, a vjerojatnost nastajanja greški je mnogo manja nego kod „I“ žlijeba, zbog dobrog provarivanja korijena zavara. Korijen zavara najčešće se radi MAG postupkom zavarivanja, a onda dolazi 4 – 10 slojeva EPP postupkom. Otvor „V“ žlijeba najčešće je 45°, no može varirati od 40° do 60° [3,4].

„X“ spoj osigurava provarivanje kroz cijelu debljinu materijala i daje lijep izgled zavara s obje strane. „X“ spoj može biti izveden kao simetrični i nesimetrični. Otvor „X“ žlijeba je između 50° i 60°. Koristi se kod veoma debelih limova (iznad 50 mm debljine), zavarivanje se vrši u više od 10 slojeva [3,4].

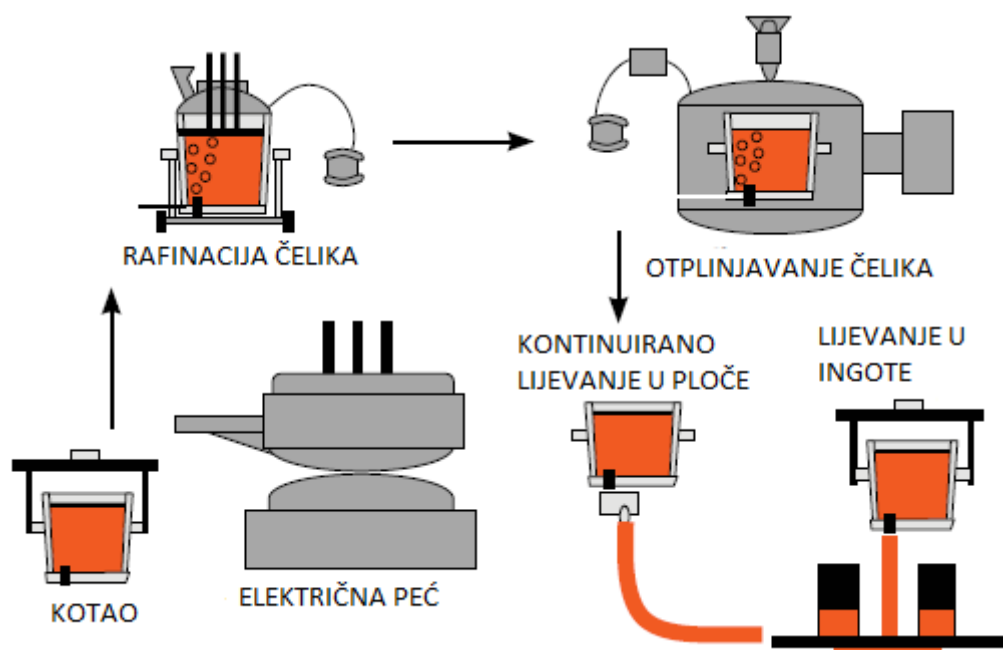
„U“ spoj osigurava sigurno provarivanje cijelog presjeka spoja i primjenu kod vrlo debelih materijala (do 100 mm). „U“ spoj može biti izveden kao jednostruki ili dvostruki, a zavarivanje je obavezno višeslojno s jednim slojem na dva mm debljine lima [3,4].

5. ČELIK SA516 Gr 70

ASTM A516/ ASME SA516 je najčešće korišteni materijal za posude pod tlakom. U osnovi nema razlike u mehaničkim i kemijskim svojstvima između ASTM A516 i ASME SA 516, već je razlika u izdavaateljima pojedinih standarda. Kratica ASTM označava Američko društvo za ispitivanje i materijale koje definira granice i svojstva proizvoda i metode ispitivanja tih svojstva. Kratica ASME označava Američko društvo inženjera strojarstva koje određuje materijale koji se koriste u proizvodnji i izgradnji pojedinih konstrukcija. Za korištenje određenog materijala kod izrade posuda pod tlakom ASME treba potvrditi ASTM standard i zadovoljiti propisane specifikacije [25]. Europski standard EN 10028 ovaj čelik navodi kao P355GH. Čelik P355GH po EN 10028 je ekvivalentan Američkom standardu ASTM A516 Gr70/ ASME SA516 Gr70.

5.1. Proizvodnja čelika SA516 Gr70

Čelici SA516 Gr70 za posude pod tlakom taljeni su u električnoj peći poštujući stroge zahtjeve specifikacije. Rastaljeni čelik zatim se rafinira u posebnoj peći. Kada je potrebno čelik se stavlja u spremnik u kojem je otplinjač radi dodatnog uklanjanja nepoželjnih plinova. S tim postupkom se postiže visoka razina čistoće čelika (maksimalno 0,001 % sumpora, maksimalno 0,005 % fosfora te maksimalno 0,003 % kisika). Poboljšana tehnologija proizvodnje i precizna kontrola kemijskog sastava omogućuje veliku točnost u određivanju ugljikova ekvivalenta. Mikrolegiranje elementima (bor, titan, niobij i vanadij) se ne preporučuje kod čelika za tlačne posude, osim ako naručitelj to zahtijeva. Kada se uklone svi nepoželjni plinovi čelici se liju u ingote ili procesom kontinuiranog lijevanja u ploče, ovisno o veličini i težini ploča. Nakon lijevanja čelici se podvrgavaju valjanju, te su isporučuju u normaliziranom stanju s feritno – perlitnom mikrostrukturom [26]. Cilj normalizacije je vraćanje sitnozrnate i jednolične mikrostrukture. Tijekom postupka toplog valjanja kristalno zrno pogrubljuje zbog pregrijanja čelika čime se snizi žilavost čelika (usitnjenjem zrna žilavost se povećava) [27]. Slika 36 prikazuje opisani proces proizvodnje čelika SA 516 Gr 70.



Slika 36. Proces proizvodnje čelika SA516 Gr70 [26]

5.2. Kemijski sastav i mehanička svojstva čelika SA516 Gr70

Ovaj čelik koristi se za eksploatacijske uvjete umjerene i niže temperature, gdje je važno da čelik ima poboljšanu žilavost. Iz njega se izrađuju posude pod tlakom i kotlovi, te se koristi u petrokemijskim postrojenjima i rafinerijama nafte. Ovaj čelik ima nekoliko gradacija a to su Gr 55, Gr 60, Gr 65 i Gr 70, koji se razlikuju po većoj granici razvlačenja i vlačnoj čvrstoći kod viših gradacija ovog čelika. Čelici ove vrste lako se zavaruju uobičajenim elektrolučnim postupcima zavarivanja, te ih karakterizira dobra obradivost i deformabilnost. Kod zavarivanja debljih limova u višim gradacijama ovog čelika treba obratiti pažnju na moguću potrebu predgrijavanja, pogotovo kod nižih unosa topline [28]. Tablica 3 prikazuje uobičajeni kemijski sastav za čelike ASTM A516, a tablica 4 mehanička svojstva za čelike ASTM A516.

Tablica 3. Kemijski sastav za čelike skupine ASTM A516 [28]

Vrsta čelika	Max. % C za debljinu (mm)				% Mn za debljinu (mm)		% Si	% P max	% S max
	6 ≤ t ≤ 12,5	12,5 < t ≤ 25	25 < t ≤ 50	50 < t ≤ 63	t ≤ 12,5	t > 12,5			
ASTM A516 Gr 60	0,21	0,23	0,23	0,25	0,6 - 0,9	0,85 - 1,20	0,15 - 0,40	0,035	0,035
ASTM A516 Gr 65	0,24	0,26	0,26	0,28	0,85 - 1,20	0,85 - 1,20	0,15 - 0,40	0,035	0,035
ASTM A516 Gr 70	0,27	0,28	0,28	0,3	0,85 - 1,20	0,85 - 1,20	0,15 - 0,40	0,035	0,035

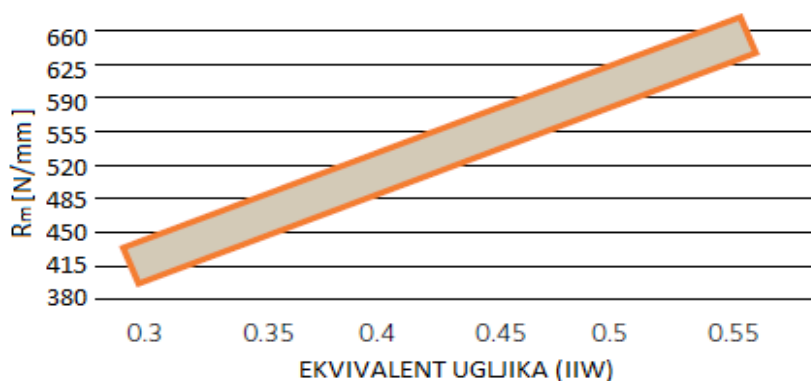
Tablica 4. Mehanička svojstva za čelike skupine ASTM A516 [28]

Vrsta čelika	Rp0,2 [N/mm ²]	Rm [N/mm ²]	Istezljivost, A [%]		Žilavost, KV [J]	Minimalna temp. [°C] za debljinu t [mm]		
			50 mm	200 mm		t ≤ 25	25 < t ≤ 50	50 < t ≤ 63
ASTM A516 Gr 60	220	415 - 550	25	21	14	-51	-46	-46
ASTM A516 Gr 65	240	450 - 585	23	19	14	-51	-46	-40
ASTM A516 Gr 70	260	485 - 620	21	17	16	-46	-40	-35

Zbog bolje zavarljivosti ekvivalent ugljika (CE) je ograničen. Maksimalni ekvivalent ugljika će se mijenjati sa gradacijom čelika, debljinom i zahtjevima za toplinskom obradom nakon zavarivanja. Ugljik i ostali najzastupljeniji elementi ulaze u formulu za ekvivalent ugljika koja se za ove čelike računa prema izrazu:

$$CE (IIW) = \%C + \frac{\%Mn}{6} + \frac{(\%Cu + \%Ni)}{15} + \frac{(\%Cr + \%Mo + \%V)}{5} \quad (2)$$

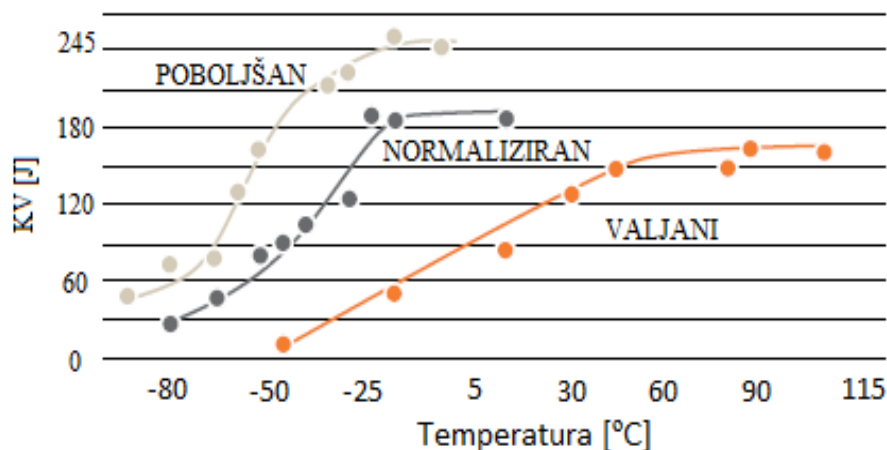
Vlačna čvrstoća raste linearno kako se povećava ekvivalent ugljika. Slika 37 prikazuje ovaj prirast čvrstoće u ovisnosti o porastu ekvivalenta ugljika.



Slika 37. Povećanje vlačne čvrstoće u ovisnosti o porastu ekvivalenta ugljika [26]

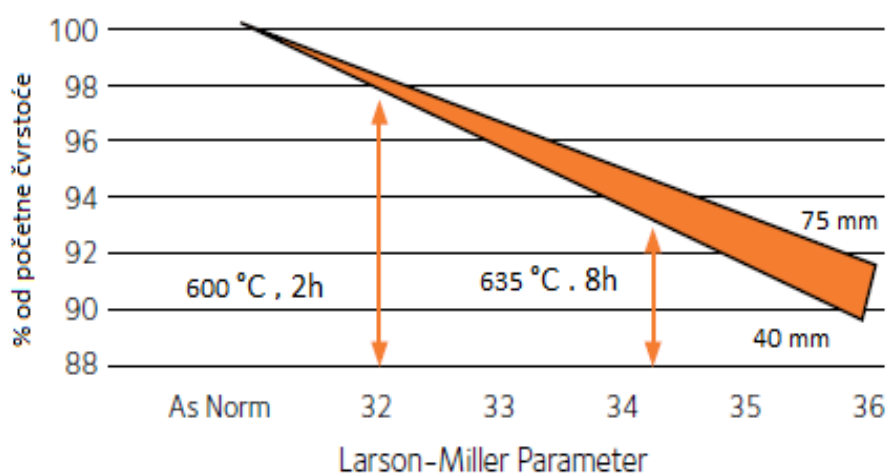
Kod ovih čelika važno je svojstvo dobra žilavost na niskim temperaturama. Poboljšana žilavost ovih čelika se postiže normalizacijom, a najbolja svojstva žilavosti postižu se specijalnom toplinskom obradom poboljšavanjem. Poboljšavanje čelika je postupak toplinske obrade koji se sastoji od kaljenja i visokotemperaturnog popuštanja (temperatura popuštanja iznad 400 °C) s glavnom svrhom postizanja visoke granice tečenja i visoke žilavosti. Ovom toplinskom obradom snižava se postotak ugljika i ekvivalent ugljika, a poboljšava se žilavost što je rezultat iznimno fino – zrnate i homogene mikrostrukture dobivene ovom toplinskom obradom. Također toplinskom obradom poboljšavanja, poboljšava se otpornost na degradaciju svojstva uslijed toplinske obrade nakon zavarivanja [26, 27].

Graf na slici 38 prikazuje kako pojedina toplinska obrada djeluje na povišenje žilavosti pri nižim temperaturama u odnosu na samo valjano stanje čelika SA 516.



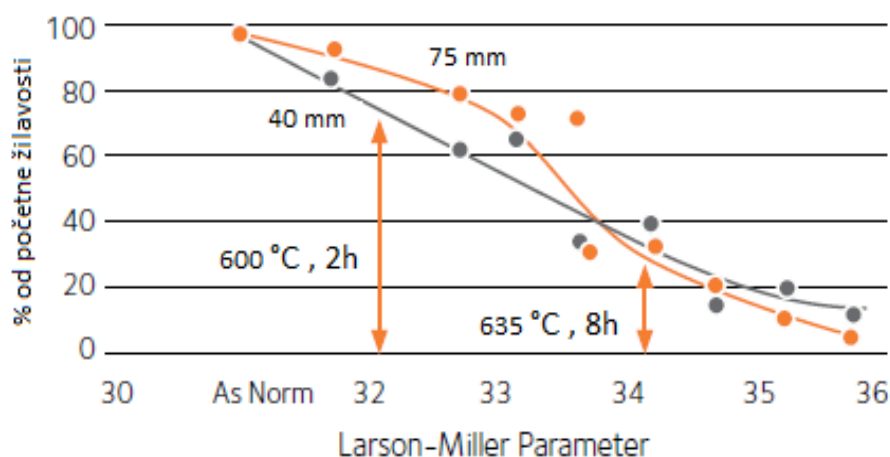
Slika 38. Utjecaj toplinske obrade na povišenje žilavosti [26]

Toplinska obrada nakon zavarivanja se kod ove skupine čelika ne primjenjuje, pogotovo u slučaju manjih debljina limova zbog lošeg utjecaja na čvrstoću i žilavost osnovnog materijala. Ekvivalent ugljika će usred toplinske obrade nakon zavarivanja pasti od 0,01 do 0,07 u ovisnosti od primijenjene temperature i trajanja toplinske obrade. Ovaj pad ekvivalenta ugljika rezultirat će i padom čvrstoće kod tako tretiranih čelika SA516 u odnosu na one koji nisu biti podvrgnuti toplinskoj obradi nakon zavarivanja. Također i degradacija žilavosti ozbiljno se povećava uslijed toplinske obrade nakon zavarivanja. Primijenjena viša temperatura i duže trajanje toplinske obrade više degradira svojstvo žilavosti kod čelika SA516 [26]. Slika 39 prikazuje pad čvrstoće uslijed toplinske obrade nakon zavarivanja, a slika 40 degradaciju žilavosti uslijed toplinske obrade nakon zavarivanja. Oba grafa na osi apcisa imaju Larson – Millerov parametar. Ovaj parametar služi za predviđanje trajnosti, na osnovi podataka o puzavosti pri kraćim vremenima i pri višim temperaturama ispitivanja od radne kao što je to slučaj u toplinskoj obradi. Na oba grafa dane su linije za dvije različite debljine ploča (40 mm i 75 mm).



