Primjena visokoučinskog MAG postupka zavarivanja

Frigan, Filip

Undergraduate thesis / Završni rad

2021

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

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:326745

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-28**

Repository / Repozitorij:

Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb







SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Filip Frigan

Zagreb, 2021.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor: Student:

Prof. dr. sc. Zoran Kožuh, dipl. ing. Filip Frigan

Zagreb, 2021.

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

Zahvaljujem se svome mentoru prof. dr. sc. Zoranu Kožuhu na ukazanome povjerenju, strpljenju i stručnome vođenju kroz izradu završnoga rada.

Posebno hvala asistentici dr. sc. Maji Jurici, mag. ing. na velikoj pomoći, strpljenju i stručnome vođenju te svim korisnim savjetima tijekom izrade završnoga rada.

Također se zahvaljujem tehničkom suradniku Krešimiru Sukobljeviću na pomoći tijekom izrade eksperimentalnog dijela završnoga rada.

Zahvaljujem se svojoj obitelji i prijateljima na velikoj podršci tijekom izrade završnoga rada i tijekom cijelog preddiplomskoga studija.

Filip Frigan

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE
Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo materijala i mehatronika i robotika

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

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **FILIP FRIGAN** Mat. br.: 0035215148

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Primjena visokoučinskog MAG postupka zavarivanja**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Application of high-efficiency MAG welding**

Opis zadatka:

U teorijskom dijelu rada potrebno je navesti i opisati vrste prijenosa metala u električnom luku pri MAG zavarivanju. S obzirom na specifične primjene, navesti modificirane načine prijenosa metala koji rezultiraju visokom produktivnošću u industriji. Detaljno opisati posebni modificirani način prijenosa metala kojeg karakterizira zakopani električni luk (D – arc), te ga usporediti s klasičnim načinom prijenosa (štrcajućim lukom).

U eksperimentalnom dijelu rada je potrebno definirati parametre zavarivanja D – arc načinom prijenosa metala za zavarivanje ploče velikih debljina u svrhu postizanja potpune penetracije. Dobiveni zavareni spoj potrebno je podvrgnuti razornim i/ili nerazornim ispitivanjima te ocijeniti kvalitetu zavarenog spoja. U konačnici, analizom dobivenih rezultata potrebno je komentirati isplativost korištenja D – arc načina prijenosa metala spram štrcajućeg luka s obzirom na kvalitetu dobivenog zavarenog spoja.

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

Zadatak zadan:
30. studenoga 2020.

Zadatak zadao:

Prof.dr.sc. Zoran Kožuh

Datum predaje rada:
1. rok: 18 veljače 2021.
2. rok (izvanredni): 5. srpnja 2021.
3. rok: 23. rujna 2021.

Predviđeni datumi obrane:
1. rok: 22.2. – 26.2.2021.
2. rok (izvanredni): 9.7.2021.
3. rok: 27.9. – 1.10.2021.

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Branko Bauer

SADRŽAJ

SADRŽAJ I

POPIS SLIKA IV

POPIS TABLICA VII

POPIS KRATICA VIII

POPIS OZNAKA X

SAŽETAK XI

SUMMARY XII

1. UVOD 1

2. MAG POSTUPAK ZAVARIVANJA 2

2.1. Osnove postupka 2

2.2. Žice za MAG zavarivanje 4

2.3. Uloga plinova pri MAG zavarivanju 4

2.4. Oprema i strojevi za MAG zavarivanje 7

2.5. Metode prijenosa metala kod MAG zavarivanja 9

2.5.1. Prijenos metala kratkim spojevima 9

2.5.2. Prijenos metala mješovitim lukom 10

2.5.3. Prijenos metala štrcajućim lukom 11

2.5.4. Prijenos metala impulsnim strujama 12

2.5.5. Prijenos metala velikom gustoćom struje 12

3. MODIFICIRANI POSTUPCI MAG ZAVARIVANJA 14

3.1. Modificirani prijenos metala kratkim spojevima 14

3.1.1. Surface tension transfer 14

3.1.2. Cold metal transfer 16

3.1.3. FastROOT 16

3.1.4. Controlled bridge transfer 17

3.2. Modificirani prijenos metala štrcajućim lukom 18
3.2.1. Rapid MAG Technology 18
3.2.2. ForceArc 19
3.2.3. PowerMode 19
3.3. Visokoučinski postupci zavarivanja 20
3.3.1. Flux Cored Arc Welding 20
3.3.2. Tandem Welding 21
4. ZAKOPANI LUK – „D – arc“ 23
4.1. Stabilizacija zakopanoga luka visoke struje 24
4.2. Sustav za zavarivanje zakopanim lukom 26
4.3. Usporedba spojeva „D – arc“ postupka i konvencionalnog MAG postupka 26
4.4. Primjeri primjene „D – arc“ sustava zavarivanja 27
4.4.1. Sučeljeni spoj 27
4.4.2. T spoj 28
5. EKSPERIMENTALNI DIO 29
5.1. Oprema za postupke zavarivanja 29
5.1.1. D - arc 29
5.1.2. EPP 30
5.2. Osnovni materijal 31
5.2.1. D - arc 31
5.2.2. EPP 31
5.3. Dodatni materijali i zaštitna atmosfera 32
5.3.1. D – arc 32
5.3.2. EPP 33
5.4. Postupak zavarivanja 34
5.4.1. D - arc 34
5.4.2. EPP 38
5.5. Provedena ispitivanja 43

5.5.1. Analiza makroizbrusaka....43
5.5.2. Mjerenje tvrdoće....47
5.6. Isplativost korištenja D – arc sustava zavarivanja....54
6. ZAKLJUČAK....55
LITERATURA....56
PRILOZI....58

POPIS SLIKA

Slika 1. Shematski prikaz procesa (a) i uređaja (b) [2] 2
Slika 2. Presjeci praškom punjenih žica [2] 4
Slika 3. Kemijske reakcije pri MAG - CO_2 zavarivanju čelika [2] 5
Slika 4. Karakterističan oblik električnoga luka i njegova geometrija; u argonu (a) i ugljičnom dioksidu (b) [2] 6
Slika 5. Oblik penetracije zavara ovisno o upotrijebljenoj zaštitnoj atmosferi [2] 6
Slika 6. Osnovna oprema za MAG postupak zavarivanja [4] 7
Slika 7. Automatski MAG sustav za zavarivanje [5] 8
Slika 8. Presjek pištolja u radu kod MAG zavarivanja [5] 9
Slika 9. Prijenos dodatnog metala kratkim spojevima: a) realni prikaz, b) shematski prikaz [5] 10
Slika 10. Prijenos dodatnog metala mješovitim lukom: a) realni prikaz, b) shematski prikaz [5] 11
Slika 11. Prijenos dodatnog metala štrcajućim lukom: a) realni prikaz, b) shematski prikaz [5] 11
Slika 12. Prijenos dodatnog metala impulsnim strujama: a) realni prikaz, b) shematski prikaz [5] 12
Slika 13. Rotacijski prijenos dodatnog metala velikom gustoćom struje: a) realni prikaz, b) shematski prikaz [5] 13
Slika 14. Izbrusak korijenskog prolaza: a) celulozna elektroda – REL; b) STT postupak [1] 14
Slika 15. Prikaz dinamičke karakteristike izvora struje [1] 15
Slika 16. CMT postupak i prikaz jednog njegovog ciklusa [6] 16
Slika 17. Zavareni spoj dupleks i superaustenitnog čelika debljine 2 mm [4] 17
Slika 18. Prijenos metala CBT postupkom [7] 17
Slika 19. Prikaz kutnog spoja izvedenog RMT postupkom (materijal – ST 37): a) d = 6 mm; b) d = 8 mm; c) d = 20 mm [4] 18
Slika 20. Snimka prijenosa metala: a) ForceArc postupak; b) prijenos metala štrcajućim lukom [8] 19
Slika 21. Shematski prikaz FCAW postupka [10] 20
Slika 22. Pištolj za Tandem postupak zavarivanja [6] 21

Slika 23. Robotska stanica za Tandem postupak zavarivanja [6] 22
Slika 24. Prikaz zakopanog električnog luka [11] 23
Slika 25. Shematski prikaz usporedbe konvencionalnog načina zavarivanja i zavarivanja zakopanim lukom [11] 23
Slika 26. Nestabilno ponašanje zakopanog luka [11] 24
Slika 27. Mehanizam stabilizacije zakopanog luka [11] 25
Slika 28. Ponašanje stabiliziranog zakopanog luka [11] 25
Slika 29. Usporedba izgleda zavara [11] 25
Slika 30. Robotizirani sustav za D - arc zavarivanje [4] 26
Slika 31. Sustav za D - arc postupak zavarivanja [4] 29
Slika 32. Mehanizam za EPP postupak zavarivanja 30
Slika 33. Specifikacijska pločica izvora struje 30
Slika 34. Specifikacija žice korištena pri D - arc zavarivanju [14] 32
Slika 35. Specifikacija žice korištena pri EPP postupku zavarivanja [15] 33
Slika 36. Specifikacija praška korištenog pri EPP postupku zavarivanja [16] 34
Slika 37. Priprema spoja za uzorke A-1 i A-2 35
Slika 38. Shematski prikaz pozicioniranja pištolja i keramičke podloške 35
Slika 39. Shematski prikaz spoja nakon zavarivanja 36
Slika 40. Uzorak A-1 nakon postupka zavarivanja 37
Slika 41. Uzorak A-2 nakon postupka zavarivanja 37
Slika 42. Priprema spoja za uzorak B–1 38
Slika 43. Priprema spoja za uzorak B–2 38
Slika 44. Prikaz pripreme spoja sa prednje strane 39
Slika 45. Prikaz pripreme spoja s korijenske strane 39
Slika 46. Pozicioniranje elektrode 40
Slika 47. Proces zavarivanja uzoraka 41
Slika 48. Uzorak B-1: lice zavara 41
Slika 49. Uzorak B-1, korijen zavara 42
Slika 50. Uzorak B-2, lice zavara 42
Slika 51. Uzorak B-2, korijen zavara 43
Slika 52. Uzorci na tračnoj pili 44
Slika 53. Uređaj za brušenje 44
Slika 54. Makroizbrusci uzoraka A-1 i A-2 45

Slika 55. Makroizbrusci uzoraka B-1 i B-2 45
Slika 56. Zone zavara na makroizbruscima A-1 i A-2 46
Slika 57. Zone zavara na makroizbruscima B-1 i B-2 46
Slika 58. Tvrdomjer Reicherter TM12 47
Slika 59. Shema mjerenja tvrdoće na uzorku A-1 48
Slika 60. Grafički prikaz tvrdoća uzorka A-1 49
Slika 61. Shema mjerenja tvrdoće na uzorku A-2 49
Slika 62. Grafički prikaz tvrdoće uzorka A-2 50
Slika 63. Shema mjerenja tvrdoće na uzorku B-1 51
Slika 64. Grafički prikaz tvrdoće uzorka B-1 52
Slika 65. Shema mjerenja tvrdoće na uzorku B-2 52
Slika 66. Grafički prikaz tvrdoće uzorka B-2 53

POPIS TABLICA

Tablica 1. Usporedba zavarenih spojeva konvencionalnog MAG postupka i "D - arc" postupka [11] 27
Tablica 2. Primjer sučeljenog zavara [11] 27
Tablica 3. Primjer sučeljenog spoja uz X pripremu [11] 28
Tablica 4. Primjer T spoja [11] 28
Tablica 5. Kemijski sastav S375 [12] 31
Tablica 6. Vrijednosti granice razvlačenja i vlačne čvrstoće za čelik S375 [12] 31
Tablica 7. Kemijski sastav S355 [13] 31
Tablica 8. Vrijednosti granice razvlačenja i vlačne čvrstoće za čelik S355 [13] 31
Tablica 9. Parametri zavarivanja D – arc postupka 36
Tablica 10. Parametri zavarivanja EPP postupkom 40
Tablica 11. Rezultati mjerenja tvrdoće na uzorku A-1 48
Tablica 12. Rezultati mjerenja tvrdoće na uzorku A-2 50
Tablica 13. Rezultati mjerenja tvrdoće na uzorku B-1 51
Tablica 14. Rezultati mjerenja tvrdoće na uzorku B-2 53
Tablica 15. Prednosti i nedostaci korištenih postupaka zavarivanja 54

POPIS KRATICA

Kratica	Opis
Al	Aluminij
Ar	Argon
C	Ugljik
CBT	Modificirani MAG postupak koji kombinira prednosti impulsnog i klasičnog MAG zavarivanja (eng. Controlled bridge transfer)
CMT	Prijenos metala kratkim spojevima uz vrlo mali unos topline (eng. Cold metal transfer)
CO	Ugljikov monoksid
CO_2	Ugljikov dioksid
CV	Konstantni napon (engl. Constant Voltage)
D - arc	Visokoučinkoviti postupaka zavarivanja zakopanim lukom
EPP	Elektrolučno zavarivanje taljivom elektrodom pod zaštitnim praškom
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)
ForceArc	Modificirani MAG postupak temeljen na prijenosu metala štrcajućim lukom
He	Helij
HV10	Tvrdoća po Vickersu

MAG	Elektrolučno zavarivanje taljivom elektrodom u zaštitnoj atmosferi aktivnog plina
Mn	Mangan
MZ	Metal zavara
OM	Osnovni materijal
O_2	Kisik
P	Fosfor
PowerMode	Modificirani MAG postupak koji omogućava stabilan električni luk s jednolikim profilom penetracije
RMT	Modificirani MAG postupak temeljen na prijenosu metala štrcajućim lukom (eng. Rapid MAG technology)
S	Sumpor
Si	Silicij
STT	Prijenos metala površinskom napetošću (engl. Surface tension transfer)
ZUT	Zona utjecaja topline

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
HV	-	Tvrdoća po Vickersu
I	A	Jakost struje zavarivanja
k	-	Stupanj iskorištenja postupka zavarivanja
Q	kJ/cm	Unos topline
R_m	MPa	Vlačna čvrstoća
$R_{p0,2}$	MPa	Konvencionalna granica razvlačenja
t	s	vrijeme
U	V	Napon električnoga luka
v	cm/min	Brzina zavarivanja

SAŽETAK

Ovim radom obrađen je konvencionalni MAG postupak zavarivanja kao i načini prijenosa metala koji se javljaju upotrebom ovoga postupka. Nabrojani su i opisani modificirani načini prijenosa metala koji rezultiraju visokom produktivnošću, a zasnivaju se na konvencionalnim načinima prijenosa. Detaljno je opisan način prijenosa metala kojeg karakterizira zakopani električni luk poznat kao „D – arc“ i njegova primjena za zavarivanje konstrukcija od nelegiranih čelika.

U eksperimentalnom dijelu provedena su ispitivanja kvalitete zavara dobivenih visokoučinskim D – arc postupkom zavarivanja u odnosu na EPP postupak zavarivanja (elektrolučno zavarivanje pod zaštitnim praškom) s parametrima D – arc postupka. Ispitivanja su se sastojala od vizualne analize makroizbrusaka i mjerenja tvrdoće. Nakon provedenih ispitivanja dobiveni rezultati su uspoređeni sa zavarima izvedenim EPP postupkom zavarivanja.

Ključne riječi: MAG, prijenos metala, zakopani električni luk, D – arc

SUMMARY

This thesis deals with the conventional MAG welding process as well as metal transfer modes that occur using this process. The modified metal transfer modes resulting in high productivity are listed and described and they are based on conventional modes of metal transfer. The method of metal transfer characterized by a buried arc known as „D – arc“ and its application for welding non – alloy steel structures is described in detail.

In the experimental part of the thesis, quality tests of welds obtained by high – efficiency D – arc welding process and SAW welding process (submerged – arc welding) with parameters of D – arc were performed. The tests consisted of visual analysis of macro – grindings and hardness measurements. After the performed tests, the results were compared with the welds performed by the SAW welding process.

Key words: MAG, metal transfer, buried arc, D – arc

1. UVOD

Zavarivanje je spajanje dvaju ili više istodobnih ili različitih materijala, taljenjem ili pritiskom sa ili bez dodavanja dodatnoga materijala. Prilikom zavarivanja se mogu koristiti različiti izvori energije kao što je plinski plamen, električni luk, električna struja, trenje i dr. Zavarivanje je jedna od najčešćih tehnologija koju susrećemo u industriji. Zbog vrste materijala, kvalitete zavara, fleksibilnosti, učinkovitosti, proizvodnosti, mehanizacije, automatizacije, razvijeno je niz postupaka zavarivanja. Među najpoznatijim postupcima ističe se zavarivanje taljivom elektrodom u zaštitnoj atmosferi poznat kao MIG/MAG postupak zavarivanja. To je vrsta postupka zavarivanja koji omogućava zavarivanje širokog spektra materijala, posebno čelika velikih debljina. Zbog prihvatljive cijene, često se koristi za pojedinačnu i masovnu proizvodnju. Također se mogu obavljati reparaturna zavarivanja te zavarivanja u prisilnim položajima. Pogodan je za automatizaciju i robotizaciju. Ima daleko veću učinkovitost nego ostali postupci zavarivanja te omogućava smanjenje deformacije samih konstrukcija. Zbog današnje proizvodnje koja je usmjerena prema proizvodnji visoke učinkovitosti, razvijeni su visokoučinski postupci MAG zavarivanja. Prilikom zavarivanja konstrukcija velikih debljina, od velike je važnosti da se osigura dovoljno velika penetracija. Neki od visokoučinskih MAG postupaka zavarivanja su FCAW, Tandem postupak, prijenos metala rotirajućim lukom, prijenos metala zakopanim lukom itd.

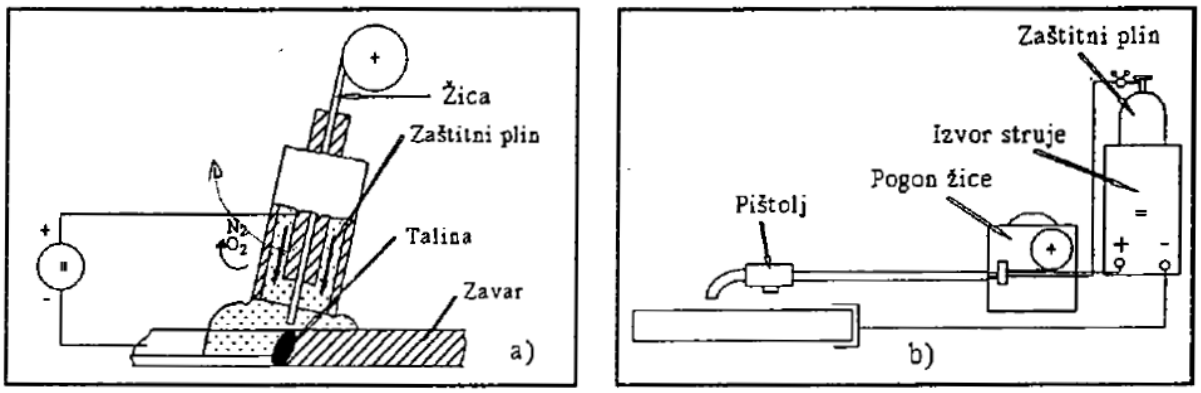
Prijenos metala zakopanim lukom (engl. buried arc) poznat kao „D – arc“ ostvaruje se na način da je vrh žice ispod razine taline. Duljina električnoga luka je relativno kratka, a uzrok tome je niska vrijednost napona. Primjenom ovakvoga postupka, ostvaruje se veliki depozit materijala što je karakteristika visokoučinskog zavarivanja. Također nije potrebna posebna priprema spoja zbog mogućnosti velike penetracije. U ovom radu je obrađena tehnologija zavarivanja D – arc postupkom te njezina primjena na različitim konstrukcijama.

