

Optimizacija tehnologije zavarivanja cjevovoda automatiziranim postupcima

Frigan, Filip

Master's thesis / Diplomski rad

2022

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:235:301473>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-13**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Filip Frigan

Zagreb, 2022.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

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

Student:

Filip Frigan

Zagreb, 2022.

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

Zahvaljujem se svome mentoru prof. dr. sc. Ivici Garašiću, dipl. ing. na ukazanome povjerenju, strpljenju i stručnome vođenju te svim korisnim savjetima tijekom izrade diplomskoga rada.

Zahvaljujem se asistentici dr. sc. Maji Jurici, mag. ing. na velikoj pomoći, strpljenju i stručnome vođenju te svim korisnim savjetima tijekom izrade diplomskoga rada.

Posebno hvala Tomislavu Kelavi, dipl. ing. na velikoj pomoći i stručnome vođenju te svim korisnim savjetima tijekom izrade diplomskog rada.

Najviše se zahvaljujem svojoj obitelji i prijateljima na velikoj podršci tijekom izrade diplomskog rada i tijekom cijelog preddiplomskog i diplomskoga studija.

Filip Frigan



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



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

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum:	Prilog:
Klasa:	602-14/22-6/1
Ur. broj:	15-1703-22-

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **FILIP FRIGAN**

Mat. br.: 0035215148

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Optimizacija tehnologije zavarivanja cjevovoda automatiziranim postupcima**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Optimization of pipeline welding technology by means of automatic processes**

Opis zadatka:

U teorijskom dijelu proučiti specifičnosti zavarivanja cjevovoda velikih promjera s posebnim naglaskom na mogućnost primjene automatiziranih MAG i FCAW postupaka. Opisati primjenjive modificirane MAG postupke i njihove značajke te usporediti produktivnost pri zavarivanju korijenskog prolaza u odnosu na TIG i REL. Za FCAW postupak navesti glavne prednosti kao i način odabira dodatnog materijala u odnosu na osnovni materijal cijevi. Dati prikaz potrebne opreme za provedbu automatskog zavarivanja na terenu.

U eksperimentalnom dijelu na cijevi promjera D406 debljine stijenke 25mm od materijala S355 provesti optimizaciju tehnologije uzimajući u obzir varijacije različitih načina pripreme i oblika žlijeba. Detaljno opisati sve parametre te uz ispitivanje mehaničkih svojstava i homogenosti zavara provesti komparativnu analizu u odnosu na postojeću tehnologiju i predložiti smjernice za primjenu u realnim uvjetima. Zaključno, ekonomski kvantificirati nove tehnološke opcije za povećanje produktivnosti kao i potrebne prilagodbe za opremu i edukaciju operatera.

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

Zadatak zadan:
5. svibnja 2022.

Rok predaje rada:
7. srpnja 2022.

Predviđeni datum obrane:
18. srpnja do 22. srpnja 2022.

Zadatak zadao:
prof. dr. sc. Ivica Garašić

Predsjednica Povjerenstva:
prof. dr. sc. Biserka Runje

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA.....	V
POPIS KRATICA	VI
POPIS OZNAKA	VIII
SAŽETAK.....	IX
SUMMARY	X
1. UVOD.....	1
2. ZAVARIVANJE CJEVOVODA.....	2
2.1. Automatsko zavarivanje.....	2
2.2. Oprema za automatsko zavarivanje	4
3. MAG POSTUPAK ZAVARIVANJA	6
3.1. Osnove postupka	6
3.2. Žice za MAG zavarivanje	8
3.3. Uloga plinova pri MAG zavarivanju	8
3.4. Oprema i strojevi za zavarivanje.....	11
3.5. Metode prijenosa metala kod MAG zavarivanja	13
3.5.1. Prijenos metala kratkim spojevima	13
3.5.2. Prijenos metala mješovitim lukom.....	14
3.5.3. Prijenos metala štrcajućim lukom.....	15
3.5.4. Prijenos metala impulsnim strujama	16
3.5.5. Prijenos metala velikom gustoćom struje	16
4. MODIFICIRANI MAG POSTUPCI ZA ZAVARIVANJE CJEVOVODA.....	18
4.1. pipeSolution/MAG Orbital System (EWM Group).....	18
4.2. Surface tension transfer – STT.....	20
4.3. FastROOT	22
4.4. Low Spatter Control - LSC	23
4.4.1. LSC Universal.....	26
4.4.2. LSC Root	26
4.5. Flux Cored Arc Welding - FCAW	27
5. EKSPERIMENTALNI DIO	29
5.1. Priprema epruveta i žljebova.....	29
5.2. Strojevi i oprema za postupak zavarivanja	33
5.2.1. Korijen zavarenog spoja.....	33
5.2.2. Popuna i završni slojevi	34
5.3. Osnovni materijal	35
5.4. Dodatni materijal i zaštitna atmosfera	36
5.4.1. Korijen zavarenog spoja.....	36
5.4.2. Popuna i završni slojevi	36
5.5. Postupak zavarivanja.....	37

5.5.1. Epruveta V-1	37
5.5.1.1. Korijen zavarenog spoja	38
5.5.1.2. Popuna i završni slojevi	40
5.5.2. Epruveta U-1	42
5.5.2.1. Korijen zavarenog spoja	43
5.5.2.2. Popuna i završni slojevi	46
5.6. Provedena ispitivanja	47
5.6.1. Radiografsko ispitivanje	47
5.6.2. Analiza makroizbrusaka.....	49
5.6.3. Mjerenje tvrdoće Vickers metodom HV10.....	50
5.6.4. Statičko vlačno ispitivanje	53
5.6.5. Ispitivanje žilavosti metala zavara	54
5.6.6. Ispitivanje na savijanje.....	56
5.7. Isplativost korištenja različitih oblika žlijebova	58
5.8. Prilagodba opreme i projekcija uštede na većem projektu	60
6. ZAKLJUČAK.....	63
LITERATURA.....	64
PRILOZI.....	66

POPIS SLIKA

Slika 1.	Priprema spoja za zavarivanje korijena s vanjske (a) i unutarnje (b) strane [1]	3
Slika 2.	Usporedba učina pri ručnom, poluautomatskom i automatskom zavarivanju [2]...	4
Slika 3.	Shematski prikaz sustava i opreme za automatsko zavarivanje cjevovoda [1].....	5
Slika 4.	Shematski prikaz procesa (a) i uređaja (b) [4]	6
Slika 5.	Presjeci praškom punjenih žica [4]	8
Slika 6.	Kemijske reakcije pri MAG - CO ₂ zavarivanju čelika [4]	9
Slika 7.	Karakterističan oblik električnoga luka i njegova geometrija; u argonu (a) i ugljičnom dioksidu (b) [4].....	10
Slika 8.	Oblik penetracije zavara ovisno o upotrijebljenoj zaštitnoj atmosferi [4]	10
Slika 9.	Osnovna oprema za MAG postupak zavarivanja [4]	11
Slika 10.	Automatski MAG sustav za zavarivanje [7]	12
Slika 11.	Presjek pištolja u radu kod MAG zavarivanja [7].....	13
Slika 12.	Prijenos dodatnog metala kratkim spojevima: a) realni prikaz, b) shematski prikaz [7]	14
Slika 13.	Prijenos dodatnog metala mješovitim lukom: a) realni prikaz, b) shematski prikaz [7]	15
Slika 14.	Prijenos dodatnog metala štrcajućim lukom: a) realni prikaz, b) shematski prikaz [7]	15
Slika 15.	Prijenos dodatnog metala impulsnim strujama: a) realni prikaz, b) shematski prikaz [7]	16
Slika 16.	Rotacijski prijenos dodatnog metala velikom gustoćom struje: a) realni prikaz, b) shematski prikaz [7]	17
Slika 17.	Oscilogram <i>pipeSolution</i> postupka zavarivanja [8].....	19
Slika 18.	Zavareni spoj izveden <i>pipeSolution</i> postupkom u PF položaju [8].....	19
Slika 19.	Izbrusak korijenskog prolaza: a) celulozna elektroda – REL; b) STT postupak [3]	20
Slika 20.	Prikaz dinamičke karakteristike izvora struje [3].....	21
Slika 21.	Korijen zavara [2].....	22
Slika 22.	Lice korijena zavara [2].....	22
Slika 23.	Zavareni spoj dupleks i superaustenitnog čelika debljine 2 mm [6]	23
Slika 24.	Slijed odvajanja kapljice kod FastROOT postupka zavarivanja [2]	23
Slika 25.	Rezultati zavarivanja: a) isključena LSC opcija; b) uključena LSC opcija [10]...	24
Slika 26.	LSC kratki električni luk [11]	25
Slika 27.	Usporedba LSC i konvencionalnog postupka [11].....	25
Slika 28.	Shematski prikaz FCAW postupka [14].....	27
Slika 29.	Bešavna cijev od materijala S355J2H	29
Slika 30.	Skica epruvete za sučeljeni spoj cijevi s punom penetracijom [15].....	30
Slika 31.	Promjer (406,4 mm) i duljina (150 mm) polovice epruvete.....	30
Slika 32.	Debljina (24,56 mm) polovice epruvete	31
Slika 33.	Skica V-1 pripreme (lijevo) i U-1 pripreme (desno).....	31
Slika 34.	Tokarenje epruveta	32
Slika 35.	Tokarene epruvete V pripreme (lijevo) i U pripreme (desno).....	32
Slika 36.	Stroj za zavarivanje <i>Fronius TPS 400i PULSE</i>	33
Slika 37.	Specifikacijska pločica <i>Fronius TPS 400i PULSE</i>	34
Slika 38.	Stezna glava za prihvat epruveti.....	34
Slika 39.	Stroj za automatsko zavarivanje <i>Fronius TPS 400i</i>	35
Slika 40.	Specifikacija postupka zavarivanja epruvete V-1	38
Slika 41.	Epruveta V-1 prije zavarivanja.....	39

Slika 42.	Lice korijena epruvete V-1	39
Slika 43.	Korijen epruvete V-1	40
Slika 44.	Dubina žlijeba nakon zavarivanja korijena epruvete V-1	40
Slika 45.	Lice zavarenoga spoja epruvete V-1	41
Slika 46.	Nadvišenje zavarenoga spoja epruvete V-1	42
Slika 47.	Specifikacija postupka zavarivanja epruvete U-1	43
Slika 48.	Epruveta U-1 prije zavarivanja.....	44
Slika 49.	Lice korijena epruvete U-1	45
Slika 50.	Korijen epruvete U-1	45
Slika 51.	Dubina žlijeba nakon zavarivanja korijena epruvete U-1	45
Slika 52.	Lice zavarenog spoja epruvete U-1	46
Slika 53.	Nadvišenje zavarenog spoja epruvete U-1	47
Slika 54.	Radiogram zavarenog spoja epruvete V-1 (bez indikacija)	48
Slika 55.	Radiogram zavarenog spoja epruvete V-1 (s indikacijama: izolirani uključak troske 47 - 49).....	48
Slika 56.	Radiogram zavarenog spoja epruvete U-1 (bez indikacija)	48
Slika 57.	Radiogram zavarenog spoja epruvete U-1 (s indikacijama: uključci u nizu 0 - 15)	48
Slika 58.	Uređaj za brušenje	49
Slika 59.	Makroizbrusak epruvete V-1	49
Slika 60.	Makroizbrusak epruvete U-1	50
Slika 61.	Tvrdomjer Reichter TM12	50
Slika 62.	Shema mjerenja tvrdoće na uzorku V-1	51
Slika 63.	Grafički prikaz tvrdoća uzorka V-1	51
Slika 64.	Shema mjerenja tvrdoće na uzorku U-1	52
Slika 65.	Grafički prikaz tvrdoća uzorka U-1	52
Slika 66.	Univerzalna kidalica WPM EU 40 mod.....	53
Slika 67.	Uzorak epruvete V-1 nakon statičko vlačnog ispitivanja.....	53
Slika 68.	Uzorak epruvete U-1 nakon statičko vlačnog ispitivanja.....	54
Slika 69.	Uzorci epruvete V-1 nakon ispitivanja žilavosti metala zavara	55
Slika 70.	Uzorci epruvete U-1 nakon ispitivanja žilavosti metala zavara	55
Slika 71.	Hidraulična preša za savijanje uzoraka	56
Slika 72.	Uzorci epruvete V-1 nakon ispitivanja bočnoga savijanja	56
Slika 73.	Uzorci epruvete U-1 nakon ispitivanja bočnoga savijanja	57
Slika 74.	Stroj za glodanje cijevi [20]	60
Slika 75.	Obrada cijevi na terenu u 10 s [22]	61

POPIS TABLICA

Tablica 1. Usporedba brzine zavarivanja <i>pipeSolution</i> i konvencionalnog postupka zavarivanja [8]	20
Tablica 2. Usporedba penetracije različitih postupaka zavarivanja [11].....	26
Tablica 3. Usporedba korijenskih prolaza različitih postupaka zavarivanja [11]	27
Tablica 4. Vremenska analiza strojne obrade.....	32
Tablica 5. Kemijski sastav čelika S355J2H u % [16]	35
Tablica 6. Mehanička svojstva čelika S355J2H [16]	35
Tablica 7. Kemijski sastav žice <i>EMK 6</i> u % [17].....	36
Tablica 8. Mehanička svojstva žice <i>EMK 6</i> [17].....	36
Tablica 9. Kemijski sastav žice <i>DIAMONDSPARK 52 RC</i> u % [18].....	36
Tablica 10. Mehanička svojstva žice <i>DIAMONDSPARK 52 RC</i> [18].....	36
Tablica 11. Kemijski sastav žice <i>SC-71MJ</i> [19]	37
Tablica 12. Mehanička svojstva žice <i>SC-71MJ</i> [19].....	37
Tablica 13. Parametri zavarivanja korijena epruvete V-1	39
Tablica 14. Parametri zavarivanja popune i završnih slojeva epruvete V-1	41
Tablica 15. Parametri zavarivanja korijena epruvete U-1	44
Tablica 16. Parametri zavarivanja popune i završnih slojeva epruvete U-1	46
Tablica 17. Rezultati mjerenja tvrdoće na uzorku V-1.....	51
Tablica 18. Rezultati mjerenja tvrdoće na uzorku U-1.....	52
Tablica 19. Numerički rezultati statičko vlačnog ispitivanja	54
Tablica 20. Numerički rezultati ispitivanja žilavosti metala zavara.....	55
Tablica 21. Ekonomska usporedba epruvete V-1 i U-1.....	58
Tablica 22. Sumirane uštede U pripreme naspram V pripreme	59
Tablica 23. Prednosti i nedostaci korištenih oblika žlijebova	59
Tablica 24. Projekcija uštede zavarivanja plinovoda duljine 20 km	62

POPIS KRATICA

Kratika	Opis
Al	Aluminij
Ar	Argon
C	Ugljik
CO	Ugljikov monoksid
CO ₂	Ugljikov dioksid
CV	Konstantni napon (engl. Constant Voltage)
FastROOT	Modificirani MAG postupak temeljen na prijenosu metala kratkim spojevima
FCAW	Visokoučinski MAG postupak kod kojeg se koriste žice punjene praškom (eng. Flux cored arc welding)
He	Helij
HV10	Tvrdoća po Vickersu
LSC	Modificirani MAG postupak temeljen na prijenosu metala kratkim spojevima (engl. <i>Low Spatter Control</i>)
MAG	Elektrolučno zavarivanje taljivom elektrodom u zaštitnoj atmosferi aktivnog plina
MIG	Elektrolučno zavarivanje taljivom elektrodom u zaštitnoj atmosferi inertnog plina
Mn	Mangan
MZ	Metal zavara
OM	Osnovni materijal
O ₂	Kisik
P	Fosfor
PF	Vertikalni položaj zavarivanja prema gore
PG	Vertikalni položaj zavarivanja prema dolje

pWPS	Preeliminarna specifikacija postupka zavarivanja
REL	Ručno elektrolučno zavarivanje taljivom elektrodom
S	Sumpor
Si	Silicij
	Prijenos metala
STT	površinskom napetošću (engl. Surface tension transfer)
TIG	Elektrolučno zavarivanje netaljivom elektrodom u atmosferi inertnog plina
ZUT	Zona utjecaja topline

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
a_0	mm	Početna debljina poprečnog presjeka četvrtaste epruvete
B	mm	Širina epruvete za ispitivanje žilavosti
b_0	mm	Početna širina poprečnog presjeka četvrtaste epruvete
D	mm	Promjer
F_m	N	Maksimalna sila
HV	-	Tvrdoća po Vickersu
I	A	Jakost struje zavarivanja
k	-	Stupanj iskorištenja postupka zavarivanja
L	mm	Duljina epruvete za ispitivanje žilavosti
Q	kJ/mm	Unos topline
R_m	MPa	Vlačna čvrstoća
$R_{p0,2}$	MPa	Konvencionalna granica razvlačenja
S_0	mm ²	Početna površina poprečnog presjeka epruvete
t	s	Vrijeme
U	V	Napon električnoga luka
v	cm/min	Brzina zavarivanja
W	mm	Visina epruvete za ispitivanje žilavosti

SAŽETAK

Ovim radom obrađeni su postupci zavarivanja cjevovoda. Nabrojani su i opisani postupci zavarivanja cjevovoda koji se danas koriste kao najproduktivniji načini spajanja cjevovoda. Detaljno je opisan konvencionalni MAG (elektrolučno zavarivanje taljivom elektrodom u zaštiti aktivnog plina) postupak zavarivanja kao i njegovi modificirani postupci koji se očituju visokom produktivnošću u industriji.

U eksperimentalnom dijelu provedena su ispitivanja kvalitete zavara dobivenih MAG LSC i FCAW postupkom zavarivanja na dva različita pripremljena uzorka. Prvi uzorak je imao V pripremu spoja, dok je drugi uzorak imao U pripremu spoja. Ispitivanja su se sastojala od radiografskog ispitivanja, vizualne analize makroizbrusaka, mjerenje tvrdoće, ispitivanje na savijanje, čvrstoću i žilavost. Nakon provedenih ispitivanja dobiveni rezultati su uspoređeni te se detaljno analizirala produktivnost između dva navedena uzorka.

Ključne riječi: MAG, LSC, FCAW, produktivnost, V spoj, U spoj

SUMMARY

This thesis deals with pipeline welding procedures. The welding procedures of pipelines that are used today are listed and described as the most productive procedures of connecting pipelines. The conventional GMAW (gas metal arc welding) welding procedure as well as its modified processes which are manifested in high productivity in industry are listed and described in detail.

In the experimental part of this thesis, weld quality tests obtained by GMAW LSC and FCAW welding process on two differently prepared samples were performed. The first sample had a V joint preparation of the compound, while the second sample had a U joint preparation of the compound. The test consisted of radiographic examination, visual analysis of macro – grindings, hardness measurements, bend, tensile and impact test. After the tests, the results were compared and the productivity between the two samples was analyzed in detail.

Key words: GMAW, LSC, FCAW, productivity, V joint preparation, U joint preparation

1. UVOD

Zavarivanje je spajanje dvaju ili više istodobnih ili različitih materijala, taljenjem ili pritiskom s ili bez dodavanja dodatnog materijala. Kao izvori energije prilikom zavarivanja mogu se koristiti plinski plamen, električna struja, trenje i dr. Zavarivanje je jedna od najčešćih tehnologija koja se susreće u industriji. Zbog vrste materijala, kvalitete zavara, fleksibilnosti, učinkovitosti, proizvodnosti, mehanizacije, automatizacije i zahtjeva tržišta, razvijeno je niz postupaka zavarivanja. U zavarivanju cjevovoda velikih promjera i debljina koriste se elektrolučni postupci zavarivanja. Široku primjenu kod zavarivanja cjevovoda ima REL (ručno elektrolučno zavarivanje taljivom elektrodom) postupak zavarivanja zbog širokog izbora dodatnog materijala i zbog otpornosti na atmosferske utjecaje. Kao alternativa REL postupku zavarivanja ističe se zavarivanje taljivom elektrodom u zaštitnoj atmosferi poznat kao MIG/MAG postupak zavarivanja koji se donedavno manje primjenjivao prilikom zavarivanja cjevovoda zbog osjetljivosti zaštitne plinske atmosfere pri radu na otvorenome. To je jedna vrsta postupka zavarivanja koji omogućava zavarivanje širokog spektra materijala, posebno čelika srednjih i velikih debljina. Često se koristi za pojedinačnu i masovnu proizvodnju zbog prihvatljive cijene. Ujedno se navedenim postupkom mogu obavljati i reparaturna zavarivanja te zavarivanja u prisilnim položajima. Postupak je pogodan za automatizaciju i robotizaciju. MAG postupak zavarivanja ima daleko veću učinkovitost i produktivnost nego ostali postupci zavarivanja. Zbog današnje proizvodnje koja je usmjerena prema proizvodnji visoke učinkovitosti, razvijeni su visokoučinski postupci MAG zavarivanja. Neki od visokoučinskih MAG postupaka zavarivanja su FCAW, Tandem postupak, LSC, STT itd.

Veliku ulogu u zavarivanju ima i vrsta pripreme spoja koja se zavaruje. Tako prilikom zavarivanja cjevovoda većih promjera i većih debljina, primjenom odgovarajućeg oblika spoja značajno se može smanjiti vrijeme zavarivanja, a time i unos topline što rezultira manjim toplinskim naprezanjima u materijalu. U ovome radu obrađena je tehnologija zavarivanja cjevovoda MAG LSC i FCAW postupkom zavarivanja na dva različita oblika spoja.