Slika 39. Pad čvrstoće kod čelika SA516 uslijed toplinske obrade nakon zavarivanja [26]

Kako se vidi iz grafa veći pad čvrstoće je uslijed duže toplinske obrade pri višoj temperaturi (za 8h taj pad iznosi približno 7 % u odnosu na početnu čvrstoću čelika). Također ovaj pad je nešto veći kod čelika s manjom debljinom ploče.



Slika 40. Pad žilavosti kod čelika SA516 uslijed toplinske obrade nakon zavarivanja [26]

Kod kraćeg trajanja toplinske obrade pad žilavosti je izraženiji kod ploče s manjom debljinom i iznosi otprilike 25 % od početne žilavosti. Kod više temperature i dužeg trajanja toplinske obrade nakon zavarivanja, približno je jednak pad žilavosti i za tanji i deblji komad, no taj pad u slučaju 8 satnog trajanja toplinske obrade iznosi 75 % od početne žilavosti što ukazuje na veliko smanjenje duktilnosti i pogoršana mehanička svojstva tako tretiranog čelika SA516.

6. EKSPERIMENTALNI RAD

6.1. Opis eksperimenta

Eksperimentalni rad proveden je u firmi Monter Strojarske Montaže d.d., te na Fakultetu strojarstva i brodogradnje, Sveučilišta u Zagrebu.

Predmet istraživanja bila je analiza tehnologije elektrolučnog postupka zavarivanja pod praškom na sučeljenom spoju od osnovnog materijala SA516 Gr70. U radu je potrebno odrediti unose topline i izračunati količinu depozita za određene parametre zavarivanja. Također je potrebno klasificirati primijenjene dodatne materijale, prašak te provjeriti potrebu za primjenom toplinske obrade nakon zavarivanja.

Pri analizi primijenjene tehnologije zavarivanja koristiti će se nerazorne metode ispitivanja zavara, kao i ispitivanje mehaničkih svojstva zavarenog spoja. Istraživanja će se provoditi u kontroliranim uvjetima, prema predviđenom slijedu eksperimenta u pet glavnih etapa:

1. Radiografsko ispitivanje zavarenog spoja
2. Statičko vlačno ispitivanje prema normi EN 895 : 1995.
3. Udarni rad loma prema normi EN 875 : 1995.
4. Makro analiza uzorka prema normi EN 1321
5. Mjerenje tvrdoće prema normi EN 1043 – 2 : 1997.

Uzorak koji se zavarivao je iz osnovnog materijala čelika SA516 Gr70, dimenzija 400x300x18 mm (duljina, širina, debljina). Priprema spoja je „V“, a prilikom zavarivanja su korištena tri postupka. Korijenski prolaz je rađen postupkom 135 (MAG – STT), drugi prolaz postupkom 136 (MAG –PPŽ), a popuna je rađena postupkom 121 (EPP). Temperatura predgrijavanja je iznosila 100 °C, a naknadna toplinska obrada se nije provodila.

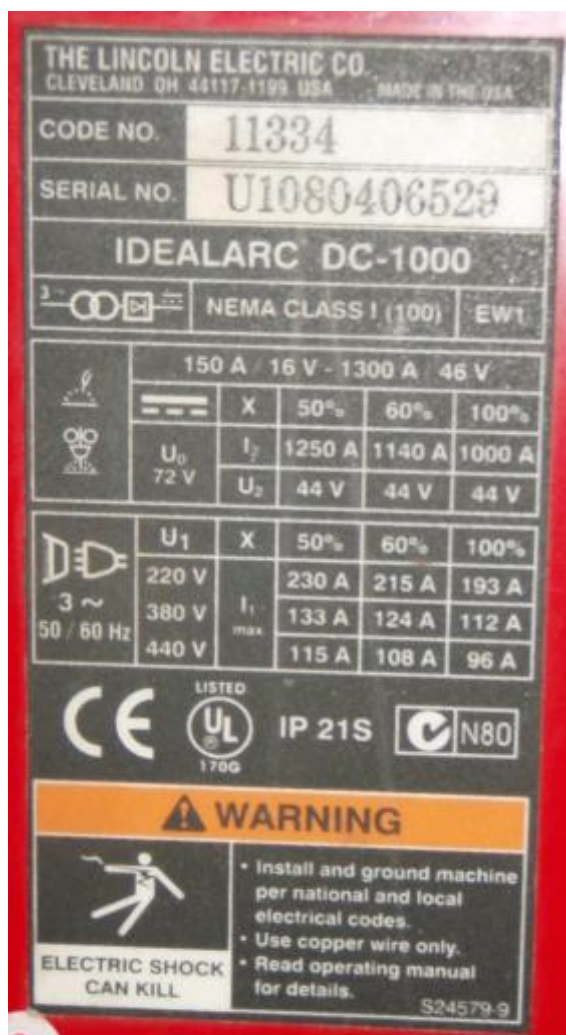
6.2. Oprema za zavarivanje

Izvor struje koji je korišten kod ovog eksperimentalnog rada je istosmjerni izvor struje, model *Lincoln Electric, Idealarc – DC 1000*. Ovaj uređaj daje istosmjernu struju zavarivanja s elektrodom na „+“ ili „-“, polu. Raspon struja zavarivanja kod ovog stroja je od 150 – 1300 A, a može raditi i s ravnom i sa strmopadajućom statičkom karakteristikom [15]. Slika 41 prikazuje uređaj za EPP zavarivanje tipa *Idealarc – DC 1000*.



Slika 41. Uređaj za EPP zavarivanje *Lincoln Electric, Idealarc – DC 1000* [29]

Slika 42 prikazuje identifikacijsku pločicu uređaja *Lincoln Electric, Idealarc – DC 1000*. Identifikacijska pločica je specifikacijska tablica izlaznih parametara izvora struje za zavarivanje. Ona se nalazi na poleđini ili sa strane izvora struje te je vrlo važan faktor kada se odlučuje koji je izvor struje prikladan za određeni proces zavarivanja [16].



Slika 42. Identifikacijska pločica uređaja *Lincoln Electric, Idealarc – DC 1000* [29]

Identifikacijska pločica daje informacije o samom uređaju za zavarivanje, izlaznim parametrima za zavarivanje te ulaznoj energiji za pokretanje uređaja.

Tako je na identifikacijskoj pločici naveden naziv i serijski broj uređaja, te simbol koji prikazuje električnu shemu uređaja, u ovom slučaju trofazni, diodni ispravljač s izmjeničnom strujom u primaru i istosmjernom strujom u sekundaru. Izlazni parametri za zavarivanje prikazani su kod ovog uređaja u odnosu na 50 %, 60 % i 100 % intermitenciju. Intermitencija je omjer vremenskog intervala unutar kojega je izvor struje za zavarivanje opterećen s obzirom na propisani maksimalni radni interval, tj. to je maksimalno vrijeme tijekom kojega je izvor struje sposoban predati tražene izlazne parametre. Prema normama HRN EN 60974 – 1 i HRN EN 60974 – 6 maksimalni vremenski ciklus unutar kojega je izvor struje opterećen, određen je na 10 minuta.

50 % intermitencija znači mogućnost rada do 5 minuta bez oštećenja infrastrukture uređaja – izolacije te osjetljivih elektroničkih komponenti. 60 % znači mogućnost rada do 6 minuta, a 100 % znači mogućnost rada i preko 10 minuta, te dovoljno snažnog hlađenja da se infrastruktura nikada ne pregrijava. 100 % intermitencija se najčešće koristi za visokoučinske automatske i poluautomatske postupke zavarivanja (EPP) gdje je vrijeme trajanja električnog luka neprekinuto [16]. Uređaj *Lincoln Electric, Idealarc – DC 1000* kod 50 % intermitencije daje struju od 1250 A i napon od 44 V, kod 60 % intermitencije struju od 1140 A i napon od 44 V, te kod 100 % intermitencije struju od 1000 A i 44 V. Napon praznog hoda iznosi 72 V, a uređaj se osim za EPP može koristiti i za zavarivanje praškom punjenom žicom. Kao ulazna energija za pokretanje uređaja služi trofazna izmjenična struja 50/60 Hz.

Glava za EPP zavarivanje, posuda s praškom, kalem žice, posuda za čuvanje praška te uređaj za podešavanje brzine žice pomoću struje i napona smješten je na konzolnom stupu, koji ima dva stupnja slobode gibanja. Glava za EPP zavarivanje može se kretati pomoću tračnica napred ili nazad, a konzola se po stupu može podizati ili spuštati, ovisno o komadu koji se zavaruje. Slika 43 prikazuje konzolni nosač na stupu na kojem se nalazi oprema za EPP zavarivanje.



Slika 43. Konzolni nosač na stupu na kojem se nalazi oprema za EPP zavarivanje [29]

6.3. Dodatni materijal i prašak za zavarivanje

Prilikom zavarivanja, kod ovog eksperimentalnog rada, korištena su tri postupka. Korijenski prolaz je rađen postupkom 135 (MAG – STT), drugi prolaz postupkom 136 (MAG – praškom punjena žica), a popuna je rađena postupkom 121 (EPP). U nastavku biti će dan kemijski sastav i mehanička svojstva svakog od dodatnih materijala redosljedom kako su korišteni prilikom zavarivanja.

Tablica 5. Kemijski sastav dodatnog materijala BOEHLER EMK 6 [30]

Kemijski element	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	V	Cu	Al
%	0,07	0,84	1,42	0,007	0,018	0,03	0,01	0,04	< 0,01	0,15	< 0,01

Tablica 6. Mehanička svojstva dodatnog materijala BOEHLER EMK 6 [30]

Mehanička svojstva	Rp0.2, [N/mm ²]	Rm, [N/mm ²]	A, [%]	KV, [J]	
	≥ 420	500 - 640	≥ 24	40 °C	20 °C
				≥ 47	≥ 90

Tablica 7. Kemijski sastav dodatnog materijala BOEHLER Ti 52 – FD [30]

Kemijski element	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	V	Cu	Nb
%	0,06	0,5	1,14	0,011	0,007	0,03	0,01	0,01	0,02	0,02	0,01

Tablica 8. Mehanička svojstva dodatnog materijala BOEHLER Ti 52 – FD [30]

Mehanička svojstva	Rp0.2, [N/mm ²]	Rm, [N/mm ²]	A, [%]	KV, [J]
	≥ 460	550 - 740	≥ 20	-40 °C
				≥ 47

Aktivni zaštitni plin koji je korišten i kod 135 (MAG – STT) i kod 136 (MAG – praškom punjena žica) postupka zavarivanja je M 21 Feromix C 18 (Ar/CO₂ 82/18) prema normi HRN EN ISO 14175.

Tablica 9. Kemijski sastav dodatnog materijala UNION S 3 [30]

Kemijski element	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Cu
%	0,1	0,06	1,56	0,007	0,009	0,02	< 0,01	0,02	0,02

Tablica 10. Mehanička svojstva dodatnog materijala UNION S 3 [30]

Mehanička svojstva	$R_{p0.2}$, [N/mm ²]	R_m , [N/mm ²]	A, [%]	KV, [J]	
	400	510	26	20 °C	60 °C
				120	47

Dodatni materijal za EPP zavarivanje je promjera 3 mm, a dolazi u kalemu težine 200 kg. Ovaj dodatni materijal se koristi kod aplikacija posuda pod tlakom, a naročito je pogodan kod zavarivanja čelika kvalitete SA516 Gr70. U nastavku biti će dan i kemijski sastav praška koji je korišten prilikom EPP zavarivanja čelika SA516 Gr70.

Tablica 11. Kemijski sastav praška za EPP zavarivanje BOEHLER BB24 [30]

Kemijski sastav	CaF ₂	SiO ₂ + TiO ₂	CaO + MgO	Al ₂ O ₃ + MnO	K ₂ O + Na ₂ O
%	26	15	34	21	2,8

BOEHLER BB24 je aglomerirani prašak za EPP zavarivanje. U kombinaciji s pravilno odabranim dodatnim materijalom, metal zavara postiže visoku vrijednost žilavosti na niskim temperaturama. Najčešće se koristi kod zavarivanja sučeljenih spojeva, a maksimalna količina vodika kod korištenja ovog praška iznosi 5ml/100g depozita. Ovaj prašak dolazi u pakiranjima od 1000 kg, veličina zrna je od 0,3 – 2,0 mm, maksimalna struja kod koje je dozvoljeno korištenje ovog praška je 800 A, a ponovno sušenje ovog praška se provodi na temperaturama od 300 do 350 °C, minimalno dva, a maksimalno deset sati.

6.4. Osnovni materijal

Osnovni materijal je čelik kvalitete SA516 Gr70. Ovaj čelik koristi se u aplikacijama gdje su niže temperature, a primarno se koristi kod izrade posuda pod tlakom.

Tablica 12. Kemijski sastav osnovnog materijala čelika SA516 Gr70 [31]

Kemijski element	C	Si	Mn	P	S	N	Cu	Mo	Ni	Cr	V	Nb	Ti
%	0,164	0,374	1,44	0,009	0,0008	0,0045	0,042	0,021	0,079	0,031	0,001	0,017	0,003

Tablica 13. Mehanička svojstva osnovnog materijala čelika SA516 Gr70 [31]

Mehanička svojstva	Rp0.2, [N/mm ²]	Rm, [N/mm ²]	A, [%]	KV, [J]		
	196	490 - 630	22	- 20 °C	- 40 °C	- 50 °C
			21	19	19	

Čelik SA516 Gr 70 je niskougljični nelegirani čelik. U tablici 14 dani su granični maseni udjeli elemenata koji odjeljuju nelegirane od legiranih čelika. Kod čelika SA516 Gr70 svi maseni udjeli elemenata su ispod graničnih te se zaključuje da se radi o nelegiranom čeliku. Od svih elementa, kod čelika SA516 Gr70 najviši maseni udjel ima mangan te je i to jedan od faktora visoke žilavosti kod ovog čelika.

Tablica 14. Granični maseni udjeli elemenata koji odjeljuju nelegirane od legiranih čelika [32]

Legirni element	Granični maseni udio. %
aluminij	0,10
bor	0,0008
krom	0,30
kobalt	0,10
bakar	0,40
rijetke zemlje – lantanidi (npr. cer, neodim, erbij)	0,05
mangan	1,60
molibden	0,08
nikal	0,30
niobij	0,05
olovo	0,40
selen, telur	0,10
silicij	0,50
titan	0,05
volfram, vanadij	0,10
cirkonij	0,05
ostali (izuzevši C, P, S, N i O)	0,05

Ekvivalent ugljika za čelik SA516 Gr70 računa se po slijedećoj formuli:

$$CE (IIW) = \%C + \frac{\%Mn}{6} + \frac{(\%Cu + \%Ni)}{15} + \frac{(\%Cr + \%Mo + \%V)}{5} \quad (3)$$

$$CE (IIW) = 0,164 + \frac{1,44}{6} + \frac{0,042 + 0,079}{15} + \frac{0,031 + 0,021 + 0,001}{5} = 0,423 > 0,40$$

Iz razloga što je ekvivalent ugljika veći od 0,40 preporuča se da se izvede predgrijavanje prije procesa zavarivanja, što je i učinjeno, a temperatura predgrijavanja je iznosila 100 °C.