2. MAG POSTUPAK ZAVARIVANJA

MAG postupak zavarivanja je postupak elektrolučnog zavarivanja u zaštitnoj atmosferi aktivnoga plina. Električni luk se uspostavlja između radnoga komada i taljive, kontinuirane elektrode koja je u ovome postupku i dodatni materijal. Primjena MAG postupka zavarivanja započela je sredinom 20. stoljeća. Postupak je prvobitno bio namijenjen za zavarivanje aluminija, legura na bazi aluminija i ostalih obojenih materijala. Veća primjena u zavarivanju različitih materijala došla je sa razvojem aktivnih plinova i plinskih mješavina koje su znatno smanjile cijenu zavarivanja. Razvoj ovoga postupka je potaknut zbog veće brzine zavarivanja, većeg depozita materijala, jednostavnoga rukovanja i automatizacije, zbog čega je danas jedan od najčešćih korištenih postupaka zavarivanja u industriji [1].

2.1. Osnove postupka

Kao što je već i prije rečeno, kod ovoga postupka zavarivanja električni se luk održava između taljive, kontinuirane elektrode u obliku žice koja je u pravilu spojena na plus pol istosmjernog izvora struje. Ovakav proces se odvija u zaštitnoj atmosferi koju osiguravaju aktivni plinovi (CO_2 i mješavine). Shematski prikaz procesa i uređaja je prikazan na slici 1 [2].



Slika 1. Shematski prikaz procesa (a) i uređaja (b) [2]

Pogonski sistem dodaje žicu konstantnom brzinom kroz cijevni paket i pištolj u električnome luku. Žica je također istovremeno i elektroda i dodatni materijal. Njenim taljenjem se popunjava pripremljeni spoj koji se zavaruje. Postupak u prikazanome slučaju može biti poluautomatski (u ovome slučaju dodavanje žice je mehanizirano, a vođenje pištolja je ručno) ili automatski gdje je postupak potpuno mehaniziran. U tom slučaju glava s pištoljem može biti

pokretana mehanizmom, ili je potpuno nepomična dok radni komad ima mehanizirano gibanje [2].

Kada se zavarivanje izvodi na udaljenostima koje su veće od 5 m od izvora električne energije, tada se obično primjenjuje dodatni pogon za dodavanje žice koji je smješten u samome pištolju. Takav sistem se naziva „push – pull“. Njegova je primjena od velike važnosti kada se radi s tanjim žicama promjera od 0,6 do 0,8 mm ili kada se radi sa žicama koje su napravljene od mekših materijala npr. Al i njegove legure. Ovaj spomenuti sistem sprječava gužvanje žice unutar cijevnoga vodiča [2].

Glavne prednosti MAG zavarivanja su [3]:

- 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 zavar 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

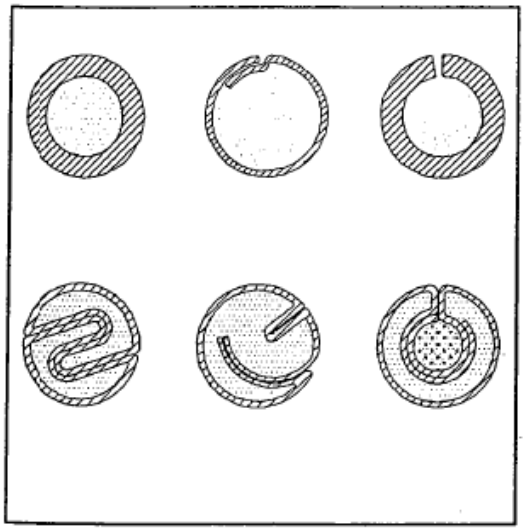
Glavni nedostaci MAG zavarivanja su [3]:

- 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

2.2. Žice za MAG zavarivanje

Kod MAG postupka zavarivanja najčešće se koriste pune žice promjera od 0,6 do 2,4 mm. Žice napravljene od čeličnoga materijala su pobakrene ili poniklane zbog boljeg električnoga kontakta i zaštite od korozije. Površine žica moraju biti glatke, dimenzijski vrlo točne i trebaju biti uredno namotane na kolute koji se pozicioniraju u uređaj za dodavanje [2].

Osim punih žica mogu se koristiti i praškom punjene žice. Takve žice mogu imati razne oblike poprečnoga presjeka ovisno o načinu kako se proizvode. Na slici 2. je prikaz presjeka različitih praškom punjenih žica. Takve se žice koriste uz plinsku zaštitu, dok postoje žice koje same sebi stvaraju zaštitnu atmosferu raspadanjem jezgre pa se stoga ne zahtijeva dodatna zaštita plinom [2].



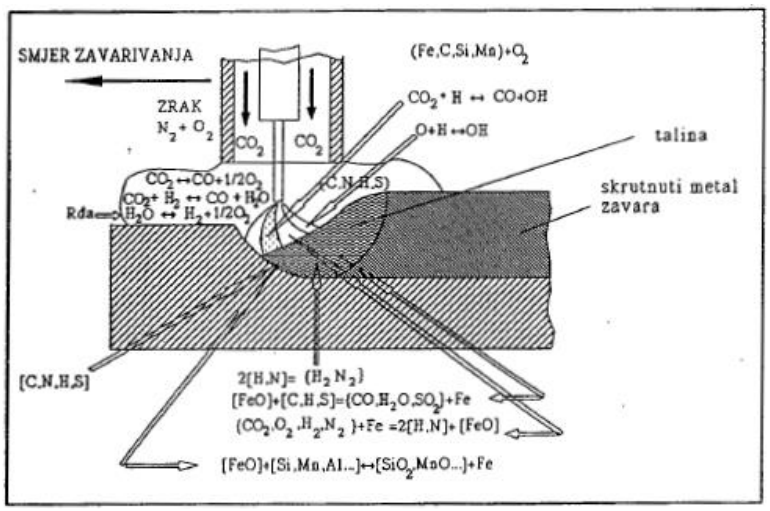
Slika 2. Presjeci praškom punjenih žica [2]

2.3. Uloga plinova pri MAG zavarivanju

Zaštitni plinovi koji se koriste kod MAG postupka zavarivanja štite rastaljeni metal, odnosno talinu od utjecaja okolne atmosfere. Dovode se kroz posebnu sapnicu na pištolju na mjesto zavarivanja koja se nalazi oko kontaktne cjevčice. Ionizacijom plina osigurava se vodljivi prostor za održavanje električnoga luka. Prilikom zavarivanja nelegiranih konstrukcijskih čelika, primjenjuju se aktivni plinovi poput čistoga CO_2 ili plinske mješavine $Ar/CO_2/O_2$. Kod zavarivanja u takvoj atmosferi dolazi do reakcije između CO_2 i rastaljenoga metala. CO_2 je inertan pri nižim temperaturama, ali se na temperaturama iznad 1600 °C disocira u ugljični monoksid (CO) i slobodni kisik koji tada reagira s rastaljenim metalom. Tada može doći i do

ponovnog vezivanja u molekulu CO_2 čime se oslobađa toplina koja rezultira većem provarivanju [2].

Štetno stvaranje oksida pri zavarivanju nelegiranih konstrukcijskih čelika može se spriječiti legiranjem dodatnog materijala (žice) dezoksidansima poput Si i Mn koji djeluju na način prikazano na slici 3. Zbog sagorijevanja Si i Mn tijekom zavarivanja u žici se nalazi više tih elemenata od količine koja je potrebna za dezoksidaciju. Obično se Si i Mn dodaju u omjeru 1:2 i tipičan sadržaj u žici je od 0,8 do 1,6 % [2].

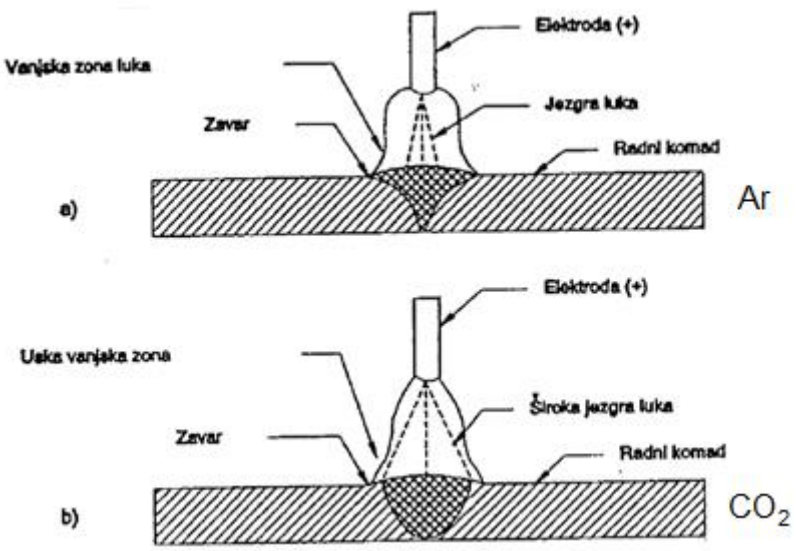


Slika 3. Kemijske reakcije pri MAG - CO_2 zavarivanju čelika [2]

Utjecaj zaštitnih plinova odražava se na [2]:

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

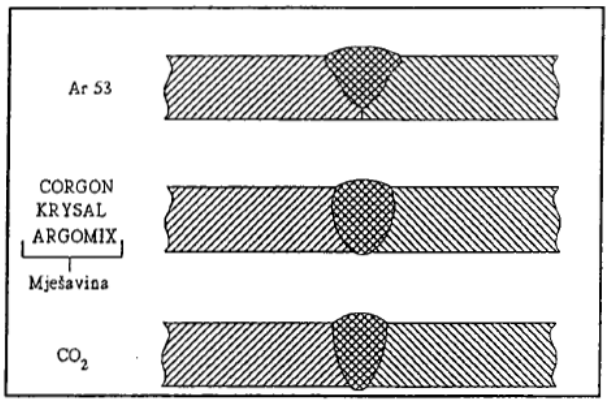
Specifična gustoća zaštitnoga plina ima veliki značaj za efikasnost zaštite mjesta zavarivanja od utjecaja okolišne atmosfere. Argon, koji je najgušći od inertnih plinova (10 puta gušći od helija), te ugljični dioksid, koji je za 1/3 gušći od argona oblikuju dobar zaštitni omotač. Toplinska vodljivost plinske atmosfere izravno utječe na radijalne gubitke topline što naposljetku utječe na oblik jezgre luka i njegovu geometriju. Argon koji ima nisku toplinsku vodljivost daje usku zonu jezgre luka, za razliku od CO_2 koji ima veću toplinsku vodljivost i prema tome širu jezgru luka što je prikazano na slici 4. Ovo svojstvo odražava se na oblik penetracije u osnovnome materijalu [2].



Slika 4. Karakterističan oblik električnoga luka i njegova geometrija; u argonu (a) i ugljičnom dioksidu (b) [2]

Također na slici 4. vide se karakteristični oblici geometrije zavara upotrebom različitih zaštitnih plinova koji se dosta razlikuju. Zaštitna atmosfera argona osigurava penetraciju, ali zahtijeva i točnost kod pripreme spoja i vođenje pištolja, dok zaštitna atmosfera CO_2 osigurava širu penetraciju, čime se mogu pokriti greške pripreme i vođenje pištolja, ali se zato dobiva nepovoljniji oblik zavara [2].

Mješavina ovih plinova u pogodnom omjeru ima prihvatljivija svojstva u pogledu penetracije. Također, uz penetraciju treba uzeti i faktore poput izgleda zavara, sklonost greškama i sl. Zbog toga je danas jedan od najčešće korištenih plinova kod MAG zavarivanja nelegiranih konstrukcijskih čelika plinska mješavina argona i ugljičnog dioksida u omjeru 82 % Ar i 18 % CO_2. Na slici 5. moguće je vidjeti oblike profila zavarenoga spoja ovisno o upotrijebljenoj zaštitnoj atmosferi [2].



Slika 5. Oblik penetracije zavara ovisno o upotrijebljenoj zaštitnoj atmosferi [2]

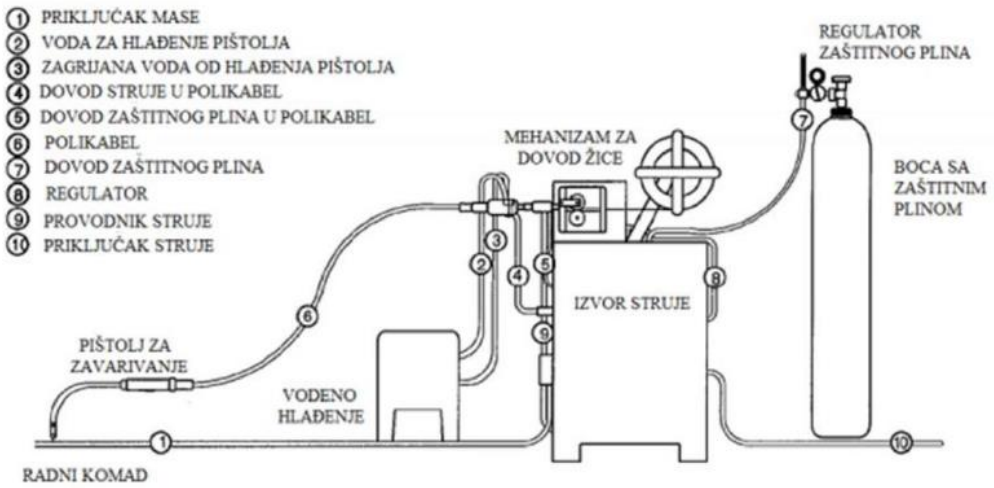
2.4. Oprema i strojevi za MAG zavarivanje

Oprema za MAG postupak zavarivanja je složena i vrlo skupa. Najskuplji dio opreme je izvor struje, a njegova cijena ovisi o njegovim mogućnostima (mogućnost zavarivanja različitih materijala, impulsno zavarivanje, zračno ili vodeno hlađenje pištolja, sinergijsko ili ručno podešavanje parametara i sl.). Također uz navedenu osnovnu opremu, potrebna je i odgovarajuća oprema za zavarivača koja se sastoji od maske za zavarivanje, zavarivačkog odijela, rukavica i cipela [4].

Stoga osnovnu opremu čini [4]:

- 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.

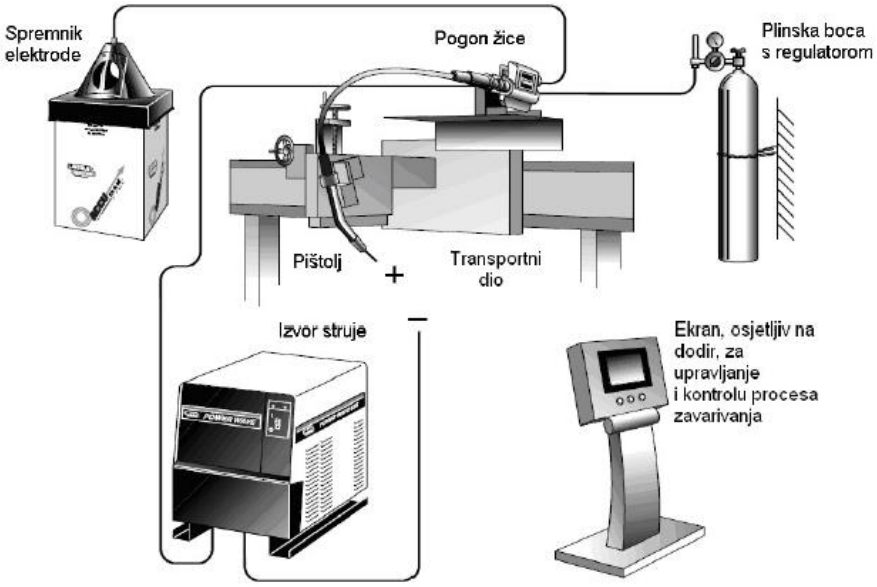
Na slici 6. prikazan je shematski prikaz osnovne opreme.



Slika 6. Osnovna oprema za MAG postupak zavarivanja [4]

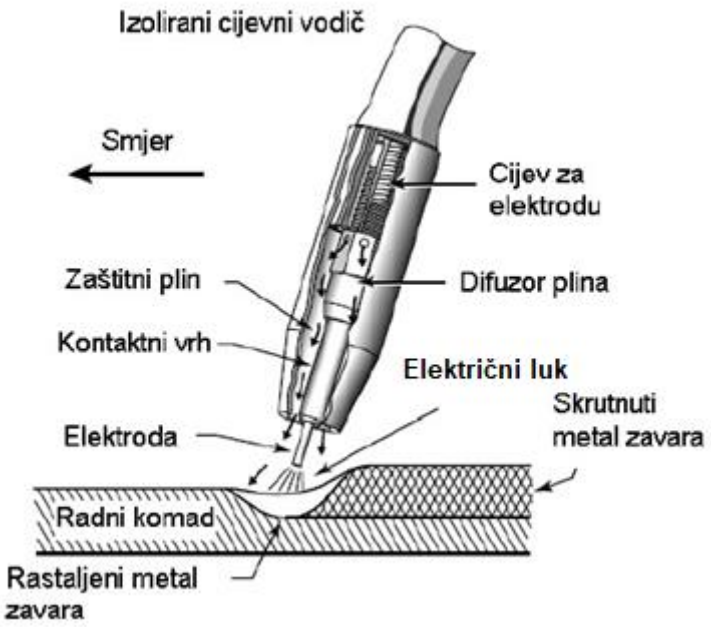
Osnovnu opremu industrijskog, automatskog MAG sustava čine (slika 7.) [5]:

- 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 7. Automatski MAG sustav za zavarivanje [5]

Proces zavarivanja započinje zatvaranjem strujnoga kruga između radnoga komada i taljive žice. Taljiva žica odnosno dodatni materijal je spojena na pozitivni pol istosmjernoga izvora struje dok je radni komad spojen na negativni pol. Kontakt je uspostavljen preko kontaktne cjevčice gdje struja prolazi samo kroz prvih nekoliko centimetara žice. Na pištolju se još također nalazi sapnica i keramički ili plastični prsten. Njihova namjena je raspršivanje i usmjeravanje zaštitnoga plina. Pritiskom na prekidač aktivira se mehanizam za dovođenje žice koji kontinuirano dovodi žicu na mjesto zavarivanja. Kod većih struja zavarivanja preporučljivo je korištenje vodeno hlađenih pištolja. Na slici 8. je shematski prikaz presjeka pištolja u radu kod MAG zavarivanja [4].