2. ZAVARIVANJE CJEVOVODA

Izgradnja modernih cjevovoda za transport fluida zahtjeva primjenu sofisticiranijih i modernijih tehnologija zavarivanja. Rokovi i trase diktiraju tempo izgradnje cjevovoda koji ponekad znaju biti fizički preteški za zavarivače. Vremenski uvjeti, rad u prisilnim položajima, toplina od predgrijavanja cijevi, brušenje međuprolaza i čišćenje od troske stvaraju vrlo teške radne uvjete koji su neophodni kako bi se osigurala kvaliteta zavarenoga spoja. U takvim uvjetima potrebno je zadržati koncentraciju i osigurati kvalitetu zavarivanja. Kako to zna biti fizički nemoguće, nastoji se konvencionalne ručne tehnike zamijeniti sustavima za automatsko zavarivanje pri čemu je fizičko, odnosno radno opterećenje zavarivača znatno manje [1].

2.1. Automatsko zavarivanje

S povećanjem intenziteta izgradnje cjevovoda, povećao se i razvoj sustava za automatsko elektrolučno zavarivanje. Tako postoji orbitalno TIG automatsko zavarivanje za cijevi malih promjera koje se koristi u procesnoj industriji i kotlogradnji. Međutim, za zavarivanje cijevi velikih promjera i većih debljina koristi se MAG postupak zavarivanja. Kvalitetan izvor struje, glave za zavarivanje (često sadrži i više pištolja), sustavi za dovod žice, vodilice i upravljačka jedinica čine samo jedan dio takvog sustava. Operater je zadužen za pozicioniranje sustava, puštanje u pogon te kontrolu pri radu. Osim osnovnih parametara zavarivanja potrebno je prilagoditi i plinske mješavine koje utječu na samu geometriju zavarenoga spoja [1].

Danas se koriste sofisticiraniji mikroprocesorski upravljani izvori struje koji posjeduju algoritam odnosno softver koji regulira prijenos metala u električnom luku. Oni ujedno osiguravaju stabilnost procesa zavarivanja. Takvi sustavi omogućuju i njihanje što je od velikog značaja kod zavarivanja popune i zavarivanja završnih prolaza. Za automatske se sustave razvijaju i posebni dodatni materijali poput praškom punjene žice te posebni omjeri plinskih mješavina [1].

Prednosti automatskog zavarivanja su [1]:

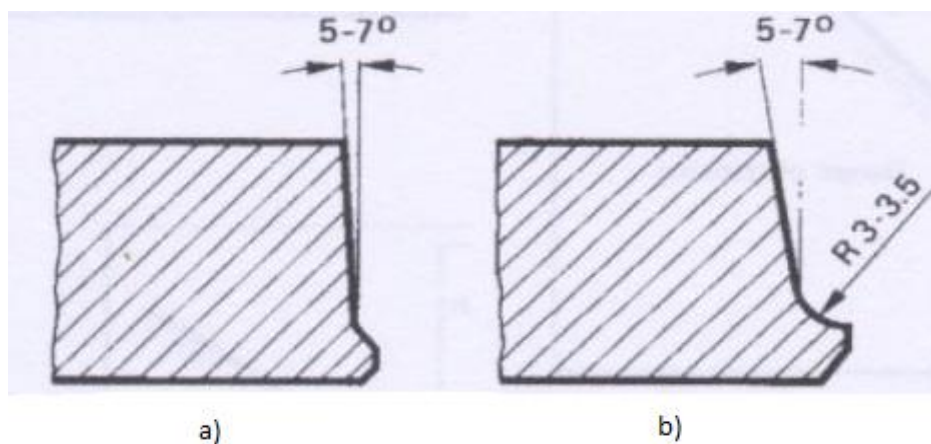
- veća količina rastaljenoga materijala u jedinici vremena
- veća brzina zavarivanja
- veća produktivnost
- manji broj grešaka (ujedno i manji broj popravaka)
- bolja kontrola geometrije zavara
- bolja kontrola unosa topline (posebno bitno kod čelika visoke čvrstoće)

- veća iskoristivost dodatnog materijala (nema bacanja polupotrošenih elektroda ni rezanja kraja žice)
- eliminacija nastavaka jer je moguće zavarivati u jednome prolazu
- manje brušenje u odnosu na zavarivanje celuloznim elektrodama kod REL postupka
- neovisnost o tržištu zavarivača (teško naći dovoljan broj REL zavarivača)
- manja količina vodika u metalu zavara u odnosu na celulozne elektrode (pojava hladnih pukotina)
- nema posebnih uvjeta za čuvanje i pripremanje dodatnog materijala.

Nedostaci automatskog zavarivanja su [1]:

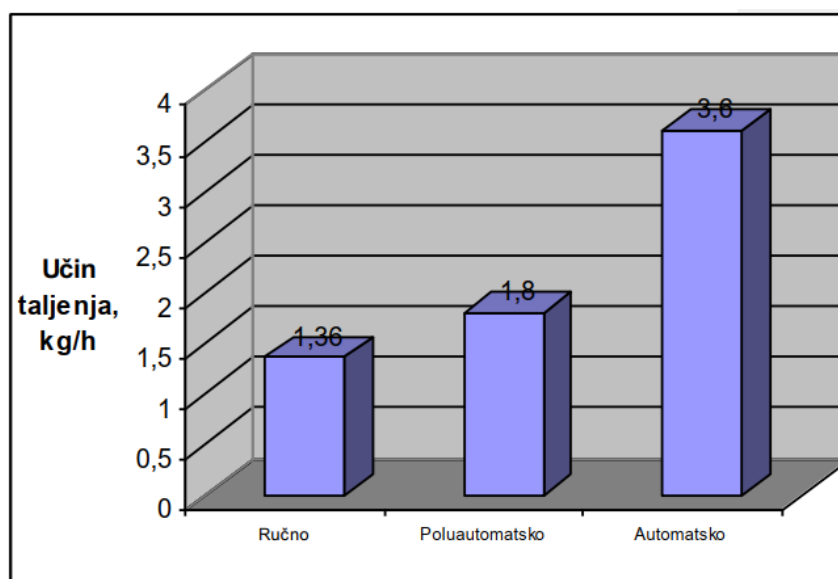
- skupa i složena oprema
- ovisnost primjene o složenosti trase jer za specijalne točke još uvijek su neophodni zavarivači
- mogući problemi s plinskom zaštitom kod jakog vjetrova i lošeg vremena
- veći zahtjevi za održavanjem opreme
- zahtjeva se jaka logistika.

Za uvođenje automatskog MAG zavarivanja u poduzeće potrebna su velika ulaganja u radne stanice i logistiku. Također je potrebna i obuka operatera. Priprema spoja kod automatskog zavarivanja mora biti jako kvalitetna jer nema fleksibilnosti ako postoji smaknuće cijevi ili nejednolik razmak između cijevi. Prilikom automatskog zavarivanja cjevovoda ne primjenjuje se klasična V priprema kao kod zavarivanja REL postupkom, nego se primjenjuje priprema prikazana na slici 1. gdje se razlikuje zavarivanje korijena s unutarnje i vanjske strane. Za precizniju pripremu primjenjuju se unutarnji centralizeri [1].



Slika 1. Priprema spoja za zavarivanje korijena s vanjske (a) i unutarnje (b) strane [1]

Na slici 2. dan je prikaz učina taljenja kod ručnog, poluautomatskog i automatskog zavarivanja.



Slika 2. Usporedba učina pri ručnom, poluautomatskom i automatskom zavarivanju [2]

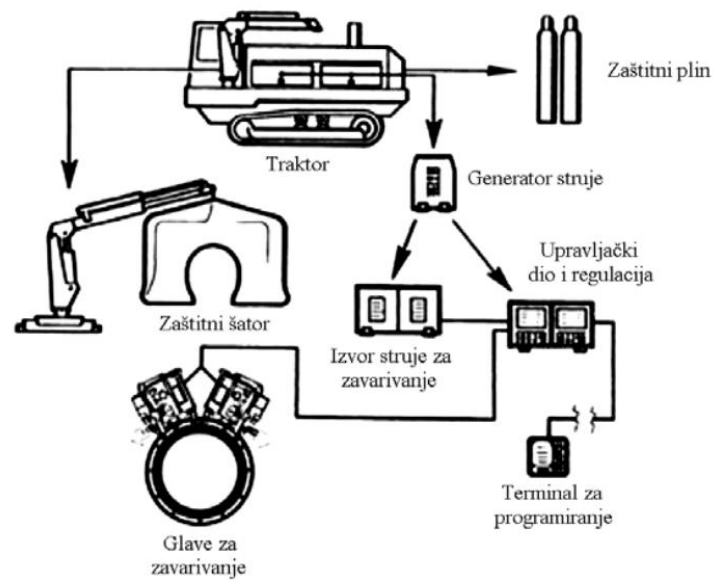
Vidi se kako automatski postupak ima najveći učin taljenja, najmanji gubitak osnovnog materijala i najveći operativni faktor. U prijevodu, automatski postupak zavarivanja ima najveću iskoristivost uređaja i opreme [2].

2.2. Oprema za automatsko zavarivanje

Veliku važnost imaju oprema i izvori struje kod automatskog zavarivanja. Sustav za automatsko zavarivanje vrlo je robustan i sastoji se od [1]:

- traktora koji služi za transport i manipulaciju (na njemu se nalaze generatori za struju, izvori struje, spremnici zaštitnih plinova i dr.)
- agregat za struju pokretan diesel motorom
- izvor struje za zavarivanje (zahtijeva se visoka intermitencija jer se zavaruje bez prekida)
- kontrolni sustav koji objedinjuje upravljanje zavarivanjem i gibanjem glave za zavarivanje
- terminal za programiranje
- glava za zavarivanje (pištolj, dodatni materijal...)
- spremnik zaštitnih plinova s mješaćem
- zavarivački šator
- sustav za pozicioniranje i centriranje cijevi

Na slici 3. dan je shematski prikaz sustava i opreme za automatsko zavarivanje.



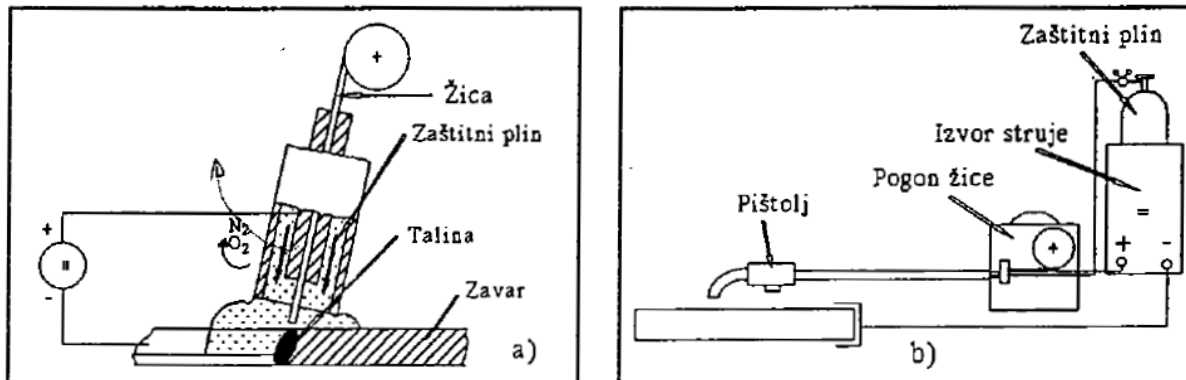
Slika 3. Shematski prikaz sustava i opreme za automatsko zavarivanje cjevovoda [1]

3. MAG POSTUPAK ZAVARIVANJA

MAG postupak zavarivanja je elektrolučni postupak zavarivanja u zaštitnoj atmosferi aktivnoga plina gdje se između radnoga komada i taljive, kontinuirane elektrode (žice) uspostavlja električni luk. Primjena ovoga postupka započela je u 20. stoljeću. U početku je bio namijenjen za zavarivanje aluminija, aluminijskih legura i ostalih obojenih metala. S razvojem aktivnih plinova i plinskih mješavina došlo je do smanjenja cijene zavarivanja te je to rezultiralo većom primjenom MAG postupka zavarivanja. MAG postupak zavarivanja danas je jedan od najčešćih postupaka zbog većih brzina zavarivanja, većeg depozita dodatnog materijala, jednostavnog rukovanja i automatizacije u usporedbi s ostalim elektrolučnim postupcima zavarivanja [3].

3.1. Osnove postupka

MAG postupak zavarivanja odvija se u zaštitnoj atmosferi aktivnoga plina (CO_2 i mješavine). Električni se luk održava između radnoga komada i taljive, kontinuirano dobavljane žice koja je u pravilu spojena na pozitivni (+) pol izvora električne energije. Na slici 4. dan je shematski prikaz procesa i uređaja [4].



Slika 4. Shematski prikaz procesa (a) i uređaja (b) [4]

Kroz cijevni paket pogonski sistem dodaje žicu koja je ujedno i elektroda. Oslobađa se toplina u električnom luku te ta ista toplina tali dodatni materijal koji popunjava pripremljeni žlijeb spoja. Postupak može biti poluautomatski (dodavanje žice je mehanizirano, a vođenje pištolja je ručno) i automatski gdje je postupak zavarivanja u potpunosti mehaniziran. Kod potpuno mehaniziranog postupka razlikuje se slučaj gdje je pištolj pokretan mehanizmom, a radni komad miruje dok kod drugog slučaja pištolj miruje, a radni komad ima mehanizirano gibanje [4].

Prilikom zavarivanja u situacijama gdje je dovodno crijevo žice dulje od 5 m obično se primjenjuje dodatni pogon za dodavanje žice koji je smješten u pištolju za zavarivanje. Navedeni pogon naziva se „*push – pull*“. Uglavnom se koristi kada se zavaruje tanjim žicama promjera 0,6 i 0,8 mm ili kada se radi s žicama koje su od mekših materijala npr. Al i njegove legure. Dodatni „*push – pull*“ pogon sprječava gužvanje žice unutar dovodnog crijeva [4].

Glavne prednosti MAG zavarivanja su [5]:

- zavarivanje raznorodnih materijala i različitih debljina materijala
- mogućnost zavarivanja u svim položajima
- visoka učinkovitost samoga postupka
- jednostavna obuka zavarivača
- lako čišćenje zavara
- unos vodika u zavareni spoj je malen (u većini slučajeva manji od 5 ml/100 g metala zavara)
- manje deformacije konstrukcija
- jeftina automatizacija
- korištenje raznih plinskih mješavina
- mogućnost primjene praškom punjenih žica.

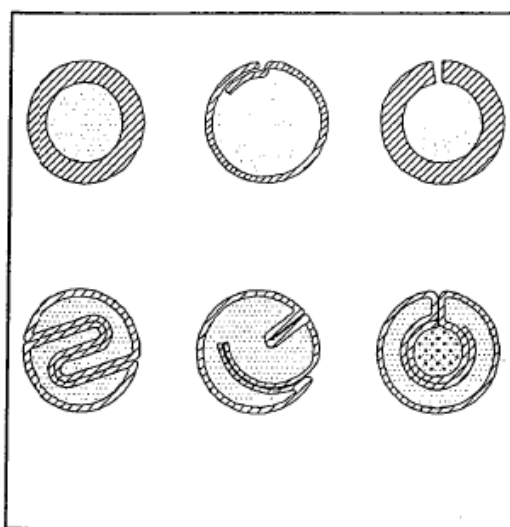
Glavni nedostaci MAG zavarivanja su [5]:

- nemogućnost zavarivanja u prisilnim položajima prilikom upotrebe aksijalnoga prijenosa metala
- kod prijenosa metala štrcajućim lukom potrebno je koristiti skuplje plinske mješavine
- kod terenskih radova potrebno je obratiti pozornost na uvjete zavarivanja (vjetar, vlaga i sl.)
- problemi kod zavarivanja aluminija u smislu dovođenja dodatnoga materijala
- moguće pojave grešaka u zavarenim spojevima
- oprema i uređaji su složene konstrukcije.

3.2. Žice za MAG zavarivanje

Najčešće korišteni dodatni materijal kod MAG postupka zavarivanja su pune žice promjera od 0,6 do 2,4 mm. Zbog boljeg električnog kontakta i zaštite od korozije površine žica su pobakrene ili poniklane. Žice su namotane na kolut te njihova površina mora biti potpuno glatka i dimenzijski vrlo točna [4].

Nadalje, kao dodatni materijal mogu se koristiti i praškom punjene žice poznate pod nazivom FCAW (engl. *Flux Cored Arc Welding*). Navedene žice se mogu koristiti uz plinsku zaštitu dok se neke vrste mogu koristiti i bez plinske zaštite gdje žica sama sebi stvara zaštitu raspadanjem jezgre. Na slici 5. dan je prikaz različitih poprečnih presjeka praškom punjenih žica [4].

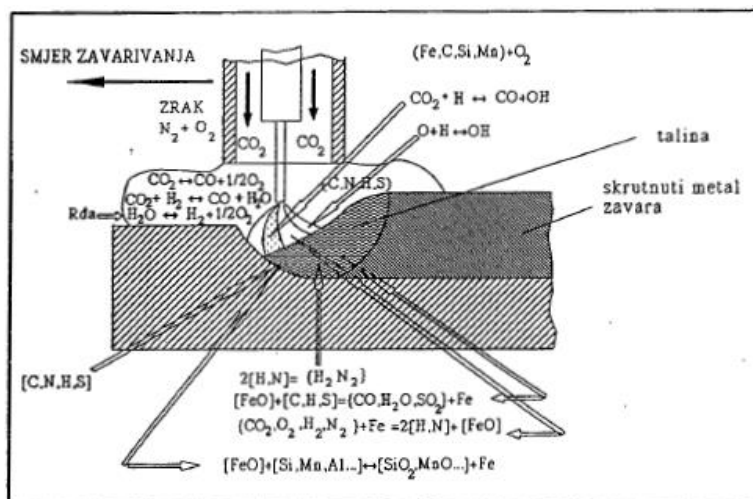


Slika 5. Presjeci praškom punjenih žica [4]

3.3. Uloga plinova pri MAG zavarivanju

Uloga plinova pri MAG zavarivanju je da štiti rastaljeni metal zavara odnosno da sprječava reakciju rastaljenog metala s okolnom atmosferom. Plin se dovodi kroz posebnu sapnicu na pištolju koja se nalazi oko kontaktne cjevčice. Ionizacijom plina osigurava se vodljivi prostor za održavanje električnoga luka. Kod zavarivanja nelegiranih konstrukcijskih čelika primjenjuju se aktivni plinovi poput čistog CO_2 ili plinske mješavine $\text{Ar}/\text{CO}_2/\text{O}_2$. Kod zavarivanja s navedenim plinom ili plinskim mješavinama dolazi do reakcije između CO_2 i rastaljenog metala zavara. Pri nižim temperaturama CO_2 je inertan dok se na povišenim temperaturama (iznad $1600\text{ }^\circ\text{C}$) disocira u ugljični monoksid (CO) i slobodni kisik koji u tom slučaju reagira s rastaljenim metalom zavara. Tada dolazi do ponovnog vezivanja u molekulu CO_2 i time se oslobađa toplina koja rezultira većem provarivanju [4].

Legiranjem dodatnog materijala (žice) dezoksidansima poput Si i Mn može se spriječiti stvaranje oksida prilikom zavarivanja nelegiranih konstrukcijskih čelika. Njihovo djelovanje prikazano je na slici 6. U žici se nalazi više tih elemenata od potrebne količine za dezoksidaciju. Tipičan omjer navedenih elemenata u žici je 1:2 dok je njihov udio u žici od 0,8 do 1,6 % [4].

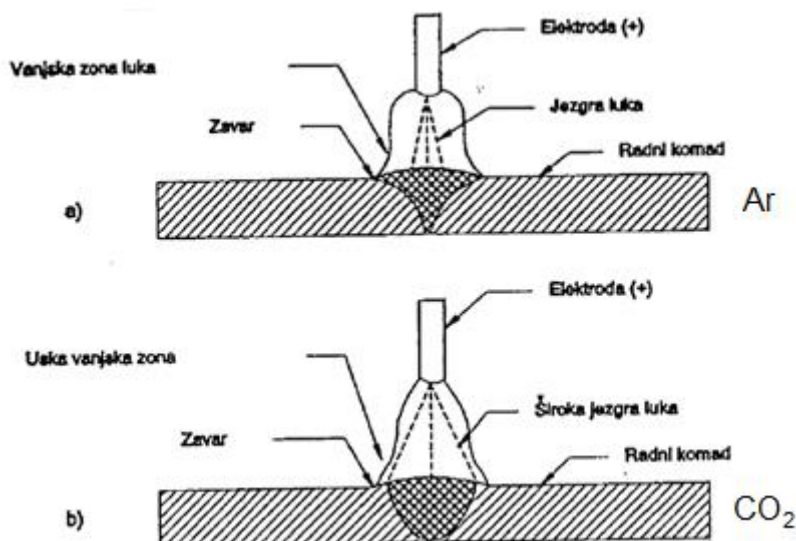


Slika 6. Kemijske reakcije pri MAG - CO₂ zavarivanju čelika [4]

Utjecaj zaštitnih plinova odražava se na [4]:

- električno – fizikalna svojstva električnoga luka i time na prijenos metala s elektrode na radni komad
- metalurške procese u rastaljenom metalu zavara
- tehnološke parametre

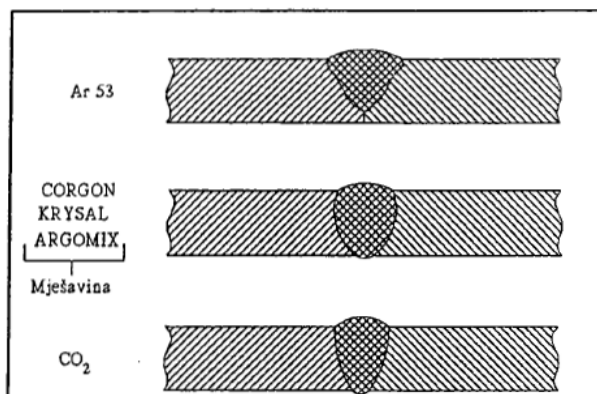
Također, specifična gustoća zaštitnoga plina ima velik utjecaj na zaštitu mjesta zavarivanja od utjecaja okolišne atmosfere. Tako argon, koji je najgušći od svih inertnih plinova, (deset puta gušći od helija) i ugljični dioksid koji je za 1/3 gušći od argona stvaraju dobar zaštitni omotač mjesta zavarivanja. Važno je napomenuti kako toplinska vodljivost zaštitne atmosfere izravno utječe na radijalne gubitke što naposljetku utječe na oblik jezgre luka i na njegovu geometriju. Tako će argon koji ima nisku toplinsku vodljivost dati usku zonu jezgre luka dok će CO₂ koji ima veću toplinsku vodljivost dati širu jezgru luka (slika 7.). Navedeno se najviše odražava na oblik penetracije u osnovnome materijalu [4].



