Optimiranje parametara D-Arc zavarivanja limova većih debljina

Grd, David

Master's thesis / Diplomski rad

2021

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

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:489238

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-29**

Repository / Repozitorij:

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

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

David Grd

Zagreb, 2021.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor: Student:

Prof. dr. sc. Zoran Kožuh, dipl. ing. David Grd

Zagreb, 2021.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći navedenu literaturu i znanje stečeno tijekom studija.

Zahvaljujem se svom mentoru prof. dr. sc. Zoranu Kožuhu na ukazanom povjerenju i strpljenju te stručnom vođenju kroz izradu diplomskog rada.

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

Također se zahvaljujem tehničkom osoblju Laboratorija za zavarivanje na pomoći tijekom izrade eksperimentalnog dijela rada.

Zahvaljujem se svojoj obitelji na velikoj podršci tijekom izrade diplomskog rada i tijekom cijelog preddiplomskog i diplomskog studija.

David Grd

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

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

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **DAVID GRD** Mat. br.: 0035203605

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Optimiranje parametara D-Arc zavarivanja limova većih debljina**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Optimisation of D-Arc Welding Parameters of Thick Steel Plates**

Opis zadatka:

Navesti i opisati vrste prijenosa metala u električnom luku pri MAG zavarivanju. S obzirom na specifične primjene, navesti modificirane načine prijenosa metala koji su u primjeni u industriji. Detaljno opisati modificirani način prijenosa metala kojeg karakterizira zakopani električni luk (D-Arc), te ga usporediti s konvencionalnim načinom prijenosa (štrcajući luk).

U eksperimentalnom dijelu rada potrebno je definirati optimalne parametre zavarivanja za D-Arc način prijenosa metala kod zavarivanja ploča debljina 8 i 11 mm u svrhu postizanja potpune penetracije. Kao osnovni materijal odabrati konstrukcijski čelik. Na izrađenim sučeljenim i kutnim zavarima potrebno je provesti propisana nerazorna/razorna ispitivanja. Na temelju dobivenih rezultata potrebno je ocijeniti kvalitetu zavarenog spoja.

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

Zadatak zadan:
12. studenog 2020.

Rok predaje rada:
14. siječnja 2021.

Predviđeni datum obrane:
18. siječnja do 22. siječnja 2021.

Zadatak zadao:
prof. dr. sc. Zoran Kožuh

Predsjednica Povjerenstva:
prof. dr. sc. Biserka Runje

SADRŽAJ

SADRŽAJ I

POPIS SLIKA III

POPIS TABLICA VI

POPIS KRATICA VII

POPIS OZNAKA IX

SAŽETAK X

SUMMARY XI

1. UVOD 1

2. MAG POSTUPAK ZAVARIVANJA 2

2.1. Općenito o MAG postupku zavarivanja 2

2.2. Žice za MAG postupak zavarivanja 4

2.3. Plinovi pri MAG postupku zavarivanja 5

2.4. Strojevi i oprema za MAG postupak zavarivanja 8

2.5. Prijenos metala pri postupku MAG zavarivanja 12

2.5.1. Prijenos metala kratkim spojevima 12

2.5.2. Prijenos metala štrcajućim lukom 13

2.5.3. Prijenos metala prijelaznim lukom 14

2.5.4. Prijenos metala impulsnim strujama (pulzirajući luk) 15

2.5.5. Prijenos metala rotirajućim električnim lukom 16

3. MODIFICIRANI POSTUPCI MAG ZAVARIVANJA 18

3.1. Modificirani prijenos metala kratkim spojevima 18

3.1.1. Surface tension transfer 18

3.1.2. FastROOT 19

3.1.3. Cold metal transfer 20

3.1.4. Controlled bridge transfer 21

3.2. Modificirani prijenos metala štrcajućim lukom 22

3.2.1. Rapid MAG Technology 22

3.2.2. ForceArc ... 23
3.2.3. PowerMode ... 23
3.3. Visokoučinski postupci MAG zavarivanja ... 23
3.3.1. Flux Cored Arc Welding ... 24
3.3.2. Tandem Welding ... 25
4. VISOKOUČINSKO ZAVARIVANJE PRIMJENOM ZAKOPANOG LUKA ... 27
4.1. Usporedba zakopanog i štrcajućeg luka ... 28
4.2. Promatranje i stabilizacija zakopanog luka ... 29
4.2.1. Promatranje zakopanog luka ... 31
4.2.2. Stabilizacija zakopanog luka ... 31
4.3. D-arc sustav za zavarivanje zakopanim lukom pri visokim strujama ... 36
4.4. Usporedba D-arc sustava sa konvencionalnim MAG postupkom ... 38
5. EKSPERIMENTALNI DIO ... 42
5.1. Oprema za D - arc sustav zavarivanja ... 43
5.2. Osnovni materijal ... 44
5.3. Dodatni materijal i zaštitni plin ... 46
5.4. Postupak zavarivanja uzoraka ... 48
5.4.1. Priprema uzoraka za zavarivanje ... 48
5.4.2. Postupak zavarivanja ispitnih uzoraka ... 51
5.5. Provedena ispitivanja ... 61
5.5.1. Analiza makroizbruska ... 61
67
5.5.2. Mjerenje tvrdoće ... 69
5.5.3. Radiografsko ispitivanje ... 78
5.6. Isplativost korištenja D-arc sustava zavarivanja ... 82
6. ZAKLJUČAK ... 84
LITERATURA ... 85
PRILOZI ... 86

POPIS SLIKA

Slika 2.1 Shema MAG postupka zavarivanja [2] 2
Slika 2.2 Presjeci praškom punjenih žica [1] 5
Slika 2.3 Karakterističan oblik električnog luka i njegova geometrija [1] 6
Slika 2.4 Oblik penetracije zavarenog spoja ovisno o zaštitnoj atmosferi [1] 7
Slika 2.5 Utjecaj poprečnog strujanja na potrebnu količinu zaštitnog plina [1] 8
Slika 2.6 Osnovna oprema za MIG/MAG postupak zavarivanja [3] 9
Slika 2.7 Karakteristična rješenja dobave žice kod MIG/MAG postupka zavarivanja [4] .. 10
Slika 2.8 Dijelovi pištolja za MAG zavarivanje [5] 11
Slika 2.9 Izvor struje za MAG zavarivanje (Daihen-Varstroj) [6] 11
Slika 2.10 Prijenos metala kratkim spojevima [1] 13
Slika 2.11 Prijenos metala štrcajućim lukom kod MAG postupka zavarivanja [1] 14
Slika 2.12 Prijenos metala mješovitim lukom [1] 15
Slika 2.13 Promjena struje u ovisnosti o vremenu pri impulsnom zavarivanju [1] 16
Slika 2.14 Shematski prikaz prijenosa metala štrcajućim i rotirajućim lukom [5] 17
Slika 2.15 Usporedba izgleda profila zavara nastalih štrcajućim i rotirajućim lukom [5] 17
Slika 3.1 Korijenski zavar dobiven STT postupkom [8] 19
Slika 3.2 Zavareni spoj dupleks i superaustenitnog čelika debljine 2 mm [8] 20
Slika 3.3 Faze CMT postupka zavarivanja 21
Slika 3.4 Priprema spoja za RMT u odnosu na konvencionalni štrcajući luk [8] 22
Slika 3.5 Zaštitna atmosfera kod FCAW postupka zavarivanja [8] 24
Slika 3.6 Sustav za tandem postupak zavarivanja [8] 25
Slika 3.7 Pištolj za tandem postupak zavarivanja [8] 26
Slika 4.1 Zakopani električni luk, pogled izvana [2] 27
Slika 4.2 Zakopani električni luk, pogled iznutra [2] 27
Slika 4.3 Razlika između MAG zavarivanja štrcajućim i zakopanim lukom [2] 28
Slika 4.4 Razlika u pripremi spoja između MAG zavarivanja štrcajućim i zakopanim lukom [2] 29
Slika 4.5 Shematski prikaz eksperimenta [5] 30
Slika 4.6 Rezultati snimanja nestabilnog zakopanog luka [10] 31
Slika 4.7 Utjecaj nagiba vanjske karakteristike na izgled navara [5] 32

Slika 4.8 Prijenos metala u zakopanom luku pri visokim strujama [5] ... 33
Slika 4.9 Valni oblik struje i napona sa shematskim prikazom prijenosa metala [5] ... 34
Slika 4.10 Izgled navara dobiven konvencionalnim (1) i stabiliziranim (2) zakopanim lukom [10] ... 34
Slika 4.11 Valni oblik struje i napona dobiven moduliranom kontrolom napona niske frekvencije [5] ... 35
Slika 4.12 Fenomen stabiliziranog zakopanog luka pri moduliranom upravljanju naponom niske frekvencije [5] ... 36
Slika 4.13 D-arc sustav za zavarivanja [5] ... 37
Slika 5.1 Oprema D-arc sustava za zavarivanje [5] ... 43
Slika 5.2 Specifikacija dodatnog materijala (EZ – SG 3) [13] ... 46
Slika 5.3 Specifikacija dodatnog materijala (EZ – SG 2) [14] ... 47
Slika 5.4 Priprema spoja za uzorke A-1 i A-2 ... 48
Slika 5.5 Priprema spoja za uzorak A-3 ... 49
Slika 5.6 Priprema spoja za uzorke B-1 i B-2 ... 49
Slika 5.7 Pripremljen žlijeb na jednoj polovici uzorka B ... 50
Slika 5.8 Pripremljeni uzorci B-1 i B-2 za postupak zavarivanja ... 51
Slika 5.9 Shema položaja zavarivanja uzoraka A-1 i A-2 ... 52
Slika 5.10 Shema položaja zavarivanja uzorka A-3 ... 52
Slika 5.11 Shematski prikaz zavarenih uzoraka A-1 i A-2 sa označenim prolazima ... 53
Slika 5.12 Shematski prikaz zavarenog uzorka A-3 sa označenim prolazima ... 53
Slika 5.13 Uzorak A-1 nakon provedenog postupka zavarivanja ... 55
Slika 5.14 Uzorak A-2 nakon provedenog postupka zavarivanja ... 55
Slika 5.15 Uzorak A-3 nakon provedenog postupka zavarivanja ... 56
Slika 5.16 Shematski prikaz položaja zavarivanja uzoraka B-1 i B-2 ... 57
Slika 5.17 Shematski prikaz zavarenih uzoraka B-1 i B-2 sa označenim prolazima ... 57
Slika 5.18 Čišćenje površine zavara između prolaza ... 58
Slika 5.19 Uzorak B-1 nakon zavarivanja ... 59
Slika 5.20 Uzorak B-2 nakon zavarivanja ... 60
Slika 5.21 Korijenska strana uzorka B-1 ... 60
Slika 5.22 Korijenska strana uzorka B-2 ... 61
Slika 5.23 Grubo izrezan makroizbrusak iz uzorka A-1 ... 62
Slika 5.24 Grubo izrezan makroizbrusak iz uzorka A-2 ... 62
Slika 5.25 Grubo izrezan makroizbrusak iz uzorka B-1 ... 63