Slika 8. Presjek pištolja u radu kod MAG zavarivanja [5]

2.5. Metode prijenosa metala kod MAG zavarivanja

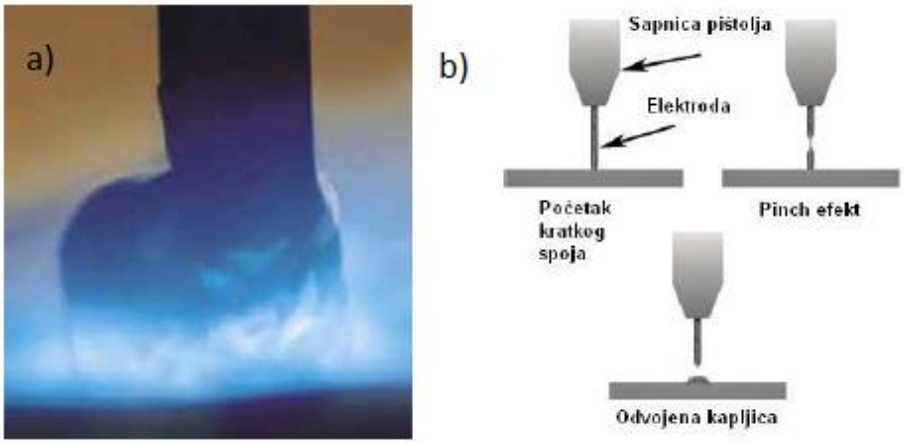
Metode prijenosa metala kod MAG postupka zavarivanja ovise o brojnim čimbenicima poput jakosti struje, napona električnoga luka, vrste dodatnoga materijala, promjer žice, vrsta zaštitnoga plina i sl. Stoga se dijele na [5]:

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

2.5.1. Prijenos metala kratkim spojevima

Ovim načinom rada dolazi do depozicije kontinuirano dobavljane žice pomoću električnih kratkih spojeva koji se periodički ponavljaju. Neke od glavnih značajki su mali unos topline i sav se prijenos dodatnog materijala vrši pri fizikalnom kontaktu elektrode i osnovnoga materijala. Period u kojemu dolazi do odvajanja jedne kapljice metala dijeli se na fazu kratkog spajanja i fazu električnoga luka. Do odvajanja kapljice dolazi u prvoj fazi u kojoj se vrh elektrode nalazi u kontaktu s rastaljenim metalom pri čemu raste jakost struje i naposljetku dovodi do povećanja magnetske sile, koja se javlja na kraju elektrode zbog djelovanja

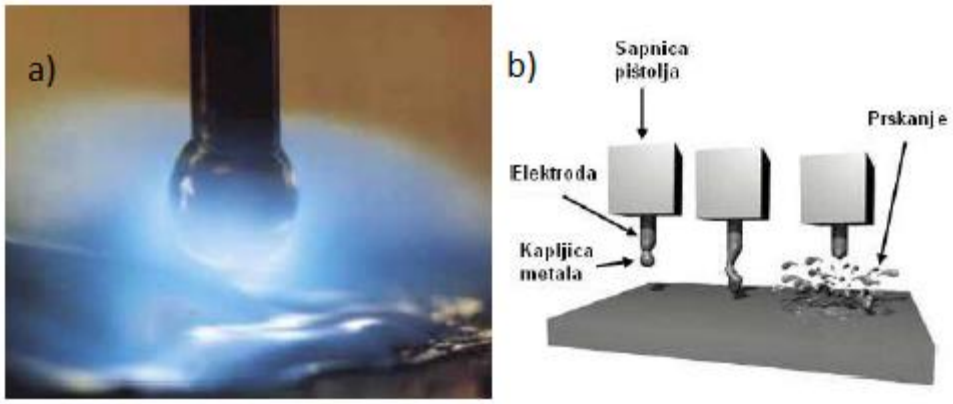
elektromagnetskoga polja i steže kapljicu taline. Ova pojava je još poznata pod nazivom „pinch – effect“. Kapljica metala kod kratkih spojeva većeg je promjera od žice s kojom se zavaruje. Broj kratkih spojeva u sekundi se kreće od 50 do 250. Ovakav prijenos metala moguć je kod malih gustoća struje (do 190 A) i niskih vrijednosti napona (15 – 23 V) za žicu promjera od 0,6 do 1,2 mm. Pogodan je za zavarivanje tankih limova i korijena zavara kod debljih komada. Najčešće se vrši u zaštiti ugljičnoga dioksida i njegovih mješavina. Na slici 9. prikazan je prijenos dodatnog materijala kratkim spojevima [5].



Slika 9. Prijenos dodatnog metala kratkim spojevima: a) realni prikaz, b) shematski prikaz [5]

2.5.2. Prijenos metala mješovitim lukom

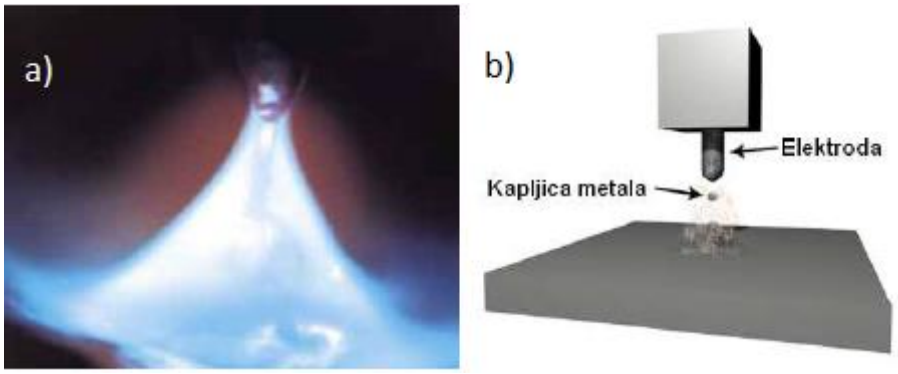
Ovaj način se odvija stvaranjem krupne kapljice metala na vrhu elektrode, zatim se pod utjecajem sila u električnome luku kapljica odvaja i pada u talinu bez kratkoga spoja. Javlja se u području jakosti struja i napona između vrijednosti prijenosa kratkim spojem i štrcajućim lukom (170 – 230 A i 17 – 23 V ovisno o promjeru žice). Promjer kapljice metala veći je od promjera žice kojom se zavaruje. Ovakav prijenos metala se teško kontrolira, javlja se intenzivno prskanje, slabije je kvašenje taline što naposljetku uzrokuje nepotpuno spajanje materijala i pojavu pukotina. Prijenos metala mješovitim lukom posebno je izražajan kod zavarivanja u zaštiti čistog ugljičnog dioksida ili mješavina s njegovim snažnim utjecajem. Na slici 10. prikazan je prijenos metala mješovitim lukom [5].



Slika 10. Prijenos dodatnog metala mješovitim lukom: a) realni prikaz, b) shematski prikaz [5]

2.5.3. Prijenos metala štrcajućim lukom

Kod prijenosa metala štrcajućim lukom, dovođena žica se tali u području većega napona i veće struje zavarivanja pri čemu se stvara mlaz malih kapi taline koje uzdužno „putuju“ kroz električni luk i velikim brzinama i snagom uranjaju u rastaljeni osnovni materijal. Na slici 11. prikazana je shema prijenosa metala štrcajućim lukom. Broj kapljica otkinutih metala mogu se popeti na nekoliko stotina u sekundi [5].

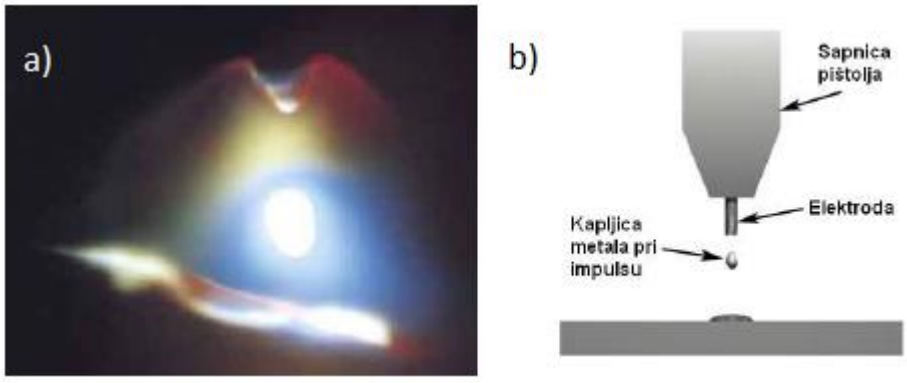


Slika 11. Prijenos dodatnog metala štrcajućim lukom: a) realni prikaz, b) shematski prikaz [5]

Promjer kapljice je manji od promjera žice s kojom se zavaruje. Prijenos je karakteriziran velikim unosom topline i količinom nataljenoga materijala te se stoga koristi kod zavarivanja debljih dijelova u vodoravnome položaju. Prijenos nije pogodan za zavarivanje u prisilnim položajima. Vrijednosti struje su preko 220 A, a napon varira od 25 – 40 V te je moguće koristiti široki spektar promjera žice. Zaštitne plinske mješavine koje se upotrebljavaju su one s pretežnim udjelom argona [5].

2.5.4. Prijenos metala impulsnim strujama

Ovakav prijenos metala je kontrolirana varijanta prijenosa štrcajućim lukom gdje se periodički izmjenjuju dvije jakosti struje. Dodatnim uređajem se uključi maksimalna jakost struje pri kojoj dolazi do kidanja kapljice, a nakon toga nastupa padanje na minimalnu jakost struje koja drži električni luk stabilnim i omogućuje konstantno dovođenje topline na mjesto zavarivanja. U jednoj se sekundi izvrši nekoliko stotina impulsnih ciklusa, a pri svakom se idealnom slučaju odvoji jedna kapljica dodatnog metala. Na slici 12. prikazana je shema prijenosa impulsnim strujama [5].



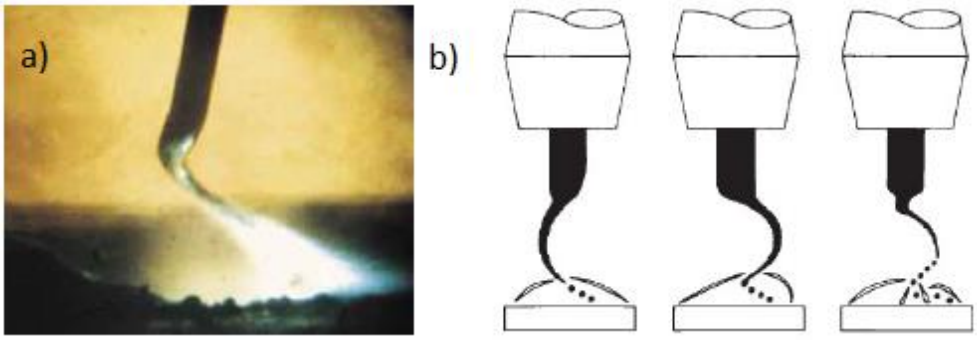
Slika 12. Prijenos dodatnog metala impulsnim strujama: a) realni prikaz, b) shematski prikaz [5]

Prosječna jakost struje je manja od prijelazne iz kratkoga u štrcajući luk te se tako izbjegava nepravilan i neprihvatljivi prijenos grubim kapima. Ova metoda primjenjiva je za sve položaje zavarivanja. Postiže se u zaštitnoj atmosferi argona i argonom bogatih plinskih mješavina [5].

2.5.5. Prijenos metala velikom gustoćom struje

Ovakva vrsta prijenosa metala se postiže posebnom kombinacijom struje, brzinom dovođenja elektrode, napona, slobodnoga kraja žice i sastava zaštitnoga plina. Ovim načinom prijenosa se mogu postići velike količine depozita, slobodne procjene od 5 do 25 kg/h, s praktičnom primjenom do 18 kg/h. Dijeli se na rotacijski i nerotacijski prijenos [5].

Rotacijski prijenos se postiže kombinacijom velike brzine dovođenja žice, dugoga slobodnoga kraja žice i zaštitne plinske mješavine koja sadrži argon, ugljični dioksid te kisik. Elektromehaničke sile koje nastaju protjecanjem struje uzrokuju krivudanje rastaljenoga metala po spiralnoj putanji pri čemu se kapljica odvaja velikim brzinama. Na slici 13. je prikaz rotacijskog prijenosa metala [5].



Slika 13. Rotacijski prijenos dodatnog metala velikom gustoćom struje: a) realni prikaz, b) shematski prikaz [5]

Nerotacijski prijenos postiže se izostankom vrtnje vrha žičane elektrode. Vrtnja se sprječava primjenom zaštitnih plinskih atmosfera koje imaju veću toplinsku vodljivost i one omogućavaju izraženiju površinsku napetost rastaljenog kraja žice. Brzina odvajanja kapljice je manja nego kod rotacijskog prijenosa stoga količina depozita iznosi otprilike 4,5 do 13,5 kg/h [5].

3. MODIFICIRANI POSTUPCI MAG ZAVARIVANJA

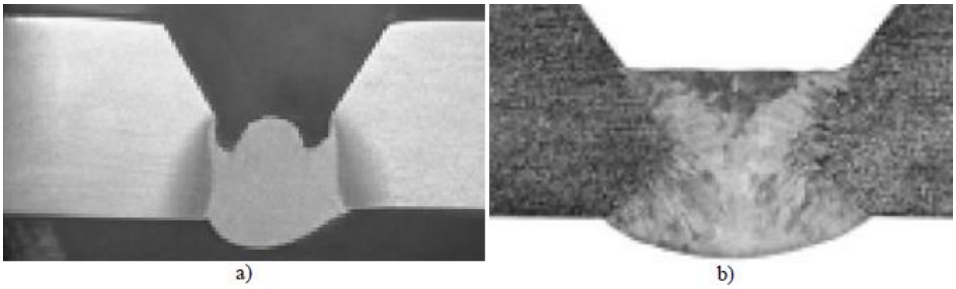
Modificirani postupci MAG zavarivanja su razvijeni na temelju razvoja i modifikacija načina prijenosa metala u električnome luku. Navedeno je omogućio razvoj inverterskih izvora struje za MAG zavarivanje. Glavna svrha je postizanje bolje kvalitete zavara, bolja i veća produktivnost te optimizacija troškova [1].

3.1. Modificirani prijenos metala kratkim spojevima

Ovakav prijenos metala se često koristi u industriji zbog niskoga unosa topline, mogućnosti poput zavarivanja u svim položajima, zbog maloga stupnja deformacije i dr. Koristi se za zavarivanje limova manjih debljina jer ima manji unos topline te su iz tog razloga i manje deformacije konstrukcija. Neki od nedostataka ovakvoga prijenosa su intenzivno prskanje, mala penetracija i nestabilnost procesa. Zbog navedenih nedostataka, nastoji se ovakav prijenos metala modificirati. Neki od poznatijih modificiranih postupaka MAG zavarivanja koji se temelje na prijenosu metala kratkim spojevima su STT, CMT, FastROOT i CBT [4].

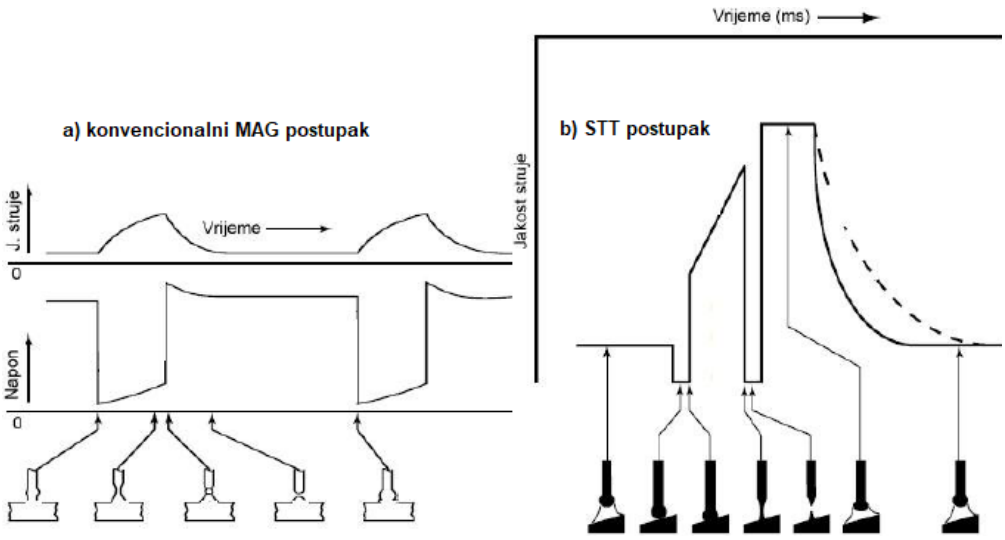
3.1.1. Surface tension transfer

STT (engl. Surface tension transfer) je modificirani postupak zavarivanja koji je razvijen u tvrtki Lincoln Electric. Vrlo je učinkovit za zavarivanje korijena zavara u otvorenome žlijebu u jednome prolazu. Najčešće se koristi kod cijevnih elemenata (slika 14.) u prehrambenoj, procesnoj i automobilskoj industriji. Koristi se za zavarivanje čelika, čelika visoke čvrstoće i nehrđajućih čelika. Postupak je predviđen za poluautomatska ili automatska (robotska) zavarivanja [1].



Slika 14. Izbrusak korijenskog prolaza: a) celulozna elektroda – REL; b) STT postupak [1]

Navedeni se postupak temelji na prijenosu materijala kratkim spojevima dok se samo odvajanje kapljice obavlja mehanizmom površinske napetosti, odakle i naziv. Uz vrlo čestu i preciznu kontrolu struje zavarivanja, izvor struje daje maksimum jakosti struje u trenutku kada je za mehanizam prijenosa metala dovoljna sama površinska napetost. Nakon što se kapljica odvoji, ponovno dolazi do povećanja struje koja zagrijava vrh elektrode i na taj način se priprema ponovno odvajanje kapljice (slika 15.) [1].