Slika 7. Karakterističan oblik električnoga luka i njegova geometrija; u argonu (a) i ugljičnom dioksidu (b) [4]

Ujedno se i na slici 7. vidi različita geometrija zavara upotrebom različitih zaštitnih atmosfera. Upotrebom argona osigurava se penetracija uz koju se zahtijeva točnost pripreme spoja i vođenje pištolja. Za razliku od argona, zaštitna atmosfera ugljičnog dioksida osigurava širu penetraciju koja može pokriti greške pripreme spoja i vođenje pištolja, ali se zato dobiva nepovoljni oblik zavara [4].

Osim upotrebe čistih plinova mogu se upotrebljavati i plinske mješavine. U pogodnome omjeru plinska mješavina može zadovoljiti zahtjeve poput penetracije, izgleda zavara, sklonost greškama i sl. Danas jedan od najčešće korištenih zaštitnih plinova pri MAG zavarivanju nelegiranih konstrukcijskih čelika je plinska mješavina argona i ugljičnog dioksida u omjeru 82 % Ar i 18 % CO₂. Na slici 8. dan je prikaz oblika zavarenih spojeva upotrebom različitih zaštitnih atmosfera [4].



Slika 8. Oblik penetracije zavara ovisno o upotrijebljenoj zaštitnoj atmosferi [4]

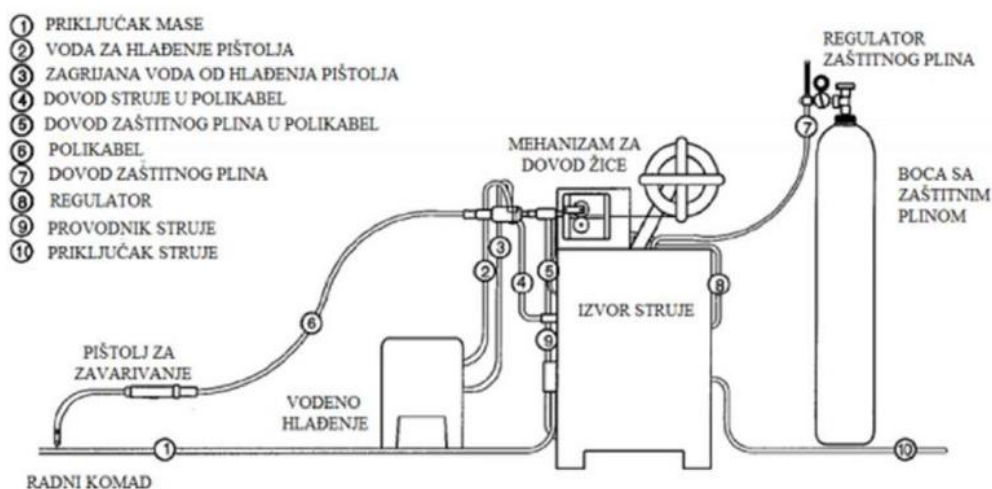
3.4. Oprema i strojevi za zavarivanje

Oprema za MAG postupak zavarivanja je u konačnici skuplja nego za npr. REL postupak zavarivanja. Izvor struje kao najskuplji dio opreme regulira kompletnu cijenu. Njegova cijena ovisi o njegovim mogućnostima poput zavarivanja raznorodnih materijala, zračno ili vodeno hlađenje pištolja, ručno ili sinergijsko podešavanje parametara. Uz to potrebna je i odgovarajuća oprema za zavarivača kao što je maska za zavarivanje, zavarivačko odijelo, cipele i rukavice [6].

Osnovnu opremu čini [6]:

- izvor istosmjerne struje s blagopadajućom statičkom karakteristikom CV (engl. Constant Voltage)
- uređaj za hlađenje
- polikabel
- regulator protoka plina
- boca sa zaštitnim plinom
- pištolj za zavarivanje
- dodavač žice.

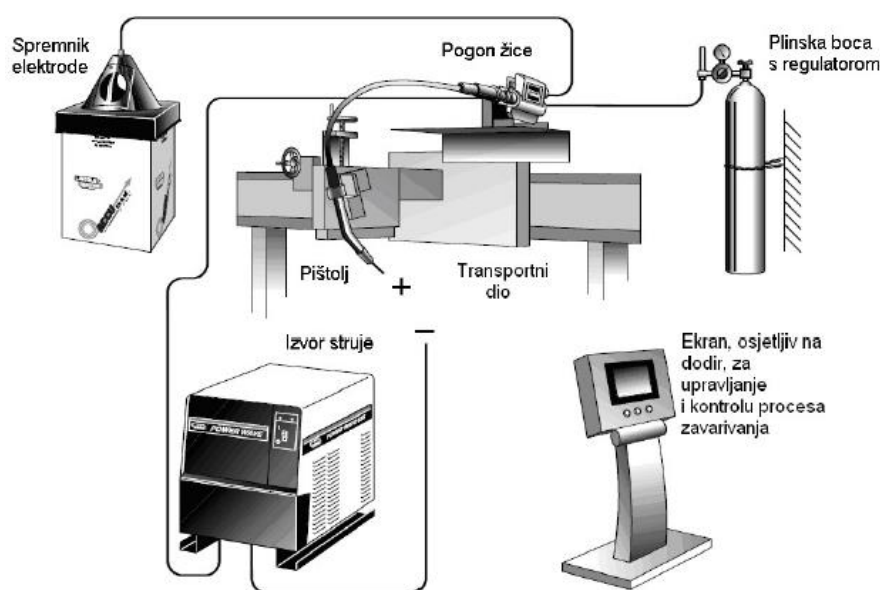
Na slici 9. dan je prikaz osnovne opreme za MAG postupak zavarivanja.



Slika 9. Osnovna oprema za MAG postupak zavarivanja [4]

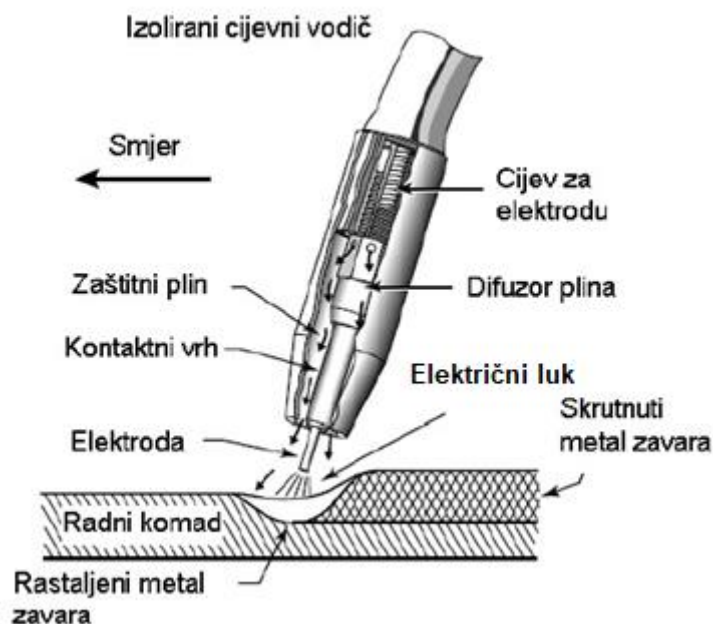
Osnovnu opremu industrijskog, automatskog MAG sustava čine (slika 10.) [7]:

- izvor struje
- oprema za dovod žice
- plinska boca s pokazateljem tlaka i regulatorom protoka
- spremnik sredstva za hlađenje pištolja
- izolirani polikabel
- pištolj za zavarivanje
- sustav za automatsko pomicanje pištolja
- zaštitna oprema za djelatnike.



Slika 10. Automatski MAG sustav za zavarivanje [7]

Zavarivanje počinje procesom zatvaranja strujnog kruga između radnog komada i taljive žice. Taljiva žica je dodatni materijal, a spojena je na pozitivni pol, dok je radni komad spojen na negativni pol istosmjernog izvora struje. Kontakt se uspostavlja pomoću kontaktne cjevčice kroz koju struja prolazi samo kroz prvih nekoliko centimetara žice. Na pištolju se još nalazi sapnica te keramički, odnosno plastični prsten. Namijenjeni su za raspršivanje i usmjeravanje zaštitnoga plina. Mehanizam za dovođenje žice aktivira se pritiskom na prekidač te kontinuirano dovodi žicu na mjesto zavarivanja. Pri većim strujama zavarivanja, preporučuje se korištenje vodeno hlađenih pištolja. Na slici 11. nalazi se shematski prikaz presjeka pištolja u radu kod MAG zavarivanja [6].



Slika 11. Presjek pištolja u radu kod MAG zavarivanja [7]

3.5. Metode prijenosa metala kod MAG zavarivanja

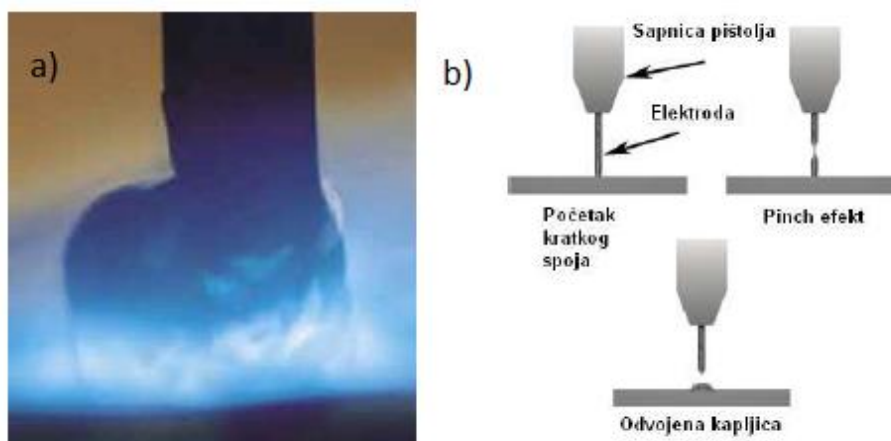
Postoji nekoliko metoda prijenosa metala kod MAG postupka zavarivanja. Te metode ovise o mnogim čimbenicima kao što su jakost struje, napon električnog luka, vrsta i promjer dodatnog materijala, vrsta zaštitne atmosfere i dr. Dijele se na [7]:

- prijenos metala kratkim spojevima
- prijenos mješovitim lukom
- prijenos štrcajućim lukom
- prijenos impulsnim strujama
- prijenos velikom gustoćom struje.

3.5.1. Prijenos metala kratkim spojevima

Zbog periodički ponavljanih kratkih spojeva dolazi do depozicije dodatnog materijala (žice). Jedna od glavnih značajki ovoga prijenosa je nizak unos topline. Prijenos dodatnog materijala vrši se pri fizikalnom kontaktu žice i radnoga komada. Period u kojemu dolazi do odvajanja jedne kapljice metala dijeli se na dvije faze, a to su faza kratkog spajanja i faza električnog luka. Kapljica se odvaja u prvoj fazi gdje se vrh elektrode nalazi u kontaktu s rastaljenim metalom pri čemu dolazi do porasta struje i povećanju magnetske sile koja se javlja na kraju elektrode zbog djelovanja elektromagnetskog polja i steže kapljicu taline. Navedeni proces poznat je još pod nazivom „*pinch – effect*“. Kapljica metala kod metode prijenosa kratkim

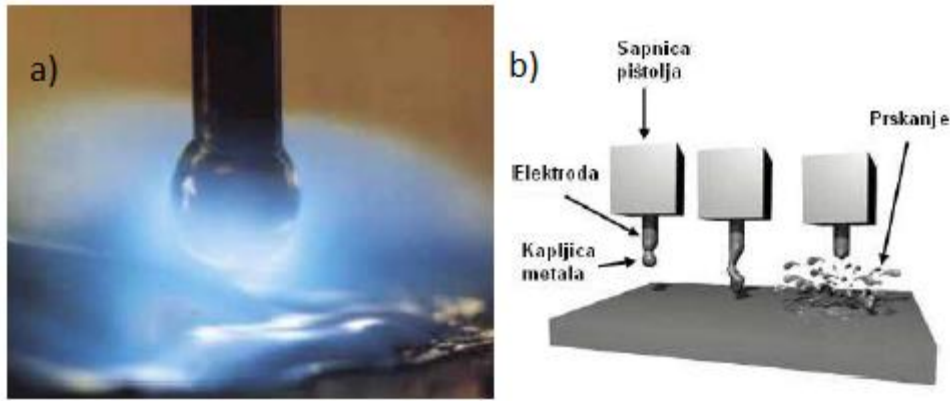
spojevima je veća od promjera dodatnog materijala. Broj kratkih spojeva u sekundi iznosi od 50 do 250. Ova metoda prijenosa metala moguća je kod malih gustoća struje (do 190 A) i nižim vrijednostima napona (15 – 23 V) za žicu od 0,6 do 1,2 mm. Koristi se za zavarivanje tanjih materijala i korijena kod debljih materijala. Zavarivanje se najčešće vrši u zaštiti ugljičnog dioksida i njegovih plinskih mješavina. Na slici 12. dan je prikaz prijenos dodatnog materijala kratkim spojevima [7].



Slika 12. Prijenos dodatnog metala kratkim spojevima: a) realni prikaz, b) shematski prikaz [7]

3.5.2. Prijenos metala mješovitim lukom

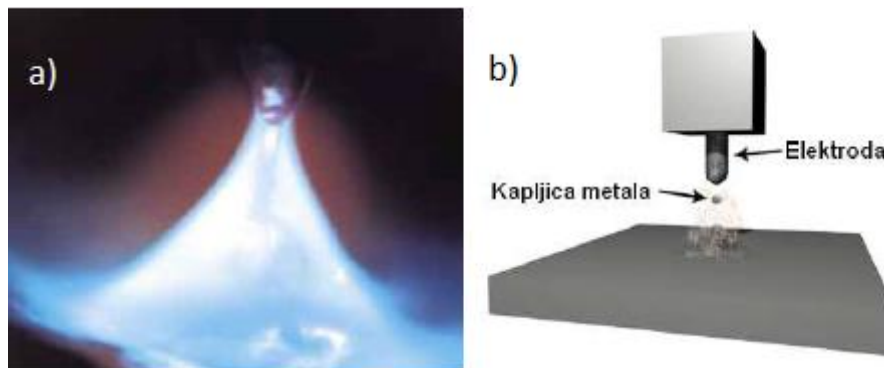
Prijenos metala mješovitim lukom odvija se na način da se na vrhu elektrode stvori krupna kapljica koja se pod utjecajem sila u električnome luku odvaja i pada u talinu bez pojave kratkoga spoja. Odvija se u većem području struje (170 - 230 A) i napona (17 - 23 V) ovisno o promjeru dodatnoga materijala. Promjer kapljice je također veći od promjera dodatnog materijala kao i kod prijenosa kratkim spojevima. Prijenos mješovitim lukom se teško kontrolira što se najviše očituje intenzivnim prskanjem i slabljenim kvašenjem taline što rezultira ne spajanjem materijala i pojavu pukotina. Posebno je izražen kod zavarivanja u zaštiti čistog CO₂ i mješavina s pretežnim udjelom CO₂. Na slici 13. dan je prikaz prijenos metala mješovitim lukom [7].



Slika 13. Prijenos dodatnog metala mješovitim lukom: a) realni prikaz, b) shematski prikaz [7]

3.5.3. Prijenos metala štrcajućim lukom

Prijenos metala štrcajućim lukom odvija se na način da se dovedeni dodatni materijal tali u području veće struje (preko 220 A) i napona (25 – 40 V). Stvara se mlaz kapljica koje „putuju“ uzduž električnog luka i velikom snagom i brzinom uranjaju u rastaljeni osnovni materijal. U sekundi se mogu pojaviti i do nekoliko stotina kapljica. Na slici 14. dan je prikaz prijenosa metala štrcajućim lukom [7].

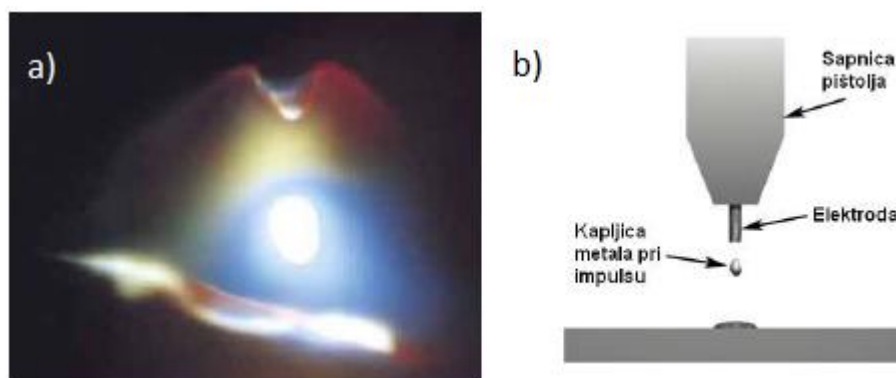


Slika 14. Prijenos dodatnog metala štrcajućim lukom: a) realni prikaz, b) shematski prikaz [7]

Kod prijenosa štrcajućim lukom promjer kapljice je manji od promjera dodatnog materijala s kojim se zavaruje. Karakteristika ovoga prijenosa je visok unos topline i količina depozita dodatnog materijala te se stoga često koristi kod zavarivanja debljih materijala. Nije pogodan za zavarivanje u prisilnim položajima (vertikale, nadglavno i sl.). Može se koristiti široki spektar promjera dodatnog materijala uz plinsku zaštitu u kojoj je pretežni udio argon [7].

3.5.4. Prijenos metala impulsnim strujama

Prijenos metala impulsnim strujama je kontroliranija varijanta prijenosa štrcajućim lukom. Periodički se izmjenjuju dvije jakosti struje gdje se dodatnim uređajem uključi maksimalna jakost struje kod koje dolazi do kidanja kapljice, a nakon toga vrijednost struje pada na minimalnu vrijednost koja je dovoljna da održava stabilnost električnog luka i omogućuje konstantno dovođenje topline na mjesto zavarivanja. U sekundi se izvrši nekoliko stotina impulsnih ciklusa dok se pri svakom idealnom slučaju odvoji jedna kapljica dodatnog materijala. Na slici 15. dan je prikaz prijenosa impulsnim strujama [7].



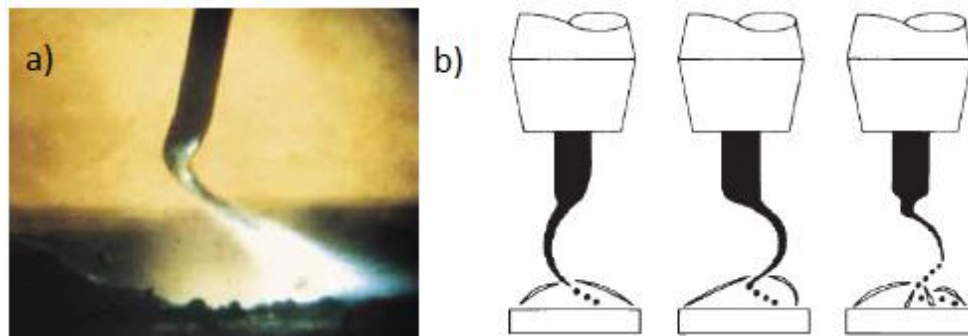
Slika 15. Prijenos dodatnog metala impulsnim strujama: a) realni prikaz, b) shematski prikaz [7]

Prosječna jakost struje je manja od prijelazne iz kratkoga u štrcajući luk te se na taj način izbjegava nepravilan prijenos grubim kapima. Navedeni prijenos metala može se primijeniti za sve položaje zavarivanja uz plinsku zaštitu argona i plinskih mješavina s pretežnim udjelom argona [7].

3.5.5. Prijenos metala velikom gustoćom struje

Prijenos metala velikom gustoćom struje postiže se kombinacijom struje, brzinom dovođenja dodatnog materijala, napona, slobodnog kraja žice i sastavom plinske zaštite. Navedenim prijenosom metala mogu se postići veće količine depozita dodatnog materijala (5 – 25 kg/h) s praktičnom primjenom od 18 kg/h. Dijeli se na rotacijski i nerotacijski prijenos [7].

Rotacijski prijenos metala se postiže kombinacijom parametara kao što su velika brzina dovođenja dodatnog materijala, dugi slobodni kraj žice i upotreba plinske zaštite koja sadrži argon, ugljični dioksid i kisik. Protjecanjem struje kroz dodatni materijal nastaju elektromehaničke sile koje uzrokuju krivudanje rastaljenog metala po spiralnoj putanji kod kojega se kapljica odvaja velikim brzinama. Na slici 16. dan je prikaz rotacijskog prijenosa metala [7].



Slika 16. Rotacijski prijenos dodatnog metala velikom gustoćom struje: a) realni prikaz, b) shematski prikaz [7]

Nerotacijski prijenos metala postiže se bez vrtnje vrha dodatnog materijala. Vrtnju je moguće spriječiti primjenom plinske zaštite koja ima veću toplinsku vodljivost jer je tada omogućena izraženija površinska napetost rastaljenog kraja dodatnog materijala. Brzina odvajanja kapljice je manja nego kod rotacijskog prijenosa te količina depozita dodatnog materijala iznosi otprilike od 4,5 do 13,5 kg/h [7].