Slika 5.26 Grubo izrezan makroizbrusak iz uzorka B-2 ... 63
Slika 5.27 Uzorak A-3 nakon operacije ručnog brušenja ... 64
Slika 5.28 Makroizbrusci (A-1, A-2 i A-3) nakon nagrizanja ... 65
Slika 5.29 Makroizbrusci (B-1 i B-2) nakon nagrizanja ... 66
Slika 5.30 Zone/područja zavara vidljive na makruizbrusku uzoraka A-1, A-2 i A-3 ... 67
Slika 5.31 Zone/područja zavara vidljive na makroizbrusku uzorka B-1 i B-2 ... 68
Slika 5.32 Tvrdomjer Reicherter TM12 ... 69
Slika 5.33 Shema mjerenja tvrdoće uzorka A-1 ... 70
Slika 5.34 Grafički prikaz tvrdoća uzorka A-1 – HV10 ... 71
Slika 5.35 Shema mjerenja tvrdoće uzorka A-2 ... 72
Slika 5.36 Grafički prikaz tvrdoća uzorka A-2 – HV10 ... 73
Slika 5.37 Shema mjerenja tvrdoće uzorka A-3 ... 73
Slika 5.38 Grafički prikaz tvrdoća uzorka A-3 – HV10 ... 74
Slika 5.39 Shema mjerenja tvrdoće uzorka B-1 ... 75
Slika 5.40 Grafički prikaz tvrdoća uzorka B-1 – HV10 ... 76
Slika 5.41 Shema mjerenja tvrdoće uzorka B-2 ... 76
Slika 5.42 Grafički prikaz tvrdoća uzorka B-2 – HV10 ... 77
Slika 5.43 Uzorci A-1 i A-2 pripremljeni za rendgensko snimanje ... 79
Slika 5.44 Uzorci B-1 i B-2 pripremljeni za rendgensko snimanje ... 79
Slika 5.45 Rendgenski snimak uzorka A-1 ... 80
Slika 5.46 Rendgenski snimak uzorka A-2 ... 80
Slika 5.47 Rendgenski snimak uzorka B-1 ... 81
Slika 5.48 Rendgenski snimak uzorka B-2 ... 81

POPIS TABLICA

Tablica 4.1 Modaliteti prijenosa metala pri zakopanom luku [5] 33
Tablica 4.2 Primjer sučeljenog zavara na limu debljine 19 mm [5] 38
Tablica 4.3 Primjer sučeljenog zavara na limu debljine 35 mm [5]..... 39
Tablica 4.4 Primjer obostranog kutnog zavara [5] 40
Tablica 4.5 Usporedba zavara dobivenih štrcajućim i zakopanim lukom [5] 41
Tablica 5.1 Kemijski sastav čelika S375 [11] 44
Tablica 5.2 Vrijednosti granice razvlačenja i vlačne čvrstoće za čelik S375 [11] 45
Tablica 5.3 Kemijski sastav čelika S355 [12] 45
Tablica 5.4 Vrijednosti granice razvlačenja i vlačne čvrstoće za čelik S355 [12] 45
Tablica 5.5 Parametri zavarivanja za uzorke A-1, A-2 i A-3 54
Tablica 5.6 Parametri zavarivanja za uzorke B-1 i B-2 59
Tablica 5.7 Rezultati mjerenja tvrdoće uzorka A-1 70
Tablica 5.8 Rezultati mjerenja tvrdoće uzorka A-2 72
Tablica 5.9 Rezultati mjerenja tvrdoće uzorka A-3 74
Tablica 5.10 Rezultati mjerenja tvrdoće uzorka B-1 75
Tablica 5.11 Rezultati mjerenja tvrdoće uzorka B-2 77
Tablica 5.12 Parametri snimanja i skeniranja te podaci o korištenoj opremi 78
Tablica 5.13 Prednosti i nedostaci D-arc i konvencionalnog MAG postupka [5] 82

POPIS KRATICA

Kratica	Opis
Ar	Argon
CO_2	Ugljikov dioksid
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)
CV	Konstantni napon (engl. Constant Voltage)
D-Arc	Visokoučinkoviti postupaka zavarivanja zakopanim lukom
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 Vickeru
MAG	Elektrolučno zavarivanje taljivom elektrodom u zaštitnoj atmosferi aktivnog plina
MIG	Elektrolučno zavarivanje taljivom elektrodom u zaštitnoj atmosferi inertnog plina
MZ	Metal zavara
OM	Osnovni materijal
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)
RTG	Rendgensko snimanje

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 električnog luka
v_z	cm/min	Brzina zavarivanja

SAŽETAK

Ovim radom obrađen je konvencionalni MAG postupak zavarivanja kao i načini prijenosa metala koji se javljaju kod ovog postupka. Nadalje, nabrojani su i kratko opisani modificirani načini prijenosa metala koji se upotrebljavaju u industriji, a zasnivaju se na konvencionalnim načinima prijenosa. Detaljno je obrađen visokoučinski postupak MAG zavarivanja koji primjenjuje način prijenosa metala zakopanim lukom nazvan "D - Arc" kao i njegova primjena za zavarivanje debelostjenih konstrukcija od nelegiranih čelika.

Eksperimentalni dio proveden je s ciljem usporedbe kvalitete zavara dobivenih visokoučinskim D - arc postupkom zavarivanja u odnosu na konvencionalni štrcajući luk te optimizacije parametara zavarivanja za D - arc sustav. Ispitivanja su se sastojala od vizualne analize makroizbruska, mjerenja tvrdoće te radiografskog snimanja zavara.

Ključne riječi: MAG, načini prijenosa metala, visokoučinsko zavarivanje, zakopani električni luk, D-Arc

SUMMARY

This thesis deals with the conventional MAG welding process as well as the methods of metal transfer that occur in this process. In addition, the modified metal transfer modes which are used in industry, based on conventional metal transfer modes are listed and shortly described. High-efficiency MAG welding process which applies "buried arc" metal transfer mode also called "D-Arc" has been elaborated in detail as well as its application for welding thick steel structures of non-alloy steel.

The experimental part of the thesis was performed with the aim of comparing the quality of weld obtained by high-efficency D - arc welding process in relation to the conventional spray arc and optimizing the welding parameters for the D - arc system. The tests consisted of visual macroscopic analysis, hardness measurements and radiographic imaging. After the tests were carried out the obtained results were compared with the conventional spray transfer.

Key words: MAG, metal transfer modes, high-efficiency welding, buried arc, D-Arc

1. UVOD

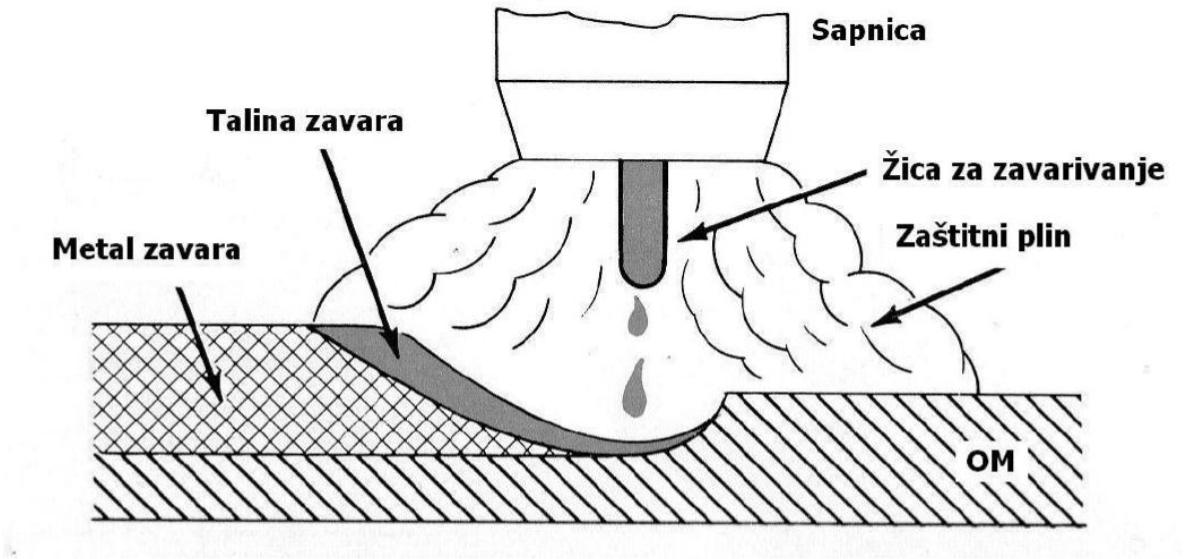
Zavarivanje je postupak spajanja dvaju ili više istovrsnih ili različitih materijala taljenjem ili pritiskom, sa ili bez dodavanja dodatnog materijala na način da se dobije homogeni zavareni spoj. Zavarivanje je jedna od najčešće primjenjivanih tehnologija za spajanje metalnih materijala u industriji. Ovisno o materijalu koji se zavaruje i nekim drugim zahtjevima poput potrebne kvalitete zavara, fleksibilnosti, proizvodnosti, utjecaju na okoliš, razvijen je veliki niz postupaka zavarivanja. Jedan od poznatijih postupaka zavarivanja nelegiranih čelika je zavarivanje taljivom elektrodom u zaštitnoj plinskoj atmosferi (MAG postupak zavarivanja). Zbog svojih raznih prednosti poput velike fleksibilnosti, odlične kvalitete zavara, mogućnosti mehanizacije, niske cijene opreme i relativno velikog depozita materijala štrcajućim lukom, ovaj postupak je često primjenjivan kod zavarivanja debelostjenih konstrukcija. Zbog zahtjeva za sve veću produktivnost razvijeni su visokoučinski postupci MAG zavarivanja. Naime, kod zavarivanja debelostjenih konstrukcija vrlo je važno da postupak zavarivanja bude što učinkovitiji s velikom penetracijom, što izravno utječe na vrijeme potrebno za pripremu spoja i vrijeme zavarivanja, a samim time i na proizvodnost. Najčešće korišteni visokoučinski postupci MAG zavarivanja su FCAW, Tandem postupak, prijenos metala rotirajućim lukom i prijenos metala zakopanim lukom. Zakopani luk (engl. buried arc) je način prijenosa metala kod kojeg je električni luk zajedno s vrhom rastaljene žice postavljen ispod razine površine rastaljenog metala zavara. S obzirom na to da je izvor topline postavljen dublje u talinu, dolazi do veće penetracije pa je ovaj postupak prikladan za zavarivanje materijala većih debljina. Zakopani luk je podložan nestabilnom ponašanju te su provedena mnogobrojna istraživanja na području njegove stabilizacije. Stabilizirani visokoučinkoviti robotizirani sustav koji primjenjuje način prijenosa metala zakopanim lukom, nazvan "D-arc", omogućava zavarivanje nelegiranih čelika debljine i do 20 milimetara u jednom prolazu uz smanjenje troškova pripreme spoja i smanjeno vrijeme zavarivanja.