Slika 15. Prikaz dinamičke karakteristike izvora struje [1]

Prednosti STT postupka u usporedbi s konvencionalnim MAG postupkom su [1]:

- odvajanje kapljice bez prskanja
- manji unos topline
- nizak udio difundiranog vodika
- lako rukovanje
- mogućnost zavarivanja u svim položajima
- veća brzina zavarivanja
- mogućnost korištenja 100 % CO_2 kod zavarivanja ugljičnih čelika
- odlično zavarivanje korijenskog prolaza zavara
- laka automatizacija postupka

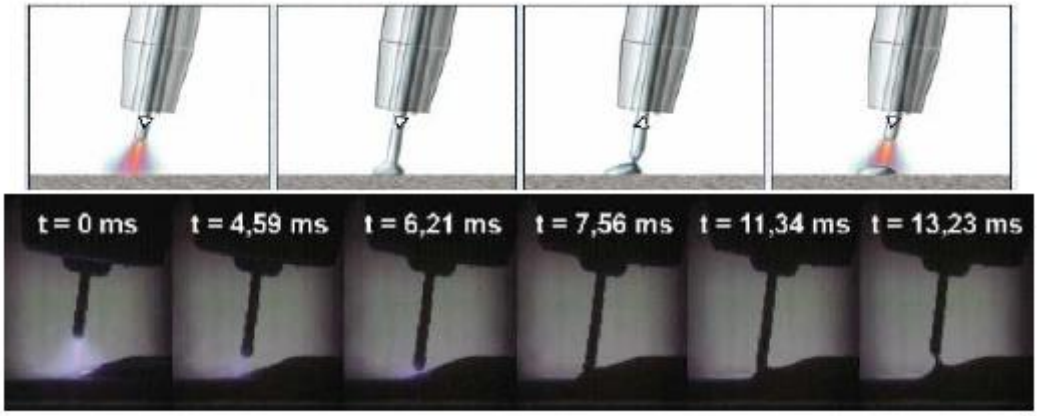
Nedostaci STT postupka u usporedbi s konvencionalnim MAG postupkom su [4]:

- viša cijena opreme
- nije moguće zavarivati aluminij

3.1.2. Cold metal transfer

CMT (engl. Cold metal transfer) postupak je jedna vrsta napretka u tehnologiji zavarivanja. Ovakva vrsta modificiranog MAG postupka omogućava novu primjenu koju konvencionalni postupak nije mogao pokriti, a to je mogućnost spajanja čelika i aluminija. Stoga se može zaključiti kako postoje materijali koji ne mogu podnijeti stalnu toplinu koja se oslobađa tijekom zavarivanja i zbog toga su nam potrebne niže temperature pri zavarivanju [6].

CMT postupak se može opisati kao postupak gdje je unos topline relativno mali u usporedbi s konvencionalnim postupkom zavarivanja. Prilikom primjene ovoga postupka, žica odnosno taljiva elektroda se giba „push – pull“ mehanizmom, s prosječnom frekvencijom oscilacija i do 70 Hz. Na slici 16. prikazan je princip rada CMT postupka [6].



Slika 16. CMT postupak i prikaz jednog njegovog ciklusa [6]

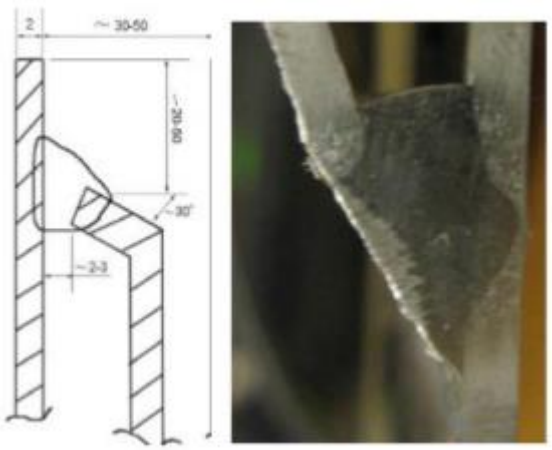
Glavne prednosti CMT postupka su [6]:

- gibanje žice odnosno elektrode je direktno uključeno u kontrolu procesa zavarivanja
- prijenos metala se izvršava gotovo bez struje
- gibanje žice podupire prijenos metala

3.1.3. FastROOT

FastROOT postupak zavarivanja je razvijen u tvrtki Kemppi. Temelji se na digitalnome upravljanju parametara zavarivanja (struje i napona). Modifikacijom kratkih spojeva koji su dobiveni digitalnim upravljanjem parametara dobiva se modificirani postupak zavarivanja koji

je pogodan za zavarivanje limova male debljine konstrukcijskih i nehrđajućih čelika te za zavarivanje korijenskoga prolaza uz veću brzinu i produktivnost. Ovakav se postupak temelji na dva različita oblika struje koji se koriste. U prvome dijelu dolazi do prijenosa metala kratkim spojem, a nakon njega slijedi povećanje energije koji služi za konačno oblikovanje spoja i zagrijavanje vrha elektrode. Nakon unosa povećane energije, struja pada na minimalnu vrijednost i ta pojava omogućava stabilnost procesa. Na slici 17. prikazan je primjer zavarenoga spoja FastROOT postupkom [1].



Slika 17. Zavareni spoj dupleks i superaustenitnog čelika debljine 2 mm [4]

3.1.4. Controlled bridge transfer

CBT (engl. Controlled bridge transfer) je modificirana metoda prijenosa metala kratkim spojevima koja kombinira prednosti klasičnog i impulsnog MAG zavarivanja. Glavna karakteristika i prednost ovoga načina zavarivanja je sprječavanje stvaranja prskanja prilikom zavarivanja. Prilikom izvođenja postupka ovom metodom zavarivanja, javljaju se sile poput elektromagnetske sile i površinske napetosti koje su orijentirane prema smjeru zavarivanja. Zbog kombinacije sila, rastaljeni se metal „premošćuje“ od elektrode do taline i na taj način se sprječava rasprskavanje materijala. Na slici 18. prikazana je realna slika postupka zavarivanja [7].



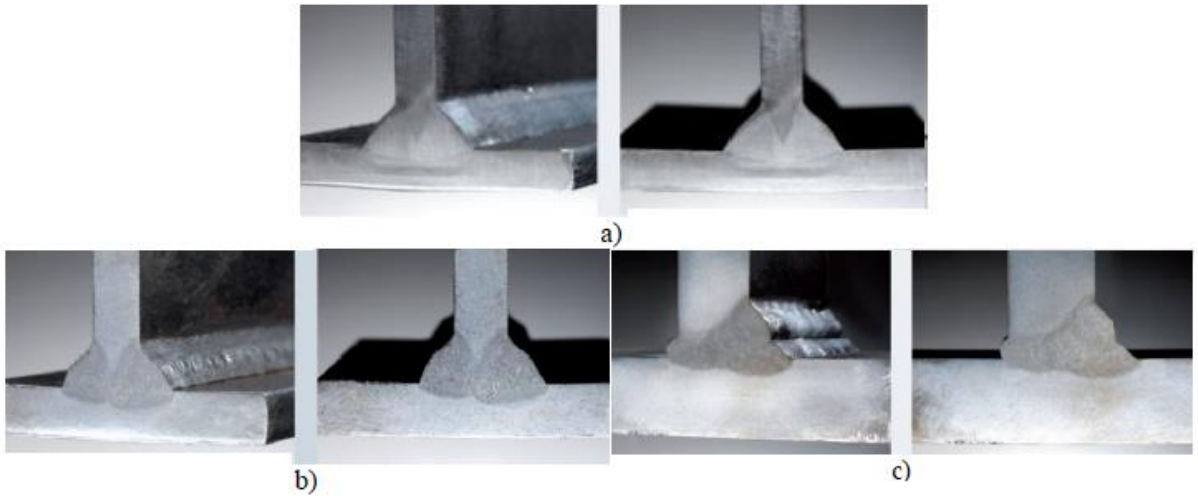
Slika 18. Prijenos metala CBT postupkom [7]

3.2. Modificirani prijenos metala štrcajućim lukom

Modificirani postupci zavarivanja koji koriste prijenos metala štrcajućim lukom omogućili su dodatne prednosti u usporedbi s konvencionalnim postupcima. Prednosti poput bolje penetracije, većega depozita materijala, veća produktivnost, bolja kvaliteta zavara uvelike poboljšavaju same značajke postupaka zavarivanja. Upotrebom manjega napona zavarivanja se smanjuje duljina električnoga luka te se postiže luk koji je puno koncentriraniji i s time je i bolja penetracija. Najpoznatiji MAG postupci koji se temelje na modificiranom prijenosu metala štrcajućim lukom su RMT, ForceArc i PowerMode [4].

3.2.1. Rapid MAG Technology

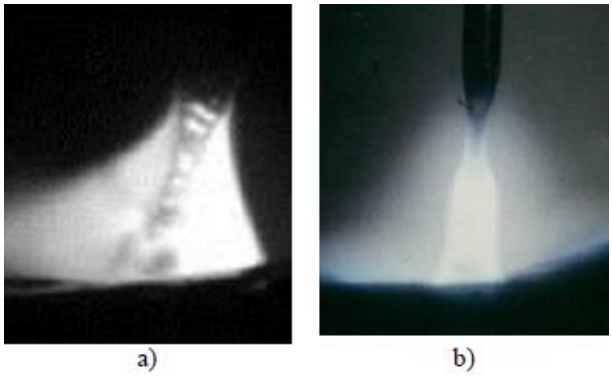
RMT (engl. Rapid MAG Technology) modificirani je postupak koji je razvijen u tvrtki ESS Schweisstechnik. Kod ove tehnologije teži se skraćivanju električnoga luka pri čemu dolazi do pada napona i povećanja koncentracije energije. Na taj se način sužava električni luk i energija električnoga luka djeluje na manjoj površini što rezultira većom penetracijom. Postupak je izrazito pogodan za zavarivanje debljih materijala. Primjerice, kutni zavareni spojevi debljine do 8 mm mogu se zavarivati bez posebne pripreme spoja. Na slici 19. prikazani su primjeri zavarenih spojeva RMT postupkom [4].



Slika 19. Prikaz kutnog spoja izvedenog RMT postupkom (materijal – ST 37): a) d = 6 mm; b) d = 8 mm; c) d = 20 mm [4]

3.2.2. ForceArc

ForceArc postupak se temelji na skraćivanju električnoga luka smanjenjem napona istoga u odnosu na prijenos metala klasičnim štrcajućim lukom. Prijenos metala se odvija u obliku sitnih rastaljenih kapljica. Prilikom primjene ForceArc postupka, kontrola procesa je omogućena kontinuiranim mjerenjem napona luka i brzom regulacijom istoga luka. Ovakva kontrola se još naziva i visokodinamička regulacija stvarnih vrijednosti parametara zavarivanja. Ona omogućuje zavarivanje s duljim slobodnim krajem žice što je od velike važnosti pri zavarivanju teško dostupnih mjesta. Na slici 20. prikazana je snimka prijenosa metala ForceArc postupkom u usporedbi s klasičnim štrcajućim lukom [8].



Slika 20. Snimka prijenosa metala: a) ForceArc postupak; b) prijenos metala štrcajućim lukom [8]

Glavne prednosti u odnosu na konvencionalni postupak su [8]:

- odlična fuzija i značajno povećanje penetracije spoja
- bolja stabilnost luka i lako izvođenje neautomatiziranog zavarivanja
- smanjenje zone utjecaja topline i općenito manji unos topline
- smanjenje mogućnosti od nastanka pora i zajeda
- ekonomska isplativost

3.2.3. PowerMode

PowerMode je modificirani postupak zavarivanja koji koristi električnu snagu za regulaciju duljine električnoga luka. Prednost ovakve vrste kontrole dolazi do izražaja gdje energija i penetracija moraju biti praćene i dosljedne. Postupak ima stabilan luk te jednolik profil

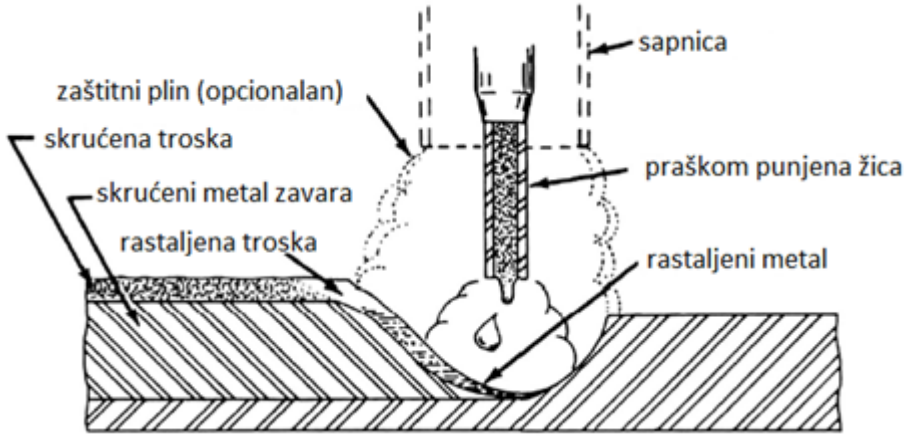
penetracije. Moguće je zavarivati materijale tanje od 0,7 mm. Koristi se za zavarivanje aluminija i nehrđajućih čelika [9].

3.3. Visokoučinski postupci zavarivanja

Visokoučinski MAG postupci zavarivanja su oni postupci zavarivanja koji se odlikuju većom brzinom zavarivanja i većom produktivnošću u usporedbi s konvencionalnim postupcima. Najbolji pokazatelji produktivnosti su broj prolaza, depozit dodatnoga materijala, penetracija i vrijeme zavarivanja. Danas najpoznatiji visokoučinski MAG postupci zavarivanja su FCAW, Tandem postupak te zakopani luk (engl. Buried arc) [4].

3.3.1. Flux Cored Arc Welding

FCAW (engl. Flux Cored Arc Welding) je visokoučinski postupak MAG zavarivanja kod kojega se umjesto pune standardne žice koristi praškom punjena žica. Ona uz sebe može, ali i ne mora imati dodatnu zaštitnu atmosferu u obliku plina. Prilikom upotrebe ovakve žice dolazi do stvaranja troske koja može uzrokovati probleme. Prašak koji se nalazi u samoj žici treba sadržavati tvari poput dezoksidansa, čistaće troske i sl. Zavari su glatki i visoke kvalitete. Na slici 21. dan je shematski prikaz FCAW postupka [10].



Slika 21. Shematski prikaz FCAW postupka [10]

Glavne prednosti FCAW postupka su [4]:

- veći depozit dodatnoga materijala
- veća produktivnost

- bolja penetracija
- uz primjenu samozaštite moguće je zavarivanje u vjetrovitim uvjetima

Nedostaci su [4]:

- velika količina plinova razvijenih izgaranjem praška iz žice
- veliko toplinsko zračenje
- nemogućnost zavarivanja aluminija i njegovih legura

3.3.2. Tandem Welding

Tandem Welding je visokoučinski MAG postupak zavarivanja u kojemu se koriste dvije žice. Tijekom procesa zavarivanja, obje elektrode za zavarivanje su postavljene jedna prema drugoj u smjeru zavarivanja. Prva elektroda, koja se naziva vodeća elektroda, osigurava potrebnu dubinu penetracije, dok druga, koja se naziva prateća elektroda, osigurava punjenje talinom i formiranje lica zavara bez poroznosti. U većini slučajeva je vodeća elektroda većega promjera. Druga elektroda je opterećena nižim intezitetom struje. Pri ovom postupku zavarivanja najčešće se koristi impulsno zavarivanje. Može se primjenjivati za zavarivanje u različitim položajima i za zavarivanje materijala koji su osjetljivi na unos topline poput legura aluminija. Na slici 22. nalazi se primjer pištolja za Tandem postupak, dok na slici 23. nalazi se prikaz robotske stanice za Tandem postupak [6].



Slika 22. Pištolj za Tandem postupak zavarivanja [6]



Slika 23. Robotska stanica za Tandem postupak zavarivanja [6]

Prednosti Tandem postupka su [4]:

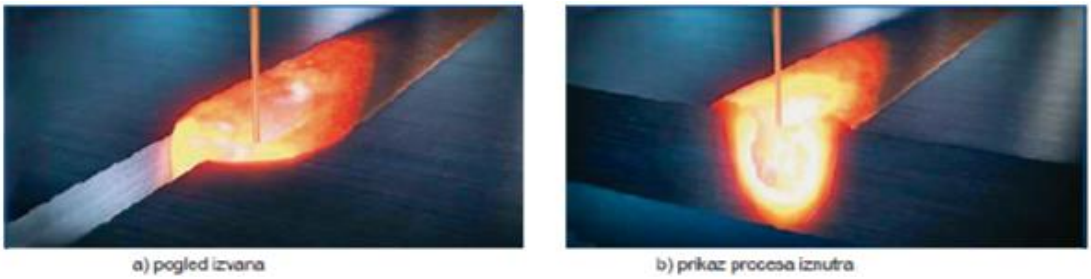
- veći depozit dodatnoga materijala
- veća brzina zavarivanja
- manji unos topline
- veća penetracija
- bolja kontrola taline

Nedostaci Tandem postupka su [4]:

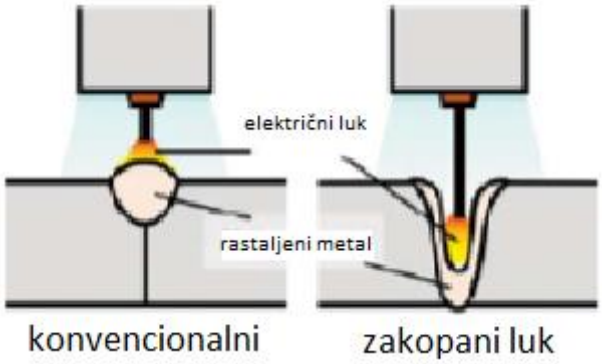
- potrebna je automatizacija ili robotizacija
- potrebna su dva izvora struje
- potreban je posebni pištolj
- visoka cijena opreme

4. ZAKOPANI LUK – „D – arc“

U zakopanom električnom luku (engl. Buried arc) prepoznat je novi način izvođenja pri kojemu je električni luk zajedno s vrhom rastaljene žice postavljen ispod površine taline metala zavara. Izvor topline kod ovoga postupka je postavljen dublje u odnosu na konvencionalne postupke se stoga može postići i veća penetracija što je vrlo pogodno za zavarivanje materijala većih debljina. Na slici 24. dan je izgled procesa zavarivanja, dok je na slici 25. dan shematski prikaz zakopanog luka u usporedbi sa konvencionalnim postupkom [11].



Slika 24. Prikaz zakopanog električnog luka [11]



Slika 25. Shematski prikaz usporedbe konvencionalnog načina zavarivanja i zavarivanja zakopanim lukom [11]

S obzirom da postoji nekoliko visokoučinskih postupaka zavarivanja koji su sposobni zavarivati materijale velikih debljina te osigurati dobru kvalitetu zavara, oni također imaju neka ograničenja poput položaja i smjera zavarivanja, oblika pripreme spoja i dr. Također, upotrebom MAG postupka postoje nedostaci koji se ne mogu izbjeći. Neki od njih su [11]:

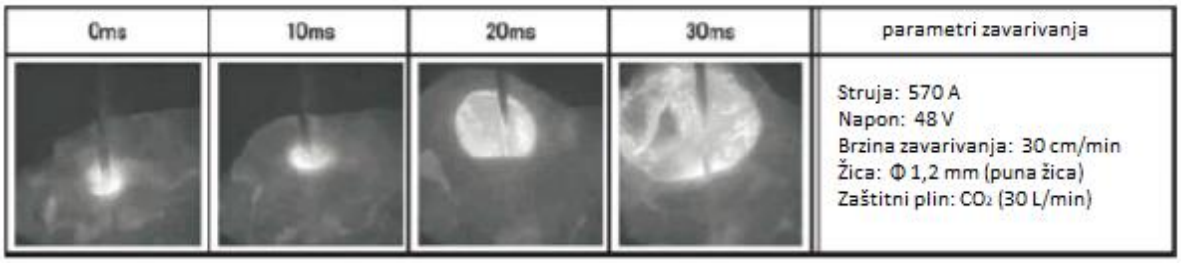
- potrebno je zavarivanje u više prolaza
- potrebna je veća količina depozita odnosno dodatnoga materijala
- deformacije konstrukcija su jako izražene

Navedeni se nedostaci mogu uvelike smanjiti i ukloniti upotrebom MAG postupka zakopanog luka. Međutim, zakopani luk je podložan nestabilnome ponašanju i povremenoj pojavi kratkih spojeva tako da je sama stabilizacija postupka jako komplicirana.