4. MODIFICIRANI MAG POSTUPCI ZA ZAVARIVANJE CJEVOVODA

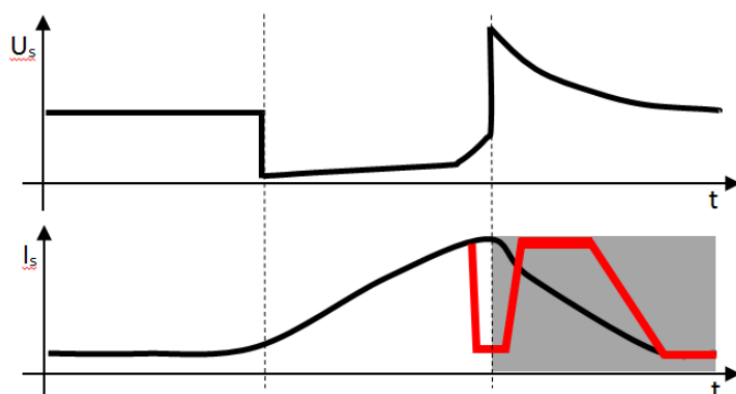
Razvoj inverterskih izvora struje omogućio je i razvijanje modificiranih MAG postupaka zavarivanja te modifikacije načina prijenosa metala u električnome luku. Glavni ciljevi su postizanje bolje kvalitete zavarenih spojeva, bolja i veća produktivnost, veći depozit dodatnog materijala i optimizacija troškova [3].

4.1. pipeSolution/MAG Orbital System (EWM Group)

pipeSolution vrsta je modificiranog MAG postupka zavarivanja tvrtke EWM Group. Postupak je namijenjen za zavarivanje cjevovoda, cijevnih konstrukcija i korijenskih prolaza. Korijenski prolazi mogu biti izvedeni sa i bez zračnoga raspora između materijala, a temelji se na prijenosu metala kratkim spojevima. Glavne karakteristike ovoga postupka su [8]:

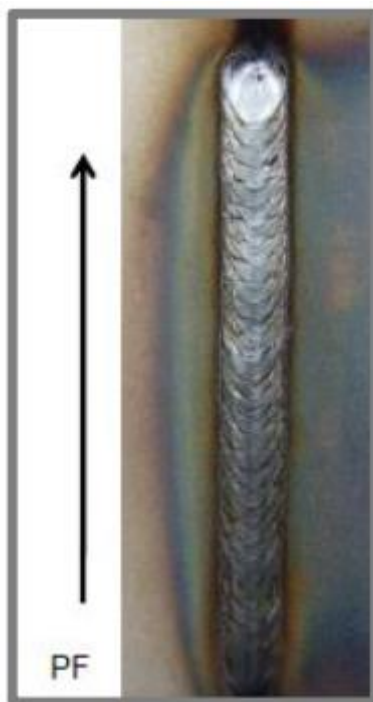
- mogućnost primjene na cijevima i limovima svih debljina
- velika brzina zavarivanja, kvaliteta zavarenoga spoja usporediva je s TIG postupkom
- stabilnost procesa
- primjena punih i praškom punjenih žica
- mogućnost zavarivanja u svim položajima, optimalna viskoznost taline u nadglavnom položaju
- stabilnost procesa i kod dužih paketa gorionika bez dodatnih senzora
- smanjena osjetljivost na promjenu duljine slobodnoga kraja žice
- manja potreba za kvalitetnom pripremom spoja
- optimalna kombinacija sa puls postupkom (*pipeSolution* osigurava dobre korijenske prolaze detekcijom rubova, puls osigurava odličnu popunu)
- lakše rukovanje za operatera
- mogućnost izvođenja ručno ili automatizacija procesa
- primjena na nelegiranim, niskolegiranim, visokolegiranim i sitnozrnatim čelicima.

Zbog napredne inverterske tehnologije izvora struje omogućena je stabilnost samoga procesa zavarivanja te manja potrošnja energije. Na slici 17. dan je prikaz oscilograma navedenog postupka zavarivanja [8].



Slika 17. Oscilogram *pipeSolution* postupka zavarivanja [8]

Dijagram je podijeljen na tri dijela. U prvome dijelu prikazano je gorenje električnog luka, u drugom dijelu slijedi uspostava kratkoga spoja, a zatim u trećem dijelu dolazi do korekcije struje gdje se odvaja kapljica i zagrijava vrh elektrode tako da bi se proces mogao nastaviti nesmetano. Zbog naglog pada i porasta struje, napon ostaje stabilan i omogućuje zavarivanje u svim položajima. Na slici 18. dan je prikaz zavarenog spoja u PF položaju [8].



Slika 18. Zavareni spoj izveden *pipeSolution* postupkom u PF položaju [8]

Navedenim se postupkom postiže bolja ekonomičnost i bolja kvaliteta zavara u odnosu na konvencionalne postupke zavarivanja. Prema podacima proizvođača, automatizirani postupak zavarivanja osigurava velike brzine zavarivanja (150 – 500 mm/min). Moguće je zavarivati

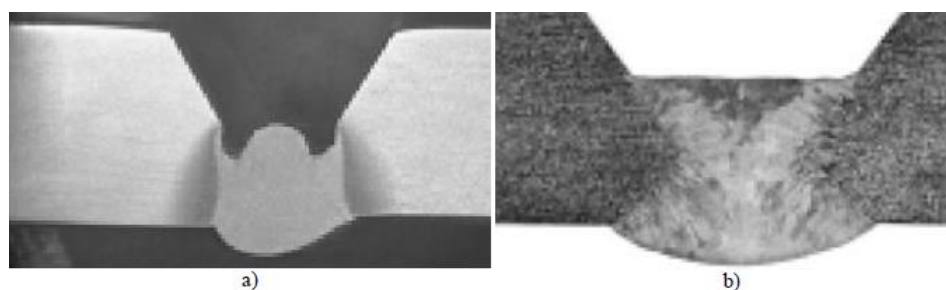
promjere cijevi i do 3400 mm i debljine stijenki do 30 mm. Tako se u tablici 1. vidi usporedba brzine zavarivanja *pipeSolution* postupka u odnosu na konvencionalni postupak [8].

Tablica 1. Usporedba brzine zavarivanja *pipeSolution* i konvencionalnog postupka zavarivanja [8]

Prolaz \ Postupak	Konvencionalni postupak	<i>pipeSolution</i> /puls postupak
Korijen	21 cm/min	38 cm/min
Popuna	27 cm/min	52 cm/min

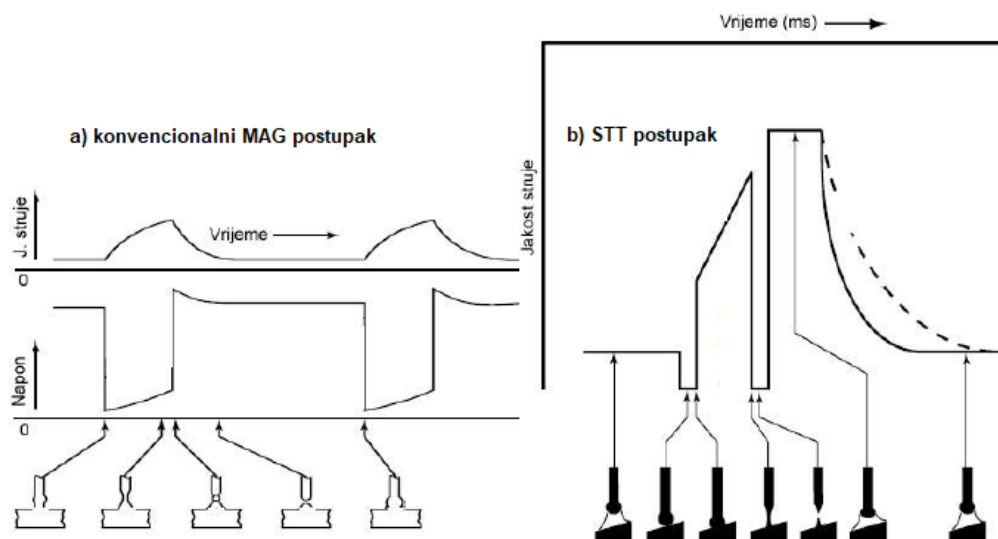
4.2. Surface tension transfer – STT

STT (engl. *Surface Tension Transfer*) je modificirani postupak zavarivanja koji je razvijen u tvrtki Lincoln Electric. Navedeni postupak se najviše koristi za zavarivanje korijenskih prolaza kod cijevnih elemenata (tlačne posude, cjevovodi i sl.). Moguće je zavarivati čelike, čelike visoke čvrstoće i nehrđajuće čelike. Može se primijeniti kao poluautomatski, automatski i robotizirani postupak zavarivanja. Na slici 19. dan je prikaz makroizbruska korijenskog prolaza koji je zavaren REL postupkom (a) i STT postupkom (b) [3].



Slika 19. Izbrusak korijenskog prolaza: a) celulozna elektroda – REL; b) STT postupak [3]

STT postupak se temelji na prijenosu metala kratkim spojevima. Odvajanje kapljice obavlja se procesom površinske napetosti odakle i dolazi naziv postupka zavarivanja. Izvor struje posjeduje vrlo čestu i preciznu kontrolu struje prilikom zavarivanja te daje maksimalnu jakost struje u trenutku kada je za prijenos metala dovoljna sama površinska napetost. Nakon odvajanja kapljice dolazi do porasta struje gdje se vrh elektrode zagrije i na taj način se priprema ponovno odvajanje kapljice metala. Na slici 20. dan je prikaz dinamičke karakteristike izvora struje [3].



Slika 20. Prikaz dinamičke karakteristike izvora struje [3]

Prednosti STT postupka u usporedbi s konvencionalnim MAG postupkom su [3]:

- odvajanje kapljice bez prskanja
- manji unos topline
- nizak udio difundiranog vodika
- lako rukovanje
- mogućnost zavarivanja u svim položajima
- veća brzina zavarivanja
- mogućnost korištenja 100 % CO₂ kod zavarivanja ugljičnih čelika
- odlično zavarivanje korijenskog prolaza zavara
- laka automatizacija postupka.

Nedostaci STT postupka u usporedbi s konvencionalnim MAG postupkom su [6]:

- viša cijena opreme
- nije moguće zavarivati aluminij.

STT postupkom zavarivanja moguće je zavariti korijenske prolaze tri do četiri puta brže u odnosu na zavarivanje korijena TIG postupkom. Ujedno se i STT postupkom unosi manje topline što smanjuje toplinsko opterećenje i deformacije. Također, puno je manje prskanja i dima u odnosu na konvencionalne postupke. Na slici 21. dan je prikaz korijena zavarenog STT postupkom dok je na slici 22. dano lice korijena zavara [9].



Slika 21. Korijen zavara [2]

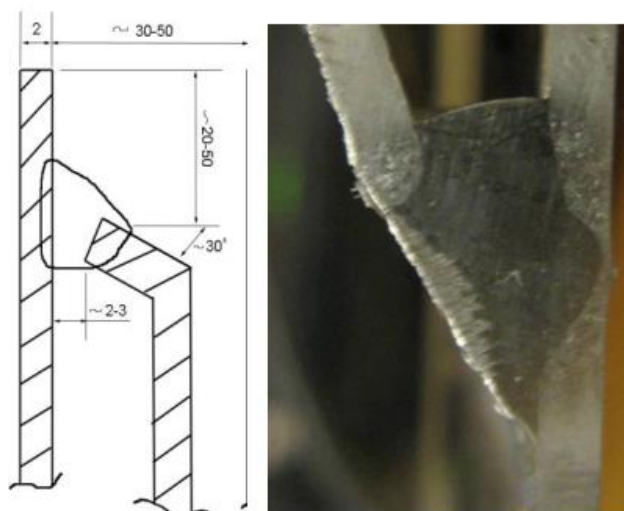


Slika 22. Lice korijena zavara [2]

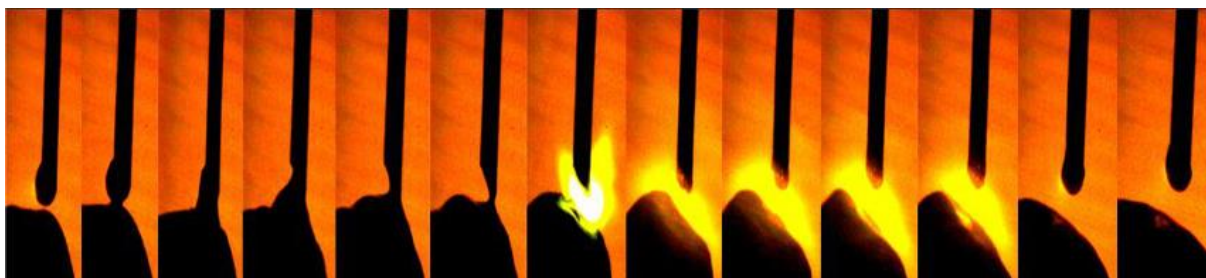
4.3. FastROOT

FastROOT postupak je postupak zavarivanja koji je razvijen u tvrtki Kempii. Temelji se na prijenosu metala kratkim spojevima odnosno modifikacijom navedenog prijenosa. Digitalnim upravljanjem parametara zavarivanja dobiva se modificirani postupak koji je vrlo pogodan za zavarivanje tanjih limova konstrukcijskih i nehrđajućih čelika. Ujedno je postupak vrlo produktivan za zavarivanje korijenskih prolaza. Postupak se temelji na dva različita oblika struje. U prvoj fazi dolazi do prijenosa metala kratkim spojevima dok nakon toga dolazi do

povećanja energije luka koji služi za konačno oblikovanje spoja i zagrijavanja vrha elektrode. Nakon povećanja energije luka dolazi do pada struje na minimalnu vrijednost čime se omogućuje stabilnost procesa. Na slici 23. dan je prikaz zavarenog spoja *FastROOT* postupkom dok je na slici 24. dan prikaz slijeda odvajanja kapljice [3].



Slika 23. Zavareni spoj dupleks i superaustenitnog čelika debljine 2 mm [6]



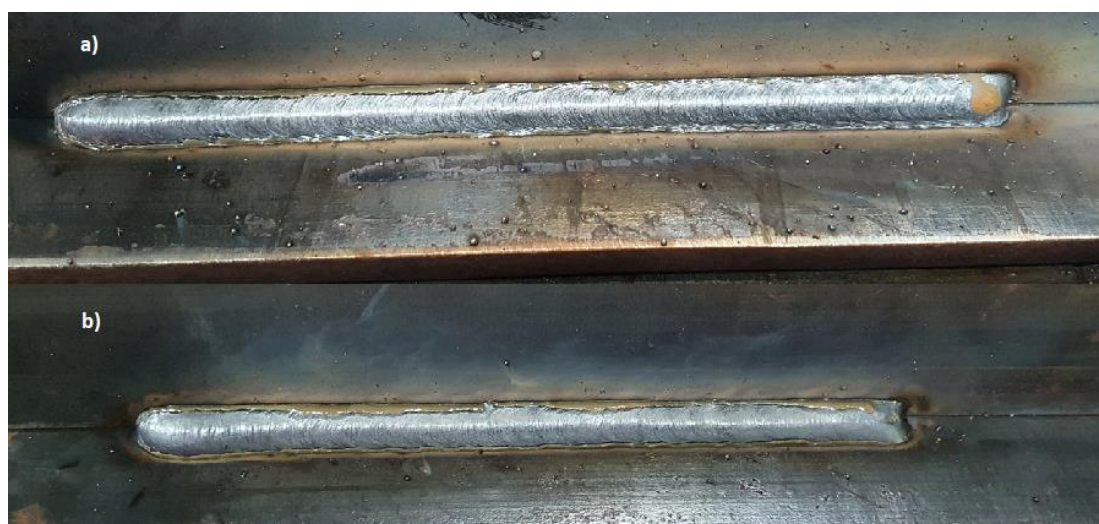
Slika 24. Slijed odvajanja kapljice kod FastROOT postupka zavarivanja [2]

Postupak se najčešće primjenjuje za zavarivanje korijenskih prolaza jer se regulacijom parametara u drugoj fazi može utjecati na oblik provara. Glavna karakteristika je brzo zavarivanje korijenskog prolaza bez štrcanja u PG položaju što je najčešća primjena u praksi [2].

4.4. Low Spatter Control - LSC

MAG LSC postupak je postupak zavarivanja koji je razvijen u tvrtki Fronius. Izvor struje posjeduje funkciju koja omogućava modificirani način prijenosa metala kratkim spojevima. Navedena funkcija ima glavnu ulogu smanjenja nastajanja prskotina u područjima niskih, srednjih i visokih struja od 80 % u odnosu na konvencionalne postupke zavarivanja. Kod takvih

modificiranih postupka smanjena je jačina i količina adhezije kapljica dodatnog materijala na osnovni materijal. Samim time vrijeme čišćenja nakon zavarivanja je smanjeno. Prilikom upotrebe čistog CO₂ kod zavarivanja prskanje je smanjeno, a maksimalno je smanjeno prskanje upotrebom plinskih mješavina (najčešće Ar 18 % i CO₂ 82 %). Na slici 25. dana je usporedba zavarenih spojeva koji su izvedeni konvencionalnim MAG postupkom te MAG LSC postupkom. Vidi se kako je broj prskotina MAG LSC postupkom daleko manji [10].



Slika 25. Rezultati zavarivanja: a) isključena LSC opcija; b) uključena LSC opcija [10]

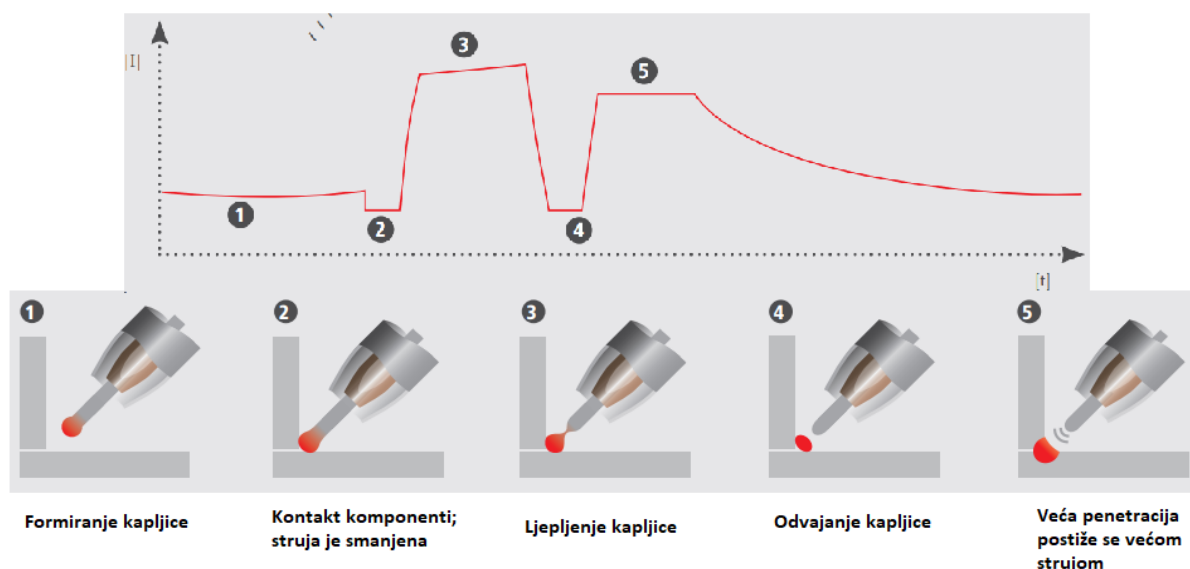
Glavne prednosti LSC postupka su [11]:

- minimalno prskanje
- smanjen unos topline i veći depozit dodatnog materijala kod korijenskih prolaza
- potpuna penetracija
- veća brzina zavarivanja
- mogućnost zavarivanja sa 100 % CO₂ plinskom zaštitom
- dvije razvijene značajke: korijen i univerzalna
- upotreba stabilizatora za penetraciju i održavanje duljine luka.

Značajke koje su razvijene su [12]:

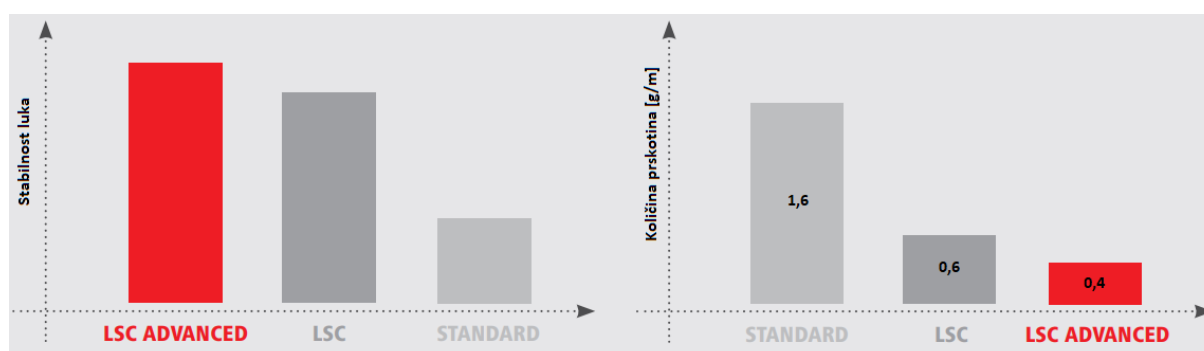
- LSC *Universal* (univerzalna)
- LSC *Root* (korijen)
- LSC *Universal Advanced* (univerzalna – napredna)
- LSC *Root Advanced* (korijen – napredna).

Na slici 26. dan je dijagram struje i shematski prikaz odvajanja kapljice koja se temelji na prijenosu kratkim spojevima. Kod LSC značajki dolazi do ponovnog paljenja na nižim strujama i to predstavlja glavnu razliku u odnosu na standardni luk kod prijenosa kratkim spojevima. Kratki spoj se pali na nižim strujama što dovodi do mekog ponavljanja paljenja i stabilnog procesa zavarivanja [11].