6.5. Specifikacija postupka i proces zavarivanja

Prije početka zavarivanja potrebno je izraditi preliminarnu specifikaciju postupka zavarivanja u kojoj su dani svi podatci potrebni da bi se moglo pristupiti samom procesu zavarivanja. U nastavku je prikazan primjer preliminarne specifikacije postupka zavarivanja pWPS FSB 10/2015, kao priprema za izvođenje ovog eksperimentalnog rada.

Preliminarna specifikacija postupka zavarivanja 10/2015 – pWPS

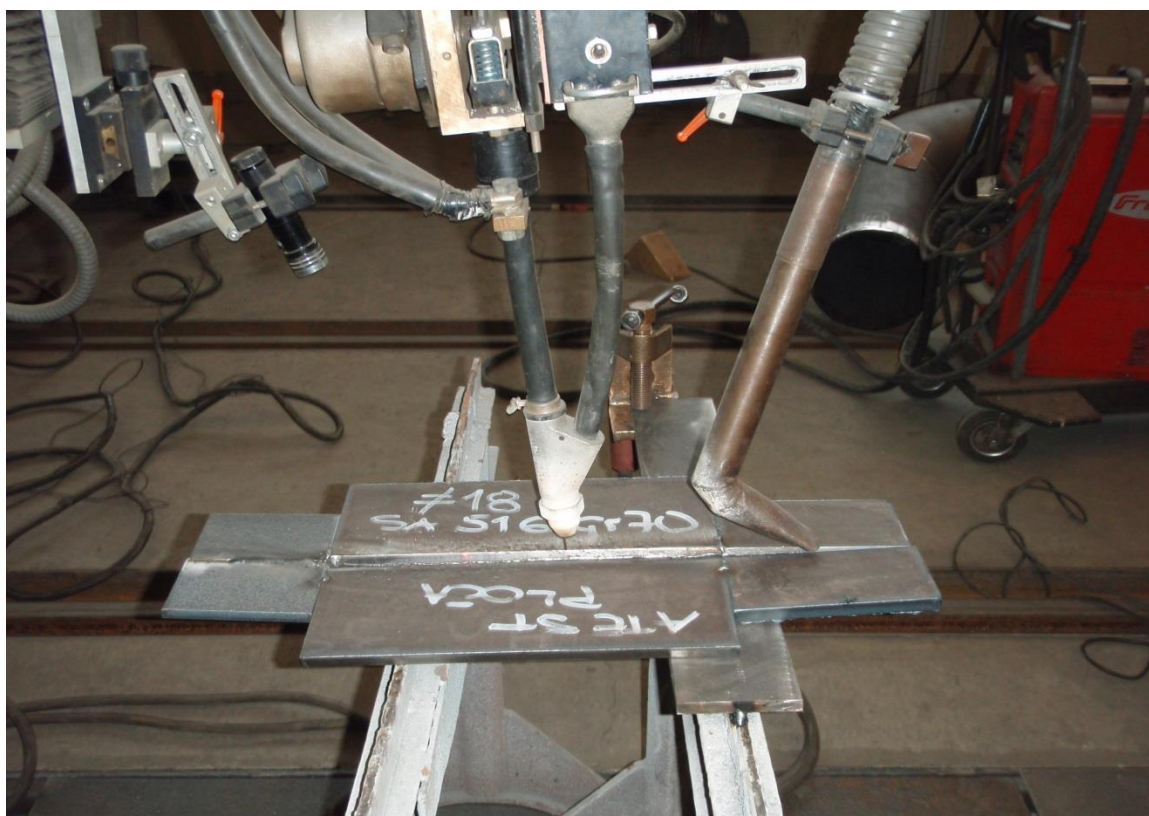
Mjesto: --- Postupak zavarivanja Oznaka uputstva za zavarivanje (pWPS): 10/2015 Broj izvještaja o odobrenju postupka (WPAR): Poduzeće: Ime zavarivača:--- Postupak zavarivanja: 135 (MAG – STT) + 136 (MAG) + 121 (EPP) Vrsta spoja: BW (sučeljeni spoj) Pojednosti pripreme rubova: ---	Ispitno mjesto: FSB, Zagreb Način pripreme rubova i čišćenja: četkanje Specifikacija osnovnog materijala: A/SA516 - Grade 70 Debljina osnovnog materijala: 18 mm Vanjski promjer: --- Položaj zavarivanja: PA
Oblikovanje zavarenog spoja	Redoslijed zavarivanja

Prolaz	Postupak zavarivanja	Promjer dodatnog materijala [mm]	Jakost struje zavarivanja [A]	Napon zavarivanja [V]	Vrsta struje, polaritet	Brzina dodavanja žice [m/min]	Brzina zavarivanja [mm/min]	Unos topline [kJ/mm]
1.	135	1,2 EMK 6	125 – 135	16 – 18	DC(+)	/	/	/
2.	136	1,2 TI 52 – FD	235 – 238	31 – 33	DC(+)	/	/	/
3. – n	121	3 UNION S3	500	30	DC(+)	/	/	/

Dodatni materijal:-vrsta i trgovačko ime:
 135: EMK 6 (EN ISO 14341-A: G424M/CG3Si1)
 136: TI 52-FD (EN ISO 17632–A/08: T 464PM1H10)
 121: UNION S3 (EN ISO 14341: G 42M G3Si1),
 BB24 (EN ISO 14174: SA FB 1 65 DC H5)
Zaštitni plin:
 -zaštitni plin: M21 Feromix C18 (Ar/CO₂ 82/18) (EN ISO 14175)
Protok plina:
 -zaštitnog plina: 15 – 20 l/min
Temperatura predgrijavanja: 100 °C, propan – butan
Međuslojna temperatura: < 250 °C
Toplinska obrada: ---

1. Pripremiti rubove lima brušenjem tako da kut između bude 60°.
2. Limove postaviti s razmakom od 2 mm između njih.
3. Prije početka zavarivanja predgrijati ploče na 100 °C.
4. Između prolaza mjeriti međuslojnu temperaturu i očistiti zavar četkanjem.
5. Bazna/vršna struja kod MAG – STT: 60 A/395 A

Na temelju podataka iz pWPS – a moglo se početi s procesom zavarivanja. Slika 44 prikazuje ploče od osnovnog materijala SA516 Gr70 nakon završenog zavarivanja MAG – STT i MAG – praškom punjena žica postupaka zavarivanja i prije početka zavarivanja EPP postupkom. Prije samog početka EPP zavarivanja operater namješta putanju glave uređaja pomoću svjetlosne točke. Ovaj postupak vrlo je bitan jer je električni luk sakriven pod praškom tijekom zavarivanja i onemogućeno je praćenje njegove putanje. Na slici se također vidi usisavač koji skuplja višak praška.



Slika 44. Vođenje glave i priprema za zavarivanje EPP postupkom [29]

Proces EPP zavarivanja započinje ispuštanjem veće količine praška iz posude i uspostavom električnog luka. Za potrebe ovog eksperimenta električni luk se uspostavljao na pomoćnoj ploči koja je bila privarena za osnovni komad, iz razloga stabilizacije luka i procesa zavarivanja prije dolaska na osnovni materijal. Namještanje i kontrola struje i napona zavarivanja vršila se na komandnoj stanici koja se nalazila na konzolnom stupu. Slika 45 prikazuje uspostavu električnog luka kod EPP zavarivanja, a slika 46 podešene i izmjerene vrijednosti struje i napona korištene prilikom EPP zavarivanja u ovom eksperimentalnom radu.

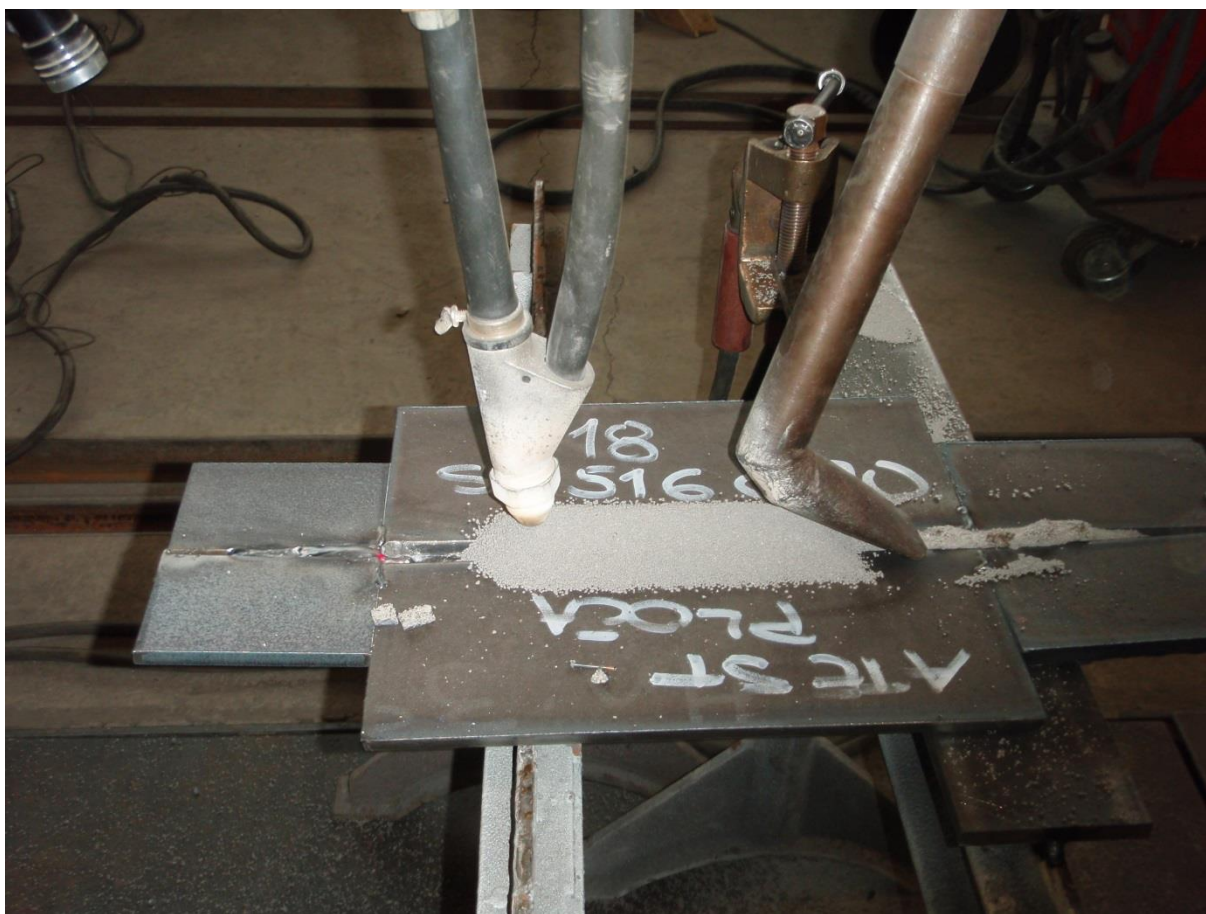


Slika 45. Uspostava električnog luka kod EPP zavarivanja [29]



Slika 46. Vrijednosti struje i napona prilikom EPP zavarivanja [29]

EPP postupkom zavarivanja napravljena je popuna sučeljenog spoja u šest prolaza. Kod svakog od prolaza stuja zavarivanja varirala je od 290 do 310 A, a napon između 30 – 33 V. Brina zavarivanja varirala je od sloja do sloja, s time da je najveća brzina zavarivanja EPP postupkom bila kod 1. prolaza i iznosila je 60,4 cm/min, a najmanja brzina bila je kod 6. tj. zadnjeg prolaza i iznosila je 31,9 cm/min. Posljedica ovih različitih brzina zavarivanja su i različiti unosi topline i različiti depozit dodatnog materijala kod različitih prolaza. Zbog V pripreme spoja, logično je smanjenje brzine zavarivanja kod zadnjih slojeva radi potrebe više nataljenog dodatnog materijala. 1. i 2. prolaz EPP postupkom rađen je tako da popuni cijeli žlijeb, a 3., 4., te 5., 6., prolazi rađeni su tako da se prvo pupunila desna, a zatim i lijeva strana žlijeba. Tehnika zavarivanja je neutralna, a to znači da je glava uređaja u odnosu na radni komad pod kutem od 90°. Slika 47 prikazuje proces EPP zavarivanja, a slika 48 zavareni spoj nakon 5. prolaza. Iz slike 48 jasno se vidi kako se popuna zadnjih slojeva vršila tako da se prvo popunjavala desna strana žlijeba.



Slika 47. Prikaz EPP zavarivanja sučeljenog spoja iz osnovnog materijala SA516 Gr70
[29]



Slika 48. Zavareni spoj nakon 5. prolaza, popuna spoja vrši se u dva prolaza [29]

Međuslojna temperatura provjeravala se između svakog prolaza. Prema preliminarnoj specifikaciji postupka zavarivanja ova temperatura mora biti manja od 250 °C, te se iz tog razloga i kontrolirala. Slika 49 A prikazuje nedozvoljeni iznos međuslojne temperature, a slika 49 B dozvoljeni iznos međuslojne temperature za početak procesa zavarivanja.



Slika 49. A

Slika 49. B

Slika 49. Kontrola međuslojne temperature [29]

49. A Previsok iznos međuslojne temperature

49. B Dozvoljen iznos međuslojne temperature

Također iza svakog prolaza zaostala troska odstranjivala se čekićem, a zavar se pobrusio. Troska služi za zaštitu taline zavara, a također pomaže u stvrdnjavanju, oblikovanju i sporijem hlađenju zavara. U pravilu pri dobro odabranim parametrima zavarivanja troska se lako odvaja. Slika 50 prikazuje trosku koja ostaje nakon završenog procesa zavarivanja, te brušenje zavara između pojedinih prolaza.



Slika 50. A

Slika 50. B

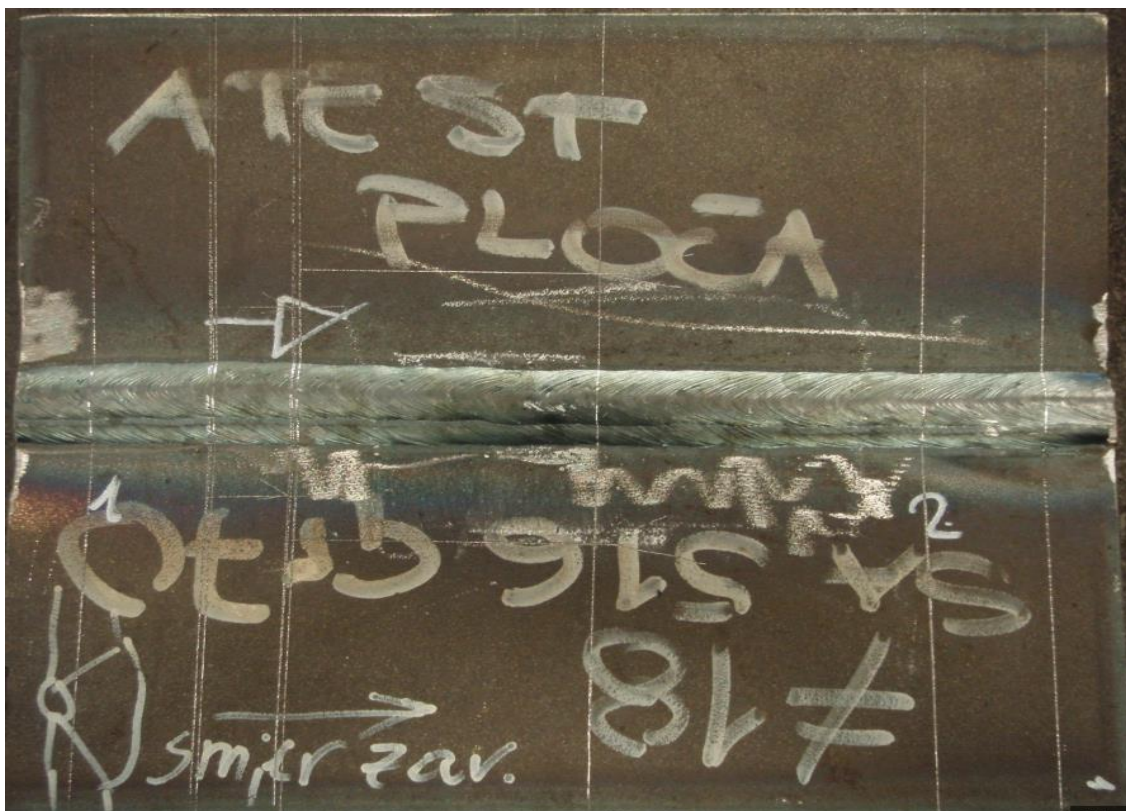
Slika 50. Aktivnosti u međuprolazu [29]

50. A Komad troske nakon skrućivanja zavarenog spoja

50. B Brušenje međuslojeva zavara između EPP zavarivanja

Nakon završenog procesa EPP zavarivanja ploča je ostavljena da se hladi na zraku, a toplinska obrada nakon zavarivanja nije se radila na ovom komadu, zbog mogućeg lošeg utjecaja na mehanička svojstva zavara kod ove debljine osnovnog materijala. Izgled zavarenog spoja nakon hlađenja i rezanja pomoćnih ploča prikazan je na slici 51.