4.1. Stabilizacija zakopanoga luka visoke struje

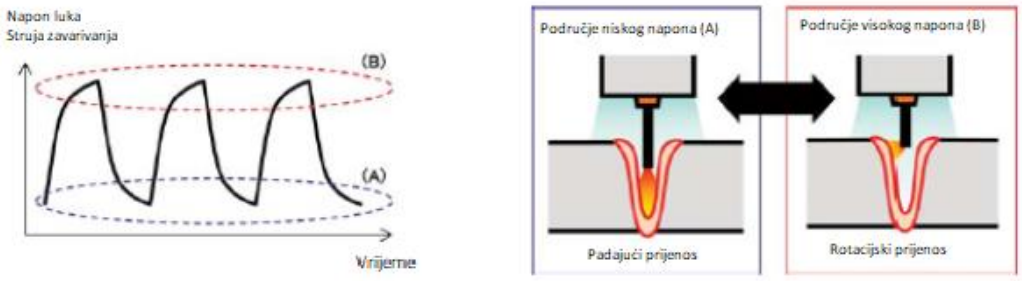
Kao što je već bilo rečeno, zakopani luk je sklon nestabilnome ponašanju. Na slici 26. dani su rezultati snimanja zakopanoga luka pri strujama višim od 500 A, pri čemu je korišten izvor struje s ravnom značajkom (CV). Otvaranje šupljine unutar rastaljenoga metala (nazvanog zakopani prostor) prilično je nestabilno i pokazuje intenzivna gibanje taline. Pretpostavlja se da je uzrok ovakvog ponašanja u ponavljajućem ciklusu, kako slijedi [11]:

1. rastaljeni metal na bočnom zidu zakopanoga prostora se približava žici
2. da bi se održala duljina luka dolazi do porasta struje
3. sile u luku rastu u dubljem dijelu taline te dolazi do brzog širenja otvora.

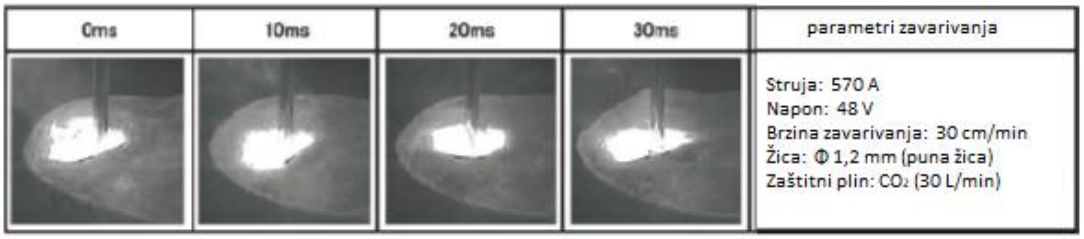


Slika 26. Nestabilno ponašanje zakopanog luka [11]

Drugim riječima, smatra se da zakopani luk postaje nestabilan u području visokih struja ukoliko nema odgovarajućeg tlaka na talinu bočnoga zida zakopanog prostora, što je posebno naglašeno blizu površine taline. Upravo zbog tog razloga razvijen je valni oblik struje koji kontinuirano pridržava rastaljeni zid zakopanog prostora uz cikličko ponavljanje struje i napona. To je u biti niskofrekventna modulirana kontrola napona kojom se periodično mijenja oblik izlaznog napona. Na slici 27. dan je prikaz mehanizma stabilizacije, dok je na slici 28. prikazano ponašanje stabiliziranog luka [11].

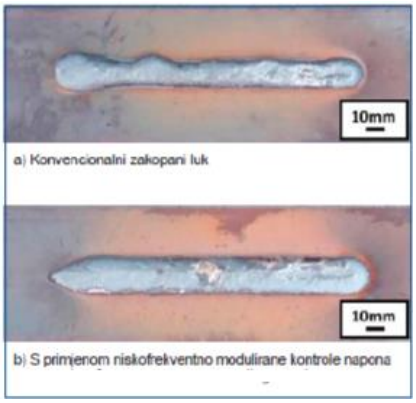


Slika 27. Mehanizam stabilizacije zakopanog luka [11]



Slika 28. Ponašanje stabiliziranog zakopanog luka [11]

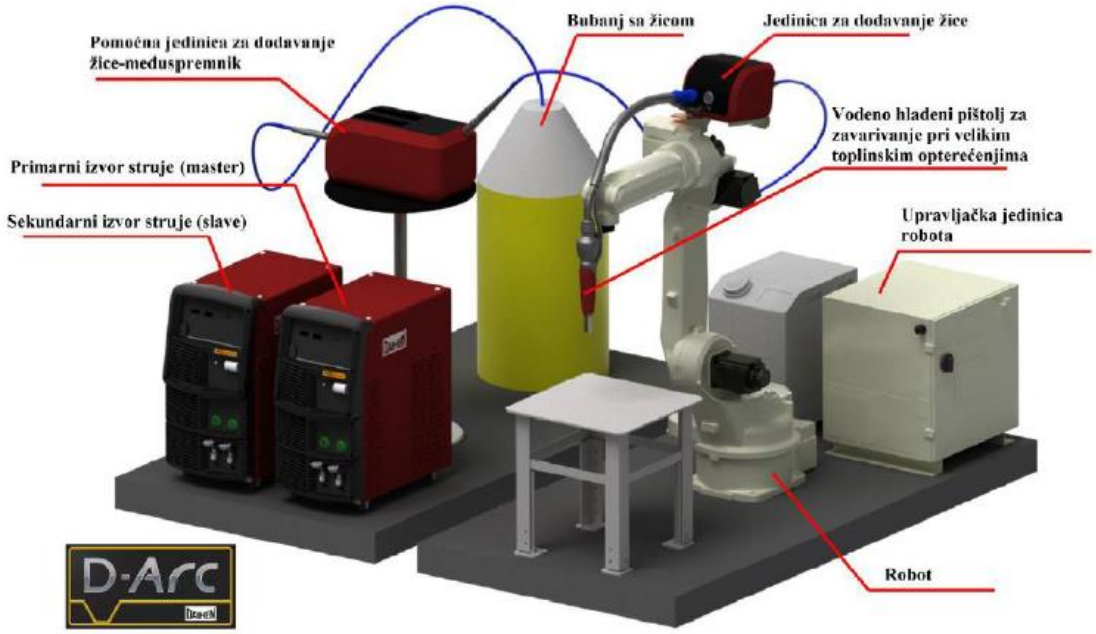
Također uz navedeno, na slici 27. se vidi valni oblik struje i napona pri niskofrekventno moduliranoj kontroli napona. Namješteni napon se mijenja frekvencijom od 100 Hz pri čemu se također mijenja i struja ovisno o opterećenju na sekundarnoj strani izvora struje za zavarivanje. Nadalje, vidi se i ponašanje luka koje su označene isprekidanom linijom (A) i (B). Linija A prikazuje područje niskoga napona, dok linija B prikazuje područja visokoga napona. U području A žica je postavljen dublje u rastaljeni metal pri čemu se tali dno šupljine, a prijenos metala je u obliku kapljica. U području B vrh elektrode je postavljen pliče pri čemu se luk uspostavlja na zidove šupljine. Rastaljeni metal na zidnoj stijenci zakopanog prostora je potisnut od strane luka pri čemu se održava rotirajući luk. Kombinacijom ova dva načina rada ponašanje luka i taline se stabilizira. Na slici 29. je prikaz usporedbe zavara. [11].



Slika 29. Usporedba izgleda zavara [11]

4.2. Sustav za zavarivanje zakopanim lukom

Sustav za zavarivanje zakopanim lukom velikom strujom čini robot s dva izvora struje koji maksimalno mogu isporučiti 1000 A struje, pri čemu je na glavni izvor struje spojeno modularno niskofrekventno upravljanje naponom kako bi se izračunala trenutna struja. Sustav ima dodavač žice koji može isporučiti žicu brzinom od 100 m/min koji se nalazi na tijelu robota i spojen je s međuspremnikom žice. Pištolj za zavarivanje je hlađen vodom i izrađen je aditivnom 3D tehnologijom na bazi bakrene legure. Na slici 30. je prikaz robotiziranog sustava D – arc postupka [11].



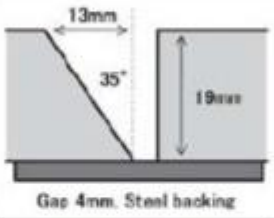
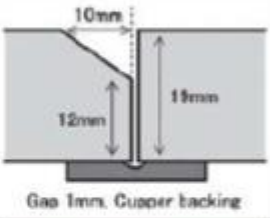
Slika 30. Robotizirani sustav za D - arc zavarivanje [4]

4.3. Usporedba spojeva „D – arc“ postupka i konvencionalnog MAG postupka

Sučeljeni zavar debljine 19 mm je izveden primjenom sustava „D – arc“ i konvencionalnim MAG zavarivanjem u više prolaza. Dodatni materijal koji se koristio u eksperimentu je bila žica debljine 1,4 mm klasificirana kao JIS YGW11 (AWS ER 70-S, EN G 42 3 C G0). Sustavom „D – arc“ postigla se potpuna penetracija u jednome prolazu, dok je pri konvencionalnom MAG postupku bilo potrebno 6 prolaza. Žlijeb s otvorom od 35° s visinom žlijeba od 0 mm koji je primijenjen za „D – arc“ postupak zavarivanja, standardiziran je po JARAS 1012 (WES 8703):2004 i JARAS 1013 (WES 8704):2004. Površina žlijeba je

smanjena s 123,5 mm^2 na 38,5 mm^2. Kutna deformacija je smanjena sa 7° na 1° stupanj. U tablici 1. dane su prethodno navedene vrijednosti i parametri te usporedba postupaka [11].

Tablica 1. Usporedba zavarenih spojeva konvencionalnog MAG postupka i "D - arc" postupka [11]

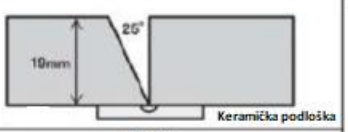
	Konvencionalni	D - arc
	Struja: 300 A Napon: 30 V Brzina zavarivanja: 30 cm/min Žica: Φ 1,4 mm (puna) Zaštitni plin: CO_2 (30 L/min)	Struja: 620 A Napon: 44 V Brzina zavarivanja: 30 cm/min Žica: Φ 1,4 mm (puna) Zaštitni plin: CO_2 (30 L/min)
Oblik žlijeba		
Presjek spoja		
Broj prolaza	6	1
Površina žlijeba	123.5 mm^2	38.5 mm^2
Kutna deformacija	7°	1°

4.4. Primjeri primjene „D – arc“ sustava zavarivanja

4.4.1. Sučeljeni spoj

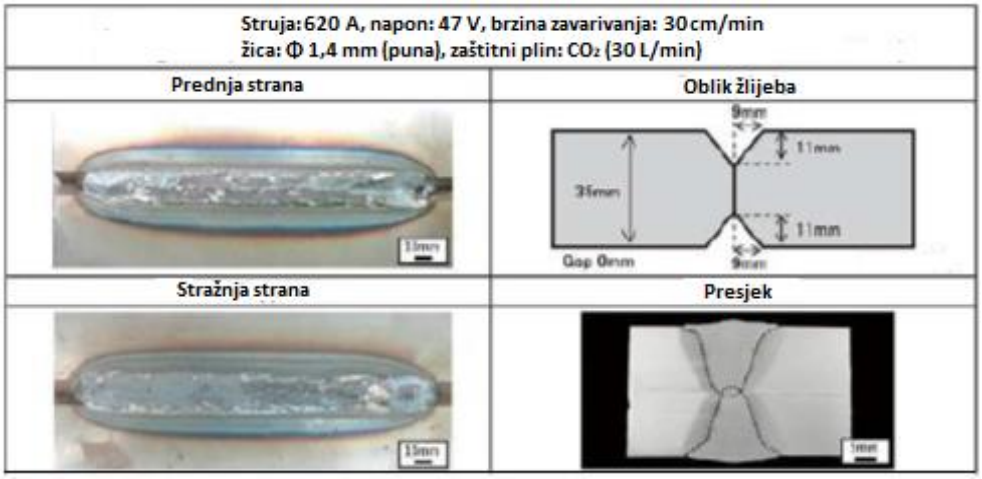
U tablici 2. vidi se primjer sučeljenog spoja napravljen „D – arc“ sustavom zavarivanja. Spoj je debljine 19 mm i otvorom žlijeba od 25 mm, bez razmaka za keramičku podlogu. Izgled zavara je dobar sa strane lica i korijena [11].

Tablica 2. Primjer sučeljenog zavara [11]

Struja: 580 A, napon: 48 V, brzina zavarivanja: 24 cm/min žica: Φ 1,4 mm (puna), zaštitni plin: CO_2 (30 L/min)	
Lice zavara	Oblik žlijeba
	
Korijen zavara	Presjek
	

Tablica 3. prikazuje primjer sučeljenog spoja uz X pripremu. Debljina iznosi 35 mm uz visinu grla žlijeba od 13 mm. Postupak zavarivanja je proveden s obje strane u vodoravnome položaju. Zbog veće visine grla žlijeba, moguća je veća penetracija bez opasnosti progaranja te je izostavljena upotreba keramičke podloške [11].

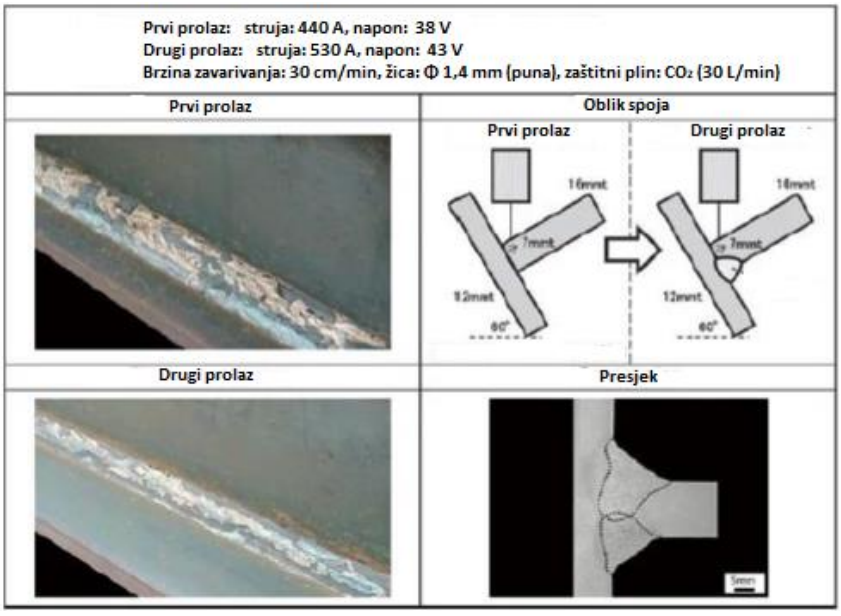
Tablica 3. Primjer sučeljenog spoja uz X pripremu [11]



4.4.2. T spoj

U tablici 4. prikazan je primjer T spoja sa potpunom penetracijom bez razmaka i pripreme. Postupak zavarivanja je proveden s obje strane u vodoravnome položaju uz okretanje radnoga komada [11].

Tablica 4. Primjer T spoja [11]



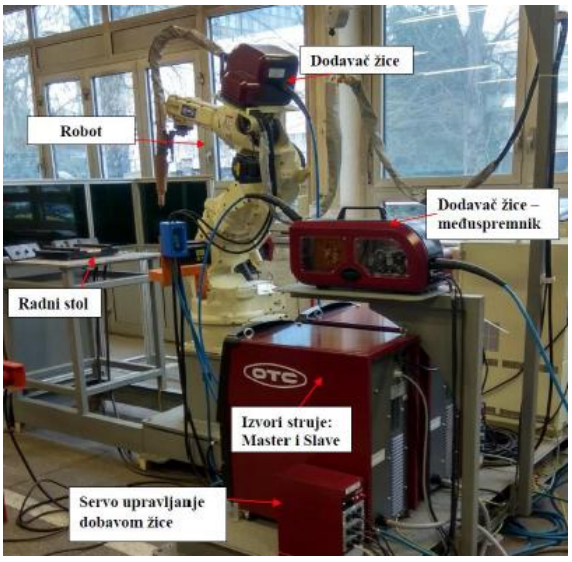
5. EKSPERIMENTALNI DIO

Eksperimentalni dio rada proveden je u svrhu definiranja parametara zavarivanja D – arc načinom prijenosa metala ploča debljina 8 mm s postizanjem potpune penetracije te u svrhu uspoređivanja uzoraka dobivenih D – arc postupkom i EPP postupkom. Uzorci su podvrgnuti odgovarajućim nerazornim/razornim ispitivanjima. Cijeli eksperimentalni dio rada je proveden u Laboratoriju za zavarivanje Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. Svi uzorci su bili podvrgnuti nerazornom ispitivanju i to vizualnoj metodi, a potom su iz uzoraka napravljeni makroizbrusci koji su naknadno obrađeni brušenjem te nagriženi te se na njima mjerila tvrdoća po Vickersovoj metodi. Uzorci koji su izrađeni s D – arc načinom su označeni s A-1 i A-2, a uzorci označeni s B-1 i B-2 su izrađeni EPP postupkom zavarivanja.

5.1. Oprema za postupke zavarivanja

5.1.1. D - arc

Oprema za D – arc postupak zavarivanja se sastoji od robotske ruke koja u ovome slučaju ima 7 stupnjeva slobode gibanja, od međusobno povezanih primarnog i sekundarnog izvora struje, uređaja za servo upravljanje, dodatnim materijalom, međuspremnikom i dodavačem žice. Povezani izvori struje mogu zajedno isporučiti struju do 1000 A. Također, sustav se još sastoji od jedinice za upravljanje robotom, uređaj za hlađenje, boca sa zaštitnim plinom i kolut žice dodatnoga materijala. Na slici 31. je prikazan sustav za D – arc postupak zavarivanja.