2. MAG POSTUPAK ZAVARIVANJA

MIG/MAG postupak zavarivanja spada u skupinu elektrolučnih postupaka u kojem se toplina potrebna za taljenje osnovnog i dodatnog materijala razvija iz električnog luka koji je uspostavljen između radnog komada i taljive, kontinuirano dobavljive elektrode u obliku žice. Cjelokupni proces se odvija u atmosferi zaštitnog plina. Ukoliko se koristi aktivan (CO_2, $Ar - CO_2$ mješavine) zaštitni plin postupak nosi oznaku MAG (**M**etal **A**ctive **G**as), a ako se koristi inertni (Ar, He) plin tada nosi oznaku MIG (**M**etal **I**nert **G**as). U današnjici sam izvor struje za MIG i MAG postupak zavarivanja je isti.

2.1. Općenito o MAG postupku zavarivanja

Žica se kroz cijevni paket i pištolj, konstantnom brzinom dodaje u električni luk. Žica je istovremeno i elektroda i dodatni materijal pa se njenim taljenjem popunjava pripremljeni žlijeb. Postupak može biti poluautomatski i automatski. Kod poluautomatskog postupka samo je dobava žice mehanizirana, a vođenje pištolja je ručno. Kod automatskog postupka, ne samo da je dobava žice mehanizirana, već i vođenje pištolja.. Slika 2.1 daje shematski prikaz MAG postupka zavarivanja [1].



Slika 2.1 Shema MAG postupka zavarivanja [2]

Prednosti [2]:

- zavarivanje različitih materijala i različitih debljina osnovnog materijala
- mogućnost zavarivanja u svim položajima
- dobra iskoristivost dodatnog materijala
- visoka učinkovitost postupka u usporedbi s ostalim elektrolučnim postupcima
- dobra estetika zavarenih spojeva
- relativno jednostavna obuka zavarivača
- utjecaj zavarivača na proces zavarivanja je malen
- u usporedbi s REL postupkom, dolazi do slabijeg stvaranja zavarivačkih plinova
- lako čišćenje zavara i odstranjivanje produkata zavarivanja
- unos vodika u metal zavara je malen (uglavnom manje od 5 ml/100 g metala zavara)
- u slučajevima primjene suvremenih MIG/MAG postupaka, deformacije u osnovnom materijalu su manje
- automatizacija procesa je jeftina i jednostavna
- dodatni materijal, tj. žica ima nižu cijenu pa je i cijena zavara po jedinici duljine manja
- zavarivanje sa različitim plinskim mješavinama
- mogućnost primjene praškom punjene žice
- prijenos metala kratkim spojevima osigurava nizak unos topline – pogodno za zavarivanje manjih debljina
- zbog velikog unosa topline štrcajućim lukom moguće je zavarivanje većih debljina

Nedostaci: [2]

- nemogućnost zavarivanja u prisilnim položajima prilikom upotrebe aksijalnog prijenosa metala štrcajućim lukom
- kod prijenosa metala štrcajućim lukom potrebno je koristiti skuplje plinske mješavine (mješavine plinova na bazi Ar, skuplje su od čistog CO_2)
- kod terenskih radova moguća je pojava pogrešaka u zavarenim spojevima zbog vanjskih faktora poput vjetra, vlage i sl.
- problemi sa dovođenjem dodatnog materijala prilikom zavarivanja aluminija i aluminijevih legura

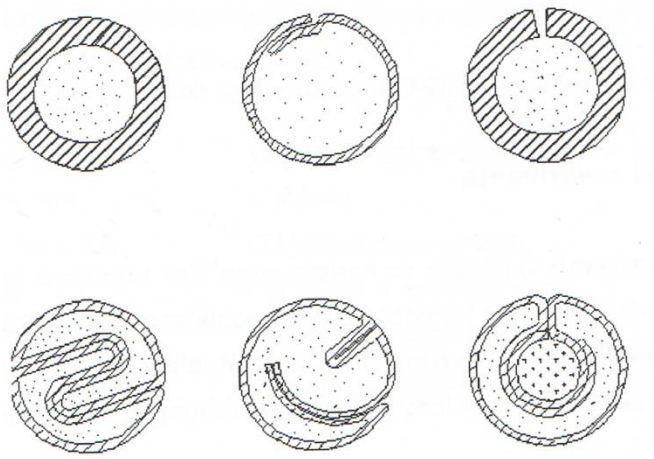
- uslijed neodgovarajuće tehnike i loše odabranih parametara moguća je pojava velikog broja grešaka
- kod prijenosa metala kratkim spojevima prisutno je rasprskavanje pa postoji potreba za dodatnom obradom
- mogućnost pojave grešaka na početku i kraju zavara
- uređaji i oprema za zavarivanje je relativno složena

Parametri zavarivanja:

- jakost struje zavarivanja
- napon električnog luka
- brzina zavarivanja
- slobodni kraj žice
- protok zaštitnog plina
- induktivitet

2.2. Žice za MAG postupak zavarivanja

Za ovaj postupak zavarivanja najčešće se koriste pune žice promjera od 0,6 do 2,4 mm. Površina žica mora biti vrlo glatka, točnih dimenzija te uredno namotana na kolut kako ne bi došlo do poteškoća sa odmatanjem žice u dodavaču prilikom zavarivanja. Kako bi se osigurala otpornost na koroziju, čelične žice moraju biti pobakrene ili poniklane. Time se ujedno i poboljšava električni kontakt između žice i kontaktne cjevčice. Osim punih žica, za ovaj postupak zavarivanja mogu se koristiti i praškom punjene žice. Presjeci takvih žica mogu biti različiti, a ovise o načinu proizvodnje. Presjeci praškom punjenih žica prikazani su slikom 2.2. Postoje praškom punjene žice uz koje se obavezno koristi i dodatna plinska zaštita, a opet postoje i praškom punjene žice kod koje se atmosfera dovoljno štiti raspadanjem jezgre žice pa zaštitni plinovi u ovom slučaju nisu potrebni. Takve žice se često koriste za terenske radove [1].



Slika 2.2 Presjeci praškom punjenih žica [1]

2.3. Plinovi pri MAG postupku zavarivanja

Samo mjesto zavarivanja, zajedno sa talinom i kapljicama koje lete kroz električni luk, moraju za vrijeme trajanja postupka biti zaštićene od nepovoljnog utjecaja atmosfere. Ovakva zaštita postiže se uporabom zaštitnih plinova. Zaštitni plin može biti aktivan ili inertan, a bira se prema materijalu koji se zavaruje. [1].

Kod MAG zavarivanja koriste se isključivo aktivni plinovi ili mješavine inertnog i aktivnog plina. Jedan od najčešće korištenih plinova kod MAG zavarivanja konstrukcijskog čelika je mješavina argona i ugljičnog dioksida u omjeru 82 % Ar i 18 % CO_2. Zaštitni plinovi se na mjesto zavarivanja dovode kroz sapnicu koja je smještena oko kontaktne cjevčice na samom vrhu zavarivačkog pištolja.

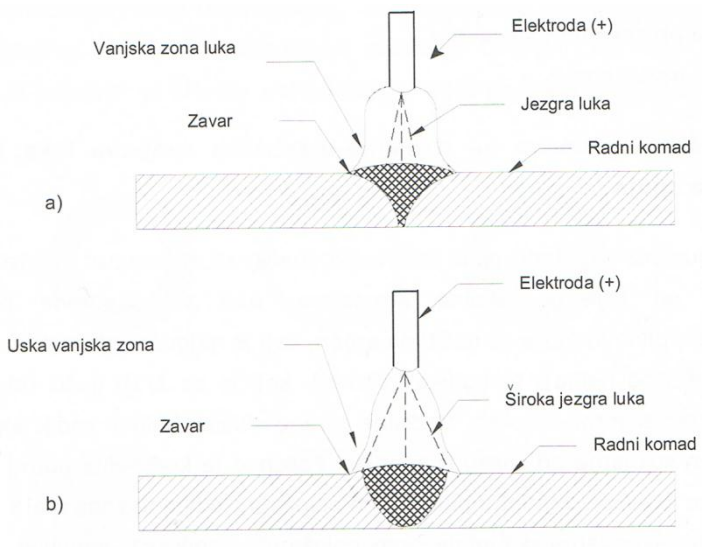
Utjecaj zaštitnih plinova odražava se na: [1]

- Električno – fizikalna svojstva električnog luka i time na prijenos metala s elektrode na radni komad
- Metalurške procese u talini zavara
- Tehnološke parametre

Utjecaj zaštitnih plinova na fizikalno električna svojstva luka i način oblikovanja spoja

Specifična gustoća zaštitnog plina ima veliki značaj za efikasnost zaštite mjesta zavarivanja. Usporedbom najčešće korištenih plinova, može se uočiti da argon, koji je najgušći od inertnih plinova (10 puta gušći od helija), te ugljikov dioksid, koji je za 1/10 gušći od argona, oblikuju

dobar zaštitni omotač. Pri uporabi plinova sa manjom specifičnom gustoćom poput dušika, helija i vodika može doći do pojave turbulentnog strujanja pri izlasku iz sapnice. Zbog manje gustoće takvih plinova, a da bi se postigla zadovoljavajuća kvaliteta zavarenog spoja, potreban je veći protok. To je česti slučaj kod helija. Helij se na našim područjima nešto slabije koristi zbog svoje visoke cijene, ali njegova uporaba ipak dolazi do izražaja kada se postupak zavarivanja vrši u prisilnim položajima (naglavno, zidno), a razlog tome je upravo njegova mala gustoća. Toplinska vodljivost plinske atmosfere i pojave u njoj utječu na radijalne gubitke topline što utječe na oblik jezgre luka i njegovu geometriju. Za razliku od CO_2, argon daje užu zonu jezgre luka. Na slici 2.3 prikazana je širina jezgre luka za spomenute plinove. Penetracija u osnovni materijal izravno ovisi o ovom svojstvu. Utjecaj plinova na metalurške reakcije s rastaljenim metalom uglavnom ovisi samo o vrsti plina ili količini pojedinih plinova u plinskoj mješavini. Djelovanje zaštitnog plina ili mješavine plinova na rastaljeni metal može biti neutralno, oksidirajuće ili reducirajuće [1].