U toku samog procesa EPP zavarivanja izmjerene su vrijednosti struja i napona za svaki od prolaza te je također izmjereno vrijeme zavarivanja svakog prolaza, na temelju čega se izračunaju pojedine brzine zavarivanja. Na temelju poznatih struja i napona te brzine zavarivanja za svaki prolaz računaju se unosi topline. U konačnici izrađuje se specifikacija ovog postupka zavarivanja (WPS) prema normi EN ISO 15609 – 1:2004 [33], što će biti prikazano u nastavku ovog rada.



Slika 51. Izgled zavarenog spoja nakon završetka procesa EPP zavarivanja [29]

U nastavku dana je formula za izračunavanje unosa topline kod zavarivanja. Koeficijent iskorištenosti električnog luka kod MAG zavarivanja je 0,8, a pri EPP zavarivanju je 1,0.

$$q = \frac{Q}{v_{zav}} = \frac{U \cdot I \cdot \eta \cdot 60}{v_{zav} \cdot 1000} \text{ [kJ/cm]} \quad (4)$$

q [kJ/cm] – unos topline

I [A] – struja zavarivanja

U [V] – napon zavarivanja

v_{zav} [cm/min] – brzina zavarivanja

η - koeficijent iskorištenosti električnog luka

Brzina žice kod uređaja na kojem se vršilo EPP zavarivanje postavlja se automatski u ovisnosti o primjenjenoj struji i naponu i ne može se očitati na uređaju za zavarivanje. Brzina žice odrediti će se retrogradno iz dobivenog depozita dodatnog materijala kasnije u ovom radu.

Specifikacija postupka zavarivanja 10/2015 – WPS

Mjesto: ---**Postupak zavarivanja**

Oznaka uputstva za zavarivanje (WPS): 10/2015

Broj izvještaja o odobrenju postupka (WPAR):

Poduzeće:

Ime zavarivača:---

Postupak zavarivanja: 135 (MAG – STT) + 136 (MAG) + 121 (EPP)

Vrsta spoja: BW (sučeljeni spoj)

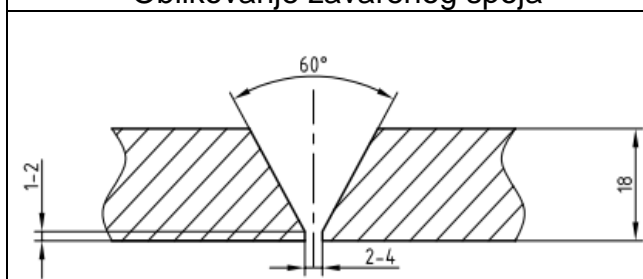
Pojednosti pripreme rubova: ---

Ispitno mjesto: FSB, Zagreb

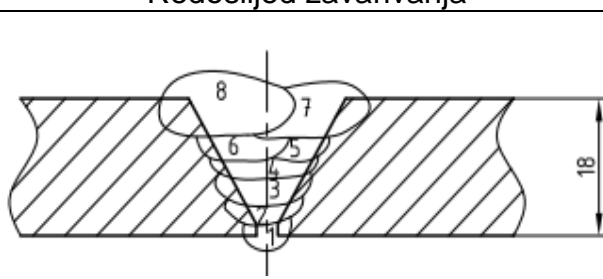
Način pripreme rubova i čišćenja: glodanje, četkanje

Specifikacija osnovnog materijala: A/SA516 - Grade 70**Debljina osnovnog materijala:** 18 mm**Vanjski promjer:** ---**Položaj zavarivanja:** PA

Oblikovanje zavarenog spoja



Redosljed zavarivanja



Prolaz	Postupak zavarivanja	Promjer dodatnog materijala [mm]	Jakost struje zavarivanja [A]	Napon zavarivanja [V]	Vrsta struje, polaritet	Brzina dodavanja žice [m/min]	Brzina zavarivanja [cm/min]	Unos topline [kJ/cm]
1.	135	1,2 EMK 6	125 – 135	16 – 18	DC(+)	3,3	11,3	10,3
2.	136	1,2 TI 52 – FD	235 – 238	31 – 33	DC(+)	9,3	45,5	8,3
3.	121	3 UNION S3	290 – 310	30	DC(+)	/	60,4	8,79
4.	121	3 UNION S3	290 – 310	32	DC(+)	/	35,9	15,78
5.	121	3 UNION S3	290 – 310	32	DC(+)	/	37,4	15,4
6.	121	3 UNION S3	290 – 310	33	DC(+)	/	34,8	17,35
7.	121	3 UNION S3	290 – 310	32	DC(+)	/	36,5	16,3
8.	121	3 UNION S3	290 – 310	32	DC(+)	/	31,9	18,66

Dodatni materijal:-vrsta i trgovačko ime:

135: EMK 6 (EN ISO 14341-A: G424M/CG3Si1)

136: TI 52-FD (EN ISO 17632-A/08: T 464PM1H10)

121: UNION S3 (EN ISO 14341: G 42M G3Si1),
BB24 (EN ISO 14174: SA FB 1 65 DC H5)**Zaštitni plin:**-zaštitni plin: M21 Feromix C18 (Ar/CO₂ 82/18) (EN ISO 14175)**Protok plina:**

-zaštitnog plina: 15 – 20 l/min

Temperatura predgrijavanja: 100 °C, propan – butan**Međuslojna temperatura:** < 250 °C**Toplinska obrada:** ---

1. Pripremiti rubove lima brušenjem tako da kut između bude 60°.

2. Limove postaviti s razmakom od 2 mm između njih.

3. Prije početka zavarivanja predgrijati ploče na 100 °C.

4. Između prolaza mjeriti međuslojnu temperaturu i očistiti zavar četkanjem.

5. Glava automata postaviti u neutralnu tehniku zavarivanja.

6. Slobodni kraj žice iznosi 35 mm.

7. Bazna/vršna struja kod MAG – STT: 60 A/395 A

6.6. Nerazorno ispitivanje zavara – radiografija

Kod EPP zavarivanja može doći do grešaka u zavarenom spoju. Najčešće greške su: pore, uključci troske, neprovareni korijen zavara, pukotine (tope, hladne) i neodgovarajući izgled zavara [6].

Uključci troske kod EPP zavarivanja nastaju uglavnom u žlijebu s malim kutom otvora ili između slojeva kod višeslojnog zavarivanja. Mogu nastati u dubokom žlijebu ako je vrh žice nepravilno vođen tako da luk udara samo na jednu stranicu žlijeba, a talina se „preklapa“ na drugu stranicu prekrivajući nepretaljeni prašak ili ostavljajući šupljinu ispod zavara. Kod premalih brzina zavarivanja u žlijeb ili zavarivanja previše „nizbrdo“ talina bježi ispred električnog luka pa tako pokriva trosku ili šupljine ili uzrokuje greške hladnog naljepljivanja [6]. Uključci troske spadaju pod volumenske nepravilnosti koje je vrlo lako otkriti radiografskim ispitivanjem.

Radiografija je metoda nerazornih ispitivanja dijelova i sklopova koja se temelji na razlikama u apsorpciji zračenja dijela ili cijelog komada koji se ispituje. Količina zračenja koje će predmet apsorbirati ovisi o apsorpcijskim karakteristikama samog materijala, kao i gustoći i debljini istog. Zračenje koje materijal ne upije odnosno apsorbira koristi se za izradu zapisa na filmu ili fotosenzitivnom papiru [34].

U odnosu na druge metode nerazornih ispitivanja radiografija ima tri osnovne prednosti [34]:

- sposobnost detekcije volumnih nepravilnosti
- sposobnost uočavanja značajnijih varijacija u sastavu materijala
- stvaranje trajnog zapisa

Parametri rendgenskog uređaja su:

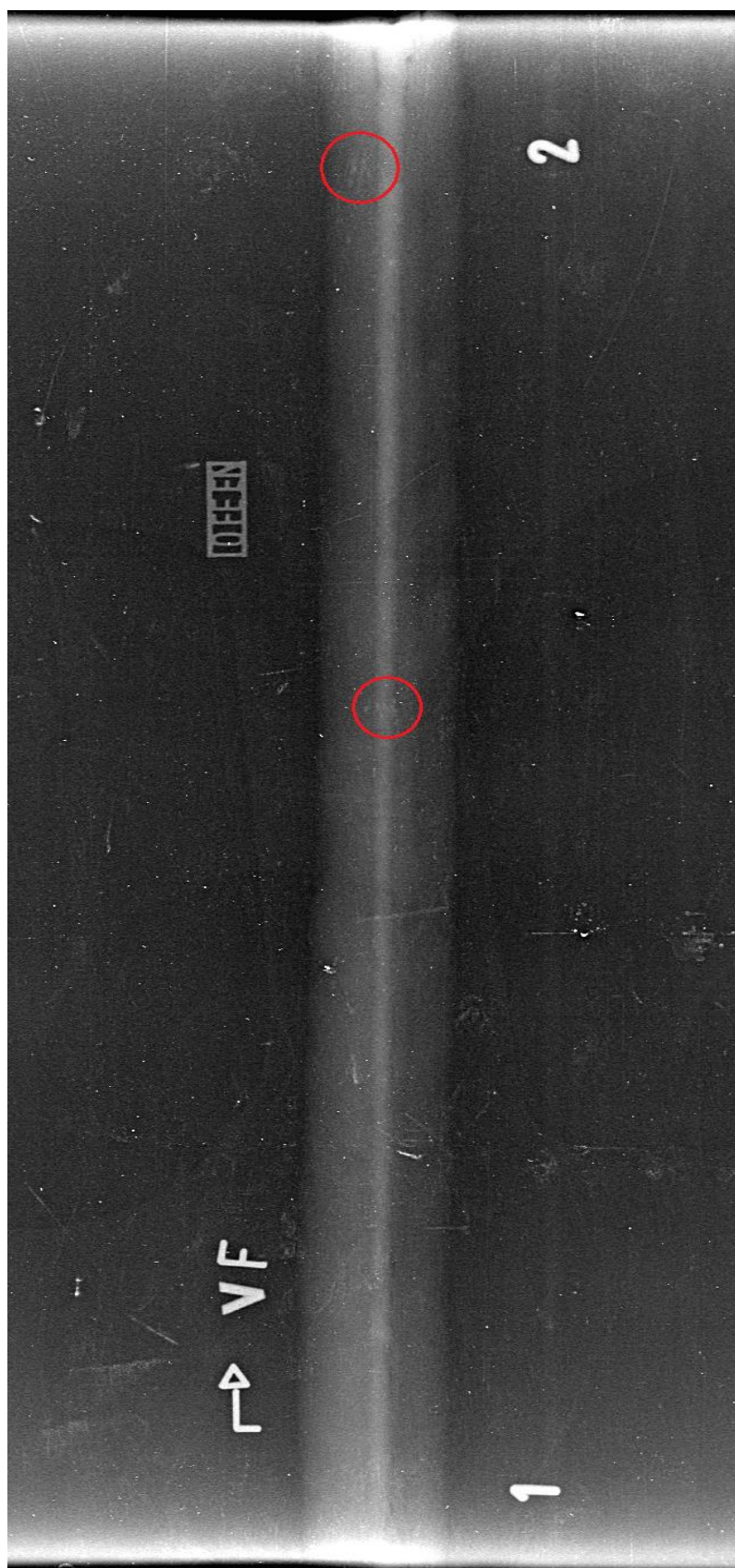
- struja (mA)
- napon cijevi (kV)
- vrijeme ekspozicije (min)

Zavareni spoj je nakon zavarivanja i hlađenja najprije podvrgnut radiografskoj metodi ispitivanja. Parametri rendgenskog uređaja su bili: struja 4 mA, napon 200 kV i vrijeme ekspozicije 2 min. Udaljenost fokus – film je iznosila 700 mm. Slika 52 prikazuje radni komad pripremljen za radiografsko ispitivanje.



Slika 52. Radni komad pripremljen za radiografsko ispitivanje [29]

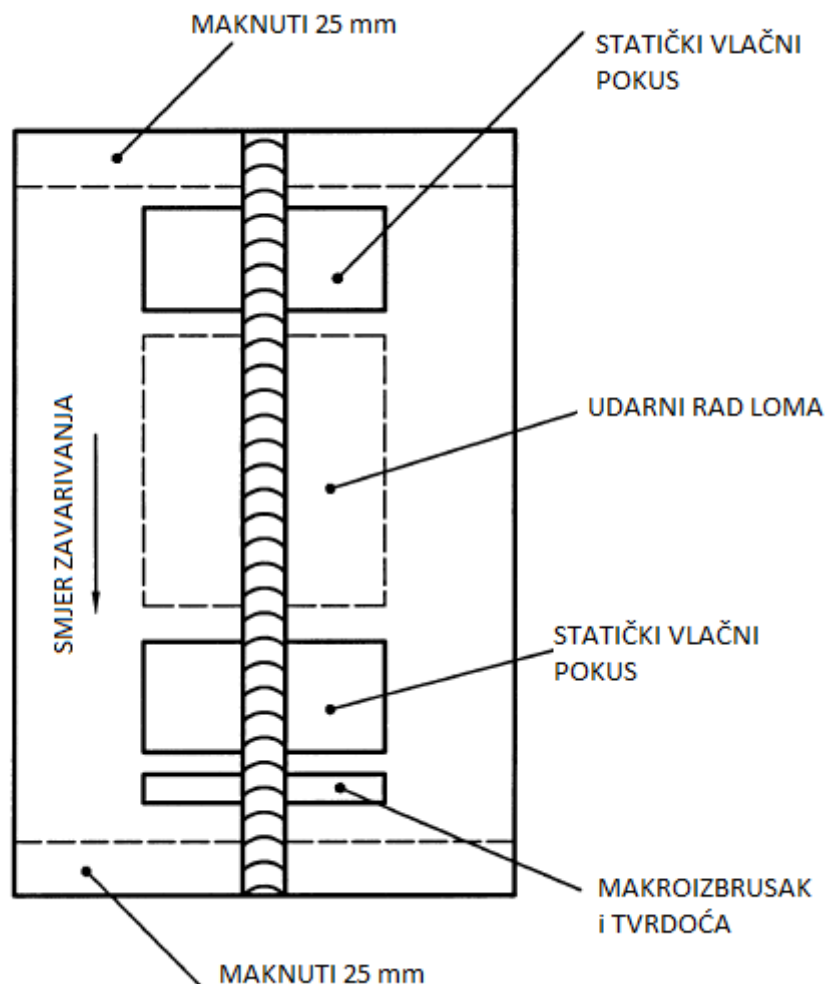
Nakon provedenog snimanja, snimljena folija se stavila u skener i nakon skeniranja slika je bila vidljiva na računalu. Slika 53 prikazuje skeniranu sliku zavarnog spoja podvrgnutog radiografskom ispitivanju. Na radiografskom snimku se vidi da je korijen zavara jednolično i kvalitetno provaren, također nema pora niti toplih ili hladnih pukotina. Na dva mjesta označenim na slici 53 nazire se moguća pojava uključaka troske u zavarenom spoju. Ovi uključci mogu biti posljedica zaostalog praška u zavarenom spoju, pri višeslojnom zavarivanju kojem je bio podvrgnut ovaj zavareni spoj. Bez obzira na to, može se na temelju radiografskog snimka zaključiti, da nema značajnijih nepravilnosti u zavarenom spoju, te da je zavareni spoj izveden kvalitetno.