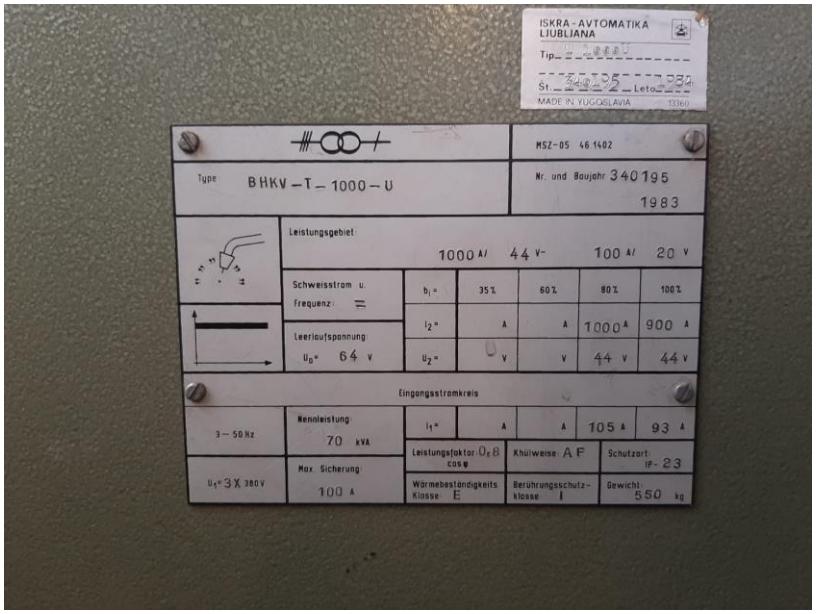
Slika 31. Sustav za D - arc postupak zavarivanja [4]

5.1.2. EPP

Oprema za EPP postupak zavarivanja se sastoji od izvora struje s kontrolom struje, napona i brzine žice, provodnika struje, koluta sa žicom, spremnika praška, glave sa pogonskim mehanizmom za žicu, kontaktnom vodilicom, sapnicom i podlogom. Na slici 32. je prikaz stroja na kojemu je proveden postupak zavarivanja dok je na slici 33. dana specifikacijska pločica izvora struje.



Slika 32. Mehanizam za EPP postupak zavarivanja



Slika 33. Specifikacijska pločica izvora struje

5.2. Osnovni materijal

5.2.1. D - arc

Za uzorke koji su zavareni D – arc postupkom korišten je osnovni materijal oznake S375. To je vrsta nelegiranog, niskougljičnog konstrukcijskog čelika. Ima vrlo dobra zavarivačka svojstva te uz pravilno odabrane parametre nije sklon greškama i nepravilnostima. U tablici 5. dan je kemijski sastav, a u tablici 6. vrijednosti granice razvlačenja i vlačne čvrstoće.

Tablica 5. Kemijski sastav S375 [12]

ČELIK	C %	Mn %	P %	S %	Si %	Cr %	N %	Cu %
S375	maks. 0,15	1,3-1,7	maks. 0,035	maks. 0,04	maks. 0,8	maks. 0,3	maks. 0,012	maks. 0,3

Tablica 6. Vrijednosti granice razvlačenja i vlačne čvrstoće za čelik S375 [12]

ČELIK	Granica razvlačenja, MPa	Vlačna čvrstoća, MPa
S375	375	510

5.2.2. EPP

Za uzorke koji su zavareni EPP postupkom korišten je osnovni materijal S355. Ova vrsta čelika također spada u skupinu nelegiranog, niskougljičnog konstrukcijskog čelika. Vrlo je sličan čeliku S375 uz malo slabija mehanička svojstva. U tablici 7. dan je kemijski sastav, a u tablici 8. vrijednosti granice razvlačenja i vlačne čvrstoće.

Tablica 7. Kemijski sastav S355 [13]

ČELIK	C %	Mn %	P %	S %	Si %
S355	maks. 0,23	maks. 1,6	maks. 0,05	maks. 0,05	maks. 0,05

Tablica 8. Vrijednosti granice razvlačenja i vlačne čvrstoće za čelik S355 [13]

ČELIK	Granica razvlačenja, MPa	Vlačna čvrstoća, MPa
S355	355	470 - 630

5.3. Dodatni materijali i zaštitna atmosfera

5.3.1. D – arc

Kod zavarivanja uzoraka D – arc postupkom, korištena je žica proizvođača Elektroda Zagreb d.d. Žica je puna te je promjera 1,2 mm pod oznakom EZ – SG 3. Korišteni zaštitni plin je mješavina Ar i CO_2 u omjeru 82 % Ar i 18 % CO_2 (oznaka M21 prema normi HRN EN ISO 14175). Na slici 34. je prikaz specifikacije žice kod D – arc postupka zavarivanja.

NORME

HRN EN ISO 14341-A	AWS / ASME SFA-5.18	DIN 8559	W. Nr.
G 46 4 C/M 4Si1	ER70S-6	SG 3	1.5130

SVOJSTVA I PODRUČJE PRIMJENE

Pobakrena ili pobrončana žica za zavarivanje u zaštitnoj atmosferi CO_2 ili mješavine plinova Ar/CO_2. Koristi se za zavarivanje nelegiranih i niskolegiranih čelika čvrstoće do 640 N/mm².

Grupa čelika	HRN (stari)	DIN (W. Nr.)	HRN / EN / ISO
Konstrukcijski čelici	Č 0361 do Č 0563	St 37-3N (1.0116) do St 52-3N (1.0570)	S 235J2G3 do S355J2G3 Fe 310-0 do Fe 490-2
Kotlovski čelici	Č 1202 Č 1204 Č 3133 Č 3105	HI (1.0345) HII (1.0425) 17Mn4 (1.0481) 19Mn6 (1.0473)	P235GH P265GH P295GH P355GH
Čelici za cijevi	Č 1212 do Č 3100	St 35.4 (1.0309) do St 52.4 (1.0581) StE 210.7 (1.0307) do StE 360.7 (1.0582)	DX55D do P355T2 L210 do L360NB
Brodski čelici	A, B, D, E AH 32 do EH 36	A, B, D, E AH 32 do EH 36	
Sitnozrnati čelici	ČRO 250 do ČRO 460 ČRV 250 do ČRV 460	StE 285 (1.0486) StE 460 (1.8905) WStE 285 (1.0487) WStE 460 (1.8935)	P275N P460N P275NH P460NH
Čelični lijev	ČL 0300 do ČL 0600	GS-38 (1.0416) do GS-52 (1.0551)	C18D do S355JRC

MEHANIČKA SVOJSTVA ČISTOG METALA ZAVARA

R_{eL} N/mm²	R_m N/mm²	A_5 %	KV (-40°C) J
> 460	530 - 680	> 22	≥ 47

ORIJENTACIJSKI KEMIJSKI SASTAV ŽICE

	C	Mn	Si	Cu
%	0,08 - 0,12	1,6 - 1,8	0,9 - 1,1	≤ 0,3

ZAŠTITNI PLIN

C1 ili M21

PAKIRANJE

Promjer žice mm	Namotaj
0,8; 1,0; 1,2; 1,6	Žica do žice (S-S)

15 kg - plastični ili žičani kolut (promjer žice 0,8; 1,0; 1,2 i 1,6 mm)

ODOBRENJA

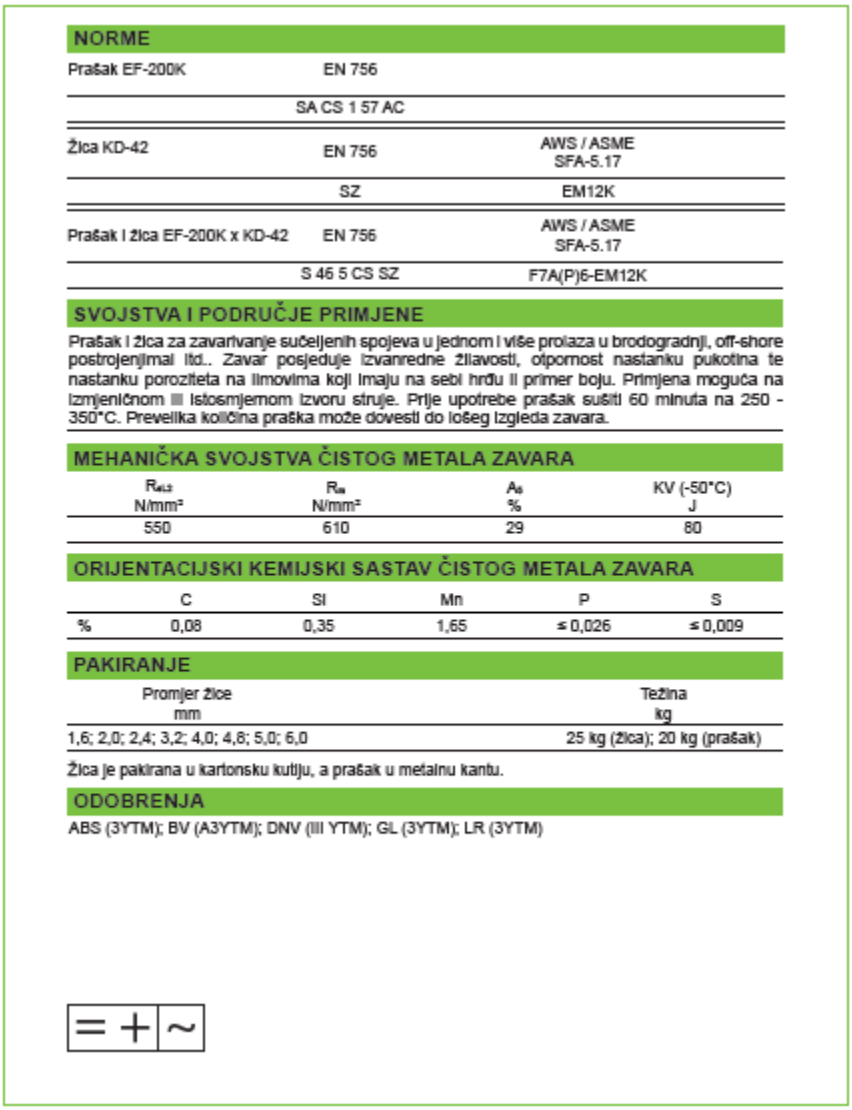
DB; TÜV



Slika 34. Specifikacija žice korištena pri D - arc zavarivanju [14]

5.3.2. EPP

Kod zavarivanja uzoraka EPP postupkom, korištena je žica proizvođača Elektroda Zagreb d.d. Žica je puna te je promjera 4 mm. Korišteni prah pri zavarivanju je SHENJIAN SJ – 301. To je vrsta praška koja daje dobru čvrstoću zavaru zbog visokog udjela Si i niskog udjela C. Na slici 35. je prikaz specifikacije žice odnosno elektrode, dok je na slici 36. dan kemijski sastav korištenoga praška.



NORME

Prašak EF-200K	EN 756	
	SA CS 1 57 AC	
Žica KD-42	EN 756	AWS / ASME SFA-5.17
	SZ	EM12K
Prašak i žica EF-200K x KD-42	EN 756	AWS / ASME SFA-5.17
	S 46 5 CS SZ	F7A(P)6-EM12K

SVOJSTVA I PODRUČJE PRIMJENE

Prašak i žica za zavarivanje sučeljenih spojeva u jednom i više prolaza u brodogradnji, off-shore postrojenjimal itd.. Zavar posjeduje izvanredne žilavosti, otpornost nastanku pukotina te nastanku poroziteta na limovima koji imaju na sebi hrđu il primer boju. Primjena moguća na izmjeničnom III istosmjernom izvoru struje. Prije upotrebe prašak sušiti 60 minuta na 250 - 350°C. Prevelika količina praška može dovesti do lošeg izgleda zavara.

MEHANIČKA SVOJSTVA ČISTOG METALA ZAVARA

R_{eLt} N/mm²	R_m N/mm²	A_5 %	KV (-50°C) J
550	610	29	80

ORIJENTACIJSKI KEMIJSKI SASTAV ČISTOG METALA ZAVARA

	C	Si	Mn	P	S
%	0,08	0,35	1,65	≤ 0,026	≤ 0,009

PAKIRANJE

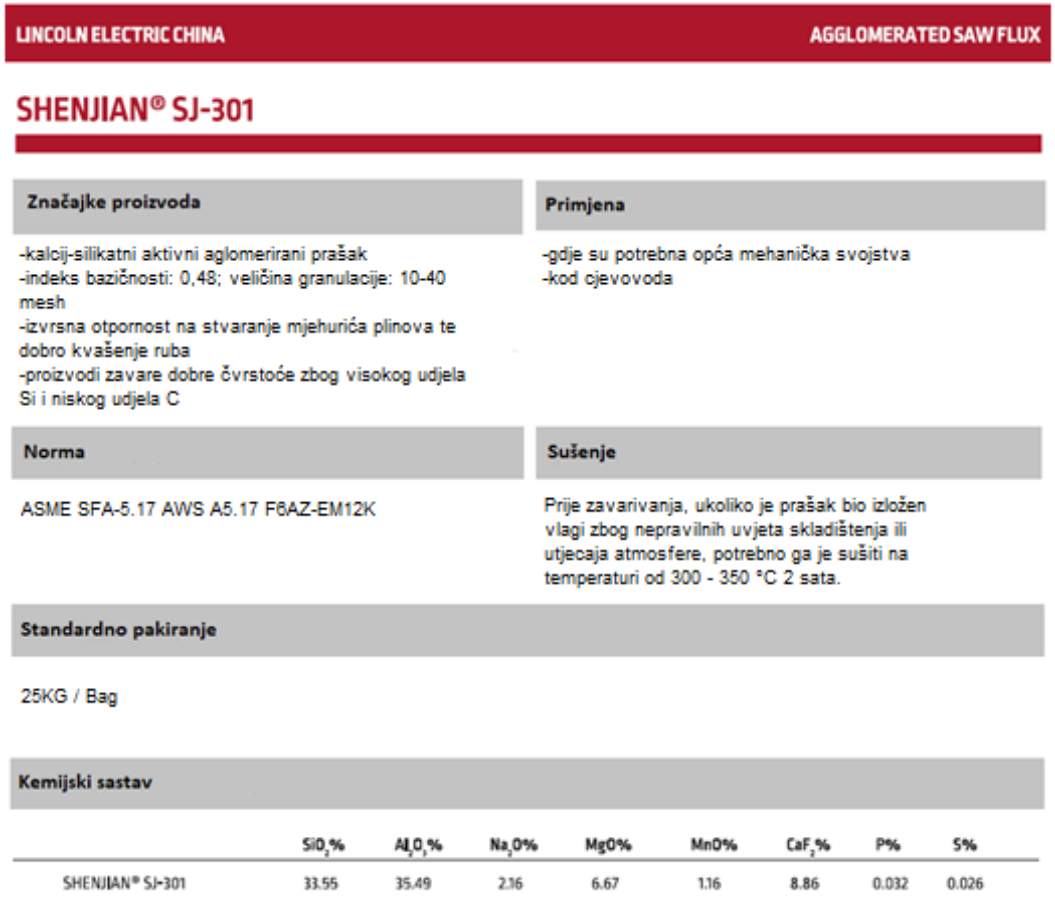
Promjer žice mm	Težina kg
1,6; 2,0; 2,4; 3,2; 4,0; 4,8; 5,0; 6,0	25 kg (žica); 20 kg (prašak)

Žica je pakirana u kartonsku kutiju, a prašak u metalnu kantu.

ODOBRENJA

ABS (3YTM); BV (A3YTM); DNV (III YTM); GL (3YTM); LR (3YTM)

Slika 35. Specifikacija žice korištena pri EPP postupku zavarivanja [15]



LINCOLN ELECTRIC CHINA AGGLOMERATED SAW FLUX

SHENJIAN® SJ-301

Značajke proizvoda

-kalcij-silikatni aktivni aglomerirani prašak
-indeks bazičnosti: 0,48; veličina granulacije: 10-40 mesh
-izvrsna otpornost na stvaranje mjehurića plinova te dobro kvašenje ruba
-proizvodi zavare dobre čvrstoće zbog visokog udjela Si i niskog udjela C

Primjena

-gdje su potrebna opća mehanička svojstva
-kod cjevovoda

Norma

ASME SFA-5.17 AWS A5.17 F6AZ-EM12K

Sušenje

Prije zavarivanja, ukoliko je prašak bio izložen vlagi zbog nepravilnih uvjeta skladištenja ili utjecaja atmosfere, potrebno ga je sušiti na temperaturi od 300 - 350 °C 2 sata.

Standardno pakiranje

25KG / Bag

Kemijski sastav

	SiO_2%	Al_2O_3%	Na_2O%	MgO%	MnO%	CaF_2%	P%	S%
SHENJIAN® SJ-301	33.55	35.49	2.16	6.67	1.16	8.86	0.032	0.026

Slika 36. Specifikacija praška korištenog pri EPP postupku zavarivanja [16]

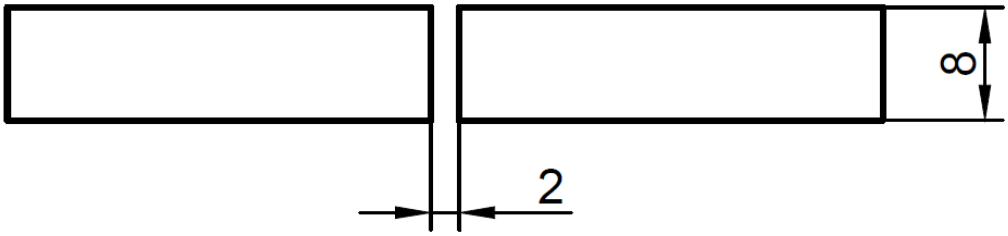
5.4. Postupak zavarivanja

5.4.1. D - arc

Prije samoga procesa zavarivanja, potrebno je:

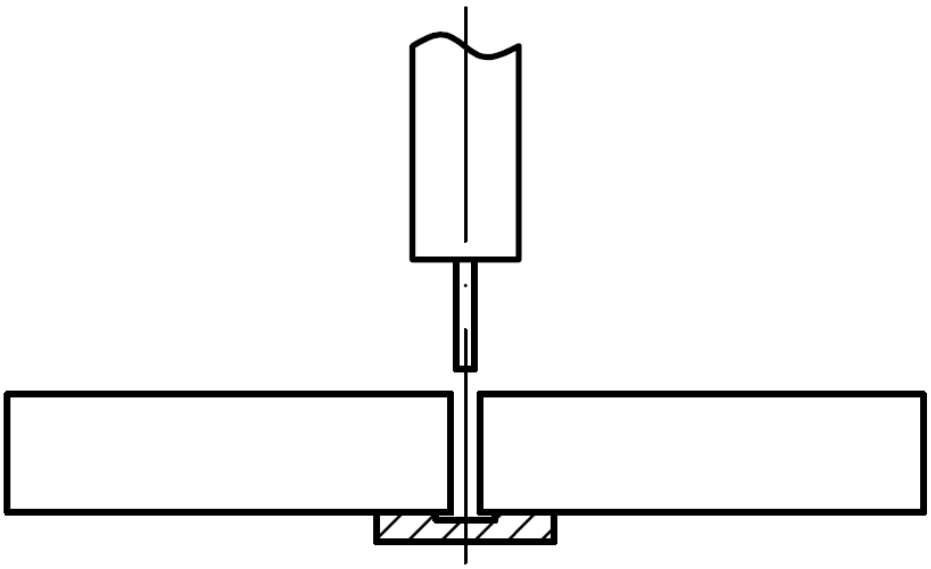
- pripremiti spoj
- brušenje i čišćenje površina koje se spajaju
- pripajanje spoja
- postavljanje krajnjih pločica
- te pozicioniranje radnoga komada na stol robota

Kod uzoraka A-1 i A-2 nije bilo dodatne pripreme spoja osim brušenja i čišćenja površine spoja. Na slici 37. dan je shematski prikaz spoja.