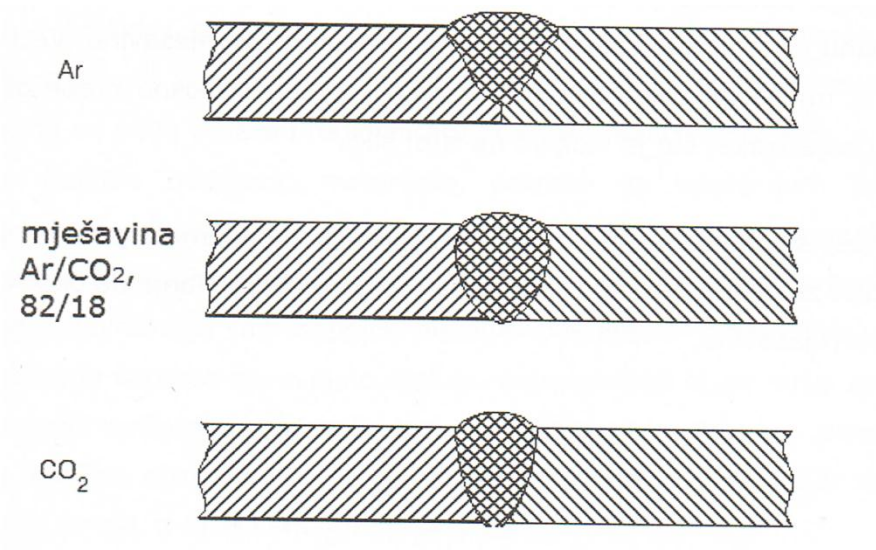


Slika 2.3 Karakterističan oblik električnog luka i njegova geometrija [1]

a) u argonu
b) u ugljikovom dioksidu

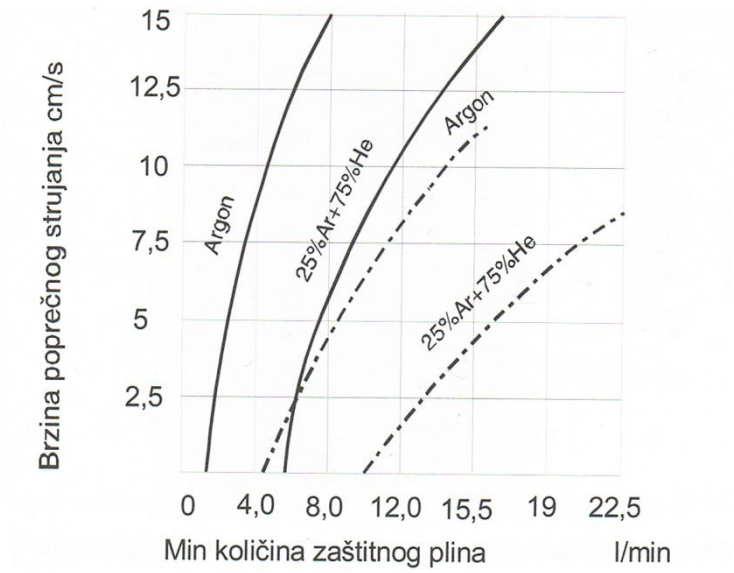
S obzirom na prije spomenute fizikalne karakteristike pojedinih plinova i njihov utjecaj na geometriju i svojstva električnog luka, izbor odgovarajuće plinske mješavine je od velike važnosti. Kombinacijom pojedinih plinova u određenim omjerima, moguće je postići optimalna svojstva zaštitnog plina za zadane uvjete. Karakterističan oblik penetracije kod MIG/MAG postupka zavarivanja u zaštitnoj atmosferi argona odnosno ugljičnog dioksida

prikazan je slikom 2.4. Uporabom čistog ugljičnog dioksida dobiva se vrlo dobra penetracija kojom se mogu kompenzirati netočnosti pripreme spoja, ali dobiveni oblik zavara je nepovoljniji. Mješavinom ovih plinova u pogodnom omjeru postiže se zadovoljavajuća penetracija uz vrlo nizak napon ionizacije što je vrlo bitno za uspostavu luka. Treba napomenuti da kod izbora mješavine treba uzeti u obzir ne samo jedan kriterij, npr. penetraciju, već se mogu pojaviti i drugi utjecaji; izgled zavara, sklonost pojedinom tipu grešaka, itd. [1].



Slika 2.4 Oblik penetracije zavarenog spoja ovisno o zaštitnoj atmosferi [1]

Da bi se osigurala zadovoljavajuća kvaliteta dobivenog zavara, protok plina mora dovoljan da se mjesto zavarivanja zaštiti od nepovoljnog utjecaja okolne atmosfere. Strujanje zraka poput vjetra može ozbiljno ugroziti zaštitu plinske atmosfere pa se u takvim slučajevima postavljaju zaštitni paravani, ali, naravno, uz povećanje protoka plina. U takvim slučajevima pogodnije je imati gušći plin kao npr. mješavinu argona i ugljičnog dioksida jer porastom gustoće zaštitnog plina raste i njegova krutost, tj. otpornost na poprečno strujanje zraka. Potrebna količina plina na mjestu zavarivanja izravno ovisi o brzini strujanja zraka i o gustoći samog plina što je prikazano slikom 2.5. [1].



Slika 2.5 Utjecaj poprečnog strujanja na potrebnu količinu zaštitnog plina [1]

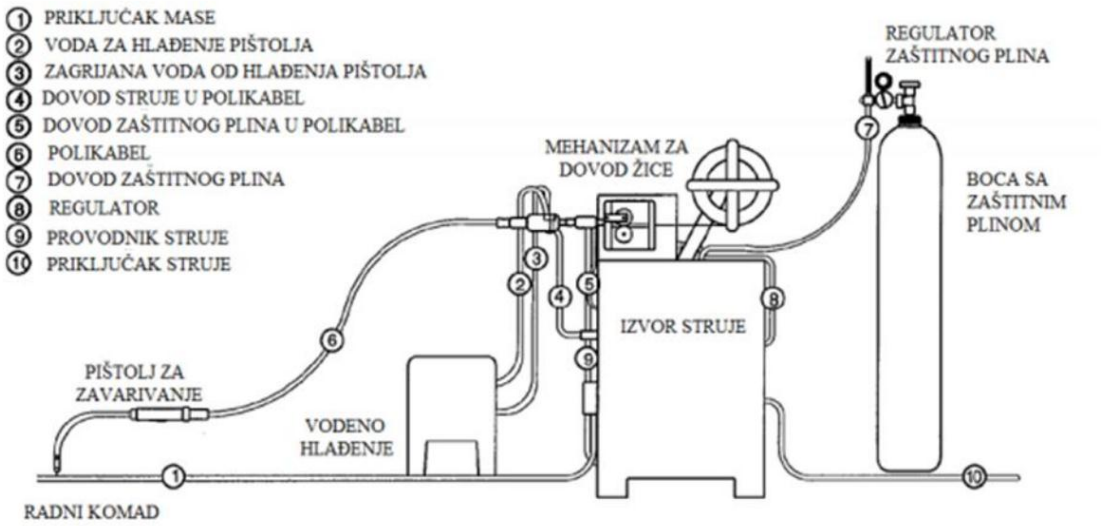
2.4. Strojevi i oprema za MAG postupak zavarivanja

U današnjici, oprema za MIG/MAG postupak zavarivanja je prilično složena i skupa. Najskuplji dio opreme je upravo izvor struje, a njegova cijena izravno ovisi o njegovim mogućnostima (mogućnost zavarivanja različitih materijala, pulsno zavarivanje, zračno ili vodeno hlađenje pištolja, sinergijsko ili ručno podešavanje parametara, izvedba dodavača žice i sl.). Uz osnovnu, vrlo je važno spomenuti i zaštitnu opremu, a ona se sastoji od maske za zavarivanje, maske za zaštitu od štetnih zavarivačkih plinova, zavarivačkog odijela i rukavica te radnih cipela.

Osnovna oprema za MIG/MAG postupak zavarivanja [3]:

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

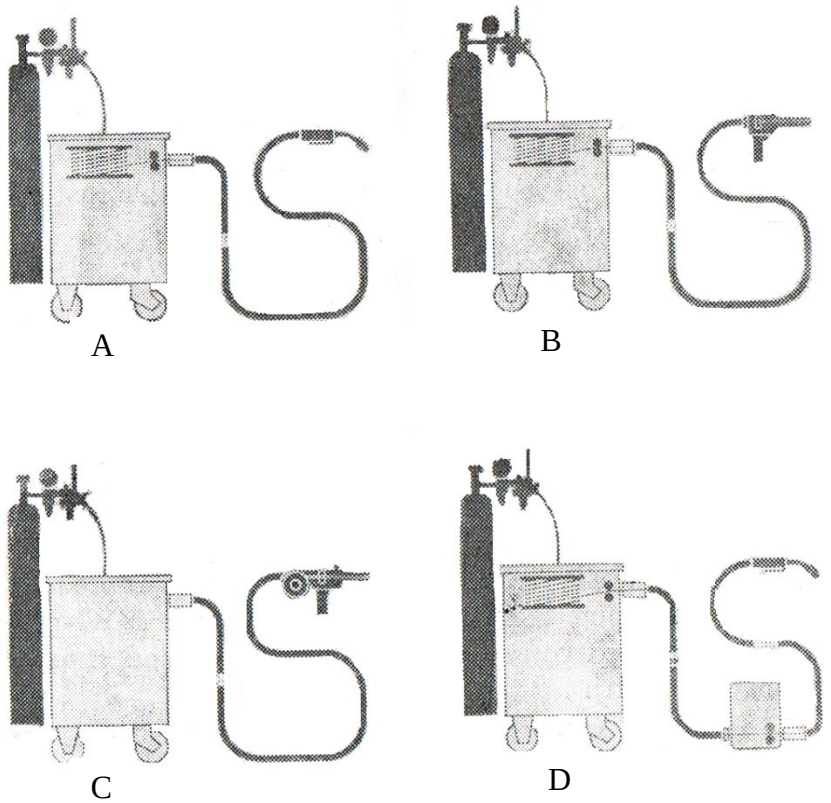
Slika 2.6 prikazuje osnovnu opremu za MIG/MAG postupak zavarivanja.