Slika 53. Rezultat radiografskog ispitivanja zavara [29]

6.7. Ispitivanje mehaničkih svojstva zavarenog spoja

Nakon provedene radiografske kontrole zavarenog spoja, pristupilo se izradi uzoraka za mehanička ispitivanja postupka zavarivanja sukladno normi HRN EN ISO 15614 – 1. Norma navodi da minimalna širina ispitne ploče u slučaju sučeljenog zavarivanja mora biti 150 mm, a minimalna dužina 350 mm. Ploča korištena u ovom eksperimentalnom radu je širine 150 mm i dužine 400 mm, tako da zadovoljava normom propisane standarde. Iz ispitne ploče izrezuju se uzorci za mehanička ispitivanja. Vade se po dva uzorka za statički vlačni pokus, jedan uzorak za makroizbrusak i mjerenje tvrdoće, te šest uzorka za ispitivanje udarnog rada loma (tri za metal zavara i tri za ZUT). Slika 54 shematski prikazuje ploču i na njoj naznačena mjesta vađenja uzoraka za mehanička ispitivanja.



Slika 54. Shematski prikaz mjesta vađenja uzoraka za mehanička ispitivanja [35]

Iz ploče uzorci za mehanička ispitivanja najprije su na grube mjere izrezani na plinskoj rezačici i na tračnoj pili. Slika 55 prikazuje procese rezanja uzoraka za mehanička ispitivanja.



Slika 55. A



Slika 55. B

Slika 55. Priprema uzoraka za mehanička ispitivanja [29]

55. A Rezanje na plinskoj rezačici

55. B Rezanje na tračnoj pili

Nakon rezanja uzorci za udarni rad loma nagriženi su kako bi se moglo označiti mjesto za izradu V utora. Slika 56 pokazuje izrezane uzorke za mehanička ispitivanja, te nagrižene i označene uzorke za mjerenje udarne radnje loma. Ovako pripremljeni uzorci odneseni su u Laboratorij alatnih strojeva da se obrade na zadane mjere, sukladno normama EN 895 i EN 875.



Slika 56. A



Slika 56. B

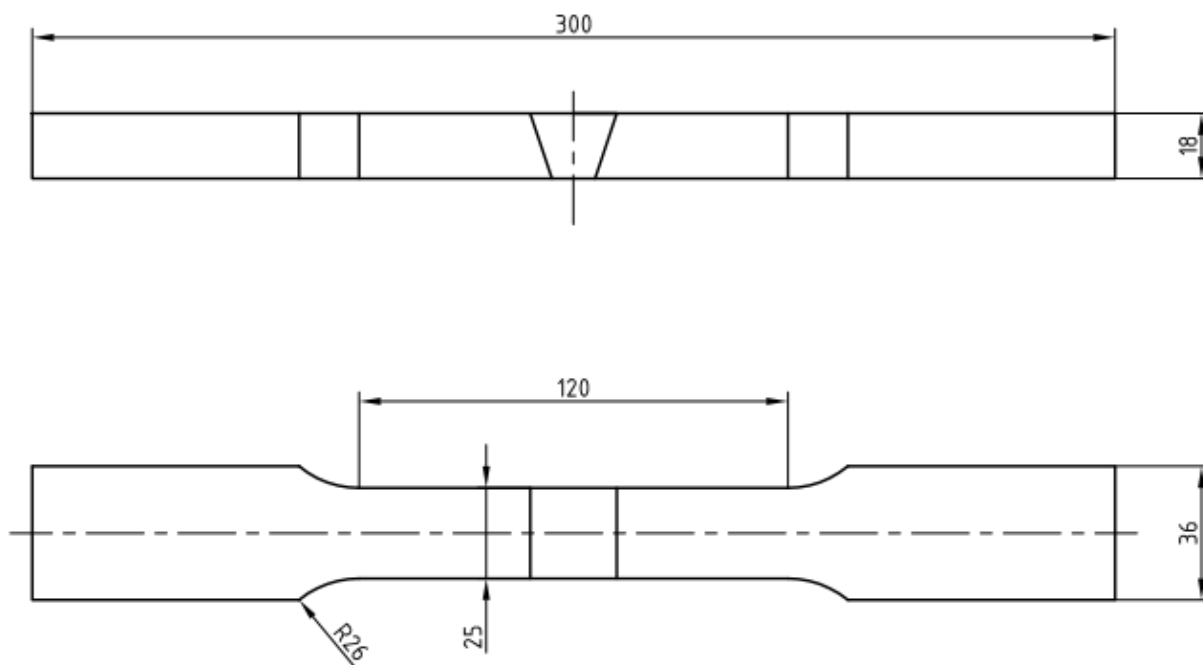
Slika 56. Uzorci nakon završenog procesa rezanja [29]

56. A Uzorci nakon rezanja na plinskoj rezačici

56. B Nagriženi i označeni uzorci nakon rezanja na tračnoj pili

6.7.1. Statičko vlačno ispitivanje

Iz materijala koji želimo ispitati izrezuje se uzorak propisanog oblika i dimenzija – epruveta ili ispitni uzorak. To je (ovisno o obliku poluproizvoda) probni štap četvrtastog poprečnog presjeka, kod kojeg je njegov poprečni presjek i mjerna duljina u određenom razmjeru [36]. Slika 57 shematski prikazuje dimenzije epruveta (u mjerilu 1:2) prema normi EN 895 koje će biti podvrgnute statičkom vlačnom ispitivanju za potrebe ovog eksperimentalnog rada. Poprečni presjek ovih epruveta iznosi $a_0 \cdot b_0 = 18 \cdot 25$ [mm], dok mjera duljina epruvete iznosi $L_0 = 120$ mm [37]. Slika 58 prikazuje dvije epruvete, strojno obrađene na zadane mjere i spremne za statičko vlačno ispitivanje.



Slika 57. Shematski prikaz i dimenzije epruvete za statičko vlačno ispitivanje



Slika 58. Epruvete za statičko vlačno ispitivanje, strojno obrađene na zadane mjere [29]

Ove epruvete su s obzirom na početnu mjernu duljinu kratke epruvete i za njih vrijedi sljedeća relacija:

$$L_0 = 5,65 \cdot \sqrt{S_0}, S_0 = a_0 \cdot b_0 \quad (5)$$

Epruveta se na mjestima zadebljanja („glava“) učvrsti u čeljusti kidalice odnosno stroja na kojem se provodi statičko vlačno ispitivanje. Epruveta se opterećuje vlačnom silom. Prirast sile pri statičkom vlačnom pokusu mora biti takav da prirast proizvedenog naprezanja u epruveti bude $\leq 10 \text{ N/mm}^2$ u sekundi. Za takvo sporo opterećivanje najprikladniji je hidraulični pogon kidalice, a pri takvom hidrauličkom sustavu moguće je u svakom trenu rasteretiti epruvetu. Iznos sile kojom je opterećena epruveta iskazan je u kN [36]

Budući da u svakom tijelu opterećenje, odnosno proizvedeno naprezanje izaziva deformaciju, tako će se i pri statičkom vlačnom ispitivanju epruveta produljivati. Stoga se pri statičkom vlačnom ispitivanju pored vrijednosti sile prati i produljenje epruvete. Na kidalici se na pisaču za vrijeme statičnog vlačnog ispitivanja crta dijagram sila – produljenje, $F - \Delta L$, koji se naziva i dijagramom kidanja. Produljenje ΔL [mm], predstavlja povećanje razmaka L_0 koji je naznačen na epruveti prije ispitivanja [36]. Slika 59 prikazuje ispitni uzorak u čeljustima kidalice, a slika 60 epruvete nakon procesa kidanja.

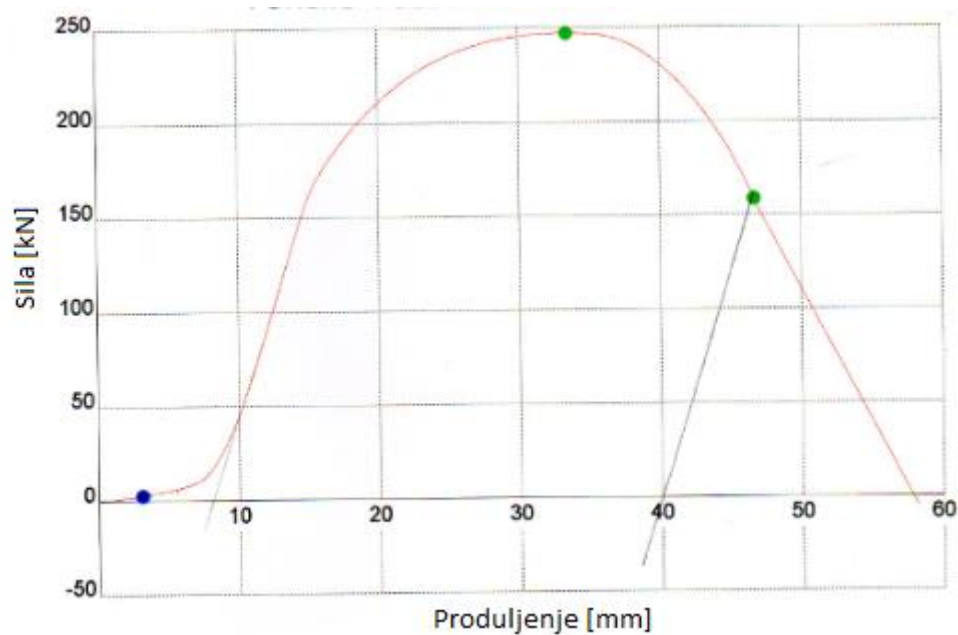


Slika 59. Ispitni uzorak u čeljustima kidalice [29]



Slika 60. Epruvete nakon procesa kidanja [29]

Slika 61 prikazuje dijagram sila – produljenje za uzorak broj 2. Uzorak broj 1 kvalitativno ima isti izgled dijagrama, te nema potrebe za stavljanjem i njegovog dijagrama sila – produljenje. Važno je naglasiti da je na ovom dijagramu na osi apcisa naznačeno ukupno produljenje epruvete, a ne produljenje ΔL_u . Produljenje ΔL_u za svaki uzorak izmjereno je naknadno te će ove vrijednosti biti dane u nastavku ovog rada, kao i dimenzije suženja poprečnog presjeka nakon kidanja.



Slika 61. Dijagram sila – produljenje za uzorak 2 [29]

U prvom dijelu dijagrama, sve do produljenja od 8 mm, je tzv. područje „klizanja“ epruvete. Nakon ovog područja linearna je ovisnost sile i produljenja, što znači da istim prirastima sile odgovaraju i jednaka produljenja. Takva zakonitost vrijedi sve do vrijednosti sile F_e koja se naziva silom tečenja. U slučaju ispitnog uzorka 2 nemamo izraženu silu tečenja, već pravac kontinuirano prelazi iz linearnog (elastičnog) područja u nelinearno (plastično) područje tečenja.

Opterećenje se povećava sve do dostizanja maksimalne sile F_m , nakon koje se epruveta nastavlja produljivati uz sve manju i manju silu. Konačno, pri vrijednosti sile F_b dolazi do loma (pucanja) epruvete. Vrijednosti sile F_m i F_b naznačene su na dijagramu na slici 61.

Sastavi li se puknuti ispitni uzorak, kako pokazuje slika 60, te izmjeri razmak koji je prije ispitivanja iznosio L_o dobit će se konačna mjerna duljina L_u . Produljenje nakon kidanja tada iznosi $\Delta L_u = L_u - L_o$, [mm].

Iznosi sile pri statičkom vlačnom ispitivanju ne daju uvid u ponašanje materijala ukoliko se u obzir ne uzme površina poprečnog presjeka epruvete. Stoga se uvodi pojam naprezanja tj. sile po jedinici površine prema izrazu [36]:

$$\sigma = \frac{F}{S_o}, [\text{N/mm}^2] \quad (6)$$

F [N] – sila

S_o [mm²] – površina poprečnog presjeka

Proizlazi da je jedinica kojom se iskazuje naprezanje N/mm², što odgovara jednom Mpa. Ukoliko se vrijednosti produljenja ΔL svedu na početnu mjernu duljinu dobiva se pojam istezanja ili relativnog produljenja [36]:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_o}, \text{ mm/mm} \quad (7)$$

Na taj način se iz dijagrama sila – produljenje dobiva dijagram naprezanje – istezanje „ $\sigma - \varepsilon$ “. Dijagram „ $\sigma - \varepsilon$ “ je kvalitativno jednak dijagramu $F - \Delta L$ budući da se svi iznosi sile dijele s istom vrijednošću (S_o), a sve vrijednosti produljenja s vrijednošću L_o . Zbog toga i dijagram $\sigma - \varepsilon$ počinje iz ishodišta pravcem koji se naziva Hooke – ovim pravcem.

U tom području naprezanja materijal je deformiran isključivo elastično što znači da u slučaju rasterećenja je trajna deformacija jednaka nuli, odnosno razmak mjernih točaka na epruveti jednak je L_0 .

Naprezanje kod maksimalne sile naziva se vlačnom ili rasteznom čvrstoćom i jednako je [36]:

$$R_m = \frac{F_m}{S_0}, [\text{N/mm}^2] \quad (8)$$

Nakon dostignute vrijednosti R_m , deformacija epruvete nije više jednolika po čitavoj njenoj duljini već se lokalizira na jednom mjestu, nastaje tzv. vrat, što se može vidjeti na slici 59.

Vrijednost istežanja nakon kidanja određuje se prema izrazu [36]:

$$\varepsilon_u = \frac{L_u - L_0}{L_0} = \frac{\Delta L_u}{L_0}, [\text{mm/mm}] \quad (9)$$

Ukoliko se vrijednost ε_u izrazi u postocima označava se slovom A i naziva istežljivost [36]:

$$A = \varepsilon_u \cdot 100, \% \quad (10)$$

Tablica 15 prikazuje mjere produljenja, a tablica 16 dobivene vrijednosti sila i naprezanja za uzorke 1 i 2 uslijed statičkog vlačnog ispitivanja.