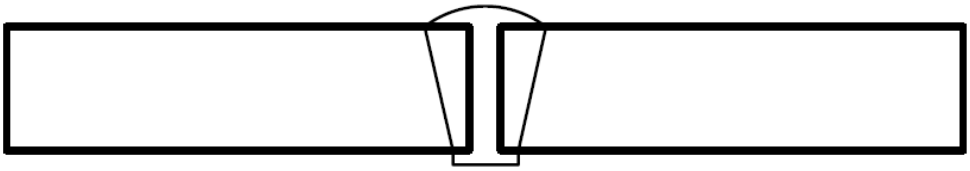
Slika 37. Priprema spoja za uzorke A-1 i A-2

Kao što je već prije navedeno, uzorci A-1 i A-2 izvedeni su kao sučeljeni spojevi debljine materijala od 8 mm. Nakon što su se materijali pripajali, postavila se keramička podloška te su se uzorci postavili na postolje gdje se nakon pozicioniranja robotske ruke započeo proces zavarivanja. Keramička podloška omogućuje zavarivanje s većim parametrima te osigurava provar korijena. Na slici 38. dan je prikaz pozicioniranja pištolja te keramičke podloške.



Slika 38. Shematski prikaz pozicioniranja pištolja i keramičke podloške

Zavarivanje uzoraka A-1 i A-2 je bilo moguće izvesti u jednom prolazu. Na taj način je dodatno smanjeno vrijeme zavarivanja i samim time veća je produktivnost. Smanjenjem vremena zavarivanja, smanjuje se i unos topline. Navedene činjenice rezultiraju i samim smanjenjem deformacija samoga spoja. Na slici 39. je shematski prikaz spoja nakon zavarivanja.



Slika 39. Shematski prikaz spoja nakon zavarivanja

Unos topline u postupku zavarivanja je izračunat prema sljedećem izrazu:

$$Q = \frac{U * I * 60 * k}{v * 1000};\ [\frac{kJ}{cm}]$$

Gdje je:

- Q – unos topline u zavar [kJ/cm]
- U – napon električnoga luka [V]
- I – jakost struje zavarivanja [A]
- k – stupanj iskorištenja postupka zavarivanja (0,8 kod MAG postupka)
- v – brzina zavarivanja [cm/min]

U tablici 9. dani su parametri zavarivanja za uzorke A-1 i A-2.

Tablica 9. Parametri zavarivanja D – arc postupka

Uzorak	Jakost struje, A	Napon, V	Brzina zavarivanja, cm/min	Slobodni kraj žice, mm	Unesena toplina, kJ/cm	Protok plina, L/min	Promjer žice, mm
A-1	320	30	28	25	16,457	20	1,2
A-2	320	30	28	25	16,457	20	1,2



Slika 40. Uzorak A-1 nakon postupka zavarivanja



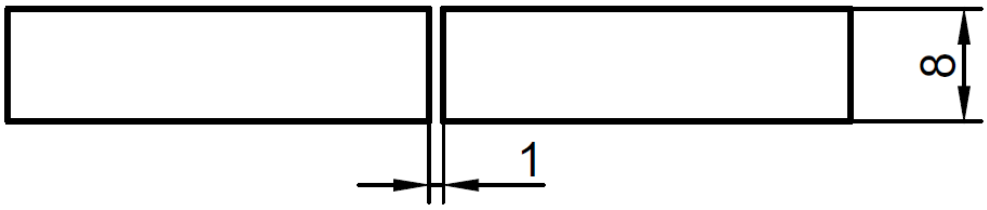
Slika 41. Uzorak A-2 nakon postupka zavarivanja

5.4.2. EPP

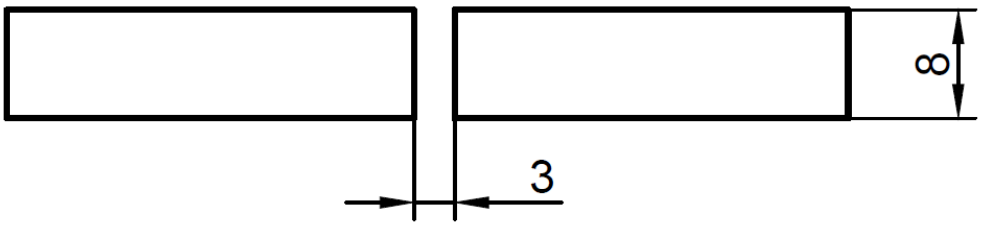
Prije samoga procesa zavarivanja, potrebno je:

- pripremiti spoj
- brušenje i čišćenje površina koje se spajaju
- pripajanje spoja
- postavljanje krajnjih pločica
- te pozicioniranje radnoga komada na podlogu

Kod uzoraka B-1 i B-2 nije bilo dodatne pripreme spoja osim brušenja i čišćenja površine spoja. Na slikama 42. i 43. dan je shematski prikaz spoja kod uzoraka B-1 i B-2, dok su na slikama 44. i 45. dani realni prikazi pripreme spojeva prije zavarivanja



Slika 42. Priprema spoja za uzorak B–1



Slika 43. Priprema spoja za uzorak B–2

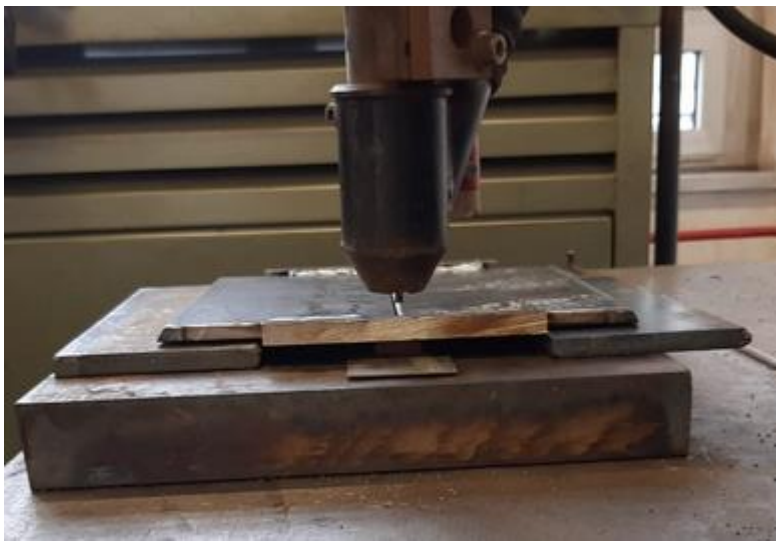


Slika 44. Prikaz pripreme spoja sa prednje strane



Slika 45. Prikaz pripreme spoja s korijenske strane

Prilikom zavarivanja uzorka B-1 koristili su se približno isti parametri kao pri zavarivanju D – arc postupkom. Kod zavarivanja B-2 uzorka su se koristili parametri koji odgovaraju EPP postupku. Pozicioniranje elektrode odnosno žice je bilo identično kao kod D – arc postupka (slika 46). Također se koristila keramička podloška.



Slika 46. Pozicioniranje elektrode

Tablica 10. Parametri zavarivanja EPP postupkom

Uzorak	Jakost struje, A	Napon, V	Brzina zavarivanja, cm/min	Slobodni kraj žice, mm	Unesena toplina, kJ/cm	Promjer žice, mm
B-1	300	34	28	25	21,857	4
B-2	290	32	28	25	19,886	4



Slika 47. Proces zavarivanja uzoraka



Slika 48. Uzorak B-1: lice zavara



Slika 49. Uzorak B-1, korijen zavara



Slika 50. Uzorak B-2, lice zavara



Slika 51. Uzorak B-2, korijen zavara

5.5. Provedena ispitivanja

U svrhu ocjene kvalitete zavara koji su dobiveni D – arc i EPP postupkom zavarivanja, u svrhu isplativosti provedena su sljedeća istraživanja:

- analiza makroizbrusaka
- mjerenje tvrdoće Vickers metodom HV10

5.5.1. Analiza makroizbrusaka

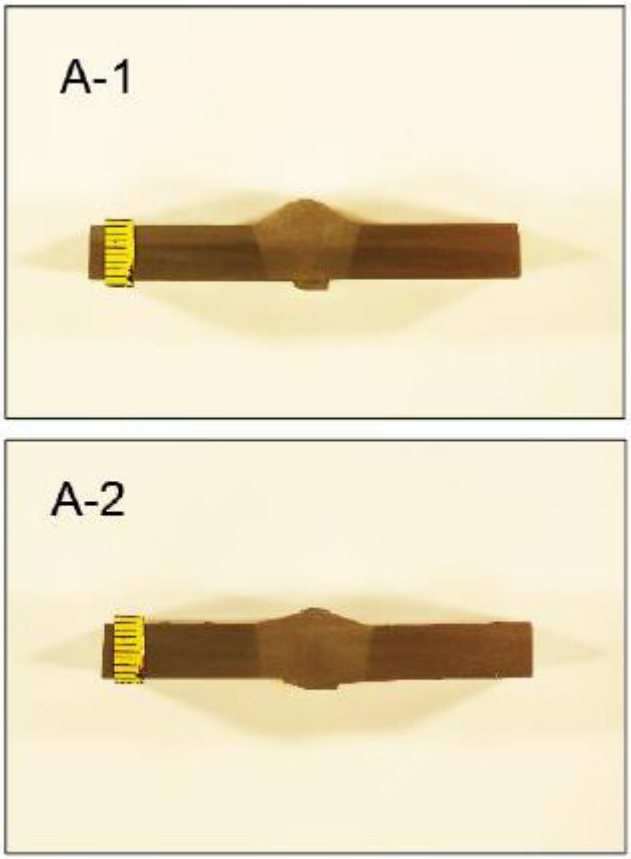
Iz ukupno 4 uzoraka izrezani su makroizbrusci na tračnoj pili prikazanoj na slici 52. Nakon izrade makroizbrusaka, uzorci su bili podvrgnuti tehnologiji brušenja. Stroj na kojemu je izvršeno brušenje prikazano je na slici 53. Brušenje je provedeno brusnim papirom granulacije 120, 320, 600, 1200 i na kraju je završeno sa 2400. Nakon tehnologije brušenja, uzorci su nagriženi u otopini (3 % nital). Nadalje su stavljeni u običnu vodu da se prekine kemijska reakcija.



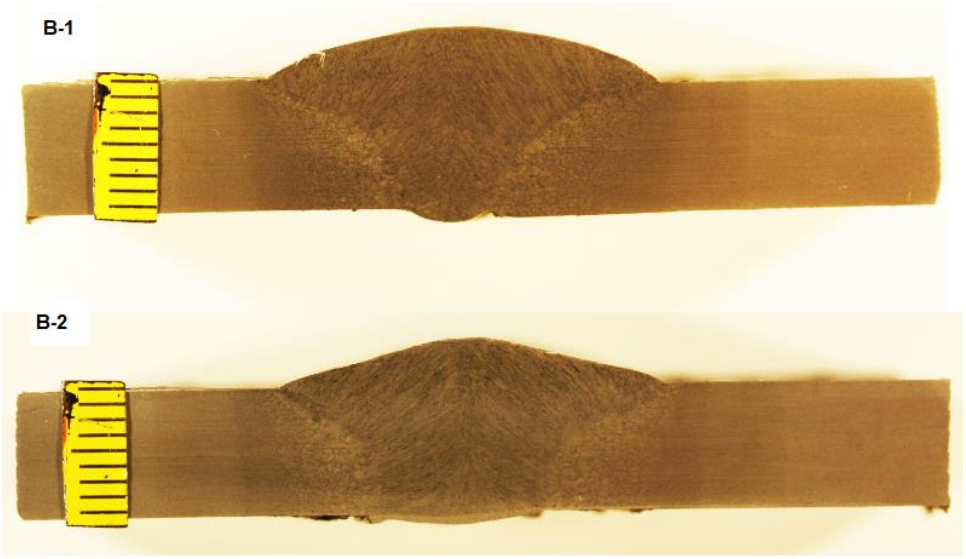
Slika 52. Uzorci na tračnoj pili



Slika 53. Uređaj za brušenje

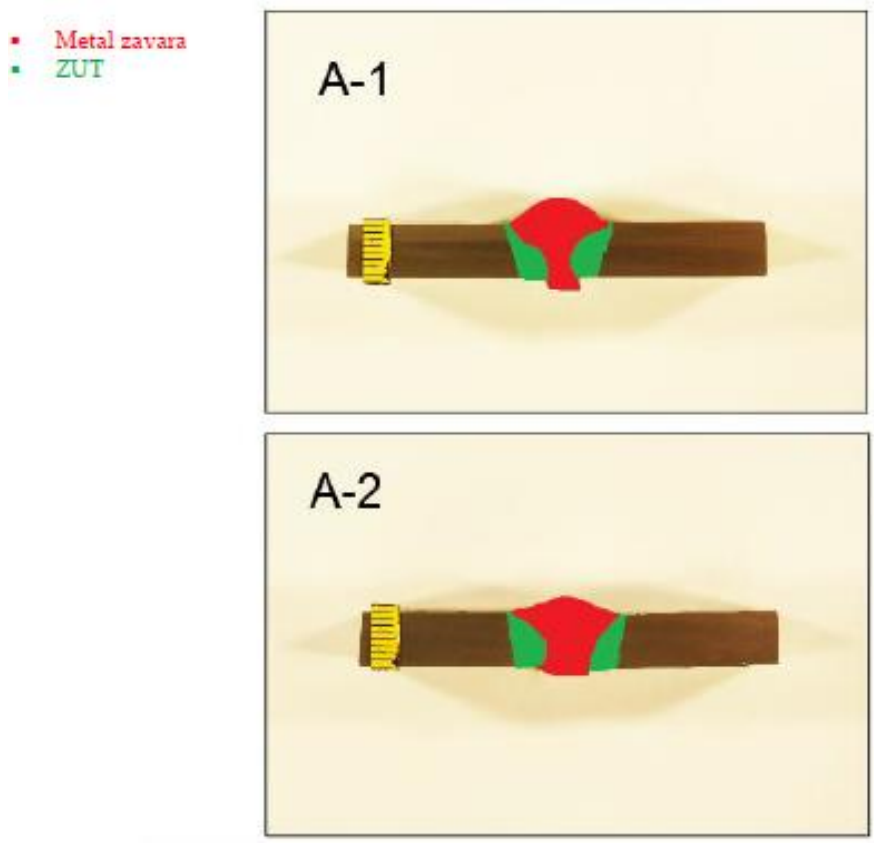


Slika 54. Makroizbrusci uzoraka A-1 i A-2



Slika 55. Makroizbrusci uzoraka B-1 i B-2

Može se iz priloženoga vidjeti i zaključiti kako na uzorcima nema uočljivih nepravilnosti. Na idućim slikama je prikaz zona odnosno područja.



Slika 56. Zone zavara na makroizbruscima A-1 i A-2



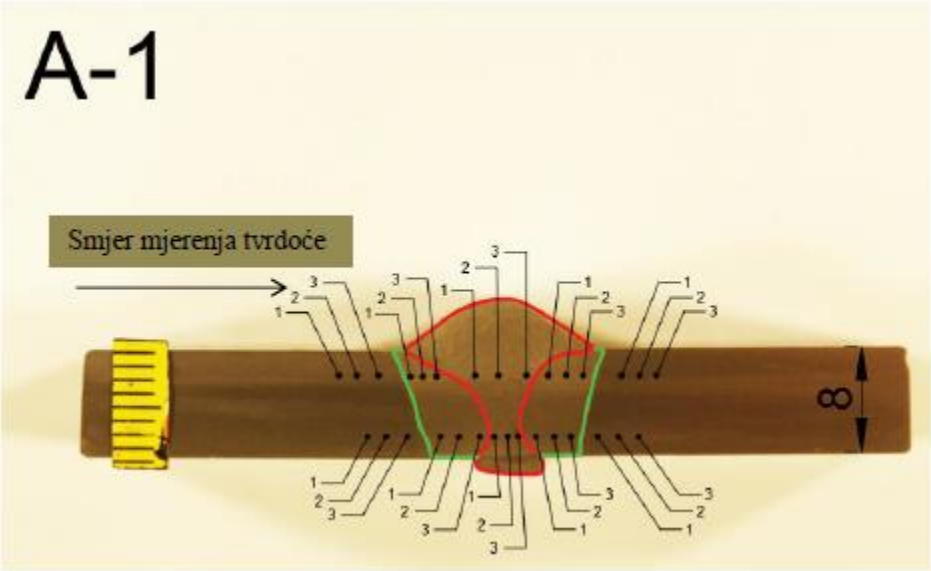
Slika 57. Zone zavara na makroizbruscima B-1 i B-2

5.5.2. Mjerenje tvrdoće

Ispitivanje je provedeno Vickersovom metodom HV10 na svim uzorcima makrozbrusaka. Mjerila se tvrdoća sa strane lica zavara te sa korijenske strane zavara. Tvrdoća je mjerena na tvrdomjeru Reicherter TM12 koji je prikazan na slici 58. Primijenjena sila je iznosila 10 kiloponda, odnosno 98,04 N. Metoda se zasniva na utiskivanju dijamantne četverostrane piramide u materijal. Tvrdoća je mjerena u osnovnom materijalu, zoni utjecaja topline i metalu zavara. Vrijeme utiskivanja je iznosilo 10 s. Na slikama 59., 61., 63. i 65. dane su sheme mjerenja i njihove pozicije, na slikama 60., 62., 64. i 66. dani su grafički prikazi tvrdoća dok su u tablicama 11., 12., 13. i 14. dani numerički rezultati mjerenja.