Slika 2.6 Osnovna oprema za MIG/MAG postupak zavarivanja [3]

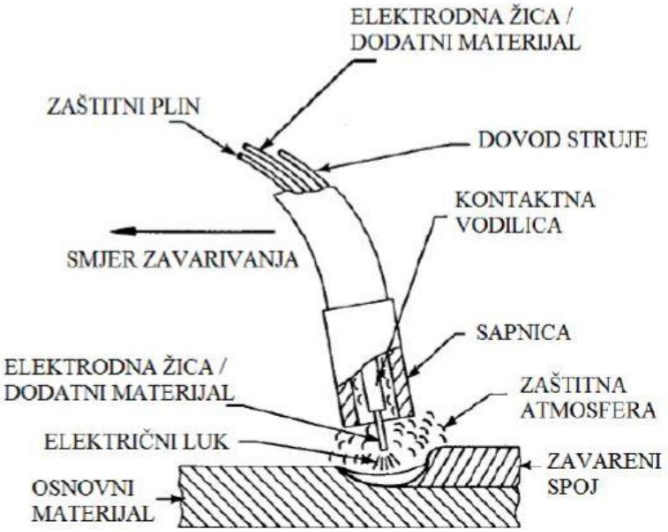
Proces zavarivanja započinje zatvaranjem strujnog kruga između radnog komada i dodatnog materijala, tj. taljive žice. Radni komad je masom spojeni na negativni pol, a taljiva žica je preko kontaktne cjevčice spojena na pozitivni pol istosmjernog izvora struje. S obzirom da je kontakt uspostavljen preko spomenute kontaktne cjevčice, struja prolazi samo kroz prvih nekoliko centimetara žice (slobodni kraj žice). Kontaktne cjevčice se biraju prema promjeru dodatnog materijala (0,8; 1,0; 1,2; itd.). Osim kontaktne cjevčice, na pištolju se još nalazi i sapnica te keramički ili plastični prsten, a njihova namjena je raspršivanje i usmjeravanje zaštitnog plina. Polikabel se sastoji od posebnog bužira kroz koji prolazi dodatni materijal, crijevo za dobavu plina na mjesto zavarivanja, glavnog vodiča kontaktne cjevčice (pozitivan pol) te vodiča za kontrolu prekidača na samom pištolju. Pritiskom na prekidač aktivira se mehanizam za dovođenje žice koji kontinuirano dobavlja žicu na mjesto zavarivanja. Pištolj može biti zračno ili vodeno hlađen. Kod većih struja zavarivanja preporučljivo je korištenje vodeno hlađenih pištolja.

Često puta može doći do zastoja žice u sistemu dovođenja dodatnog materijala, pogotovo kada se radi o većim dužinama polikabela. Postoji nekoliko načina dovođenja dodatnog materijala i oni su prikazani na slici 2.7 [4].



Slika 2.7 Karakteristična rješenja dobave žice kod MIG/MAG postupka zavarivanja [4]

U rješenju A pogonski sistem za dodavanje žice zajedno s kolutom smješten je unutar kućišta izvora struje. To je jedan od najčešće primjenjivanih sistema. Dužina cijevnih paketa za ovaj način dovođenja žice ne smije prelaziti 5m. Takav sistem naziva se potisni "push". U rješenju B vučni uređaj je smješten u samom pištolju, a potisni uređaj s kolutom smješten je u kućištu izvora struje. Takav način dovođenja žice naziva se "push-pull". Primjenjuje se za cijevne pakete dulje od 5m ili kod korištenja mekših dodatnih materijala npr. aluminij i njegove legure. U rješenju C mehanizam za dodavanje žice je zajedno s kolutom smješten u samom pištolju. Ovakav način omogućava zavarivanje na većim udaljenostima od izvora struje, ali se rijetko primjenjuje zbog velike mase pištolja. U rješenju D potisni uređaj je, zajedno s kolutom, smješten u kućištu izvora struje, a drugi mehanizam za povlačenje i dodatno potiskivanje žice smješten je u prijenosnoj kutiji na koju je spojen provodnik s pištoljem za zavarivanje. Ovakvo rješenje omogućava zavarivanje na udaljenostima većim od 20m od izvora struje [4].



Slika 2.8 Dijelovi pištolja za MAG zavarivanje [5]

Slika 2.8 prikazuje polikabel i dijelove pištolja za MIG/MAG postupak zavarivanja, dok je izvor struje prikazan slikom 2.9..

Slika 2.9 Izvor struje za MAG zavarivanje (Daihen-Varstroj) [6]

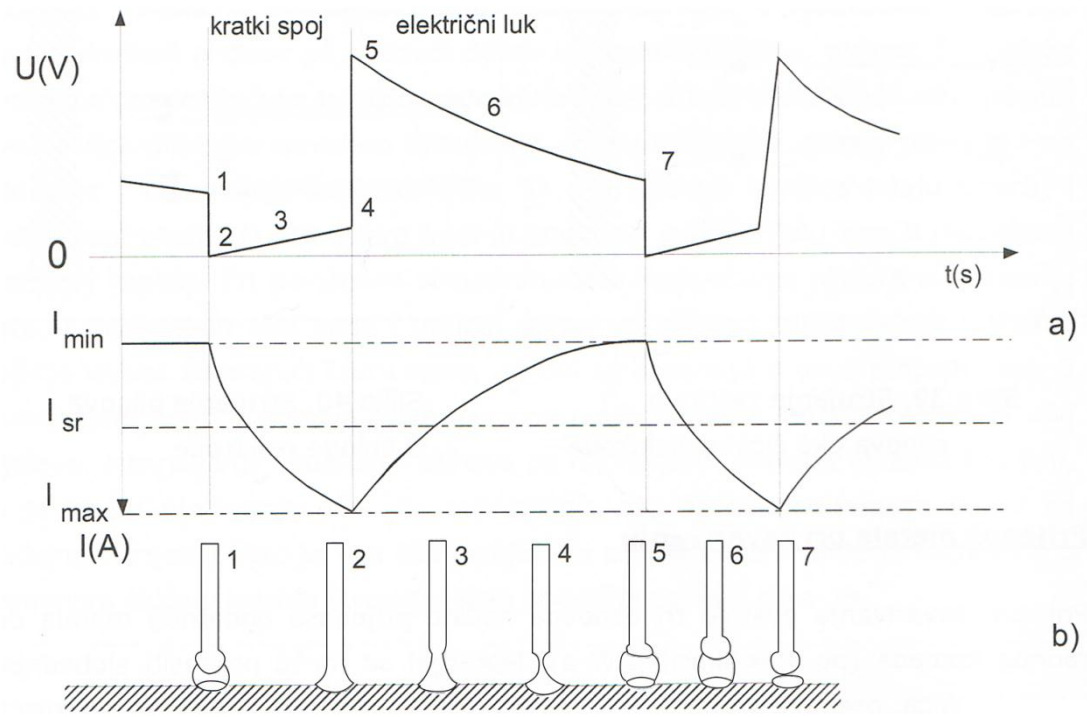
2.5. Prijenos metala pri postupku MAG zavarivanja

Kod konvencionalnih izvora struje, ovisno o jačini struje, napona, promjeru žice i vrsti zaštitnog plina, ostvaruju se različiti načini prijenosa metala u električnom luku. Prema gruboj podjeli razlikujemo prijenos metala kratkim spojevima, prijenos metala mješovitim lukom i prijenos metala štrcajućim lukom. Impulsno zavarivanje predstavlja kontrolirani prijenos materijala prema radnom komadu i to slobodnim letom kapljica u području niskih i visokih parametara zavarivanja zahvaljujući visokim razinama impulsne struje. Ovisno o načinu prijenosa metala u električnom luku mijenja se i dinamička karakteristika. Suvremeni MAG postupci zavarivanja odlikuju se modificiranim načinom prijenosa metala u električnom luku i njima je uvijek osnova prijenos metala kratkim spojevima, štrcajućim lukom ili impulsnim strujama. To se omogućava kontinuiranim upravljanjem i regulacijom struje i napona zavarivanja te indirektnom kontrolom sila koje sudjeluju u prijenosu metala (površinska napetost), kombinacijom impulsa i kratkih spojeva u istom radnom ciklusu, promjenom balansa polariteta, uvođenjem izmjenične struje i uvođenjem mehaničkog upravljanja odvajanja kapljice koje kompenzira nedostatan unos topline potreban za odvajanje dodatnog materijala. Kontrola procesa provodi se digitalnom tehnologijom [5].

2.5.1. Prijenos metala kratkim spojevima

Jedan od karakterističnih načina prijenosa metala kod zavarivanja u zaštitnoj plinskoj atmosferi je prijenos metala kratkim spojevima. Slika 2.10 a) prikazuje pojednostavljeni osciloskopski prikaz procesa, a na slici b) je shematski prikaz pojava za vrijeme trajanja jednog ciklusa. Točka 1 prikazuje stanje u električnom luku kod kojeg žica nije u dodiru s radnim komadom. Napon na luku ima zadanu vrijednost. U trenutku kada žica dotakne radni komad (točka 2) dolazi do kratkog spoja. Napon trenutno pada na 0, a struja počinje eksponencijalno rasti. Brzina rasta ograničena je induktivnim otporima kruga. Obzirom na to da u strujnom krugu otpor ipak ima konačnu vrijednost, napon polagano počinje rasti (točka 3 i 4) zbog povećanja otpora do kojeg dolazi uslijed pojačanog zagrijavanja slobodnog kraja žice. Porastom struje raste i "pinch efekt" što dovodi do smanjenja presjeka žice (otpor dodatno raste) i do otkidanja zagrijanog vrha žice. Nakon otkidanja zagrijanog vrha žice dolazi do prekida kratkog spoja i ponovne uspostave električnog luka (točka 5), a struja počinje eksponencijalno padati na nominalnu vrijednost. Skok napona je zbog induktiviteta

krugova nešto veći od nominalnog i u toku vremena se smanjuje na nominalnu vrijednost (točke 6 i 7). Potrebno je napomenuti da se sve ovo zbiva kada se žica jednolikom brzinom giba prema radnom komadu. Kada žica ponovno premosti razmak nastao otkidanjem njenog vrha, ponavlja se ciklus od točke 1. Broj takvih ciklusa varira u ovisnosti o promjeru žice i parametrima zavarivanja. Pri stabilnim parametrima obično ima i do 200 kratkih spojeva u sekundi [1,5].