Tablica 15. Vrijednosti produljenja za uzorke 1 i 2

Uzorak	a_0 , [mm]	b_0 , [mm]	S_0 , [mm ²]	L_0 , [mm]	a_1 , [mm]	b_1 , [mm]	S_1 , [mm ²]	L_u , [mm]	ΔL_u , [mm]
1	18,21	24,99	455,1	120	10,74	15,92	171	145	25
2	18,44	24,91	459,3	120	10,33	14,9	154	141,6	21,6

Tablica 16. Vrijednosti sila i naprezanja za uzorke 1 i 2

Uzorak	F_m , [N]	F_b , [N]	R_m , [N/mm ²]	A , [%]
1	245,35	156,27	539,12	21
2	247,48	158,57	538,77	18

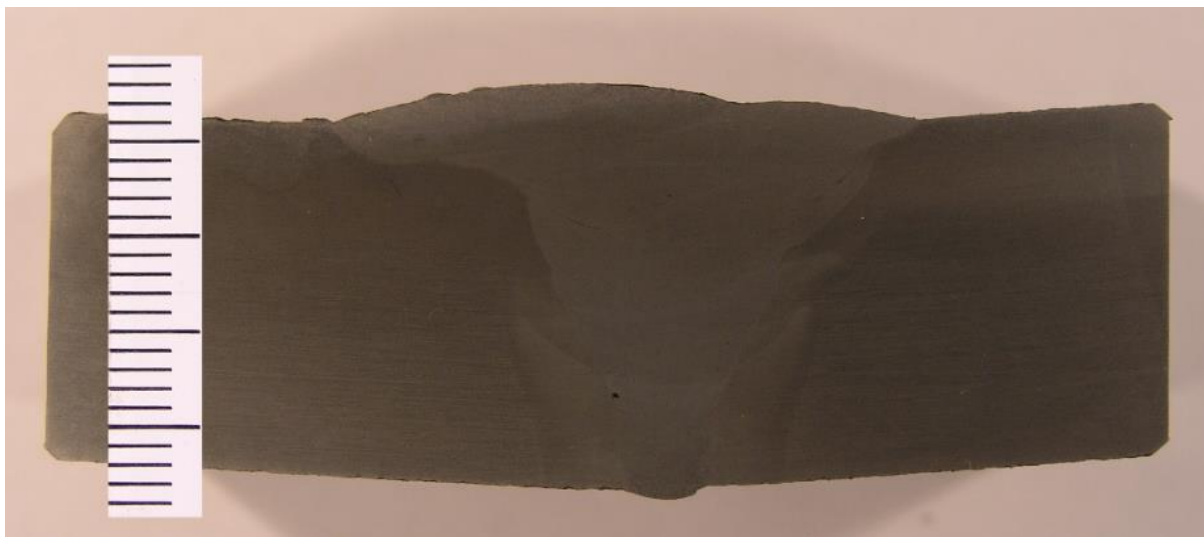
Ta temelju rezultata statičkog vlačnog ispitivanja mogu se donjeti sljedeći zaključci:

- iznos vlačne čvrstoće je u granicama propisanim specifikacijom osnovnog materijala
- iznos istezljivosti jednak je onima koje propisuje specifikacija osnovnog materijala
- puknuće epruveta nije se dogodilo na mjestu zavarenog spoja

Ovaj posljednji zaključak je najvažniji s gledišta kvalitete izvedbe zavarenog spoja. On ukazuje na to da su prilikom zavarivanja odabrani ispravni parametri zavarivanja, kao i dodatni materijal i prašak, te da je cijeli proces zavarivanja (od predgrijavanja prije zavarivanja, poštivanja temperature između prolaza, brzine zavarivanja i hlađenja zavara nakon završetka procesa zavarivanja) ispravno vođen.

6.7.2. Analiza makroizbruska i izračun brzine dodavanja žice kod EPP zavarivanja

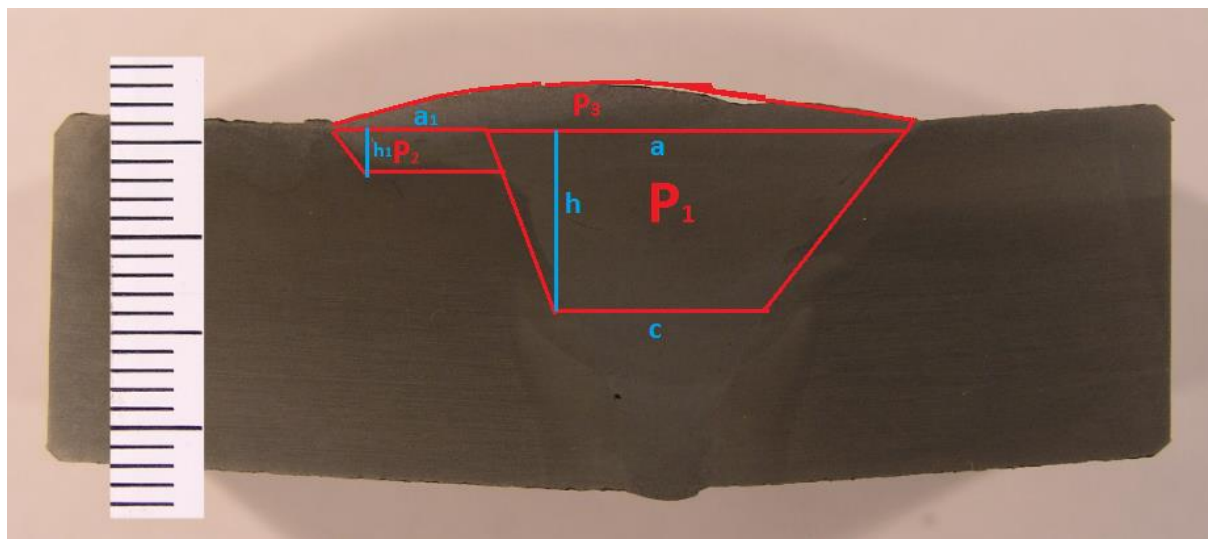
Nakon završenog procesa brušenja, uzorak za makroskopsku analizu uronjen je u 3 % -tni Nital, te je zatim opran s vodom i osušen kako bi se uklonili tragovi vlage. Nagrizanjem u reagensu 3 % nitala dobio se izgled makrostrukture metala zavara, zone utjecaja topline i osnovnog metala materijala, te linije staljivanja. Pripremljeni uzorak snimljen je odmah nakon nagrizanja digitalnim fotoaparatom. Slika 62 prikazuje fotografiju uzorka snimljenu digitalnim fotoaparatom.



Slika 62. Makroizbrusak slikan digitalnim fotoaparatom [29]

Na slici 62 jasno se vidi metal zavara, osnovni metal, kao i područje zone utjecaja topline i područje staljivanja. Također vide se i svih osam prolaza koji tvore ovaj zavareni spoj. Otprilike 8 mm zavara otpada na korijenski prolaz i prvu popunu postupkom MAG – praškom punjena žica, a preostalih 10 mm otpada na EPP postupak zavarivanja. Nadvišenje zavara je od 1 – 2 mm. Područje zone utjecaja topline nije jednoliko kroz cijeli presjek zavara, već se razlikuje između pojedinih prolaza. Najveće područje zone utjecaja topline je kod zadnjeg prolaza EPP postupkom, kod kojeg je bio i najveći unos topline. Razmjerno jednaka područja zone utjecaja topline su kod prva četiri prolaza, kod kojih se bili manji unosi toplina i kod kojih se popuna žlijeba vršila u jednom prolazu.

Na temelju makroizbruska sa slike 62 može se izračunati i depozit nataljenog materijala prilikom EPP zavarivanja. Na taj način može se i retrogradnom metodom izračunati brzina žice kod EPP postupka zavarivanja koja kao parametar nije dana na samom uređaju za zavarivanja. Slika 63 prikazuje makroizbrusk s naznačenim površinama pomoću kojih će se izračunati depozit nataljenog materijala kod EPP zavarivanja. Duljina ploče koja se zavarivala bila je 400 mm.



Slika 63. Makroizbrusk s naznačenim površinama za računanje depozita nataljenog materijala [29]

Površina P1 predstavlja trapez, površina P2 paralelogram, a površina P3 je površina kružnog odsječka. Uz pomoć formula za površine ovih likova i mjerila izračunat će se najprije površine, a nakon toga i volumen nataljenog dodatnog materijala.

$$P_1 = \frac{a+c}{2} \cdot h = \frac{23 + 11}{2} \cdot 10 = 170 \text{ mm}^2 \quad (11)$$

$$P_2 = a_1 \cdot h_1 = 7,2 \cdot 2,8 = 20,2 \text{ mm}^2 \quad (12)$$

$$P_3 = \frac{r^2}{2} \cdot \left(\frac{\pi \cdot \rho}{180} - \sin \rho \right) = \frac{38^2}{2} \cdot \left(\frac{\pi \cdot 45}{180} - \sin 45^\circ \right) = 56,5 \text{ mm}^2 \quad (13)$$

$$V_1 = P_1 \cdot 400 = 170 \cdot 400 = 68\,000 \text{ mm}^3 = 68 \text{ cm}^3 \quad (14)$$

$$V_2 = P_2 \cdot 400 = 20,2 \cdot 400 = 8080 \text{ mm}^3 = 8,1 \text{ cm}^3 \quad (15)$$

$$V_3 = P_3 \cdot 400 = 56,5 \cdot 400 = 22600 \text{ mm}^3 = 22,6 \text{ cm}^3 \quad (16)$$

$$V_{\text{uk}} = V_1 + V_2 + V_3 = 68 + 8,1 + 22,6 = 98,7 \text{ cm}^3 \quad (17)$$

Dobiveno je da depozit nataljenog materijala kod EPP zavarivanja iznosi 98,7 cm³. Da bi iz ovog podatka izračunali brzinu žice potrebno je znati ukupno vrijeme zavarivanja EPP postupkom i promjer žice. Promjer žice s kojom se vršilo EPP zavarivanje bio je 3 mm, a vremena zavarivanja EPP postupkom za svaki prolaz dana su u tablici 17.

Tablica 17. Vremena zavarivanja EPP postupkom za svaki prolaz i ukupno

Prolaz	Vrijeme zavarivanja [s]
3.	39,7
4.	66,7
5.	64,1
6.	68,9
7.	65,7
8.	75,1
Ukupno	380,2

Površina žice računa se po sljedećoj formuli:

$$A_{\text{ž}} = \frac{d^2 \cdot \pi}{4} = \frac{3^2 \cdot \pi}{4} = 7,07 \text{ mm}^2 \quad (18)$$

Duljinu žice koja se iskoristila prilikom EPP zavarivanja dobijemo sljedećom relacijom:

$$V_{uk} / A_{\dot{z}} = 98\,700 / 7,07 = 13\,960 \text{ mm} = 13,96 \text{ m} \quad (19)$$

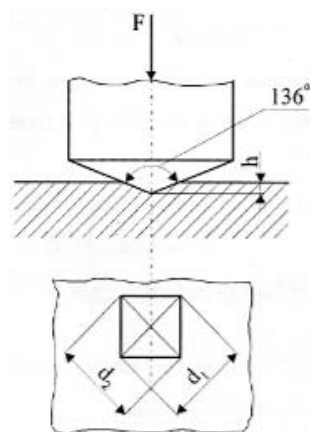
Konačno brzinu žice dobijemo tako da iznos duljine iskorištene žice (13,96 m) podijelimo sa ukupnim vremenom zavarivanja (6,34 min):

$$13,96 / 6,34 = 2,2 \text{ [m/min]} \quad (20)$$

U specifikacijama uređaja s kojim je vršeno zavarivanje se navodi da raspolaže sa brzinama dodavanja žice od 0,6 – 16,5 m/min, tako da je dobiveni rezultat unutar ovih vrijednosti.

6.7.3. Mjerenje tvrdoće prema HV10

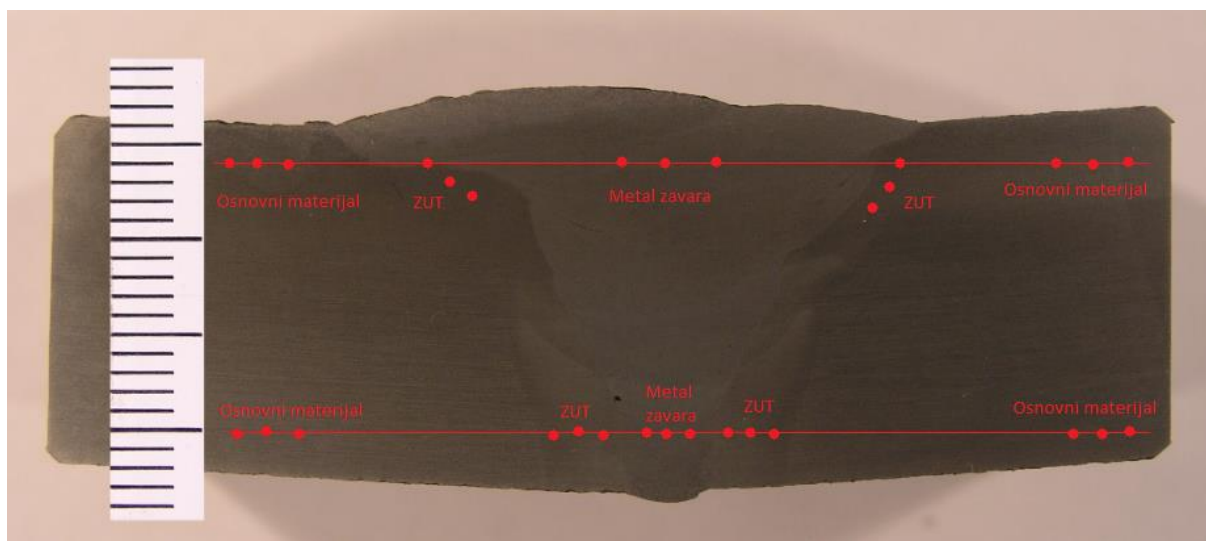
Tvrdoća predstavlja otpornost materijala prema prodiranju nekog drugog znatno tvrdog tijela. Vickersovom metodom, koja je korištena kod ovog eksperimenta, moguće je mjeriti i najtvrdje materijale, a tvrdoća nije ovisna o primijenjenoj sili. Kod Vickersa je penetrator istostrana četverostrana piramida s kutem između stranica od 136°. Ovakav kut nije odabran nasumce, već se utiskivanjem penetratora s tim kutem, dobivaju vrijednosti tvrdoće neovisne o primijenjenoj sili, pa se tvrdoće mekih materijala i tvrdih materijala mogu mjeriti primjenom iste sile, a isto tako se tvrdoća istog materijala može mjeriti s različitim opterećenjima. Utiskivanjem ovakvog penetratora u materijalu ostaje otisak oblika piramide prikazan na slici 64 [36].



Slika 64. Skica penetratora i otiska kod Vickersove metode [36]

Pomoću mjernog mikroskopa mjere se dijagonale (d_1 , d_2) baze piramide otisnute u materijalu, a tvrdoća se zatim isčitava iz tablica za HV 10 metodu.

Mjerenje tvrdoće, za potrebe ovog eksperimentalnog rada, izvedeno je metodom Vickers HV10 na makroizbrusku izrezanom iz ploče na kojoj se provodilo zavarivanje. Primijenjena sila kod metoda HV10 iznosi 98 N. Slika 65 prikazuje izgled makroizbruska i raspored mjerenja. Mjerenje tvrdoće provodi se zbog utvrđivanja maksimalne vrijednosti tvrdoće zone zavara u dvije linije. Prema normi EN 1043 – 2 gornja linija mora biti na udaljenosti 2 mm od gornje površine ispitnog uzorka, a donja linija na udaljenosti 2 mm od donje površine ispitnog uzorka. Na svakoj liniji mjeri se tvrdoća u 15 točaka i to sa svake strane po tri mjerenja u osnovnom materijalu, tri mjerenja u ZUT – u i tri mjerenja u metalu zavara [38]. Prema normi HRN EN ISO 15614 – 1 maksimalna tvrdoća za materijale koji prema normi CR ISO 15608 spadaju u grupu 1 i 2 (osnovni materijal ispitnog uzorka spada u grupu 1.2) ne smije biti viša od 380 HV10. Zbog toga je vrlo važno provođenje mjerenja tvrdoće kako bi se osigurala sigurnost i strukturni integritet ispitivanog zavarenog spoja.



Slika 65. Raspored mjerenja tvrdoće metodom HV10 na makroizbrusku [29]

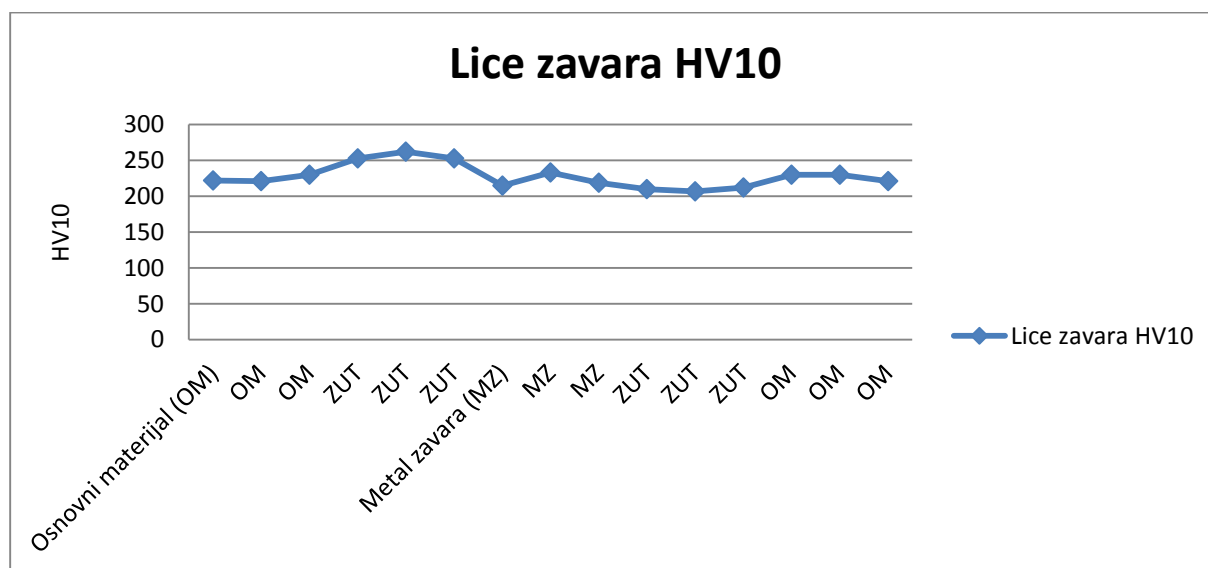
Kod mjerenja vrlo je bitno bilo zadržati određeni linijski razmak između otisaka u vrijednosti od minimalno 4 dijagonale mjerne točke kako bi se spriječio utjecaj lokalnog otvrdnjivanja na rezultat mjerenja.