Slika 26. LSC kratki električni luk [11]

Također, na slici 27. prikazane su usporedbe LSC postupaka s konvencionalnim postupcima gdje je vidljiva količina prskotina te stabilnost luka.



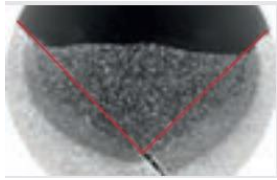
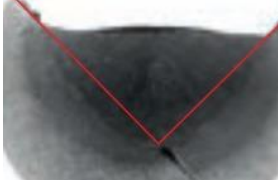
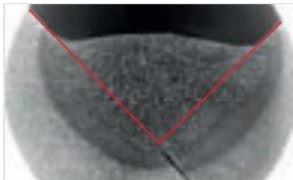
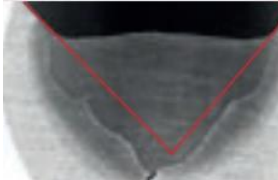
Slika 27. Usporedba LSC i konvencionalnog postupka [11]

Kod REL zavarivanja, korijen se može zavarivati brzinom približno 9 cm/min, dok je kod TIG postupka zavarivanje je sporije i iznosi približno 5 – 6 cm/min. LSC postupak omogućuje brzo i kvalitetno zavarivanje korijenskih prolaza [11].

4.4.1. LSC Universal

LSC *Universal* je univerzalna značajka LSC postupka. Pogodna je za zavarivanje kutnih i preklopnih zavora. Također je pogodna za popunu i završne prolaze. U tablici 2. dan je prikaz usporedbe penetracije LSC postupka s konvencionalnim postupcima [11].

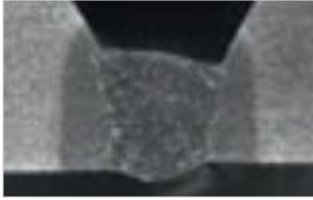



Tablica 2. Usporedba penetracije različitih postupaka zavarivanja [11]

Konvencionalni MAG postupak		FCAW	
	DM: 1,2 mm G3Si1		DM: 1,2 mm E81T-Ni
	Napon: 18,4 V		Napon: 22,7 V
	Struja: 183 A		Struja: 152 A
	Brzina dobave žice: 5,2 m/min		Brzina dobave žice: 8 m/min
	Plin: Ar + 15-20 % CO ₂		Plin: Ar + 15-20 % CO ₂
	Protok plina: 12 l/min		Protok plina: 15 l/min
LSC sa stabilizatorima penetracije		LSC sa stabilizatorima penetracije	
	DM: 1,2 mm G3Si1		DM: 1,0 mm G3Si1
	Napon: 18 V		Napon: 19,8 V
	Struja: 171 A		Struja: 154 A
	Brzina dobave žice: 5,2 m/min		Brzina dobave žice: 7,5 m/min
	Plin: Ar + 15-20 % CO ₂		Plin: Ar + 15-20 % CO ₂
	Protok plina: 10 l/min		Protok plina: 10 l/min

4.4.2. LSC Root

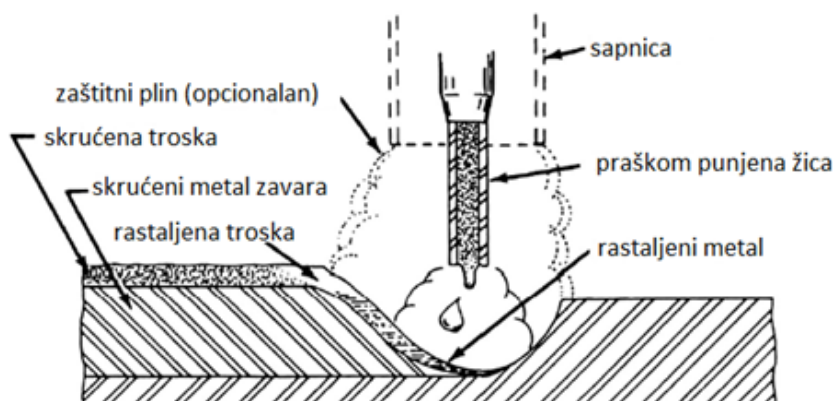
LSC *Root* je značajka koja zahvaljujući velikom pritisku luka i velikom depozitu dodatnog materijala omogućuje zavarivanje korijena većim brzinama. Operateri, odnosno zavarivači mogu izvoditi zavarivanje prema dolje brzinom od 25 cm/min. Zbog oblika strujnog impulsa ova značajka omogućuje odlično oblikovanje korijena te sigurno premošćivanje raspورا. Također je eliminirana greška poput naljepljivanja. U tablici 3. dani su korijenski prolazi koji su zavareni različitim postupcima zavarivanja [12].

Tablica 3. Usporedba korijenskih prolaza različitih postupaka zavarivanja [11]

REL (vertikalno prema gore)		TIG (vertikalno prema gore)	
	DM: 2,5 mm E6013		DM: 2,0 mm
	Napon: 22,82 V		Napon: 9,3 V
	Struja: 83,44 A		Struja: 123 A
Konvencionalni MAG (vertikalno prema dolje)		LSC (vertikalno prema dolje)	
	DM: 1,2 mm		DM: 1,2 mm G3Si1
	Napon: 15,68 V		Napon: 14,69 V
	Struja: 101,7 A		Struja: 145,8 A
	Brzina dobave žice: 2,5 m/min		Brzina dobave žice: 3,6 m/min
	Plin: Ar + 18 % CO ₂		Plin: Ar + 18 % CO ₂
Protok plina: 12 l/min	Protok plina: 10 l/min		

4.5. Flux Cored Arc Welding - FCAW

Zavarivanje praškom punjenom žicom (engl. *Flux Cored Arc Welding*) je visokoučinski elektrolučni postupak zavarivanja gdje se električni luk održava između kontinuirano dobavljane žice i radnoga komada. Prašak koji se nalazi unutar same žice tali se tijekom zavarivanja i štiti talinu zavara. Razlikuju se dvije vrste FCAW postupka zavarivanja s obzirom na primjenu zaštitnoga plina. Tako se razlikuje postupak gdje se uz FCAW postupak primjenjuje zaštitni plin te postupak gdje se ne primjenjuje zaštitni plin (na terenskom radu zbog utjecaja vjetera). Na slici 28. dan je shematski prikaz FCAW postupka [13].

**Slika 28. Shematski prikaz FCAW postupka [14]**

Praškom punjena žica je šuplja cijev koja je ispunjena mješavinom deoksikatora, metalnim prahom i fero – legura. Šav gdje je cijev zatvorena jedva je vidljiv i to je ujedno jedina vidljiva razlika između praškom punjene žice i pune žice. Zavarivanje praškom punjenih žica moguće je izvesti na dva načina, a to može biti sa ili bez zaštitnog plina (CO₂). Zaštitni plin stvara luk koji omogućuje veću penetraciju i osigurava bolju kvalitetu zavara. Postupak se može kvalificirati kao poluautomatski (gdje dodavač žice dovodi žicu, a zavarivač upravlja pištoljem i parametrima) i automatski (gdje operater kontinuirano prati zavarivanje i prilagođava parametre) postupak. Automatsko zavarivanje se koristi u primjenama visoke proizvodnje [13].

Prednosti FCAW postupka su [13]:

- veliki depozit dodatnog materijala
- veća penetracija od konvencionalnog MAG postupka
- visoka kvaliteta zavara
- manje prskanja, potrebno manje čišćenja zavara
- mogućnost zavarivanja u svim položajima
- veće brzine zavarivanja.

Nedostaci FCAW postupka su [13]:

- potrebno ukloniti trosku nakon zavarivanja
- razvija se više dima tijekom zavarivanja (u usporedbi s REL i MAG postupkom)
- žica je skuplja
- problemi zavarivanja na terenu (vjetar).

5. EKSPERIMENTALNI DIO

Eksperimentalni dio rada proveden je u svrhu optimizacije tehnologije zavarivanja i definiranja parametara zavarivanja primjenom automatiziranih postupaka zavarivanja. Eksperiment je proveden na dvjema cijevnim epruvetama materijala S355J2H, promjera $\varnothing 406,4$ mm (16") i debljine stijenke 25 mm. Jedna cijev je kao oblik žlijeba imala V pripremu dok je druga cijev imala U pripremu. Uzorci su zavareni jednakim postupcima zavarivanja. Korijen je zavaren MAG LSC postupkom, dok je popuna (i završni slojevi) zavarena FCAW postupkom. Epruvete su nadalje bile podvrgnute nerazornim (vizualno i radiografsko) ispitivanjima, a zatim razornim ispitivanjima (mjerjenje tvrdoće po Vickersovoj metodi, ispitivanje na savijanje, čvrstoću i žilavost). Postupak zavarivanja proveden je u poduzeću Monter – strojarske montaže d.d., nerazorno (radiografsko) ispitivanje je provedeno u poduzeću TPK Zavod d.d. dok su razorna ispitivanja provedena na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. Epruveta s V pripremom je označena oznakom V-1 dok je epruveta s U pripremom označena oznakom U-1.

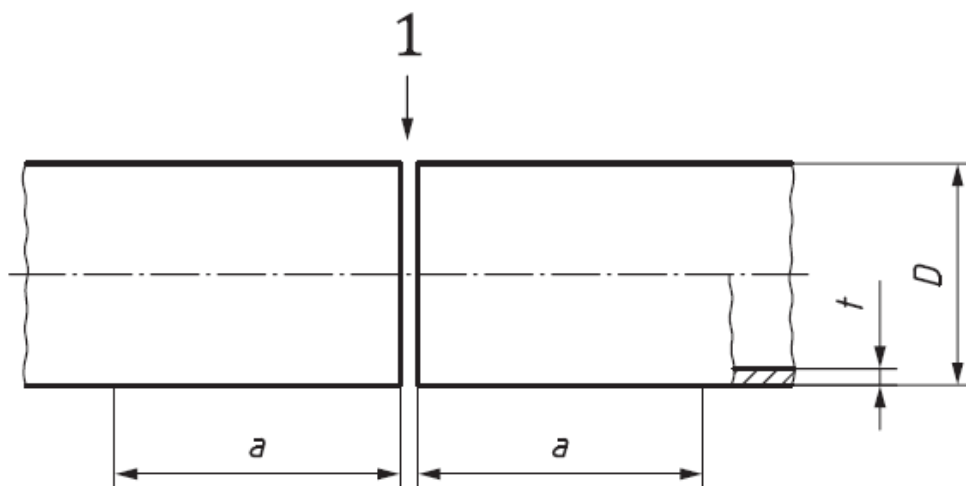
5.1. Priprema epruveta i žljebova

Iz bešavne cijevi materijala S355J2H (slika 29.) na tračnoj pili izrezane su epruvete. Ukupno je izrezano četiri polovica epruveti duljine 150 mm te jedan komad cijevi od 1000 mm koji služi kao prihvat epruveta na koju kasnije dolaze vodilice za automatsko zavarivanje. Cijev je prije rezanja bila podvrgnuta postupku sačmarenja kako bi se površina cijevi dodatno očistila .



Slika 29. Bešavna cijev od materijala S355J2H

Epruvete su rezane na dimenzije sukladno HRN EN ISO 15614-1:2017 (specifikacija i kvalifikacija postupaka zavarivanja za metalne materijale) (slika 30.).

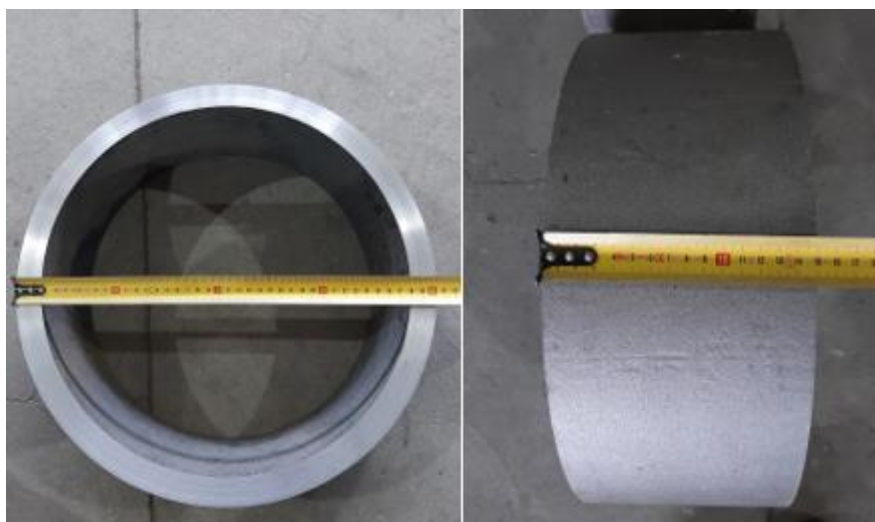


Slika 30. Skica epruvete za sučeljeni spoj cijevi s punom penetracijom [15]

Gdje je [15]:

- 1 – priprema spoja koja je definirana u preliminarnoj specifikaciji postupka zavarivanja (pWPS)
- a – minimalna duljina od 150 mm
- D – vanjski promjer epruvete
- t – debljina materijala.

Na slici 31. prikazana je osaćmarena bešavna polovica epruvete promjera 406,4 mm, duljine 150 mm dok je na slici 32. prikazana debljina od 25 mm.

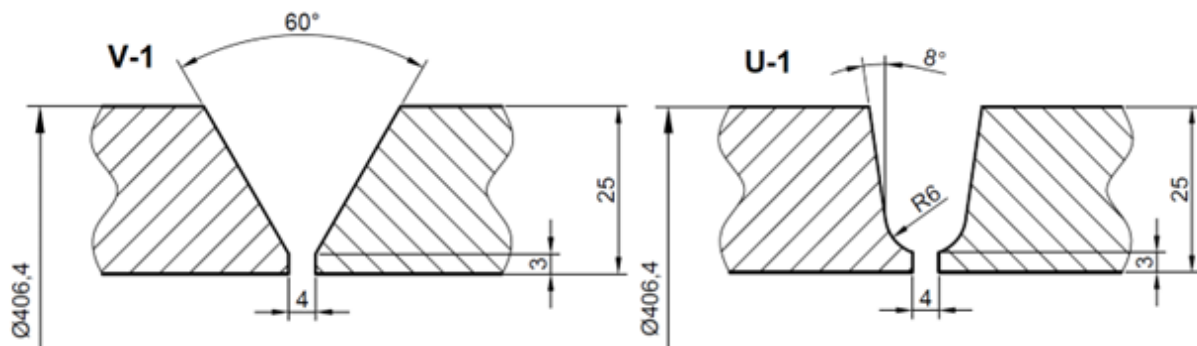


Slika 31. Promjer (406,4 mm) i duljina (150 mm) polovice epruvete



Slika 32. Debljina (24,56 mm) polovice epruvete

Oblici žljebova epruveti pripremljeni su sukladno HRN EN ISO 9692-1:2013. Kao što je već prije navedeno, epruveta oznake V-1 imala je V pripremu dok je epruveta oznake U-1 imala U pripremu. Na slici 33. dan je prikaz skica V pripreme i U pripreme po kojima se izvršila strojna obrada tokarenja.



Slika 33. Skica V-1 pripreme (lijevo) i U-1 pripreme (desno)

Nadalje, sami postupak tokarenja prikazan je na slici 34. Prilikom strojne obrade tokarenja mjereno je vrijeme u kojemu je nož bio u doticaju s epruvetama kako bi se usporedila vremenska analiza pripreme spojeva. Epruvete nakon tokarenja su prikazane na slici 35. dok je vremenska analiza tokarenja epruveti prikazana u tablici 4.



Slika 34. Tokarenje epruveta



Slika 35. Tokarene epruvete V pripreme (lijevo) i U pripreme (desno)

Tablica 4. Vremenska analiza strojne obrade

	Epruveta V-1	Epruveta U-1
Poravnanje 1 mm, min	2 x 13:26	2 x 13:26
Tokarenje, min	2 x 70:14	2 x 55:14
Ukupno	167 min 20s	137 min 20s

Iz podataka u tablici 4. može se zaključiti kako je tokarenje U pripreme trajalo 30 minuta kraće u odnosu na V pripremu što u postocima iznosi da je za tokarenje U pripreme bilo potrebno 17,93 % manje vremena.

5.2. Strojevi i oprema za postupak zavarivanja

5.2.1. Korijen zavarenog spoja

Stroj koji se koristio za zavarivanje korijena je marke Fronius i trgovačkog naziva *TPS 400i PULSE*. Sastoji se od glavnoga izvora električne energije, dva dodavača žice i dva pištolja za zavarivanje (tkz. *double head*, jedan pištolj je zrakom hlađeni dok je drugi vodom hlađeni) (slika 36. i 37.). Navedeni stroj ima mogućnosti *STANDARD*, *PULS* i *LSC* što mu omogućuje široki raspon zavarivanja od korijena pa sve do popuna i završnih slojeva. Od opreme koristila se stezna glava (slika 38.) za prihvat epruveti prilikom zavarivanja u PF položaju (pozicija).



Slika 36. Stroj za zavarivanje *Fronius TPS 400i PULSE*



Slika 37. Specifikacijska pločica *Fronius TPS 400i PULSE*

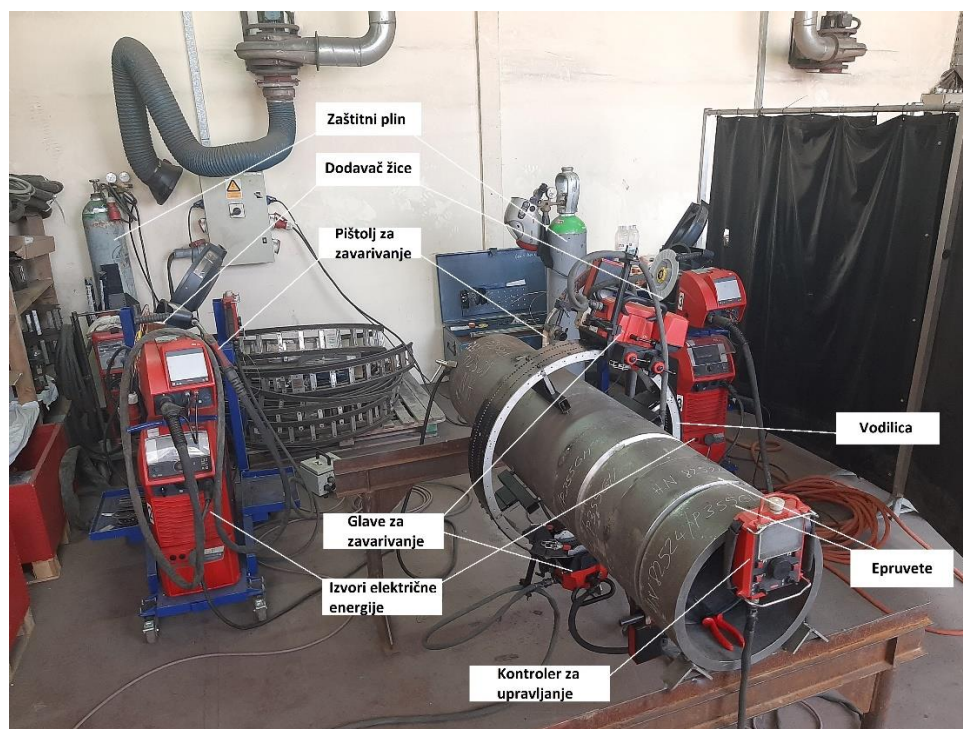


Slika 38. Stezna glava za prihvat epruveti

5.2.2. Popuna i završni slojevi

Stroj koji se koristio za automatsko zavarivanje popune i završnih slojeva također je marke Fronius i trgovačkog naziva *TPS 400i*. Sastoji se od glavnoga izvora električne energije, dodavača žice i pištolja za zavarivanje. Navedeni stroj ima mogućnosti *STANDARD* zavarivanja. Od opreme koristile su se vodilice po kojima se gibaju glave za zavarivanje

zajedno s pištoljima i kontroler za upravljanje parametara automatskog zavarivanja. Na slici 39. dan je prikaz cjelokupne opreme prije postupka zavarivanja popune i završnih slojeva. Specifikacijska pločica je ista prema slici 37.



Slika 39. Stroj za automatsko zavarivanje *Fronius TPS 400i*

5.3. Osnovni materijal

Osnovni materijal načinjen je od čelika S355J2H. Ovaj čelik spada u skupinu nelegiranog, niskougličnog čelika. Ima vrlo dobra zavarivačka svojstva i uz pravilno odabrane parametre zavarivanja nije sklon greškama i nepravilnostima koje mogu nastati uslijed procesa zavarivanja. Cijev od navedenog materijala nastala je postupkom toploga valjanja. U tablici 5. naveden je kemijski sastav, dok su u tablici 6. navedena mehanička svojstva navedenoga čelika.

Tablica 5. Kemijski sastav čelika S355J2H u % [16]

C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	Cu	Ti	Al	V	Nb	N	As	Mo	Sn	C _{ev}
0,15	1,31	0,27	0,004	0,008	0,05	0,09	0,2	0,001	0,031	0,004	0,002	0,006	0,006	0,008	0,012	0,46

Tablica 6. Mehanička svojstva čelika S355J2H [16]

Vlačna čvrstoća, MPa	Granica razvlačenja, MPa	Min. istezljivost pri puknuću, %	KV min. J -20 °C			
			1	2	3	Prosječna vrijednost
539	362	28	35	37	31	34

5.4. Dodatni materijal i zaštitna atmosfera

5.4.1. Korijen zavarenog spoja

Kod zavarivanja korijena MAG LSC postupkom kod obje epruvete (V-1 i U-1) korištena je ista žica proizvođača *BÖHLER*. Riječ je o punoj žici trgovačkog naziva *EMK 6* promjera 1,2 mm (oznake G 42 4 M21 3Si1 prema EN ISO 14341-A). Korišteni zaštitni plin *Ferroline C18* je mješavina Ar i CO₂ u omjeru 82 % Ar i 18 % CO₂ (oznaka M21 prema HRN EN ISO 14175). U tablici 7. naveden je kemijski sastav, dok su u tablici 8. navedena mehanička svojstva navedene žice.