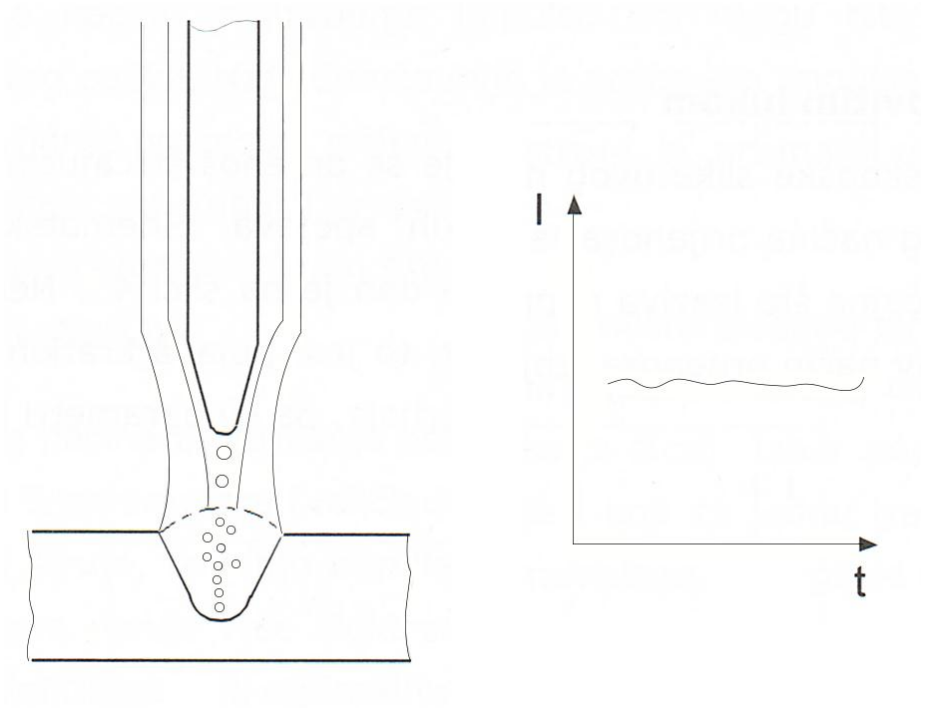
Slika 2.10 Prijenos metala kratkim spojevima [1]

Prijenos metala kratkim spojevima moguć je kod malih gustoća struje i niskih vrijednosti napona (do 190 A i 15-23 V za žicu promjera 1,2 mm), a karakterizira ga malen unos energije pa se često primjenjuje za zavarivanje tankih materijala i za zavarivanje u prisilnim položajima [5].

2.5.2. Prijenos metala štrcajućim lukom

Ovakav način prijenosa metala ostvaruje se kod viših vrijednosti struje (iznad 220 A) i napona (25 – 40 V), a karakterizira ga relativno visok unos topline i visoka produktivnost, tj. visok učinak taljenja. Primjenjuje se samo kod zavarivanja debljih materijala. Kod ovakvog načina prijenosa metala karakteristično je da se prijenos metala s vrha žice vrši slobodnim letom

malih kapljica kroz atmosferu luka. Jednom kada je električni luk uspostavljen, ne dolazi do dodira između žice i radnog komada. Sile koje djeluju u električnom luku moraju biti dovoljno velike da otkidaju i usmjeravaju kapljice prema radnom komadu prije nego žica dotakne taj komad. Poželjno je da sile površinske napetosti budu što manje jer one djeluju na veličinu kapljica. Kod postupka zavarivanja u zaštitnoj plinskoj atmosferi može se točno uočiti veličina struje kod koje se značajno mijenja veličina i broj kapljica kao i osnovni način njihova prijenosa kroz električni luk. Ta veličina se naziva kritičnom strujom I_{kr}. Kritična struja ovisi o sastavu zaštitnog plina. Slika 2.11 predstavlja shematski prikaz prijenosa metala štrcajućim lukom pri MAG postupku zavarivanja [1].

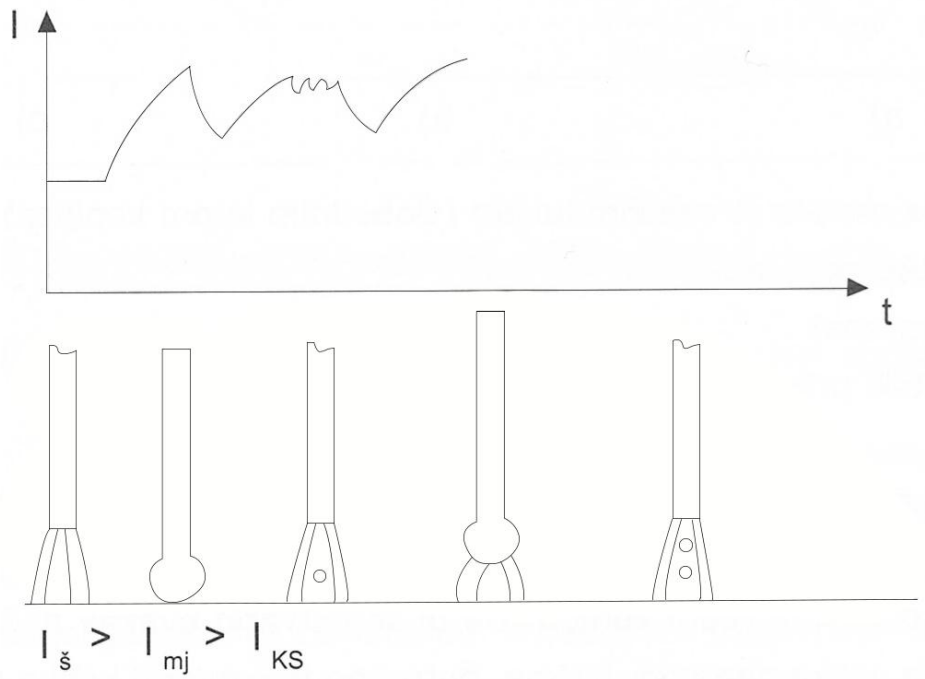


Slika 2.11 Prijenos metala štrcajućim lukom kod MAG postupka zavarivanja [1]

2.5.3. Prijenos metala prijelaznim lukom

Kod ovakvog načina prijenosa metala pojavljuje se prijenos štrcajućim lukom, ali se povremeno pojavi jedan ili više kratkih spojeva. Parametri zavarivanja koji bi mogli izazvati ovakav način prijenosa metala se često izbjegavaju zbog njegove neregularnosti, tj. pojava kratkih spojeva je slučajna što izaziva nepredvidivo prskanje materijala. Shematski prikaz osciloskopske slike ovog načina prijenosa metala dan je slikom 2.12 [1].

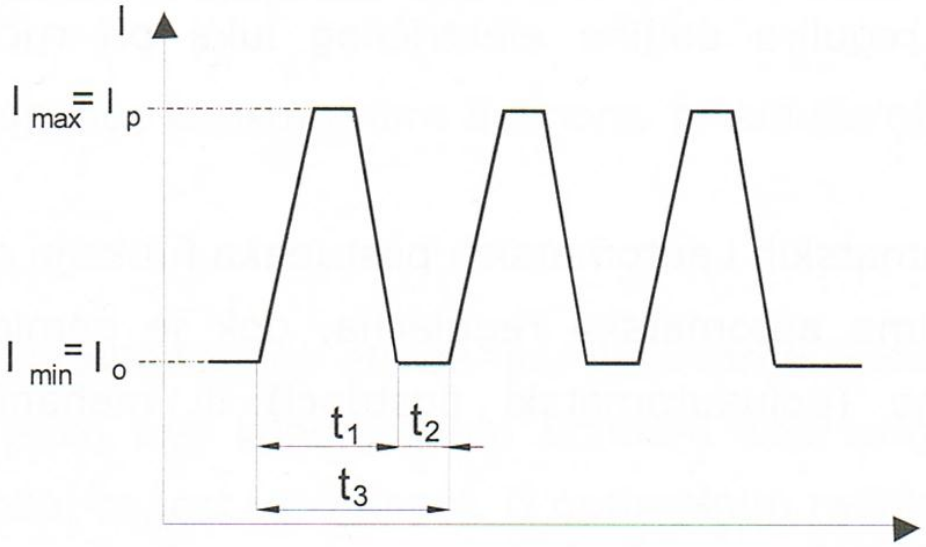
Ovisno o promjeru žice do prijenosa metala prijelaznim lukom može doći pri strujama od 170 A do 230 A i naponu od 17 V do 22 V [5].



Slika 2.12 Prijenos metala mješovitim lukom [1]

2.5.4. Prijenos metala impulsnim strujama (pulzirajući luk)

Prijenos metala impulsnim strujama omogućava kontrolirani prijenos metala od žice do radnog komada u malim kapljicama. Prosječna struja zavarivanja niža je od I_{kr}kako bi se osiguralo odvajanje u malim kapima. Ona se modulira jačom strujom određene frekvencije, tako da varira između minimalne vrijednosti nazvane osnovna struja i maksimalne vrijednosti nazvane strujom impulsa. Zadatak osnovne struje jest održavanje električnog luka, dok je visina i duljina trajanja impulsa jake struje prilagođeno da premaši I_{kr} i osigura odvajanje jedne kapi po svakom impulsu. Podešavanje parametara je prilično komplicirano zbog toga što se istodobno mora uskladiti 5 različitih parametara, a to su vrijednost osnovne struje, vrijednost impulsne struje, trajanje osnovne struje, trajanje impulsa i brzina dodavanja žice. Kod suvremenih izvora podešava se samo jedan parametar, a ostale bira sam uređaj zahvaljujući unaprijed programiranim krivuljama. Ovakav način prijenosa metala zadržava prednosti štrcajućeg luka i otklanja njegove nedostatke, tj. omogućava zavarivanje manjih debljina, zavarivanje u prisilnim položajima i sl. i to zahvaljujući niskim prosječnim strujama. Dijagram promjene struje u ovisnosti o vremenu pri impulsnom zavarivanju dan je slikom 2.13 [1].