Tablica 18 prikazuje vrijednosti mjerenja tvrdoće za lice i korijen zavora po svim zonama zavarenog spoja i osnovnog materijala.

Tablica 18. Vrijednosti mjerenja HV10

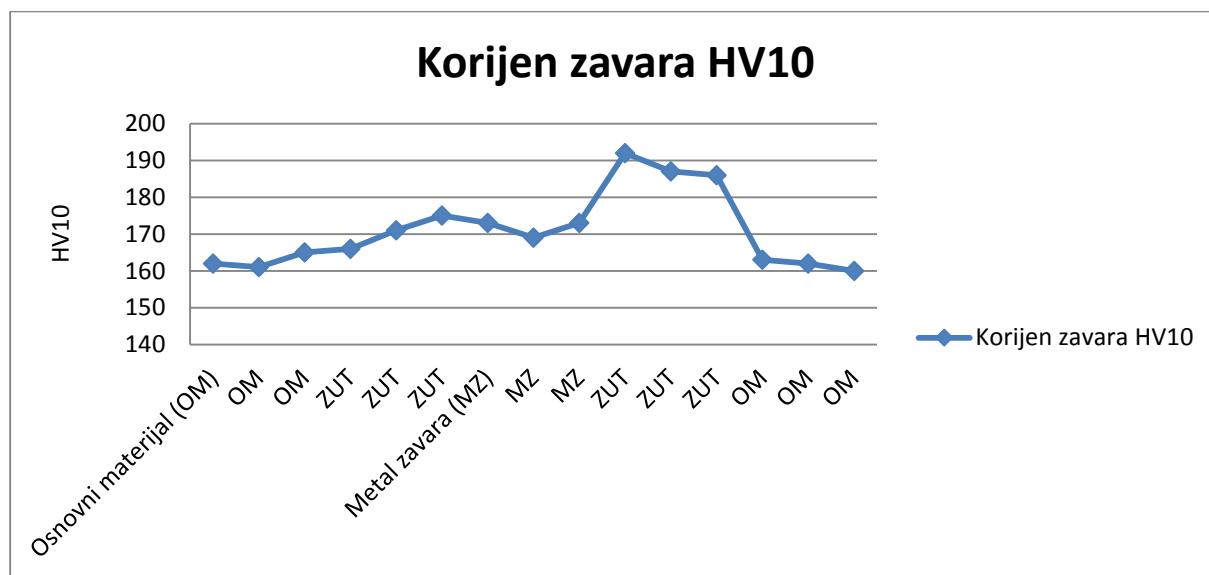
Mjesto mjerenja	Lice zavora HV10	Korijen zavora HV10	Max. Vrijednost prema HRN EN ISO 15614 - 1
Osnovni materijal (OM)	222	162	380
OM	221	161	
OM	230	165	
ZUT	253	166	
ZUT	262	171	
ZUT	253	175	
Metal zavora (MZ)	215	173	
MZ	233	169	
MZ	219	173	
ZUT	210	192	
ZUT	207	187	
ZUT	212	186	
OM	230	163	
OM	230	162	
OM	221	160	

Slika 66 grafički prikazuje tvrdoće izmjerene na licu zavora.



Slika 66. Grafički prikaz tvrdoće izmjerene na licu zavora metodom HV10

Slika 67 grafički prikazuje tvrdoće izmjerene u korijenu zavara.



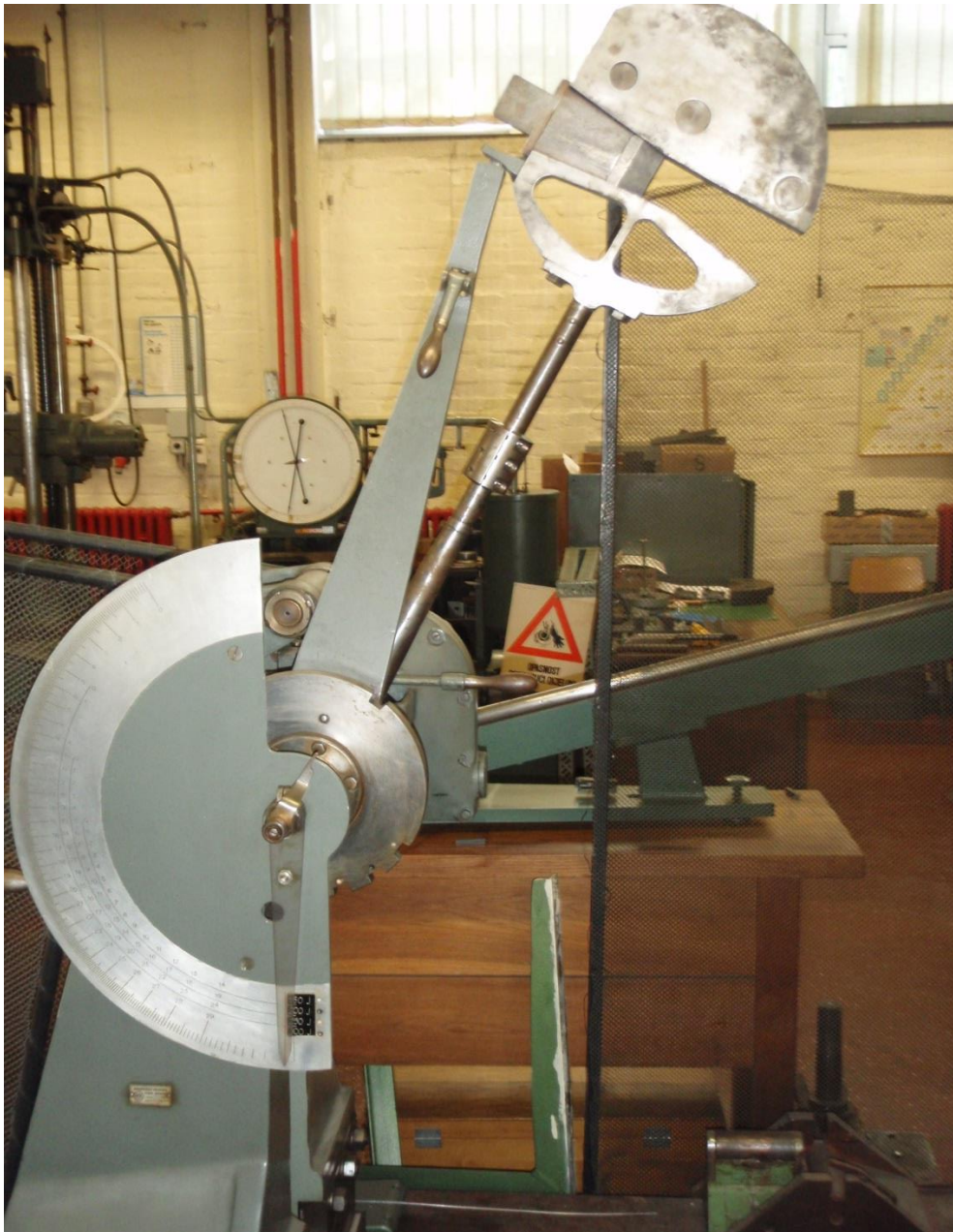
Slika 67. Grafički prikaz tvrdoće izmjerene u korijenu zavara metodom HV10

U okviru provedenog mjerenja iznosi tvrdoće su bili manji od vrijednosti 380 HV10. Grafički prikazi izmjerenih tvrdoća na licu i korijenu zavara svojim izgledom se dosta razlikuju. Iznosi tvrdoća lica zavara općenito su viši od korijena zavara. Razlog toga je puno viši unos topline na mjestu lica zavara, a manji unos topline na mjestu korijena zavara. U području lica zavara nalaze se zadnja dva prolaza rađena EPP postupkom zavarivanja, te je kristalno zrno pogrubilo zbog pregrijanja čelika i iz tog razloga mu se povisila tvrdoća. Također u ovom je području veća i zona utjecaja topline, koja se prostire gotovo kroz cijelo lice zavara i ima veći utjecaj na osnovni metal nego je to slučaj kod korijena zavara. Zbog toga su i iznosi tvrdoća osnovnog metala lica zavara veći nego kod korijena zavara. U području korijena zavara zavarivao se korijenski prolaz MAG – STT postupkom. Ovdje se radilo o jednom prolazu u kojem je unos topline bio skoro dvostruko manji nego kod zadnjih prolaza EPP postupkom, pa nije došlo do značajnijeg pregrijavanja čelika i pogrubljenja zrna, što se očituje u manjim iznostima tvrdoće.

Usprkos pogrubljenju zrna i višim iznosima tvrdoće na licu zavara, nema potrebe za toplinskom obradom nakon zavarivanja u vidu žarenja za redukciju zaostalih naprezanja ili normalizacijskog žarenja, iz razloga jer su svi iznosi tvrdoća manji od normom dozvoljenih 380 HV10.

6.7.4. Mjerenje žilavosti – udarni rad loma

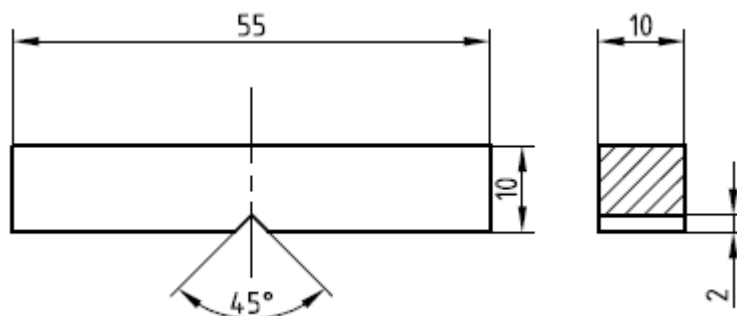
Ispitivanje udarnog rada loma provodi se s ciljem utvrđivanja ponašanja materijala u uvjetima udarnog opterećenja. Iznos udarnog rada loma je pokazatelj „žilavosti“ ili „krhkosti“ materijala udarno opterećenih epruveta s utorom. Ispitivanje udarnog rada loma provodi se na Charpy – evom batu [36]. Slika 68 prikazuje Charpy – ev bat na kojem je vršeno ispitivanje u okviru ovog eksperimentalnog rada.



Slika 68. Charpy – ev bat na kojem je mjereno udarno rad loma [29]

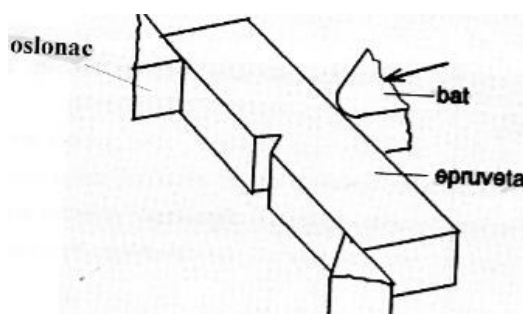
Bat težine G podiže se na visinu h_1 te s obzirom na ravninu u kojoj se nalazi ispitni uzorak, posjeduje potencijalnu energiju $G \cdot h_1$ [J]. Puštanjem bata iz početnog položaja njegova potencijalna energija prelazi u kinetičku. U najnižem položaju sva se potencijalna energija pretvorila u kinetičku energiju. Ukoliko na oslonac nije postavljen ispitni uzorak bat se penje na istu visinu s koje je i pušten, jasno ako se zanemari trenje u ležaju i otpor zraka [36].

Oblik i dimenzije epruvete, na kojima se vršilo ispitivanje udarne radnje loma u okviru ovog eksperimentalnog, rada prikazuje slika 69. Uz epruvetu s „V“ utorom, može se koristiti i epruveta s „U“ utorom. Dubina „V“ utora je 2 mm, a „U“ utora može biti 3 ili 5 mm. Ovdje je prikazana epruveta s „V“ utorom, jer takve propisuje norma HRN EN ISO 15614 – 1 po kojoj je rađen eksperimentalni rad.



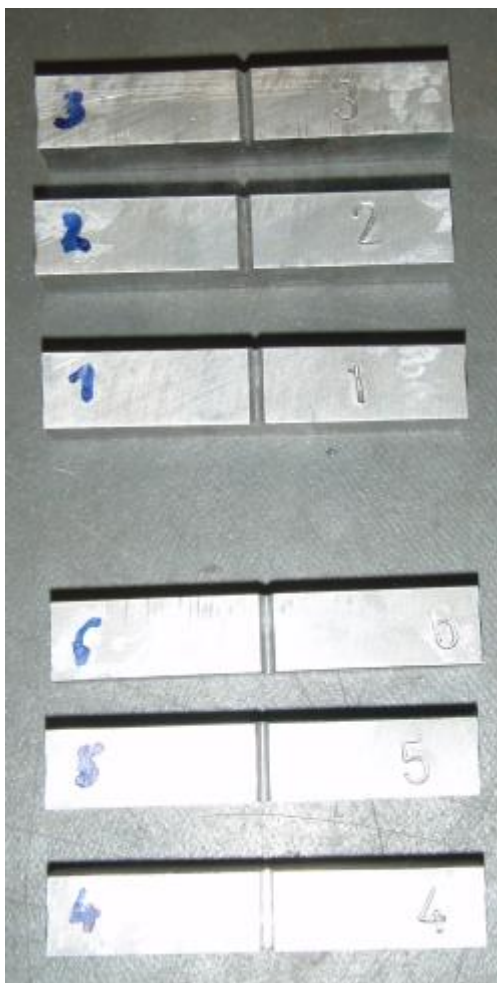
Slika 69. Oblik i dimenzije epruvete za ispitivanje udarnog rada loma [29]

Pri ispitivanju na oslonac je postavljena epruveta pa se za njezin lom utroši određen iznos kinetičke energije bata. Stoga se bat sada u uzlaznom dijelu penje na manju visinu od početne i dostiže visinu h_2 . Utrošena energija očitava se na skali uređaja [36]. Uređaj na kojem se provodilo mjerenje udarnog rada loma u ovom slučaju imao je mjerno područje 0 – 300 J. Slika 70 shematski prikazuje način udarnog djelovanja bata na epruvetu.



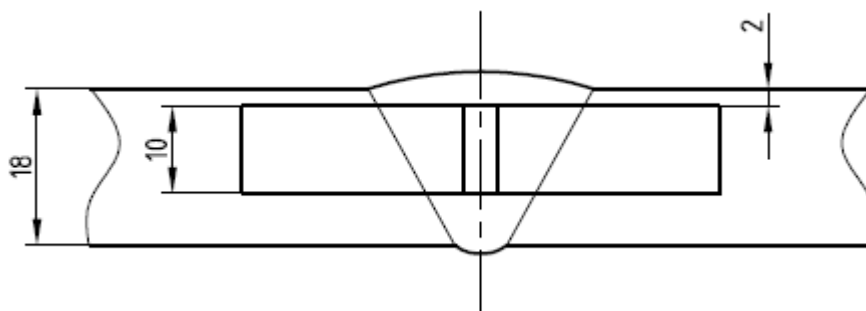
Slika 70. Način udarnog djelovanja bata na epruvetu [36]

Slika 71 prikazuje pripremljene uzorke za ispitivanje udarne radnje loma.