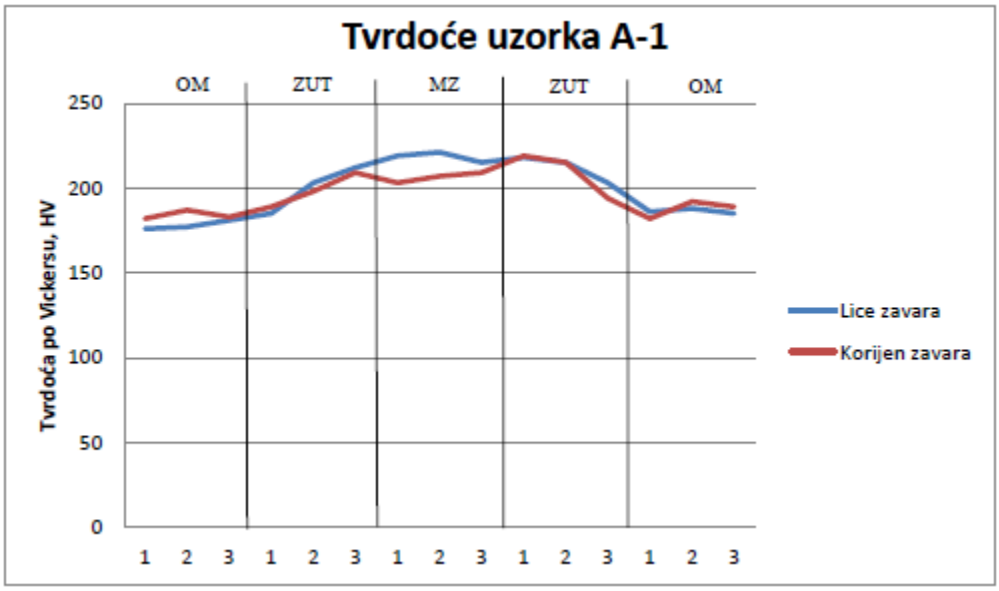
Slika 58. Tvrdomjer Reicherter TM12



Slika 59. Shema mjerenja tvrdoće na uzorku A-1

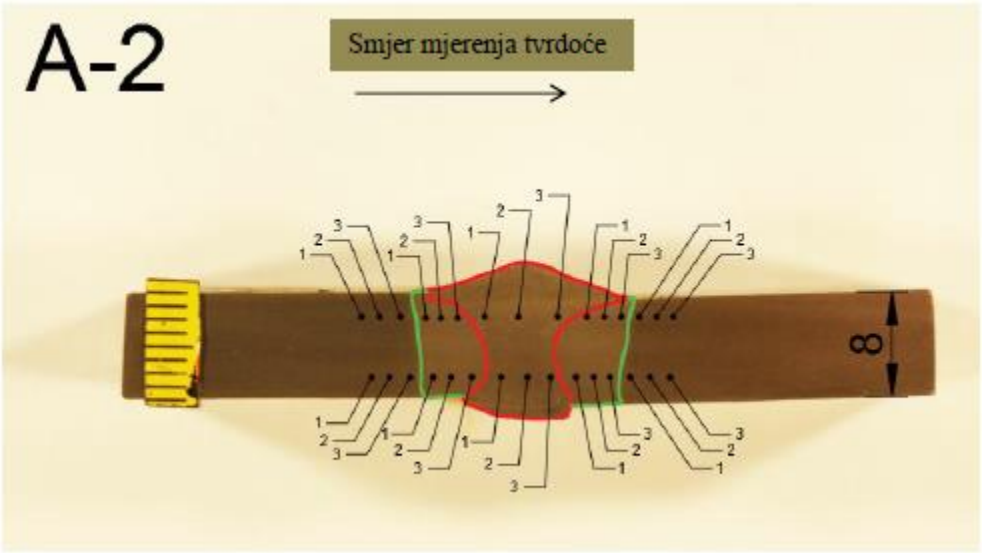
Tablica 11. Rezultati mjerenja tvrdoće na uzorku A-1

Oznaka		Lice zavara	Korijen zavara
1	Osnovni materijal	176	182
2		177	187
3		181	183
1	ZUT	185	189
2		203	198
3		212	209
1	Metal zavara	219	203
2		221	207
3		215	209
1	ZUT	218	219
2		215	215
3		203	194
1	Osnovni materijal	186	182
2		188	192
3		185	189



Slika 60. Grafički prikaz tvrdoća uzorka A-1

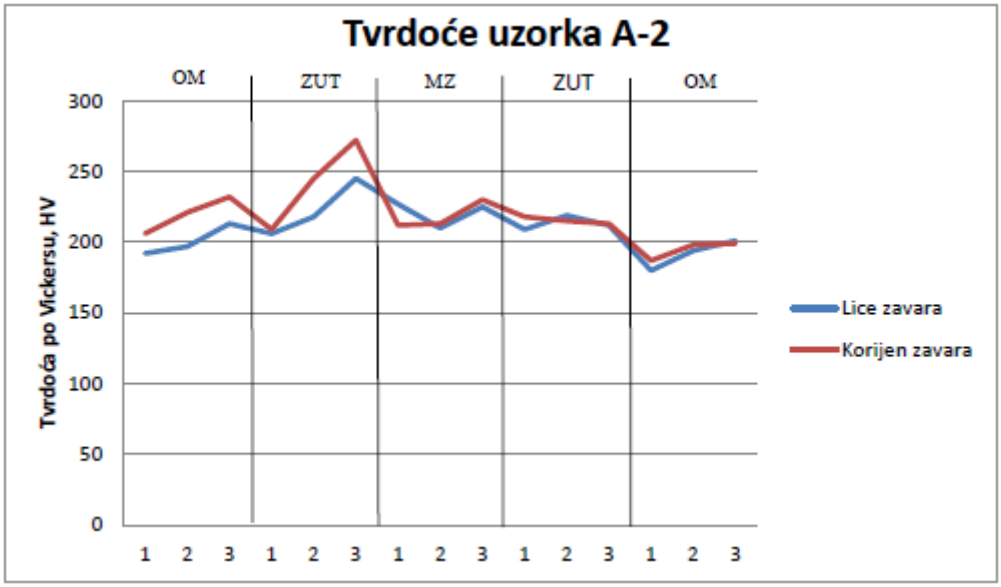
Analizom dijagrama se može zaključiti kako je tvrdoća najveća u ZUT-u sa korijenske strane, dok je najveća tvrdoća sa strane lica zavara u metalu zavara.



Slika 61. Shema mjerenja tvrdoće na uzorku A-2

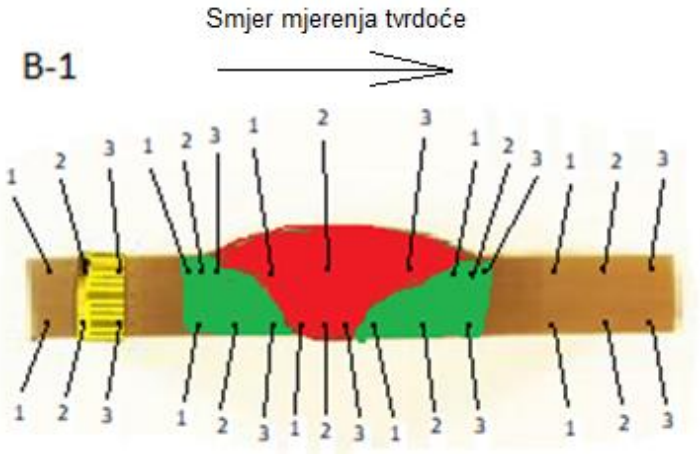
Tablica 12. Rezultati mjerenja tvrdoće na uzorku A-2

Oznaka		Lice zavara	Korijen zavara
1	Osnovni materijal	192	206
2		197	221
3		213	232
1	ZUT	206	209
2		218	245
3		245	272
1	Metal zavara	227	212
2		210	213
3		225	230
1	ZUT	209	218
2		219	215
3		212	213
1	Osnovni materijal	180	187
2		194	198
3		201	199



Slika 62. Grafički prikaz tvrdoće uzorka A-2

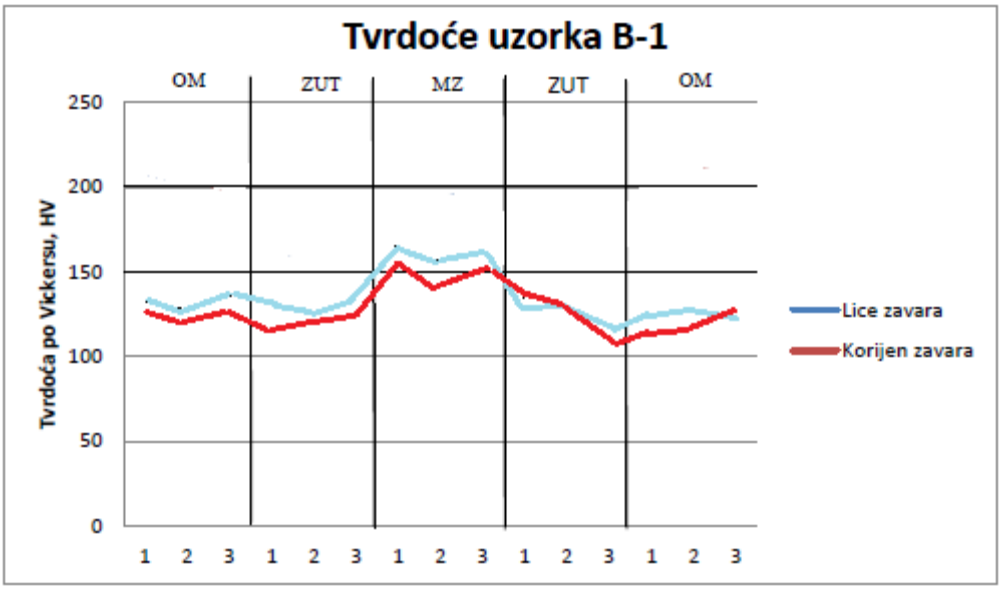
Nakon analize rezultata mjerenja tvrdoće možemo zaključiti da je tvrdoća najveća u ZUT-u, nešto manja u metalu zavara, a najmanja u osnovnom materijalu.



Slika 63. Shema mjerenja tvrdoće na uzorku B-1

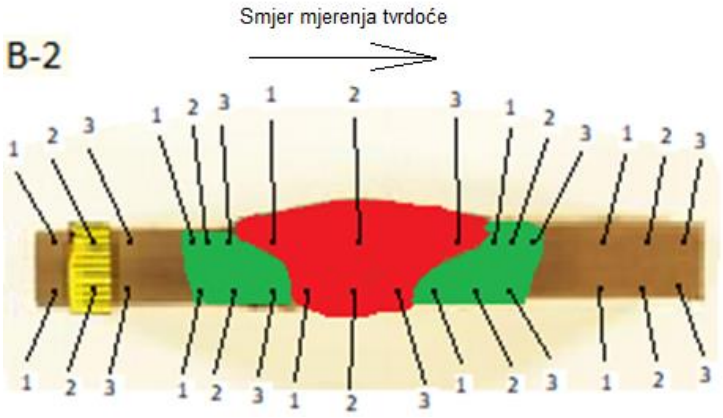
Tablica 13. Rezultati mjerenja tvrdoće na uzorku B-1

Oznaka		Lice zavara	Korijen zavara
1	Osnovni materijal	133	130
2		131	126
3		135	130
1	ZUT	132	120
2		128	124
3		133	125
1	Metal zavara	165	152
2		152	143
3		157	151
1	ZUT	130	135
2		130	130
3		123	117
1	Osnovni materijal	126	123
2		128	124
3		123	128



Slika 64. Grafički prikaz tvrdoće uzorka B-1

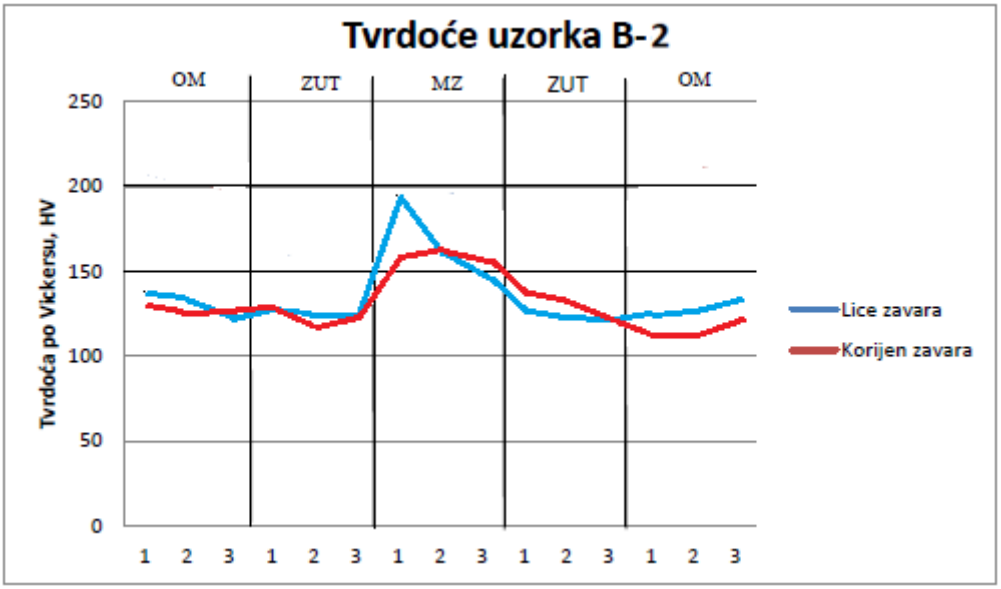
Nakon provedenog ispitivanja tvrdoće, može se zaključiti kako je najveća tvrdoća u metalu zavara, te da su tvrdoće u ZUT-u i osnovnome materijalu približno jednake.



Slika 65. Shema mjerenja tvrdoće na uzorku B-2

Tablica 14. Rezultati mjerenja tvrdoće na uzorku B-2

Oznaka		Lice zavara	Korijen zavara
1	Osnovni materijal	142	134
2		140	129
3		124	129
1	ZUT	128	130
2		128	122
3		128	126
1	Metal zavara	193	160
2		157	160
3		150	156
1	ZUT	133	144
2		129	140
3		125	125
1	Osnovni materijal	130	120
2		131	119
3		138	126



Slika 66. Grafički prikaz tvrdoće uzorka B-2

Analizom rezultata vidi se kako je najveća tvrdoća u metalu zavara dok su približne vrijednosti tvrdoće u ZUT-u i osnovnome materijalu.

5.6. Isplativost korištenja D – arc sustava zavarivanja

Tablica 15. Prednosti i nedostaci korištenih postupaka zavarivanja

Kriterij	Postupak	
	D - arc	EPP
Intermitencija	+	-
Brzina zavarivanja	+	-
Mogućnost jednoprolaznog zavarivanja debljih stijenki (do 20 mm)	+	+
Geometrija zavara	+/-	-
Pojava nepravilnosti	+/-	+
Mikrostruktura	+/-	+/-
Proizvodnost	+	+
Spektar debljih stijenki koje se zavaruju	-	-
Cijena investicije (robotizacija)	-	-
Pojava deformacije	+	-
Mogućnost primjene na raznorodnim materijalima	-	-
Jednostavna priprema/izvedba spoja	+	+

Usporedbom prednosti i nedostataka, zaključuje se kako su oba postupka visokoproduktivna. EPP postupkom se dobiva dobra kvaliteta zavara, no primjenom D – arc sustava za zavarivanje konstrukcijskih čelika odabirom optimalnih parametara dobiva se također zadovoljavajuća kvaliteta zavara uz najbitniju osobinu manjeg unosa topline (kod uzorka B-1 unos topline je veći za 24,71 %, dok je kod uzorka B-2 unos topline veći za 17,24 %) što na kraju rezultira manjim deformacijama i utječe na mikrostrukturu zavarenoga spoja. Također, skraćeno je vrijeme pripreme i vrijeme samoga postupka zavarivanja. Najveći nedostatak D – arc postupka je njegova visoka cijena opreme te visoka kompleksnost samih dijelova. Potrebno je imati visoko robotiziran sustav za primjenu ovakvoga postupka. Primjenjiv je za poduzeća koji proizvode dijelove od konstrukcijskog čelika većih debljina i to u većim serijama.

6. ZAKLJUČAK

Zbog sve većih zahtjeva tržišta dolazi i do razvoja novih tehnologija. U tom aspektu posebno je zahvaćena tehnologija zavarivanja. Istraživanjima se danas dokazuje da konvencionalni MAG postupak ima dosta nedostataka u pogledu efikasnosti, kvalitete i produktivnosti. Uz navedene nedostatke, dodatno utječe i nedovoljna penetracija pri zavarivanju debljih materijala. U svrhu navedenoga, razvijaju se i primjenjuju modificirani postupci MAG zavarivanja. Takvi postupci razvijeni su s ciljem ostvarivanja zahtijevane kvalitete i sigurnosti zavarenoga spoja, prihvatljive cijene uz daleko povećanu produktivnost. Takav jedan modificirani MAG postupak zavarivanja primjenjuje zakopani luk kod kojega je električni luk postavljen ispod razine rastaljenoga dodatnog i osnovnog materijala. Prve inačice zakopanoga luka su se počele istraživati u Japanu gdje je ostvarena penetracija od 10 mm u jednome prolazu. Uz ugradnju niskofrekventne kontrole napona, zakopani luk je uspješno stabiliziran te je razvijen kao visokoučinski MAG postupak zavarivanja. Iako ima visoku cijene opreme (robot, izvor struje, upravljanje i sl.), opisuje se kao veoma isplativa investicija za tvrtke u čijem pogonu je potrebno zavarivati deblje materijale. U eksperimentalnom dijelu rada, D – arc postupak zavarivanja se uspoređivao s EPP postupkom zavarivanja. Zaključuje se kako je pravilnim odabirom parametara zavarivanje moguće dobiti zavare dobre kvalitete s potpunom penetracijom i velikim depozitom materijala. Samim većim depozitom materijala izravno se povećava produktivnost zajedno s brzinom zavarivanja. Uz nedostatke najviše se ističe precizno podešavanje parametara. S obzirom da je D – arc postupak zavarivanja još uvijek u fazi istraživanja, tvrtke koje proizvode zavarene konstrukcije iz debljih materijala, mogu u širokom pogledu računati na ovakav postupak visokoučinskog zavarivanja u bližoj budućnosti.

LITERATURA

[1] Horvat M., Kondić V.: Primjeri modificiranih postupaka MIG/MAG zavarivanja, Varaždin, 2012., https://hrcak.srce.hr/94796 preuzeto 26.01.2021.

[2] Kralj S., Andrić Š.: Osnove zavarivačkih postupaka 1992., Zagreb

[3] 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 26.01.2021.

[4] 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 27.01.2021.

[5] 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 28.01.2021.

[6] Rosado, T., Almeida, P., Pires, I., Miranda, R., Quintino, L.: Innovation in Arc Welding, https://www.researchgate.net/publication/228908389_Innovations_in_arc_welding preuzeto 28.01.2021.

[7] T. Era, A. Ide, T. Uezono, T. Ueyama & Y. Hirata: Controlled bridge transfer (CBT) gas metal arc process for steel sheets joining, https://doi.org/10.1179/136217109X406965 preuzeto 30.01.2021.

[8] Horvat M., Kondić V., Brezovečki D.: Opravdanost primjene MAG forceArc postupka zavarivanja u izradi čeličnih konstrukcija, https://hrcak.srce.hr/129388 preuzeto 30.01.2021.

[9] www.lincolnelectric.com/assets/US/EN/literature/NX260.pdf preuzeto 30.01.2021.

[10] J.M. Antonini: Health Effects Associated with welding, https://doi.org/10.1016/B978-0-08-096532-1.00807-4 preuzeto 30.01.2021.

[11] Hayato B., Tetsuo E., Tomoyuki U., Manabu T.: Razvoj visokoučinskog zavarivanja čelika za debele limove primjenom zakopanog luka električnog luka velike struje, Zavarivanje vol. 60. No. 5-6, 2017., https://hrcak.srce.hr/index.php?show=toc&id_broj=16174 preuzeto 30.01.2021.

[12] http://www.splav-kharkov.com/en/e_mat_start.php?name_id=886 preuzeto 31.01.2021.

[13] https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=6022 preuzeto 31.01.2021.

[14] https://www.ezg.hr/proizvodi/wire/EZSG3.html preuzeto 01.02.2021.

[15] https://www.ezg.hr/download/EZ_katalog_2018_hrv.pdf preuzeto 01.02.2021.

[16] https://www.lincolnelectric.com.cn/en/product/consumables/detail?ProductItem=%7BFBFA7744-5446-4647-8621-3AB2DB045AAB%7D preuzeto 01.02.2021.

PRILOZI

I. CD-R disc