Slika 2.13 Promjena struje u ovisnosti o vremenu pri impulsnom zavarivanju [1]

I_o - osnovna razina jakosti struje

I_p - jakost struje impulsa

t_1 - vrijeme trajanja impulsa

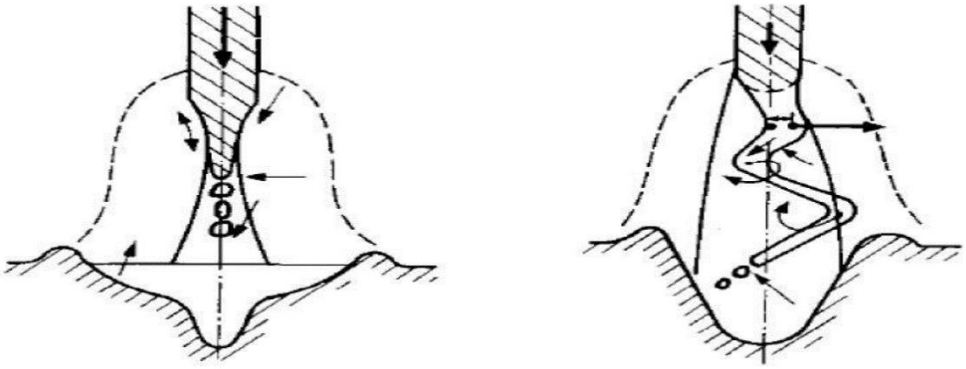
t_2 - vrijeme trajanja osnovne struje

t_3 - vrijeme jednog ciklusa

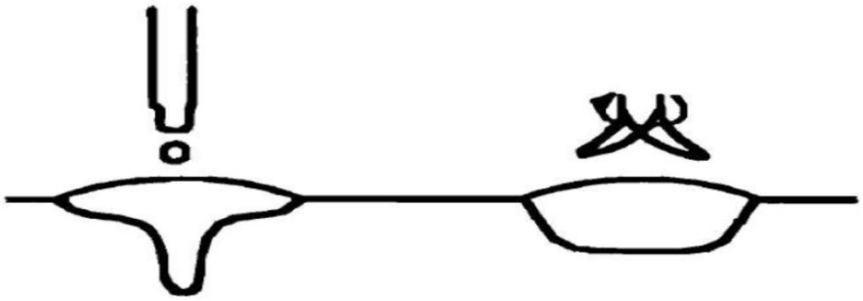
2.5.5. Prijenos metala rotirajućim električnim lukom

Rotirajući luk je način prijenosa metala u električnom luku koji spada u grupu visokoučinskih MAG postupaka zavarivanja. Visokoučinski postupci MAG zavarivanja su oni postupci koji imaju mogućnost dodavanja jedne ili više žica brzinom većom od 15 m/min. Time se povećava volumen nataljenog metala, brzina zavarivanja, a samim time i produktivnost. Rotirajući luk je karakterističan po rotacijskom prijenosu rastaljenog kraja žice. Vrh elektrode tali se na osnovi velikog slobodnog kraja žice i visokih struja zavarivanja. Zaštitni plin koji se koristi kod ovakvog načina prijenosa metala je mješavina argona s kisikom. Zahvaljujući takvoj mješavini plinova dolazi do smanjenja površinske napetosti taline te se na kraju žice prvo stvara rastaljeni metal u obliku gusjenice, a potom se ona transformira u velik broj malih

kapljica. Shematski prikaz prijenosa metala štrcajućim i rotirajućim lukom prikazan je na slici 2.14. Radijalna komponenta sila magnetskog polja upravlja rastaljenom gusjenicom te je pomiče iz simetrale i rotira. Zbog ove rotacije i amplitude električni luk se konusno proširuje, posebno kad ima dovoljnu dužinu. Rastaljeni materijal kapima radijalno ulazi u talinu zavara. Rotirajući luk ima visok stupanj stabilnosti, a duljina slobodnog kraja žice mora iznositi od 25 do 35 mm. Zavari dobiveni ovim načinom prijenosa su relativno široki i plosnati. Slikom 2.15 prikazani su oblici profila zavara dobiveni štrcajućim i rotirajućim lukom. Prijenos metala rotirajućim lukom moguće je postići samo uz primjenu punih žica i to najčešće promjera 1,0 mm i 1,2 mm. Ovakav postupak koristi se kod zavarivanja srednjih i velikih debljina u proizvodnji različitih konstrukcija u strojogradnji, kotlogradnji i sl. [5,7].



Slika 2.14 Shematski prikaz prijenosa metala štrcajućim i rotirajućim lukom [5]



Slika 2.15 Usporedba izgleda profila zavara nastalih štrcajućim i rotirajućim lukom [5]

3. MODIFICIRANI POSTUPCI MAG ZAVARIVANJA

Modificirani postupci MAG zavarivanja temelje se na modificiranom prijenosu metala u električnom luku zahvaljujući razvoju inverterskih izvora struja za MAG zavarivanje. Cilj takvih prijenosa je eliminacija nedostataka osnovnih prijenosa metala, često izbjegavanje prijelaznih lukova te ostvarenje veće stabilnosti i produktivnosti [8].

3.1. Modificirani prijenos metala kratkim spojevima

Prijenos metala kratkim spojevima se često primjenjuje u industriji zbog svojih prednosti kao što su niski unos topline, mogućnost zavarivanja u svim položajima, mali stupanj deformacije i sl. Prijenos metala kratkim spojevima često se primjenjuje za zavarivanje limova manjih debljina zbog malih unosa topline pa nema opasnosti od velikih deformacija i protaljivanja. Zbog nedostataka takvog prijenosa metala poput intenzivnog prskanja, nedovoljne penetracije, stabilnosti procesa, nastoji ga se modificirati. Neki od poznatijih modificiranih postupaka MAG zavarivanja koji se temelje na prijenosu metala kratkim spojevima su STT, CMT, FastROOT i CBT [8].

3.1.1. Surface tension transfer

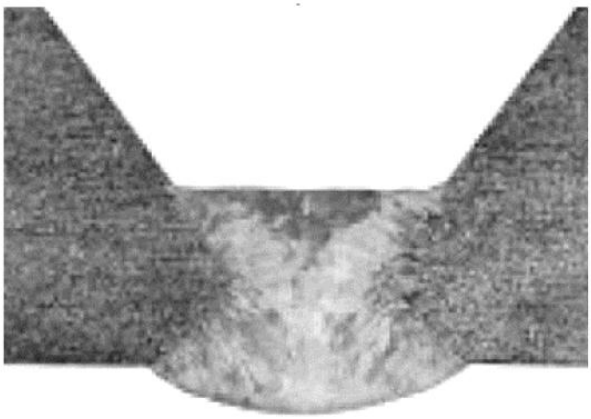
STT (engl. **S**urface **T**ension **T**ransfer) je modificirani MAG postupak zavarivanja koji koristi unaprijeđen način prijenosa metala kratkim spojevima, a odvajanje kapljice metala vrši se silama površinske napetosti. Ovaj postupak se najčešće koristi za zavarivanje materijala manjih debljina, zavarivanje korijena kod cijevi i sl. Nije potrebna dodatna vještina radnika jer je tehnika rada slična onoj kod konvencionalnog MAG zavarivanja. Izvor struje kod STT postupka kontrolira električni luk uz vrlo preciznu kontrolu struje zavarivanja. Struja zavarivanja ima maksimalan iznos u trenutku kada je za prijenos kapljice metala dovoljan samo mehanizam površinske napetosti te se na taj način izbjegava rasprskavanje i daljnji unos topline. Nakon odvajanja kapljice započinje ponovni rast struje, odnosno novi ciklus. Materijali koji se zavaruju ovakvim postupkom su najčešće konstrukcijski čelici, visokočvrsti čelici te nehrđajući čelici. Primjer korijenskog zavara dobivenog STT postupkom dan je slikom 3.1 [8].

Prednosti: [8]

- veća brzina zavarivanja u odnosu na konvencionalni MAG postupak
- manji unos topline nego kod konvencionalnog MAG zavarivanja
- odvajanje kapljice bez rasprskavanja
- nizak udio difundiranog vodika
- lako rukovanje
- mogućnost zavarivanja u svim položajima
- odlična kontrola taline

Nedostaci: [8]

- viša cijena opreme u usporedbi s opremom za konvencionalno MAG zavarivanje
- mogućnost prijenosa metala samo kratkim spojevima
- postupak se upotrebljava samo u kombinaciji s nekim visokoučinskim postupkom zavarivanja za popunu žlijeba
- nije moguće zavarivati aluminij

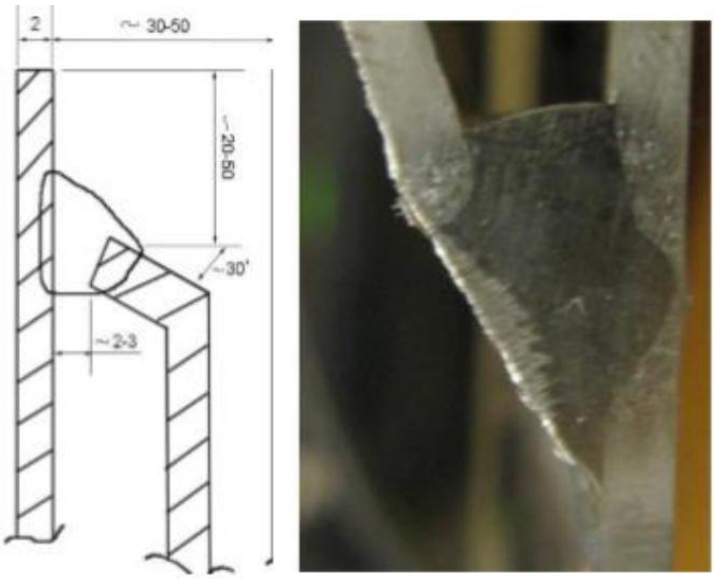


Slika 3.1 Korijenski zavar dobiven STT postupkom [8]

3.1.2. FastROOT

FastROOT je modificirani postupak MAG zavarivanja kod kojeg se struja i napon kontroliraju digitalno. Postupak se zasniva na modificiranom prijenosu metala kratkim spojevima. Prijenos metala kod ovog postupka odvija se tako da se nakon prvog stanja kratkog spoja, u kojem dolazi do odvajanja kapljice "pinch" efektom, aktivira drugi strujni interval (sekundarni strujni impuls) koji služi za oblikovanje spoja (zagrijavanje osnovnog

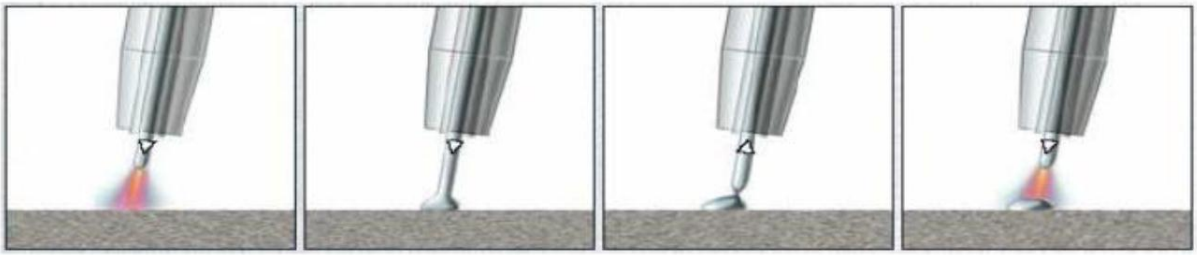
materijala i zagrijavanje vrha žice pripremajući ih za novi ciklus). Nakon toga struja pada na minimalnu vrijednost što omogućava stabilan električni luk do sljedećeg kratkog spoja. FastROOT postupak se koristi za zavarivanje korijenskog prolaza i za zavarivanje tankih limova. Ovaj postupak omogućava relativno mali unos topline s malim deformacijama radnog komada, a sve to bez prskanja do kojeg dolazi kod konvencionalnog prijenosa metala kratkim spojevima. Slika 3.2 prikazuje zavareni spoj dupleks i superaustenitnog čelika debljine 2 mm [8].