Tablica 7. Kemijski sastav žice *EMK 6* u % [17]

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	V	Cu	Ti	Al	Zr
0,07	0,86	1,45	0,011	0,017	0,05	< 0,01	0,05	< 0,01	0,16	0,01	< 0,01	< 0,01

Tablica 8. Mehanička svojstva žice *EMK 6* [17]

Vlačna čvrstoća, MPa	Granica razvlačenja, MPa	Min. istezljivost pri puknuću, %	KV min. J -40 °C
500-640	≥ 420	≥ 20	≥ 47

5.4.2. Popuna i završni slojevi

Nakon korijenskog prolaza, zavario se nadkorijenski prolaz na obje epruvete (V-1 i U-1) žicom proizvođača *BÖHLER*. Riječ je o praškom punjenoj žici trgovačkog naziva *DIAMONDSPARK 52 RC* promjera 1,0 mm (oznake T46 4 P M21 1 H5 prema EN ISO 17632-A). Korišteni zaštitni plin *Ferroline C18* je mješavina Ar i CO₂ u omjeru 82 % Ar i 18 % CO₂ (oznaka M21 prema HRN EN ISO 14175). Razlog zbog kojega se nakon korijenskog prolaza zavarivalo žicom promjera 1,0 mm je sigurnost od neprobijanja korijena zavara. U tablici 9. naveden je kemijski sastav, dok su u tablici 10. navedena mehanička svojstva navedene žice.

Tablica 9. Kemijski sastav žice *DIAMONDSPARK 52 RC* u % [18]

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	V	Cu	Al	Nb	B
0,05	0,41	1,19	0,013	0,009	0,03	< 0,01	< 0,01	0,01	0,11	< 0,1	0,02	0,004

Tablica 10. Mehanička svojstva žice *DIAMONDSPARK 52 RC* [18]

Vlačna čvrstoća, MPa	Granica razvlačenja, MPa	Min. istezljivost pri puknuću, %	KV min. J -40 °C
530-620	≥ 460	≥ 23	≥ 47

Nakon dovoljne debljine zavara, popuna i završni slojevi na obje epruvete (V-1 i U-1) zavareni su žicom proizvođača *HYUNDAI*. Riječ je o praškom punjenoj žici trgovačkog naziva *SC-71MJ* promjera 1,2 mm (oznake T46 4 P M21 1 H5 prema EN ISO 17632-A). Korišteni zaštitni plin *Ferroline C18* je mješavina Ar i CO₂ u omjeru 82 % Ar i 18 % CO₂ (oznaka M21 prema HRN EN ISO 14175). U tablici 11. naveden je kemijski sastav, dok su u tablici 12. navedena mehanička svojstva navedene žice.

Tablica 11. Kemijski sastav žice SC-71MJ [19]

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	V	Cu
0,05	0,27	1,09	0,007	0,005	0,48	0,03	0,01	0,02	0,02

Tablica 12. Mehanička svojstva žice SC-71MJ [19]

Vlačna čvrstoća, MPa	Granica razvlačenja, MPa	Min. istezljivost pri puknuću, %	KV min. J -40 °C
578	528	≥ 22	≥ 90

5.5. Postupak zavarivanja

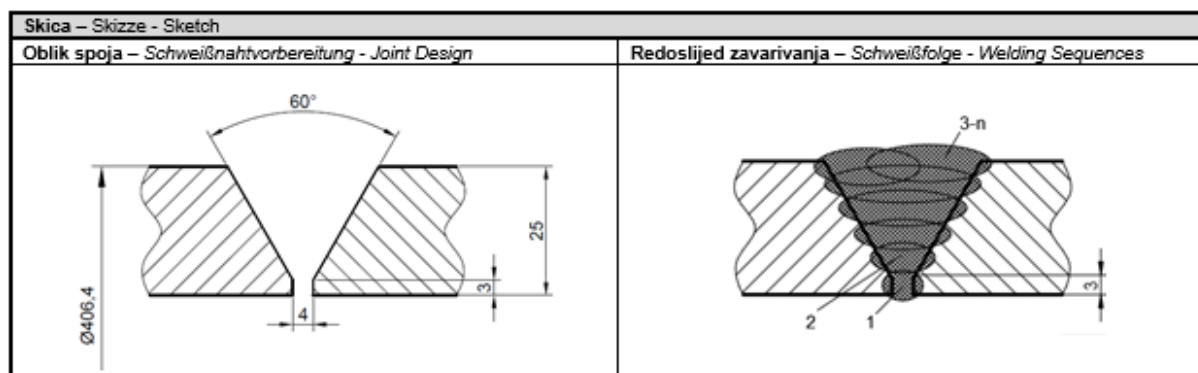
5.5.1. Epruveta V-1

Prije samog procesa zavarivanja potrebno je:

- pripremiti spoj
- brusiti i očistiti površine koje se spajaju
- pripojiti spoj
- pozicionirati epruvetu na steznu glavu.

Na slici 40. dan je prikaz specifikacije postupka zavarivanja za epruvetu V-1.

Specifikacija postupka zavarivanja br.: Schweißanweisung Nr. / WPS No.:	V-1	Broj pripadajućeg atesta: WPAR Nr. / PQR No.:	-
Broj pripadajućeg crteža: Zeichnungs- Nr. / Drawing-No.:	-	Osnovni materijal: Grundwerkstoff / Parent Material Spec.:	S355J2H
Dimenzija uzorka (Øt): Durchmesser - Wanddicke (Øt): Outside Diameter - Material Thickness (Øt):	Ø406,4, t=25 mm	Grupa: Gruppe / Group No.:	1.2 HRI CEN ISO/TR 15608 HRI CEN ISO/TR 20173
Postupak zavarivanja: Schweißverfahren / Welding Process:	135/136 (MAG-L SC)/MAG HRN EN ISO 4063	Početno i međuslojno čišćenje: Erst und Zwischenlagen Reinigung: Initial and Interpass Cleaning:	Brušenje / Četkanje
Tip postupka: Arbeitstyp / Type:	Poluautomatsko /mehanizirano Semi-automatic/ Mechanized	Instrukcijski list za TO br.: Wärmenachbehandlungsblatt Nr.:	-
Način pripreme žlijeba: Art der Nahtvorbereitung: Weld Preparation Details:	Tokarenje	Oblik spoja / Položaj zavarivanja: Nahtart / Schweißposition: Joint Type / Welding position:	BW; PF HRN EN ISO 6947



Parametri zavarivanja – Schweißparametern – Welding parameters								
Sloj br.	Post. zavar.	Promjer DM	Jakost struje	El. napon	Vrsta struje / polaritet	Protok plina	Brzina zavarivanja	Dodatni Mat.
Schweiß-Raupe Nr. / Run	Schweiß-Verfahren / Process	Zusatz-Werkstoff / Size of Filler Metal	Stromstärke / Current	Spannung q / Voltage	Stromart / Current Type Polarity	Gasmenge / Shielding Gas Flow Rate	Schweißgeschwindigkeit / Wire Speed	Zusatz – Werkstoff / Filler Metal Class. and trade name
		Ø (mm)	(A)	(V)	AC / DC (+ / -)	(l/min)	(cm/min)	
1	135	1,2	90-110	15-17	DC (+)	25-27	14-15	EMK 6
2	136	1,0	150-160	23-24	DC (+)	20-22	18-19	DIAMOND SPA RK 52 RC
3-n	136	1,2	160-200	23-24	DC (+)	20-22	5,5-8,5	SC-71MJ

DODATNI I POMOĆNI MATERIJAL ZUSATZWERKSTOFF UND ZUSATZMATERIAL / FILLER METAL		TEHNIKA ZAVARIVANJA SCHWEISSAUSFÜHRUNG / TECHNIQUE	
Naziv / proizvođač: Marke / Erstheller: Trade name / Manufacturer	Böhler EMK6, DIAMOND SPARK 52 RC HYUNDAI SC-71MJ	Povlačenje ili njihanje: Strich oder Pendelraupe: String or weave:	Njihanje
Oznaka po normi: Normbezeichnung: Designation by norms:	G 42 4 M21 3Si1 T46 4 P M21 1 H5 T46 4 P M21 1 H5	Temp. predgrijavanja: Vorwärmtemperatur: Preheat Temp.:	- °C
Tip obloge: Umhüllungstyp: Cover type:	-	Međuslojna temperatura: Zwischenlagentemperatur: Interpass Temp.	≤ 180 °C
Kvaliteta praška: Schweißpulverqualität: Welding flux:	Rutilan	NAKNADNA TOPL. OBRADA VÄRMENACHBEHANDLUNG POST WELD HEAT TREATMENT	
Promjer i vrsta W - elektrode: Wolframelektrode, Ø: Tungsten Electrode, Ø:	-	Temperatura: Temperatur: Temperature:	- °C
Sušenje dodatnog materijala: Rücktrocknung: Rebaking	-	Vrijeme držanja: Haltezeit: Holding time:	- h
Zaštitni plin / zaštita korijena: Schutzgas / Wurzelschutz: Shielding gas / Backing gas:	Ferroline C18 (M21-ArC-18)	Brzina zagrij. / hlađenja: Aufheizrate / Abkühlrate: Heating rate / cooling rate:	- °C/h

Slika 40. Specifikacija postupka zavarivanja epruvete V-1

5.5.1.1. Korijen zavarenog spoja

Kao što je već prije navedeno, korijen zavara izveden je MAG LSC postupkom zavarivanja. U tablici 13. dani su parametri zavarivanja korijena epruvete V-1.

Tablica 13. Parametri zavarivanja korijena epruvete V-1

Postupak zavarivanja	ØDM, mm	Struja, A		Napon, V		Pol, +/-	Protok plina, l/mm	Brzina zavarivanja, cm/min	Širina njihanja, mm	Brzina dobave žice, m/min	Dodatni materijal	Unos topline, kJ/mm	
		min.	max.	min.	max.							min.	max.
135 - LSC	1,2	92	110	15,1	16,4	DC (+)	25	14,2	/	4,8	EMK 6	0,47	0,61

Na slici 41. dan je prikaz pripremljene, očišćene, pripojene i pozicionirane epruvete V-1 na steznoj glavi, dok je na slikama 42., 43. i 44. dan prikaz širine i visine korijena zavara.

**Slika 41. Epruveta V-1 prije zavarivanja****Slika 42. Lice korijena epruvete V-1**



Slika 43. Korijen epruvete V-1



Slika 44. Dubina žlijeba nakon zavarivanja korijena epruvete V-1

5.5.1.2. Popuna i završni slojevi

Popuna i završni slojevi zavarili su se MAG postupkom zavarivanja koristeći praškom punjenu žicu. U tablici 14. dani su parametri pojedinog prolaza tijekom zavarivanja.

Tablica 14. Parametri zavarivanja popune i završnih slojeva epruvete V-1

Postupak zavarivanja	ØDM, mm	Struja, A		Napon, V		Pol, +/-	Protok plina, l/mm	Brzina zavarivanja, cm/min	Širina njihanja, mm	Brzina dobave žice, m/min	Dodatni materijal	Unos topline, kJ/mm	
		min.	max.	min.	max.							min.	max.
136	1,0	149	155	23,2	23,8	DC (+)	20	18,4	/	9,9	DIAMONDSPARK 52 RC	0,90	0,94
136	1,2	157	167	22,7	23,3	DC (+)	20	8,4	10	6,5	SC-71MJ	2,03	2,22
136	1,2	161	175	23,3	23,5	DC (+)	20	7,3	18	6,5	SC-71MJ	2,47	2,70
136	1,2	180	195	23,5	23,6	DC (+)	20	5,7	22	6,7	SC-71MJ	3,56	3,88
136	1,2	180	192	23,2	23,7	DC (+)	20	6,7	25	6,7	SC-71MJ	2,99	3,26
136	1,2	180	192	23,2	23,7	DC (+)	20	6,5	25	6,7	SC-71MJ	3,08	3,36

Na slici 45. dan je prikaz lica zavara dok je na slici 46. dan prikaz nadvišenja zavara od 3 mm.

**Slika 45. Lice zavarenoga spoja epruvete V-1**



Slika 46. Nadvišenje zavarenoga spoja epruvete V-1

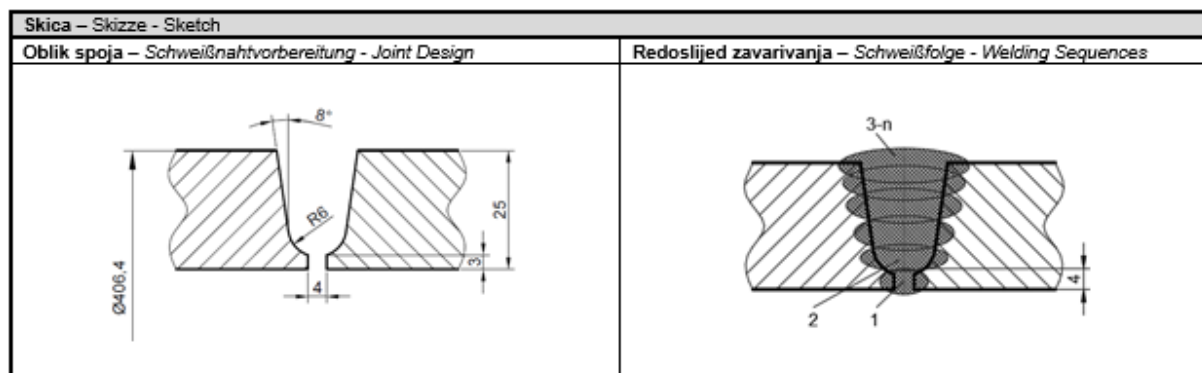
5.5.2. Epruveta U-1

Prije samog procesa zavarivanja potrebno je:

- pripremiti spoj
- brusiti i očistiti površine koje se spajaju
- pripojiti spoj
- pozicionirati epruvetu na steznu glavu.

Na slici 47. dan je prikaz specifikacije postupka zavarivanja za epruvetu U-1.

Specifikacija postupka zavarivanja br.: Schweißanweisung Nr. / WPS No.:	U-1	Broj pripadajućeg atesta: WPAR Nr. / PQR No.:	-
Broj pripadajućeg crteža: Zeichnungs-Nr. / Drawing-No.:	-	Osnovni materijal: Grundwerkstoff / Parent Material Spec.:	S355J2H
Dimenzija uzorka (Øt): Durchmesser - Wanddicke (Øt): Outside Diameter - Material Thickness (Øt):	Ø406,4, t=25 mm	Grupa: Gruppe / Group No.:	1.2 HRI CEN ISO/TR 15608 HRI CEN ISO/TR 20173
Postupak zavarivanja: Schweißverfahren / Welding Process:	135/136 (MAG-L SC)/MAG HRN EN ISO 4063	Početno i međuslojno čišćenje: Erst und Zwischenlagen Reinigung: Initial and Interpass Cleaning:	Brušenje / Četkanje
Tip postupka: Arbeitstyp / Type:	Poluautomatsko /mehanizirano Semi-automatic/ Mechanized	Instrukcijski list za TO br.: Wärmenachbehandlungsblatt Nr.: Instruction for heat treatment No.:	-
Način pripreme žlijeba: Art der Nahtvorbereitung: Weld Preparation Details:	Tokarenje	Oblik spoja / Položaj zavarivanja: Nahtart / Schweißposition: Joint Type / Welding position:	BW; PF HRN EN ISO 6947



Parametri zavarivanja – Schweißparametern – Welding parameters								
Sloj br.	Post. zavar.	Promjer DM	Jakost struje	El. napon	Vrsta struje / polaritet	Protok plina	Brzina zavarivanja	Dodatni Mat.
Schweiß-Raupe Nr. / Run	Schweiß-Verfahren / Process	Zusatz-Werkstoff / Size of Filler Metal	Stromstärke / Current	Spannung q / Voltage	Stromhart / Current Type Polarity	Gasmenge / Shielding Gas Flow Rate	Schweißgeschwindigkeit / Wire Speed	Zusatz - Werkstoff / Filler Metal Class and trade name
1	135	Ø (mm)	(A)	(V)	AC / DC (+ / -)	(l/min)	(cm/min)	EMK 6
2	136	1,0	140-160	23-25	DC (+)	20-22	16-18	DIAMOND SPA RK 52 RC
3-n	136	1,2	160-200	23-25	DC (+)	20-22	7-9	SC-71MJ

DODATNI I POMOĆNI MATERIJAL ZUSATZWERKSTOFF UND ZUSATZMATERIAL / FILLER METAL		TEHNIKA ZAVARIVANJA SCHWEISSAUSFÜHRUNG / TECHNIQUE	
Naziv / proizvođač: Marke / Hersteller: Trade name / Manufacturer	Böhler EMK6, DIAMOND SPARK 52 RC HYUNDAI SC-71MJ	Povlačenje ili njihanje: Strich oder Pendelraupe: String or weave:	Njihanje
Oznaka po normi: Normbezeichnung: Designation by norms:	G 42 4 M21 3Si1 T46 4 P M21 1 H5 T46 4 P M21 1 H5	Temp. predgrijavanja: Vorwärmtemperatur: Preheat Temp.:	- °C
Tip obloge: Umhüllungstyp: Cover type:	-	Međuslojna temperatura: Zwischenlagentemperatur: Interpass Temp.	≤ 180 °C
Kvaliteta praška: Schweißpulverqualität: Welding flux:	Rutilan	NAKNADNA TOPL. OBRADA VÄRMENACHBEHANDLUNG POST WELD HEAT TREATMENT	
Promjer i vrsta W - elektrode: Wolframelektrode, Ø: Tungsten Electrode, Ø:	-	Temperatura: Temperatur: Temperature:	- °C
Sušenje dodatnog materijala: Rücktrocknung: Rebaking	-	Vrijeme držanja: Haltezeit: Holding time:	- h
Zaštitni plin / zaštita korijena: Schutzgas / Wurzelschutz: Shielding gas / Backing gas:	Ferroline C18 (M21-ArC-18)	Brzina zagrij. / hlađenja: Aufheizrate / Abkühlrate: Heating rate / cooling rate:	- °C/h

Slika 47. Specifikacija postupka zavarivanja epruvete U-1

5.5.2.1. Korijen zavarenog spoja

Kao što je već prije navedeno, korijen zavara izveden je MAG LSC postupkom zavarivanja. U tablici 15. dani su parametri zavarivanja korijena epruvete U-1.

Tablica 15. Parametri zavarivanja korijena epruvete U-1

Postupak zavarivanja	ØDM, mm	Struja, A		Napon, V		Pol, +/-	Protok plina, l/mm	Brzina zavarivanja, cm/min	Širina njihanja, mm	Brzina dobave žice, m/min	Dodatni materijal	Unos topline, kJ/mm	
		min.	max.	min.	max.							Min.	max.
135 – LSC	1,2	98	103	16,9	17,3	DC (+)	25	16,9	/	4,8	EMK 6	0,47	0,51

Na slici 48. dan je prikaz pripremljene, očišćene, pripojene i pozicionirane epruvete U-1 na steznoj glavi, dok je na slikama 49., 50. i 51. dan prikaz širine i visine korijena zavora.

**Slika 48. Epruveta U-1 prije zavarivanja**



Slika 49. Lice korijena epruvete U-1



Slika 50. Korijen epruvete U-1



Slika 51. Dubina žlijeba nakon zavarivanja korijena epruvete U-1

5.5.2.2. Popuna i završni slojevi

Popuna i završni slojevi zavarili su se MAG postupkom zavarivanja koristeći praškom punjenu žicu. U tablici 16. dani su parametri pojedinog prolaza tijekom zavarivanja.

Tablica 16. Parametri zavarivanja popune i završnih slojeva epruvete U-1

Postupak zavarivanja	ØDM, mm	Struja, A		Napon, V		Pol, +/-	Protok plina, l/mm	Brzina zavarivanja, cm/min	Širina njihanja, mm	Brzina dobave žice, m/min	Dodatni materijal	Unos topline, kJ/mm	
		min.	max.	min.	max.							min.	max.
136	1,0	147	151	23,9	24,1	DC (+)	20	16,7	/	10,2	DIAMONDSPARK 52 RC	1,01	1,05
136	1,2	157	170	23,3	23,8	DC (+)	20	8,6	6	6,5	SC-71MJ	2,04	2,26
136	1,2	160	171	23,4	23,8	DC (+)	20	8,5	10	6,6	SC-71MJ	2,11	2,30
136	1,2	182	203	23,4	23,6	DC (+)	20	8,0	15	6,7	SC-71MJ	2,56	2,87
136	1,2	178	182	23,9	24,1	DC (+)	20	7,3	19	7,0	SC-71MJ	2,80	2,88

Na slici 52. dan je prikaz lica zavara dok je na slici 53. dan prikaz nadvišenja zavarenoga spoja od 2 mm.