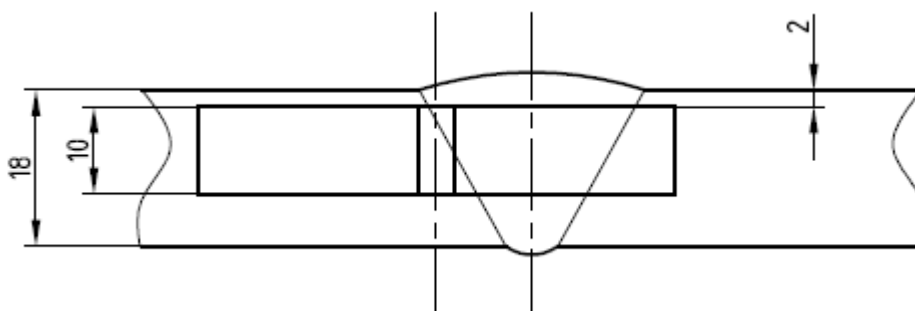


Slika 71. Uzorci za ispitivanje udarne radnje loma [29]

Prema normi HRN EN ISO 15614 – 1 za ispitivanje udarnog rada loma sučeljenog zavarenog spoja potrebno je izraditi i ispitati šest uzoraka i to tako da tri uzorka imaju „V“ utor izrađen u metalu zavara, a tri uzorka „V“ utor izrađen u ZUT – u. Kod uzoraka označenih brojevima 1, 2 i 3 „V“ utor se nalazi u metalu zavara, a kod uzoraka 4, 5 i 6 u ZUT – u. Norma EN 875 propisuje da se uzorci vade iz ispitne ploče s dubine od 2 mm s obzirom na gornju površinu ploče, te da „V“ utor mora biti okomit na gornju i donju površinu ploče [39]. Slika 72 shematski prikazuje način vađenja epruvete u slučaju „V“ utora u metalu zavara, a slika 73 u slučaju „V“ utora u zoni utjecaja topline.



Slika 72. Prikaz načina vađenja epruvete u slučaju „V“ utora u metalu zavara [39]



Slika 73. Prikaz vađenja epruvete u slučaju „V“ utora u ZUT – u [39]

Specifikacija osnovnog materijala čelika SA516 Gr70 definira vrijednosti udarnog rada loma na temperaturama $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$, $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ i $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$, iz razloga korištenja ovog čelika na sniženim i niskim temperaturama. Iz tog razloga će se ispitivanje udarne radnje loma u ovom eksperimentalnom radu provoditi na temperaturi od $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$. Uzorci se prije ispitivanja podhlađuju na zadanu temperaturu u smjesi alkohola i suhog leda. Uzorci su u ovoj smjesi držani oko 25 min, a temperatura uzoraka se kontrolirala digitalnim termometrom, što prikazuje slika 74.



Slika 74. Podhlađivanje uzoraka u smjesi suhog leda i alkohola [29]

Tablica 19 daje prikaz izmjerene žilavosti u metalu zavara i zoni utjecaja topline za ispitivane uzorke.

Tablica 19. Rezultati ispitivanja udarnog rada loma

Uzorak	Tip	Temperatura, [°C]	KV, [J]	SA516 Gr70 KV [J], -40 °C
1	Metal zavara (MZ)	-40	55	19
2	MZ	-40	56	
3	MZ	-40	45	
4	ZUT	-40	43,5	
5	ZUT	-40	48,5	
6	ZUT	-40	161	

Kako se vidi iz tablice izmjerene žilavosti u metalu zavara i zoni utjecaja topline su veće od onih koje daje specifikacije osnovnog materijala čelika SA516 Gr70. Općenito nešto veće vrijednosti žilavosti pokazuje metal zavara, a nešto slabije zona utjecaja topline. Može se zaključiti da je za veće žilavosti metala zavara zaslužan veći postotni udio mangana (1,56) u odabranom dodatnom materijalu kod EPP zavarivanja, naspram nešto manjeg udjela u osnovnom materijalu (1,44). Nešto slabiji iznosi žilavosti u zoni utjecaja topline su povezani s većim pogrubljenjem zrna u tom području, nego u području metala zavara. Također na mjestu ispitivanja žilavosti u zoni utjecaja topline izmjerena je najviša tvrdoća gornje linije mjerenja, a kako je iznos tvrdoće obrnuto proporcionalan iznosu žilavosti, ne iznenađuje niža izmjerena žilavost u tom području. Zona utjecaja topline je i područje koje zahvaća liniju staljivanja, ali i područje osnovnog materijala, koji općenito ima nižu žilavost pa je i to jedan od razloga manje žilavosti u zoni utjecaja topline. Bez obzira na nabrojene negativne utjecaje, rezultati dobiveni ispitivanjem udarne radnje loma su jako zadovoljavajući i u zoni utjecaja topline, a posebno u metalu zavara.

Izmjerena vrijednost uzorka 6 odskaka od ostalih vrijednosti. Ovaj uzorak uzet je s donje strane zavarenog spoja, tj. žilavost je na tom uzorku izmjerena u zoni utjecaja topline korijenskog prolaza. Ovako velik iznos žilavosti može se objasniti malim unosom topline u korijenskom prolazu, uslijed čega nije došlo do velikog pogrubljenja zrna. Također iznosi tvrdoće u korijenu zavara su općenito niži nego na licu zavara, te se iz toga može zaključiti da će iznosi žilavosti biti veći.

Ova visoka žilavost je poželjna jer se radi o korijenskom prolazu koji je i najvažniji prolaz kod zavarivanja, a posebice ako znamo da se radi o osnovnom materijalu namijenjenom za izradu posuda pod tlakom kod kojih je zahtjev za visokom žilavosti kako materijala, tako i zavarenog spoja jedna od ključnih značajki.

6.7.5. Ukupni rezultati ispitivanja

Na temelju provedenog nerazornog i mehaničkih ispitivanja na sučeljenom zavarenom spoju izvedenog postupcima 135, 136 i 121 iz osnovnog materijala čelika SA516 Gr70 mogu se donjeti sljedeći zaključci:

- radiografska kontrola je pokazala da nema volumnih grešaka u zavarenom spoju, što ukazuje na pravilno odabrane parametre i brzine zavarivanja,
- kod ispitivanja statičkim vlačnim pokusom puknuće epruvete se dogodilo na mjestu osnovnog materijala, a ne na mjestu zavarenog spoja, što ukazuje na pravilno odabrane osnovne materijale i prašak kod EPP zavarivanja,
- analizom makroizbruska zaključuje se da nije došlo do nalijepljivanja uslijed više prolaza, te da je došlo do mješanja metala zavara s osnovnim materijalom,
- izmjerene tvrdoće su niže od onih propisanih normom HRN EN ISO 15614 – 1, što ukazuje da unos topline nije bio previsok, te da nije došlo do značajnijeg pogrubljenja zrna,
- iznosi žilavosti zavarenog spoja su viši od žilavosti osnovnog materijala, što također ukazuje na optimalan unos topline, kao i pravilno odabrane dodatne materijale i prašak kod EPP zavarivanja.

7. ZAKLJUČAK

EPP postupak zavarivanja je visoko produktivan postupak korišten uglavnom u aplikacijama teške strojogradnje s velikim debljinama stijenke. Osnovna razlika u odnosu na druge postupke zavarivanja je korištenje praška, te iz tog razloga nemogućnosti praćenja električnog luka za vrijeme zavarivanja, kao i nemogućnost zavarivanja u okomitom i prisilnim položajima. Ovi nedostaci su uklonjeni različitim pozicionerima i uređajima koji se redovito koriste kod EPP zavarivanja, a sam postupak EPP zavarivanja je automatiziran. Uz različite uređaje poboljšana produktivnost ovog postupka se postiže uz korištenje tehnika s više žica, tandem tehnike i za potrebe maksimalne produktivnosti tehnike s više glava za zavarivanje. Može se reći da je EPP postupak u vidu svoje produktivnosti postigao svoj maksimum i da daljnji razvoj treba usmjeriti na razvoj dodatnih materijala i prašaka za EPP zavarivanje. Također povećanje produktivnosti EPP postupka sa sobom povlači i velike investicijske troškove, pa je to jedan od ograničavajućih faktora daljnjeg razvoja još veće produktivnosti EPP postupka. Velika prednost EPP postupka je u velikoj stabilnosti samog procesa zavarivanja, kao i korištenje pouzdanih izvora struje, koji u slučaju EPP zavarivanja mogu biti ispravljači, transformatori i inverteri.

Materijal korišten kod ovog eksperimentalnog rada je čelik SA516 Gr70, koji se najčešće koristi za izradu posuda pod tlakom u aplikacijama sniženih i niskih temperatura. Ovaj čelik ima nizak sadržaj ugljika, te je dobre zavarljivosti. Kod izrade tlačnih posuda jedan od češće korištenih postupaka je EPP postupak zavarivanja.

U eksperimentalnom radu EPP postupkom zavarivanja zavarivao se sučeljeni spoj debljine 18 mm od osnovnog materijala čelika SA516 Gr70. Izračunati su unosi topline i depozit nataljenog dodatnog materijala, te je izrađena specifikacija postupka zavarivanja. Nakon zavarivanja izvodila su se mehanička i radiografsko ispitivanje u okviru ispitivanja postupka zavarivanja prema normi HRN EN ISO 15614 – 1. Sva provedena ispitivanja rezultirala su boljim mehaničkim svojstvima zavarenog spoja u odnosu na osnovni materijal. To ukazuje na kvalitetno proveden proces EPP zavarivanja, koji uključuje pravilno izabrane parametre zavarivanja (struja, napon, brzina zavarivanja), kao i na korištenje ispravnog dodatnog materijala i praška.

Zaključuje se da uz veliku produktivnost EPP postupak zavarivanja pokazuje i izrazitu kvalitetu, posebno kod aplikacija s velikom debljinom stijenke osnovnog materijala. Stoga je EPP postupak nezamjenljiv u zavarivanju masivnih konstrukcija, u ovom slučaju kod zavarivanja posuda pod tlakom.

LITERATURA

- [1] S. Kralj, Š. Andrić: „Osnove zavarivačkih i srodnih postupaka“, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 1992.
- [2] M. Živčić: „Elektrolučno zavarivanje pod zaštitom praška – EPP“, Zavarivanje 26 (1983) 4, 215 – 221
- [3] http://www.ozmetalsan.com/management/katalog/20090508_28_5757715106.pdf - preuzeto 2.10.2015.
- [4] M. Živčić: „Elektrolučno zavarivanje pod zaštitom praška – EPP“, 1. nastavak, Zavarivanje 26 (1983) 5, 281 – 288
- [5] M. Langenoja, V. Ö. Karlsson: „Next generation high productivity submerged arc welding“, KTH Stockholm, Sweden 2012.
- [6] M. Živčić: „Elektrolučno zavarivanje pod zaštitom praška – EPP“, 1. nastavak, Zavarivanje 26 (1983) 6, 337 – 345
- [7] J. Cankar, M. Bregant, M. Šolar: „Novine kod zavarivanja i navarivanja pod praškom“, Zavarivanje i zavarene konstrukcije (3/2010), str. 97 – 100
- [8] J. Grgac: „Rukovanje obloženim elektrodama i prašcima za zavarivanje“, Zavarivanje 20 (1977) 6, 337 – 339
- [9] Inženjersko tehnički priručnik – Zavarivanje 2, RAD Beograd, 1979.
- [10] D. Petti: „Varijante automatskog elektrolučnog zavarivanja pod zaštitom praška“, Zavarivanje 27 (1984) 3, 307-315
- [11] ESAB: „Submerged Arc Welding“,pdf, 02 – 10 – 08/KW
- [12] J. Tušek, V. Kralj: „Zavarivanje pod praškom s dvostrukom, trostrukom i četverostrukom elektrodom“, Zavarivanje 35 (1992) 2, 77 – 84
- [13] J. Tušek, M. Suban: „High – Productivity Multiple – Wire Submerged – Arc Welding and Cladding with Metal – Powder Addition“, Journal od materials processing technology, February 2003.
- [14] <http://www.thefabricator.com/article/arcwelding/improving-productivity-with-submerged-arc-welding> - preuzeto 2.10.2015.
- [15] „Hard Automation Equipment for Submerged Arc Welding“, Lincoln Electric Europe, 2008.
- [16] I. Garašić, Z. Kožuh: „Priručnik iz kolegija strojevi i oprema za zavarivanje“, FSB, Zagreb, veljača 2015.

- [17] <http://www.lincolnelectric.com/assets/global/Products/K388-2/e910.pdf> - preuzeto 2.10.2015.
- [18] <http://www.lincolnelectric.com/assets/servicenavigator-public/lincoln3/im10024.pdf> - preuzeto 15.10.2015.
- [19] http://www.steitz.info/Englisch/PROSP_fluxrecovery.pdf - preuzeto 17.10.2015.
- [20] <http://www.esabsp.esab.net/templates/docOpen.asp?...pdf> – preuzeto 17.10. 2015.
- [21] R. Saluja, K. M. Moeed: „RECLAMATION OF MOISTURIZED FLUX IN SUBMERGED ARC WELDING“, International Journal of Technical Research and Applications, Volume 1, Issue 1(march – april 2013.)
- [22] „Welding Automation Submerged Arc, TIG, MIG/MAG“, Complete solutions in welding and cutting from ESAB – katalog
- [23] [http://www.hwayuan.com/en/uploads/MZ-1%20MANUAL\(1\).pdf](http://www.hwayuan.com/en/uploads/MZ-1%20MANUAL(1).pdf) – preuzeto 18.10.2015.
- [24] http://www.magmaweld.ru/files/welding_automation_column_boom.pdf - preuzeto 18.10.2015.
- [25] <http://www.brownmac.com/products/pressure-vessel-steel-plate/asme-sa516-gr-70-astm-a516-gr-70.aspx> - preuzeto 18.10.2015.
- [26] http://usa.arcelormittal.com/globalassets/arcelormittal-usa/what-we-do/steel/plate/plate-product-brochures/201502_pressure-vessel.pdf - preuzeto 19.10.2015.
- [27] M. Stupnišek, F. Cajner: „Osnove toplinske obradbe metala“, FSB, Zagreb, 2001.
- [28] https://flatsteel.arcelormittalsa.com/fspcatalogue/DataSheets/UnCoated/Web_datasheet_a6.1.pdf - preuzeto 19.10.2015.
- [29] Vlastita arhiva fotografija
- [30] BÖHLER Schweisstechnik Austria GmbH, katalog dodatnih materijala
- [31] DILLINGER HÜTTE, atest osnovnog materijala čelika SA516 Gr70
- [32] T. Filetin, F. Kovačiček, J. Indof: „Svojstva i primjena materijala“, FSB, Zagreb, 2011.
- [33] HRN EN ISO 15609 – 1:2004, Specifikacija i kvalifikacija postupaka zavarivanja za metalne materijale – Specifikacija postupka zavarivanja – 1. dio: Elektrolučno zavarivanje
- [34] B. Breka: „Tehnički zahtjevi za radiografsko ispitivanje zavarenih spojeva“, Diplomski rad, FSB, Zagreb, 2013.

- [35] HRN EN ISO 15614 – 1:2004, Specifikacija i kvalifikacija postupaka zavarivanja za metalne materijale – Ispitivanje postupka zavarivanja – 1. dio: Elektrolučno i plinsko zavarivanje čelika te elektrolučno zavarivanje nikla i legura nikla
- [36] V. Ivušić, M. Franz, Đ. Španiček, L. Čurković: „Materijali I – skripta iz kolegija Materijali I“, FSB, Zagreb, 2009.
- [37] BS EN 895:1995, Destructive tests on welds in metallic materials – Transverse tensile test
- [38] BS EN 1043 – 2:1997, Destructive tests on welds in metallic materials – Hardness test
- [39] DIN EN 875:1995, Destructive tests on welds in metallic materials – Impact tests

PRILOZI

I. CD-R disc