Slika 52. Lice zavarenog spoja epruvete U-1



Slika 53. Nadvišenje zavarenog spoja epruvete U-1

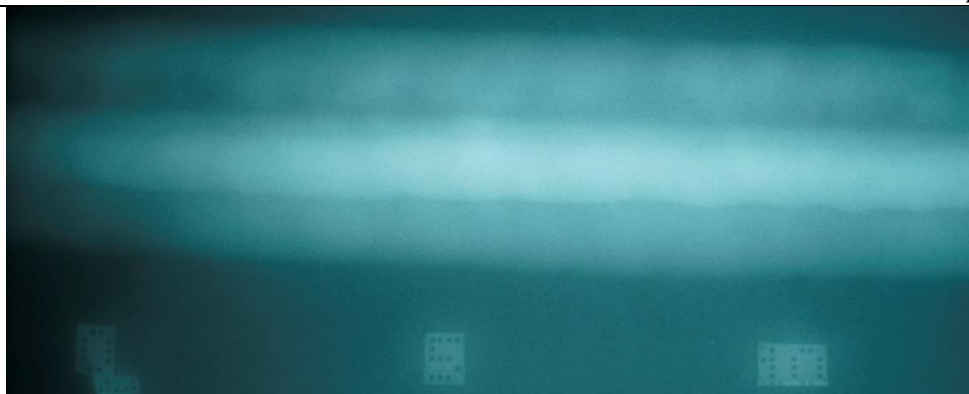
5.6. Provedena ispitivanja

U svrhu usporedbe i ocjene kvalitete zavarenoga spoja epruvete V-1 i epruvete U-1 provedena su sljedeća ispitivanja:

- radiografsko ispitivanje
- analiza makroizbrusaka
- mjerenje tvrdoće Vickers metodom HV10
- statičko vlačno ispitivanje
- ispitivanje žilavosti metala zavara
- ispitivanje na savijanje.

5.6.1. Radiografsko ispitivanje

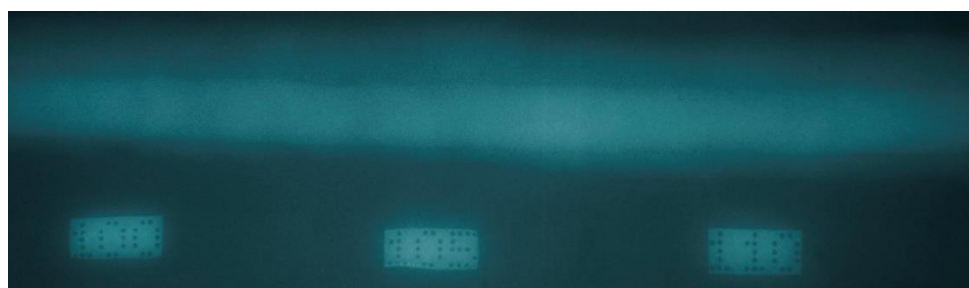
Radiografsko ispitivanje je provedeno u tvrtki TPK Zavod d.d. Nakon ispitivanja dobiveni su radiogrami, odnosno filmovi zavarenih spojeva epruvete V-1 i epruvete U-1. Oba zavara su imala dijelove na kojima su se pojavljivale indikacije. Na slikama 54., 55., 56. i 57. dan je prikaz radiograma oba zavarena spoja na kojima je vidljiv dio bez indikacija i dio s indikacijama.



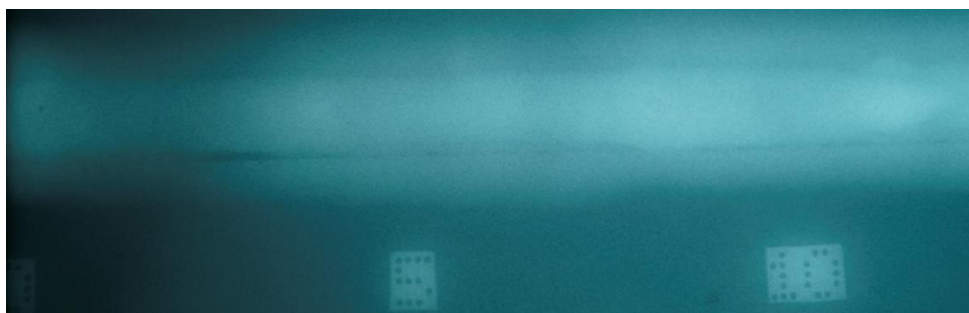
Slika 54. Radiogram zavarenog spoja epruvete V-1 (bez indikacija)



Slika 55. Radiogram zavarenog spoja epruvete V-1 (s indikacijama: izolirani uključak troske 47 - 49)



Slika 56. Radiogram zavarenog spoja epruvete U-1 (bez indikacija)



Slika 57. Radiogram zavarenog spoja epruvete U-1 (s indikacijama: uključci u nizu 0 - 15)

Navedene indikacije nalaze se u području nadkorijenskog prolaza (prvi prolaz nakon korijena) praškom punjenom žicom promjera 1,0 mm. Zaključuje se kako su se indikacije pojavile uslijed nedovoljnog čišćenja međuprolaza te prevelikog slobodnog kraja žice zbog uskog žlijeba. Sapnica pištolja nije mogla dovoljno duboko ući u žlijeb kako bi se navedeno izbjeglo.

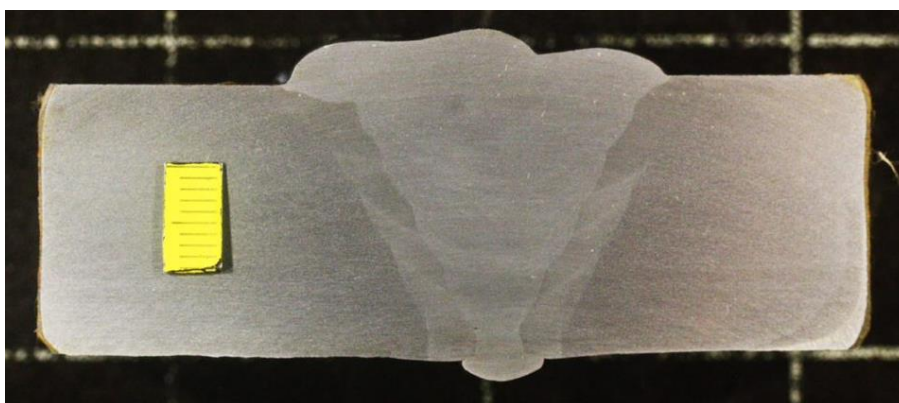
5.6.2. Analiza makroizbrusaka

Iz navedenih epruveta V-1 i U-1 izrezani su makroizbrusci. Nakon rezanja makroizbrusci su bili podvrgnuti tehnologiji brušenja. Uređaj na kojemu je izvršena tehnologija brušenja prikazan je na slici 58. Brušenje je provedeno brusnim papirom granulacije 320, 600, 1000, 2400 i na kraju je završeno s 4000. Brzina brušenja je iznosila 300 o/min. Nadalje su uzorci bili nagriženi u otopini (3 % nital). Nakon toga su stavljani u običnu vodu kako bi se prekinula kemijska reakcija.

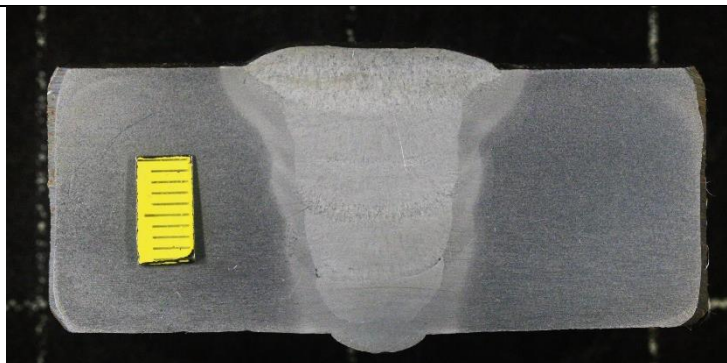


Slika 58. Uređaj za brušenje

Na slici 59. dan je prikaz makroizbruska epruvete V-1 dok je na slici 60. dan prikaz makroizbruska U-1.



Slika 59. Makroizbrusak epruvete V-1



Slika 60. Makroizbrusak epruvete U-1

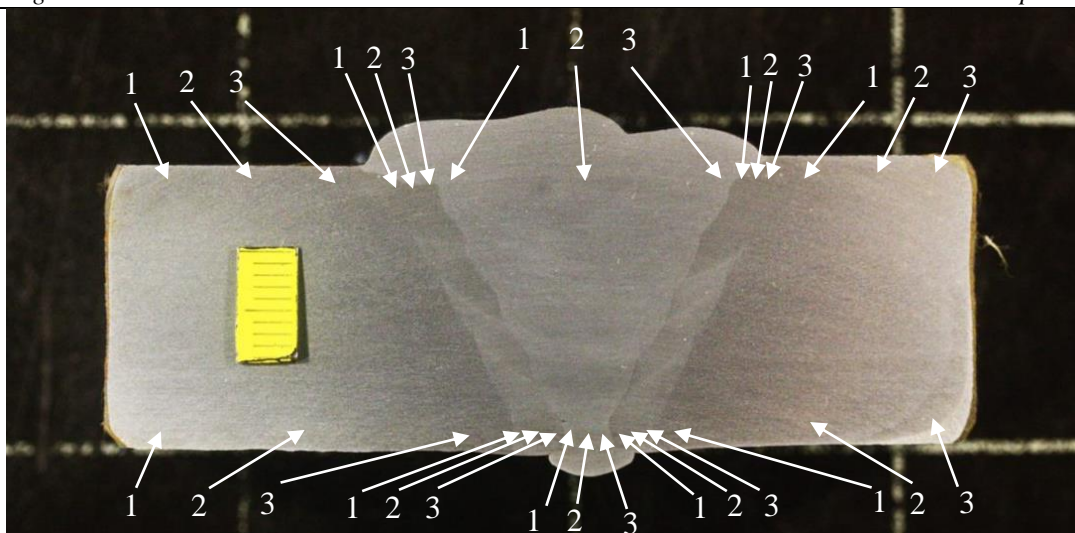
Iz prethodnih slika može se vidjeti kako postoje sitne indikacije nastale zavarivanjem nadkorijenskog prolaza što se pripisuje nedovoljnim čišćenjem međuprolaza te velikim slobodnim krajem žice uslijed uskoga žlijeba spoja. Nadalje, unos topline prilikom zavarivanja epruvete U-1 je bio manji nego kod zavarivanja epruvete V-1 što se iz slika može zaključiti po širini ZUT-a (1 mm manji kod epruvete U-1).

5.6.3. Mjerenje tvrdoće Vickers metodom HV10

Mjerenje tvrdoće je provedeno Vickersovom metodom HV10 na oba uzorka makroizbrusaka. Tvrdoća se mjerila u dvije linije, jedna sa strane lica zavarenoga spoja i jedna sa strane korijena zavarenoga spoja. Uređaj koji se koristio za mjerenje tvrdoće je tvrdomjer Reichter TM12 koji je prikazan na slici 61. Primijenjena sila je iznosila 10 kiloponda što odgovara 98,04 N. Metoda se zasniva na utiskivanju dijamantne četverostrane piramide u materijal. Tvrdoća se mjerila u osnovnome materijalu (OM), zoni utjecaja topline (ZUT) i metalu zavara (MZ). Vrijeme utiskivanja iznosilo je 10 s. Na slikama 62., 63., 64. i 65. dan je prikaz sheme mjerenja tvrdoće te njihov grafički prikaz dok su u tablicama 17. i 18. dani numerički rezultati mjerenja.



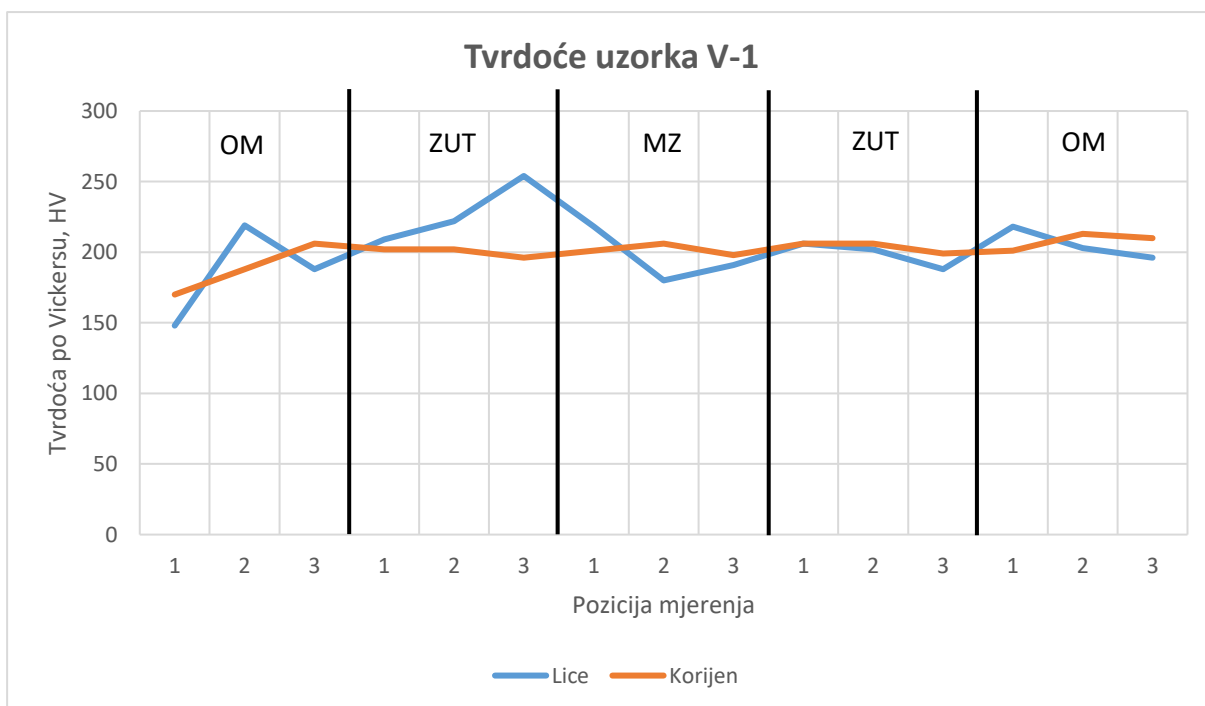
Slika 61. Tvrdomjer Reichter TM12



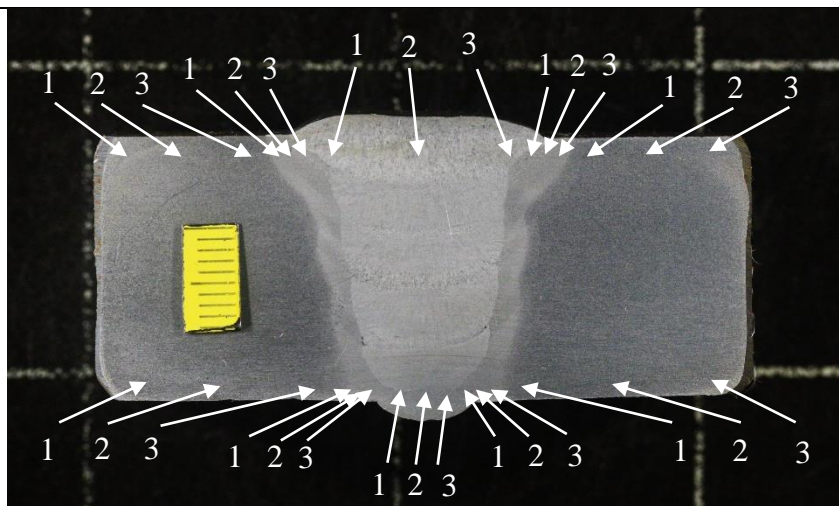
Slika 62. Shema mjerenja tvrdoće na uzorku V-1

Tablica 17. Rezultati mjerenja tvrdoće na uzorku V-1

Linija	OM			ZUT			MZ			ZUT			OM		
Lice	148	219	188	209	222	254	218	180	191	206	202	188	218	203	196
Korijen	170	188	206	202	202	196	201	206	198	206	206	199	201	213	210



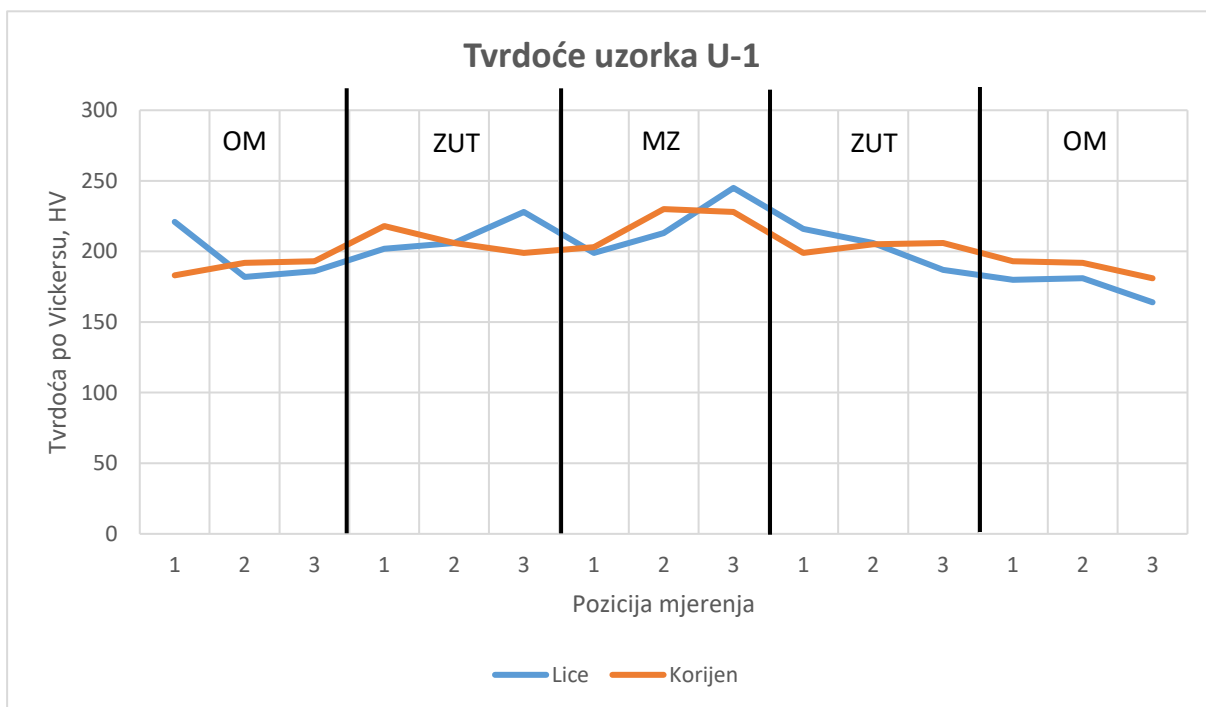
Slika 63. Grafički prikaz tvrdoća uzorka V-1



Slika 64. Shema mjerenja tvrdoće na uzorku U-1

Tablica 18. Rezultati mjerenja tvrdoće na uzorku U-1

Linija	OM			ZUT			MZ			ZUT			OM		
Lice	221	182	186	202	206	228	199	213	245	216	206	187	180	181	164
Korijen	183	192	193	218	206	199	203	230	228	199	205	206	193	192	181



Slika 65. Grafički prikaz tvrdoća uzorka U-1

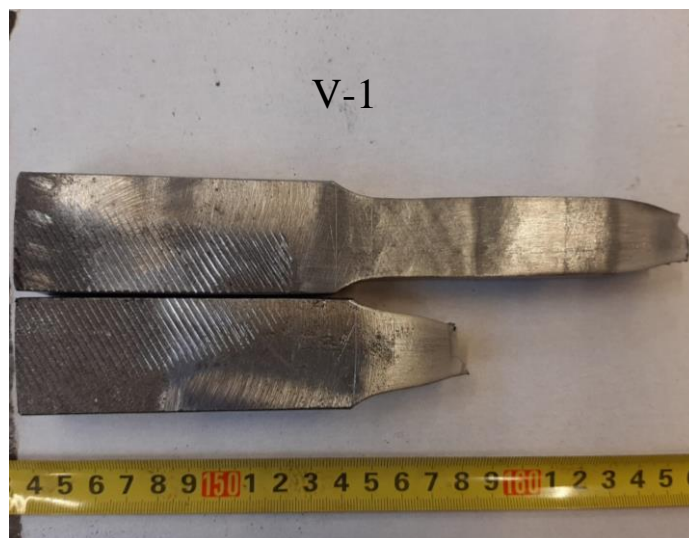
Analizom numeričkih rezultata mjerenja tvrdoće na uzorcima V-1 i U-1 zaključuje se kako je jedina vidljiva razlika u tvrdoći bila kod epruvete V-1 gdje je blizu linije staljivanja ZUT-a i MZ došlo do naglog skoka tvrdoće. Navedeno se pripisuje većim unosom topline prilikom zavarivanja epruvete V-1 u usporedbi s epruvetom U-1. Osim navedenog, nije bilo značajnih skokova tvrdoće.

5.6.4. Statičko vlačno ispitivanje

Statičko vlačno ispitivanje provedeno je u laboratoriju za mehanička ispitivanja na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. Iz epruveta V-1 i U-1 izrezali su se plosnati uzorci za statičko vlačno ispitivanje. Ispitivanje je provedeno prema HRN EN ISO 6892-1. Uređaj na kojemu se provodilo statičko vlačno ispitivanje prikazan je na slici 66. Riječ je o univerzalnoj kidalici naziva WPM EU 40 mod. Navedena kidalica sadrži kapacitet od 400 kN. Brzina ispitivanje iznosila je 10 mm/min dok je temperatura iznosila 23 °C. Na slikama 67. i 68. dan je prikaz epruveti nakon kidanja dok su u tablici 19. dani numerički rezultati mjerenja.



Slika 66. Univerzalna kidalica WPM EU 40 mod



Slika 67. Uzorak epruvete V-1 nakon statičko vlačnog ispitivanja



Slika 68. Uzorak epruvete U-1 nakon statičko vlačnog ispitivanja

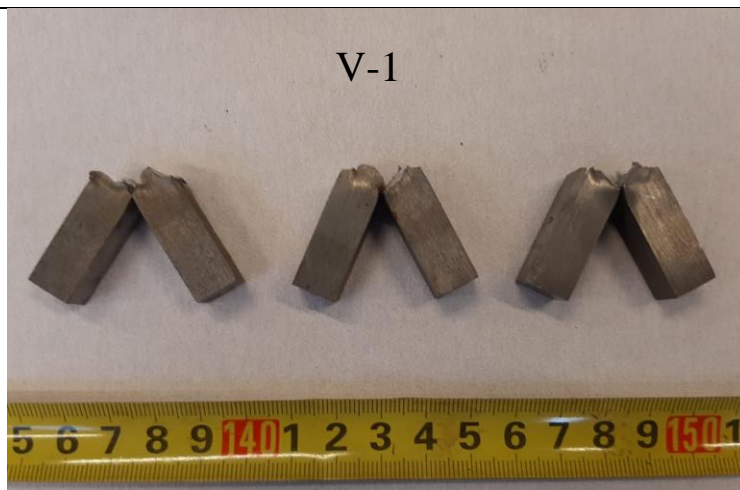
Tablica 19. Numerički rezultati statičko vlačnog ispitivanja

Veličina	a_0 ,	b_0 ,	S_0 ,	F_m ,	R_m ,
Oznaka	mm	mm	mm ²	kN	MPa
V-1	23,52	24,96	587,06	308	524,6
U-1	24,21	24,81	600,65	308,5	513,6

Analizom numeričkih rezultata statičko vlačnog ispitivanja na uzorcima V-1 i U-1 zaključuje se kako su rezultati vlačne čvrstoće približno jednaki. Ne dolazi do promjene mehaničkih svojstva i značajnog smanjenja vlačne čvrstoće uslijed upotrebe dva različita oblika žlijeba.

5.6.5. Ispitivanje žilavosti metala zavara

Ispitivanje žilavosti metala zavara provedeno je u laboratoriju za mehanička ispitivanja na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. Iz epruveta V-1 i U-1 izrezalo se po tri uzorka za ispitivanje žilavosti metala zavara. Ispitivanje je provedeno prema HRN EN ISO 148-1. Uređaj na kojemu se ispitivala žilavost naziva je AVK Budapest kapaciteta 300 J. Uzorci su hlađeni 30 minuta u smjesi suhog leda i alkohola kako bi se postigla tražena temperatura. Nakon hlađenja uzorci su bili podvrgnuti ispitivanju. Na slikama 69. i 70. dan je prikaz uzoraka nakon ispitivanja dok su u tablici 20. numerički rezultati ispitivanja.



Slika 69. Uzorci epruvete V-1 nakon ispitivanja žilavosti metala zavara



Slika 70. Uzorci epruvete U-1 nakon ispitivanja žilavosti metala zavara

Tablica 20. Numerički rezultati ispitivanja žilavosti metala zavara

Veličina	B,	W,	L,	Utor,	Utor,	Temp.,	KV,
Oznaka	mm	mm	mm	mm	V ili U	°C	J
V-1	10,00	9,96	55,00	2,00	V	-20	150
V-1	9,98	9,96	55,40	2,00	V	-20	123
V-1	10,00	9,96	55,00	2,00	V	-20	141
Aritmetička sredina							138
U-1	10,00	10,00	55,00	2,00	V	-20	145
U-1	10,00	9,97	55,00	2,00	V	-20	148
U-1	9,95	9,98	54,70	2,00	V	-20	130
Aritmetička sredina							141

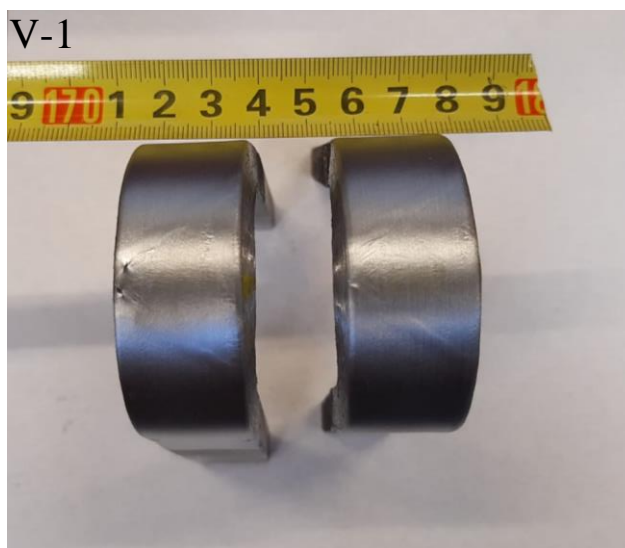
Analizom numeričkih rezultata ispitivanja žilavosti metala zavara na uzorcima V-1 i U-1 zaključuje se kako su rezultati žilavosti približno jednaki. Kako se ispitivala žilavost metala zavara, a metal zavara ima garantiranu žilavost na $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ (po važećim atestima) zaključuje se kako materijali nisu imali gubitak žilavosti na $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Stoga se zaključuje kako upotrebom dva različita oblika žlijeba ne dolazi do međusobnog odstupanja rezultata ispitivanja.

5.6.6. Ispitivanje na savijanje

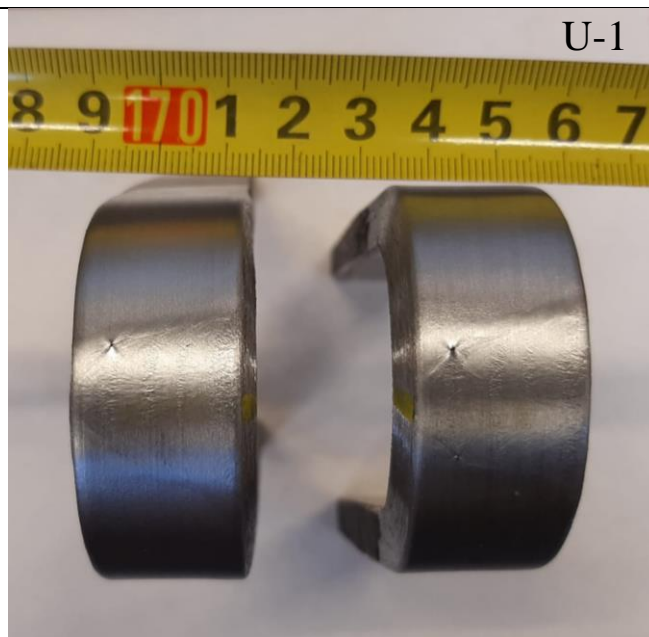
Ispitivanje na savijanje provedeno je u laboratoriju za zavarivanje na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. Iz epruveta V-1 i U-1 izrezalo se po dva uzorka za bočno savijanje. Ispitivanje je provedeno prema ISO 5173. Uređaj na kojemu se ispitivalo bočno savijanje je hidraulična preša proizvođača OMCN kapaciteta 10 t odnosno 400 bar (slika 71.). Na slikama 72. i 73. dan je prikaz uzoraka nakon ispitivanja.



Slika 71. Hidraulična preša za savijanje uzoraka



Slika 72. Uzorci epruvete V-1 nakon ispitivanja bočnoga savijanja



Slika 73. Uzorci epruvete U-1 nakon ispitivanja bočnoga savijanja

Na oba uzorka epruvete V-1 i U-1 pojavila se pukotina u području između korijenskog i nadkorijenskog prolaza. Navedeno se pripisuje nečistoćama koje nisu uklonjene čišćenjem međuprolaza. Red veličine indikacije je od 0,5 – 1 mm. Ukoliko nije drukčije navedeno, prema ISO 5173 nesavršenosti koje su manje od 3 mm smatraju se kao prihvatljive. Iz navedenoga se zaključuje kako su uzorci prošli ispitivanje te se različitim oblikom žlijeba dobivaju slične karakteristike.

5.7. Isplativost korištenja različitih oblika žlijebova

Tablica 21. Ekonomska usporedba epruvete V-1 i U-1

		Epruveta V-1	Epruveta U-1
Vrijeme tokarenja, min		167 min 20 s	137 min 20 s
Broj prolaza		7	6
Vrijeme zavarivanja, min	1	9 min	7 min 33 s
	2	6 min 56 s	7 min 40 s
	3	15 min 14 s	14 min 47 s
	4	17 min 29 s	15 min
	5	22 min 31 s	16 min 3 s
	6	19 min 9 s	17 min 36 s
	7	19 min 30 s	/
	Ukupno	109 min 49 s	78 min 39 s
Količina žice, kg	Ø1,2 (puna)	0,38	0,32
	Ø1,0 (PPŽ)	0,25	0,27
	Ø1,2 (PPŽ)	4,1	3,24
	Ukupno	4,73	3,83
Količina troske, g	Ø1,0 (PPŽ)	42,5	38,8
	Ø1,2 (PPŽ)	351,7	225,7
	Ukupno	394,2	264,5
Max. unesena toplina, kJ/mm		3,88	2,88

Analizom tablice 21. dolazi se do sljedećih zaključaka:

- vrijeme za izradu epruvete U-1 iznosilo je 30 min manje nego za izradu epruvete V-1 (17,93 % manje vrijeme izrade)
- broj prolaza kod zavarivanja epruvete U-1 je manji za jedan nego za zavarivanje epruvete V-1
- ukupno vrijeme zavarivanje epruvete U-1 iznosilo je 31 min i 10 s kraće nego za zavarivanje epruvete V-1 (28,38 % manje vremena zavarivanja)

- ukupna težina žice potrošena za zavarivanje epruvete U-1 iznosilo je 0,9 kg manje nego za epruvetu V-1 (19,03 % manje dodatnoga materijala)
- na 1 kg dodatnog materijala ($\emptyset 1,2$ praškom punjena žica) nastane 85,78 g troske
- najveća unesena toplina prilikom zavarivanja epruvete U-1 iznosila je 1 kJ/mm manje nego za zavarivanje epruvete V-1 (25,77 % manja unesena maksimalna toplina).

Sumirane uštede U pripreme naspram V pripreme prikazani su u tablici 22.

Tablica 22. Sumirane uštede U pripreme naspram V pripreme

	Epruveta V-1	Epruveta U-1	Ušteda
Vrijeme pripreme, min	167 min 20 s	137 min 20 s	30 min
Broj prolaza	7	6	1
Vrijeme zavarivanja, min	109 min 49 s	78 min 39 s	31 min 10 s
Količina dodatnog materijala, kg	4,73	3,83	0,9

Tablica 23. Prednosti i nedostaci korištenih oblika žlijebova

Kriterij	Epruvete	
	V-1	U-1
Brzina zavarivanja	-	+
Vrijeme zavarivanja	-	+
Utrošeni dodatni materijal	-	+
Mogućnost zavarivanja debljih materijala u manje prolaza	-	+
Geometrija zavarenog spoja	+	+
Pojava nepravilnosti	-/+	-/+
Proizvodnost	-	+
Spektar debljih stijenki koje se zavaruju	+	+
Pojava deformacije	-	-
Mogućnost primjene na raznorodnim materijalima	+	+
Jednostavna priprema spoja	+	-

Usporedbom prednosti i nedostataka iz tablice 23. zaključuje se kako se s oba oblika žlijeba mogu ostvariti visokoproduktivni postupci zavarivanja. Primjena klasičnog V spoja je sigurnija varijanta izgradnje trasa cjevovoda jer su radnici s takvom pripremom uigrani te znaju kako se treba ponašati prilikom zavarivanja. Nadalje, U spoj je uža varijanta V spoja kod koje nema previše mjesta za njihanje te je takvom pripremom moguće napraviti jedan prolaz što bi inače kod V spoja bilo ostvarivo s dva prolaza. Odabirom optimalnih parametara dobiva se zadovoljavajuća kvaliteta zavarenoga spoja uz bitan parametar manjeg unosa topline. Također je skraćeno vrijeme pripreme, vrijeme postupka zavarivanja te količina dodatnoga materijala. Od nedostataka potrebno je naglasiti prilagodbu opreme za zavarivanje trasa s U pripremom spoja.

5.8. Prilagodba opreme i projekcija uštede na većem projektu

Analizom cjelokupnog eksperimenta zaključuje se kako se za zavarivanje cjevovoda većih promjera i većih debljina mora prilagoditi oprema. Što se tiče samih strojeva i opreme za automatsko zavarivanje, nema razlike u pogledu zavarivanja V spoja i U spoja. Valja pripaziti na uski žlijeb U spoja te po tome prilagoditi sapnicu pištolja za zavarivanje. Nadalje, sama priprema spoja kod zavarivanja cjevovoda teče drugačije. Može se zaključiti kako se cijevi na terenu ne tokare pojedinačno kao u eksperimentu iz prethodnog poglavlja već za to postoje posebno konstruirani strojevi koji na terenu obrade cijevi na željenu pripremu spoja. Cijevi od dobavljača dođu na krajevima ravne ili već imaju unaprijed klasičnu V pripremu. Kako bi se uštedilo vrijeme zavarivanja, a time i dodatni materijal postoji opcija kupnje stroja prikazan na slici 74.



Slika 74. Stroj za glodanje cijevi [20]

Riječ je o stroju koji na terenu može u kratkom vremenskom razdoblju (manje od jedne minute) obraditi cijev na željenu U pripremu. Raspon cijevi ide od 24“ pa sve do 48“. Dvostruki hidraulički motor alata pokreće pogonske zupčanike koji su pričvršćeni na glavno vreteno za isporuku snage. Alat se može podizati uzdužno te gore i dolje ovisno o položaju. Red veličine cijene navedenoga stroja je oko 100 000 €. Na slici 75. dan je prikaz obrađene cijevi na terenu [21].



Slika 75. Obrada cijevi na terenu u 10 s [22]

Valja napomenuti kako je uz navedeni stroj potreban i dodatan bager ili traktor za transport stroja od jedne jedinice do druge. Uz to su potrebni i operateri koji programiraju stroj, postavljaju parametre i kontroliraju žlijeb nakon obrade. Navedeno još dodatno povećava početne investicije.

Kao primjer buduće projekcije na većim projektima može se razmatrati izgradnja magistralnog cjevovoda duljine 20 kilometara (cijev promjera $\varnothing 406,4$ mm i debljine stijenke 25 mm). Kako su cijevi pri izgradnji cjevovoda dugačke 12 metara, može se lako doći do ukupnog broja zavora koji tada iznosi 1667. Na temelju rezultata iz eksperimenta može se izračunati kako je za izgradnju cjevovoda s V pripremom potrebno 11 669 prolaza automatskim zavarivanjem dok je za izgradnju cjevovoda s U pripremom potrebno 10 002 prolaza. Iz navedene razlike se zaključuje kako je za izgradnju cjevovoda s U pripremom potrebno 1667 prolaza manje. Nastavno na to može se izračunati i utrošak žice koji će se uštediti upotrebom U pripreme, a to je 1500 kg. Računajući prosječna vremena zavarivanja prolaza kod V spoja (15 min 41 s) i kod U spoja (13 min 6 s) može se dobiti vrijeme zavarivanja prilikom zavarivanja cjevovoda duljine 20 kilometara. Za V spoj iznosi 3048 sati dok za U spoj iznosi 2148 sata što u razlici iznosi 864 sata manje vremena zavarivanja. Podijeli li se navedeno vrijeme s brojem ekipa zavarivača (u praksi najčešće 3, ali to ovisi o promjeru cijevi i debljine stijenke) te pomnoži s vremenom zavarivanja u jednome danu (prosječno oko 6 sati), dobiva se ušteda od 48 radnih dana. U tablici 24. dan je prikaz navedenih ušteda.

Tablica 24. Projekcija uštede zavarivanja plinovoda duljine 20 km

		V priprema	U priprema	Ušteda
Broj prolaza		11669	10002	1667
Vrijeme zavarivanja, h	Ukupno	3048	2184	864
	Po ekipi (3)	1016	728	288
	Broj radnih dana	170	122	48
Količina dodatnog materijala, kg		7884	6384	1500

Navedena projekcija uštede je gruba te se ona samo odnosi na uštedu vremena zavarivanja (kada luk gori) i uštedu dodatnoga materijala.

6. ZAKLJUČAK

Budući da se postavljaju sve veći zahtjevi za dubljom penetracijom, većom brzinom zavarivanja, boljom kvalitetom zavara i visokom produktivnošću, dolazi do razvoja novih, odnosno modificiranih konvencionalnih postupaka. Tako su razvijeni modificirani MAG postupci zavarivanja poput STT, LSC, *FastROOT*, primjena praškom punjene žice (FCAW) i dr. Moderniji sustavi za zavarivanje cjevovoda koriste U pripremu spoja prilikom zavarivanja čime se značajno smanjuje vrijeme zavarivanja te je moguće ispoštovati rokove trase i uštedu sredstava.

U eksperimentalnom dijelu rada uspoređivao se automatski postupak zavarivanja V spoja i U spoja. Zaključuje se kako je na velikim promjerima i debljinama daleko produktivnija upotreba U pripreme spoja te je moguće dobiti zavarene spojeve dobre kvalitete s potpunom penetracijom uz manji depozit materijala nego kod V pripreme spoja. U eksperimentu se dokazalo kako je za cijev promjera 406,4 mm, debljine stijenke 25 mm s U pripremom bio potreban 1 prolaz manje, vrijeme zavarivanja bilo je 31 minuta manje te je utrošak žice bio manji za 0,9 kg u odnosu na V pripremu cijevi jednakih dimenzija. Analizom makroizbrusaka vidljivo je proširenje ZUT-a kod epruvete V-1 u odnosu na epruvetu U-1 što se pripisuje većim unosom topline. Kod mjerenja tvrdoće nije bilo značajnih skokova tvrdoće što je karakteristično za ZUT-a uslijed većeg unosa topline. Ispitivanjem žilavosti metala zavara i statičko vlačnim ispitivanjem nije došlo do gubitka žilavosti i smanjenja mehaničkih svojstva uslijed upotrebe dva različita žlijeba. Nadalje, nakon ispitivanja bočnog savijanja pojavile su se indikacije koje su prihvatljive i koje su mogu pojaviti neovisno o obliku žlijeba.

Kako je oprema za automatsko zavarivanje vrlo robusna i skupa, potrebno je na početku napraviti veliku investiciju u kojoj je potrebno analizirati svaku stavku troška. Prilikom zavarivanja cjevovoda s U pripremom uvelike će pomoći stroj koji na terenu obrađuje cijevi na navedenu pripremu. Ušteda će na većim projektima (poput izgradnje magistralnog cjevovoda duljine 20 kilometara) biti značajna te se detaljnijom analizom gdje se uzimaju u obzir i utrošak plina, energije, ljudstva i ostalih parametara može saznati nakon koliko zavarenih spojeva će se dodatna investicija isplatiti.

LITERATURA

- [1] Kralj S., Kožuh Z., Garašić I.: Moderni sustavi za automatsko zavarivanje magistralnih cjevovoda 2007., Slavonski Brod, s interneta https://dtzsb.unisb.hr/wp-content/uploads/radovi_2007/365-376.pdf preuzeto 16.03.2022.
- [2] Garašić I., Kožuh Z.: Autorizirana predavanja iz kolegija „Strojevi i oprema za zavarivanje“, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, s interneta https://www.fsb.unizg.hr/atlantis/upload/newsboard/19_11_2013_19842_STROJEVI_I_OPREMA_ZA_ZAVARIVANJE_ZK.pdf preuzeto 16.03.2022.
- [3] Horvat M., Kondić V.: Primjeri modificiranih postupaka MIG/MAG zavarivanja, Varaždin, 2012., <https://hrcak.srce.hr/94796> preuzeto 16.03.2022.
- [4] Kralj S., Andrić Š.: Osnove zavarivačkih postupaka 1992., Zagreb
- [5] Golubić, M.: Usporedna analiza zavarenih spojeva izrađenih konvencionalnim MAG i D-arc postupkom, Diplomski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2018., <https://repozitorij.fsb.unizg.hr/islandora/object/fsb%3A4303> preuzeto 16.03.2022.
- [6] Grd, D.: Optimiranje parametara D – arc zavarivanja limova većih debljina, Diplomski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2021., <https://repozitorij.fsb.unizg.hr/islandora/object/fsb%3A6682> preuzeto 16.03.2022.
- [7] Garašić, I.: Autorizirana predavanja iz kolegija „Postupci zavarivanja“, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, s interneta https://www.fsb.unizg.hr/usb_frontend/?action=view&site_id=90&id=6314 preuzeto 22.03.2022.
- [8] Horvat M., Kondić V., Đunder M., Samardžić I.: Zavarivanje cjevovoda modificiranim MIG/MAG postupcima, Slavonski Brod, 2015., <https://www.bib.irb.hr/785191> preuzeto 22.03.2022.
- [9] <https://www.lincolnelectric.com/en-au/support/process-and-theory/Pages/stt-pipe-welding-detail.aspx> preuzeto 22.03.2022.
- [10] <https://servus.hr/strucni-clanci/low-spatter-funkcija/> preuzeto 23.03.2022.
- [11] <https://www.fronius.com/en/welding-technology/world-of-welding/fronius-welding-processes/lsc> preuzeto 23.03.2022.
- [12] https://www.irt3000.si/hr/vijesti/arhiv-vijesti/2017011808532713/napredni_izvori_struje_za_migmag_zavarivanje/ preuzeto 24.03.2022.

-
- [13] <https://weldguru.com/flux-core-welding/> preuzeto 22.05.2022.
- [14] J.M. Antonini: Health Effects Associated with welding,
<https://doi.org/10.1016/B978-0-08-096532-1.00807-4> preuzeto 22.05.2022.
- [15] HRN EN ISO – 156145 – 1: 2017
- [16] Atest osnovnoga materija S355J2H
- [17] Atest dodatnoga materijala Böhler EMK 6
- [18] Atest dodatnoga materijala Böhler DIAMONDSPARK 52 RC
- [19] Atest dodatnoga materijala HYUNDAI SC – 71MJ
- [20] <https://www.qapqa.com/portfolio-item/pipe-facing-machine/> preuzeto 22.06.2022.
- [21] <https://www.tritool.com/files/content/technicalspecifications/portablefacingmachinepfm/terramax%C3%82%C2%AE-techspec.pdf?d=20211112183333> preuzeto 22.06.2022.
- [22] https://www.youtube.com/watch?v=5dT37_t6EA4&ab_channel=CRC-EvansPipelineInternational preuzeto 22.06.2022.

PRILOZI

I. CD-R disc