Slika 3.2 Zavareni spoj dupleks i superaustenitnog čelika debljine 2 mm [8]

3.1.3. Cold metal transfer

CMT (engl. **C**old **M**etal **T**ransfer) je modificirani MAG postupak koji se zasniva na prijenosu metala kratkim spojevima, a specifičnost ovog postupka je ta da se žica dodaje oscilatorno, tj. primiče se i odmiče od radnog komada, stoga se ovaj postupak izvodi isključivo pomoću robota. Žica se primiče radnom komadu do trenutka ostvarenja kratkog spoja nakon čega mijenja smjer i odmiče se od radnog komada kako bi se prijenos metala ostvario površinskom napetošću. Prekidom kratkog spoja žica ponovo mijenja smjer i započinje novi ciklus. Taj proces se odvija pri niskim vrijednostima struje što rezultira smanjenom unosu topline, a posljedično i manjim deformacijama. Ovaj postupak se primjenjuje u automobilskoj i zrakoplovnoj industriji za zavarivanje tankih limova čelika i aluminija. Slikom 3.3 prikazane su faze CMT postupka zavarivanja [8].



Slika 3.3 Faze CMT postupka zavarivanja

Prednosti: [8]

- mali unos topline
- velika brzina zavarivanja
- prijenos metala u talinu bez pojave rasprskavanja
- kontrolirano i točno upravljanje duljinom električnog luka
- dobra kvaliteta zavara
- mogućnost zavarivanja tankih limova (i do 0,3 mm)
- mogućnost zavarivanja raznorodnih materijala

Nedostaci: [8]

- ne može se primjenjivati pri većim strujama zavarivanja
- ne može se primjenjivati pri većim debljinama materijala
- potreban je poseban pištolj za zavarivanje koji omogućava pomicanje žice i prekidanje struje tijekom zavarivanja (problem mogućeg gužvanja žice prilikom povlačenja riješen je ugradnjom kompenzatora povrata žice)

3.1.4. Controlled bridge transfer

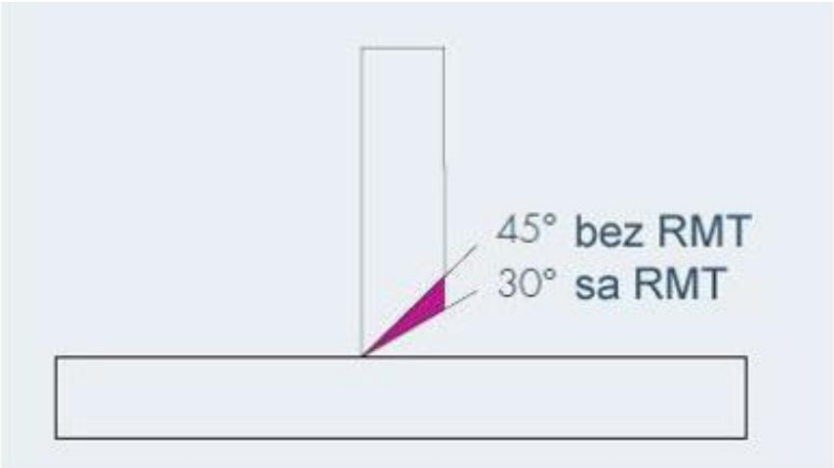
CBT (engl. **C**ontrolled **B**ridge **T**ransfer) je modificirana metoda prijenosa metala koja kombinira prednosti impulsnog i klasičnog MAG zavarivanja. Temelji se na preciznom podešavanju jakosti struje u odnosu na napon električnog luka što omogućava stabilizaciju električnog luka i upravljanje prijenosom metala tijekom kratkog spoja. Neposredno prije uspostave električnog luka smanjuje se jakost struje te se rastaljena kapljica prenosi u talinu pomoću sila površinske napetosti, čime se izbjegava pojava rasprskavanja. Ovaj postupak se primjenjuje za zavarivanje korijenskih prolaza i za zavarivanje limova manjih debljina [8].

3.2. Modificirani prijenos metala štrcajućim lukom

Zahvaljujući modificiranom prijenosu metala štrcajućim lukom omogućene su brojne prednosti u odnosu na konvencionalni luk poput bolje penetracije, većeg depozita dodatnog materijala što rezultira većom produktivnošću, bolje kvalitete zavara i sl. Smanjenjem napona zavarivanja smanjuje se duljina električnog luka te se postiže koncentriraniji luk i bolja penetracija. Najpoznatiji MAG postupci koji se temelje na modificiranom prijenosu metala štrcajućim lukom su RMT, ForceArc i PowerMode [8].

3.2.1. Rapid MAG Technology

RMT (engl. **R**apid **M**AG **T**echnology) je postupak MAG zavarivanja koji se temelji na modificiranom štrcajućem luku. Prijenos metala se kod ovog postupka vrši u jako sitnim kapljicama. Jezgra električnog luka se snižava te dolazi do smanjenja napona i duljine električnog luka u odnosu na konvencionalan način prijenosa. Rezultat je koncentriraniji luk i veća penetracija pa ovaj postupak pogoduje zavarivanju debljih materijala. Kod debljih materijala kut pripreme se smanjuje, što utječe na potrebni volumen nataljenog materijala, a samim time i na produktivnost. Na slici 3.4 prikazana je razlika u pripremi spoja za RMT u odnosu na konvencionalan štrcajući luk [8].



Slika 3.4 Priprema spoja za RMT u odnosu na konvencionalni štrcajući luk [8]

3.2.2. ForceArc

EWM forceArc je postupak MAG zavarivanja koji se zasniva na modificiranom prijenosu metala štrcajućim lukom. Kod ovog postupka male i srednje velike kapljice taline transferiraju se velikom brzinom kroz električni luk. Zbog međusobnog doticanja kapljica i taline metala zavara dolazi do povremene pojave kratkih spojeva čime se ostvaruje izravan kontakt s talinom i dolazi do rasprskavanja. Rasprskavanje se reducira zahvaljujući digitalnom upravljanju kojim se, nakon ponovne uspostave električnog luka, vrlo brzo smanjuje struja zavarivanja dok napon ne postigne nominalnu vrijednost. Električni luk je kraći nego je to slučaj kod konvencionalnog MAG postupka, a postupak se najčešće koristi u izgradnji čeličnih konstrukcija, kontejnera, vozila, u brodogradnji i energetici i sl. [8].

Prednosti: [8]

- bolja kvaliteta zavara
- manje ugorina
- veća brzina zavarivanja
- bolja penetracija
- lakše rukovanje zbog kraćeg električnog luka

3.2.3. PowerMode

PowerMode spada u skupinu modificiranih postupaka MAG zavarivanja, a način prijenosa metala ovisi o brzini dodatnog materijala i o snazi definirane u programu. Na višim strujama zavarivanja PowerMode postupak ponaša se prema ravnoj karakteristici, dok se pri većim naponima ponaša prema strmopadajućoj statičkoj karakteristici. Ovim postupkom mogu se zavarivati razni materijali, uključujući aluminij i nehrđajući čelik, a postoji i mogućnost zavarivanja tankih limova i do 0,7 mm [8].

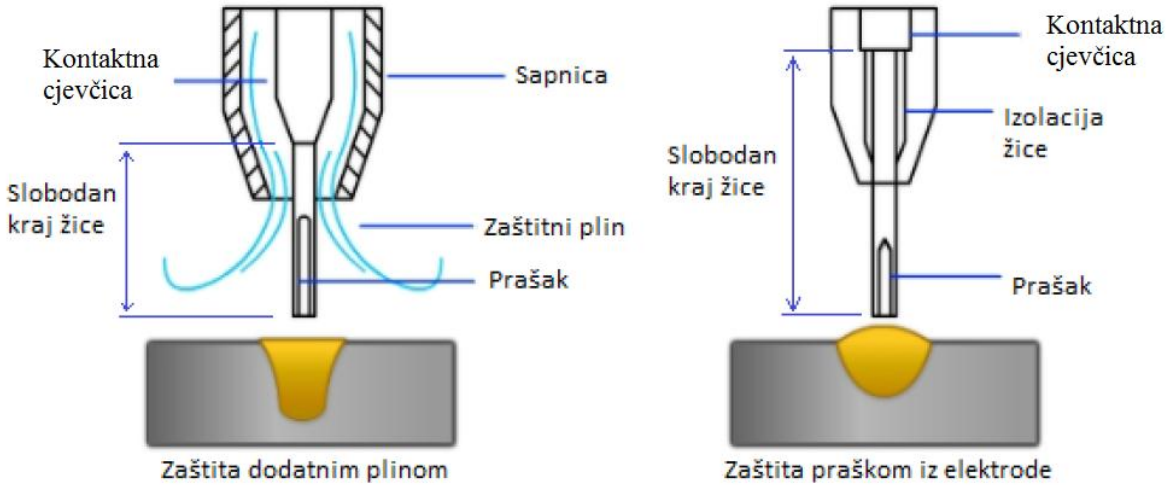
3.3. Visokoučinski postupci MAG zavarivanja

Visokoučinski postupci MAG zavarivanja su oni postupci koji, uz zadovoljavanje određenih zahtjeva i kvalitete, povećavaju produktivnost zavarivanja. Produktivnost zavarivanja najčešće karakteriziraju potreban broj prolaza, depozit dodatnog materijala, penetracija, vrijeme zavarivanja i sl. Najpoznatiji visokoučinski postupci MAG zavarivanja su FCAW, Tandem postupak, prijenos metala rotirajućim lukom i zakopani luk (engl. buried arc) [8].

Rotirajući luk opisan je u 2. poglavlju, a zakopani luk je detaljno opisan u poglavlju pod brojem 4.

3.3.1. Flux Cored Arc Welding

FCAW (engl. **F**lux **C**ored **A**rc **W**elding) je visokoučinski MAG postupak zavarivanja pri kojem se umjesto obične pune žice koriste praškom punjene žice. Postupak se odvija u zaštitnoj atmosferi koja se može ostvariti uporabnom aktivnog plina ili metodom samozaštite, tj. reakcijom sastojaka iz žice formira se zaštitni plin. U takvom slučaju penetracija je manja kao i kvaliteta zavara pa se takva metoda koristi za zavarivanje slabije opterećenih zavara. Slikom 3.5 prikazana su oba načina stvaranja zaštitne atmosfere [8].



Slika 3.5 Zaštitna atmosfera kod FCAW postupka zavarivanja [8]

S obzirom na to da nije potrebna dodatna obuka zavarivača ovakav postupak se često primjenjuje u industriji za zavarivanje čelika, nehrđajućih čelika te nekih legura nikla raznih debljina. Priprema spoja prije zavarivanja nije toliko zahtjevna kao kod MAG zavarivanja punim žicama. Kao zaštitni plin najčešće se koristi mješavina argona i ugljičnog dioksida [8].

Prednosti u odnosu na zavarivanje punom žicom: [8]

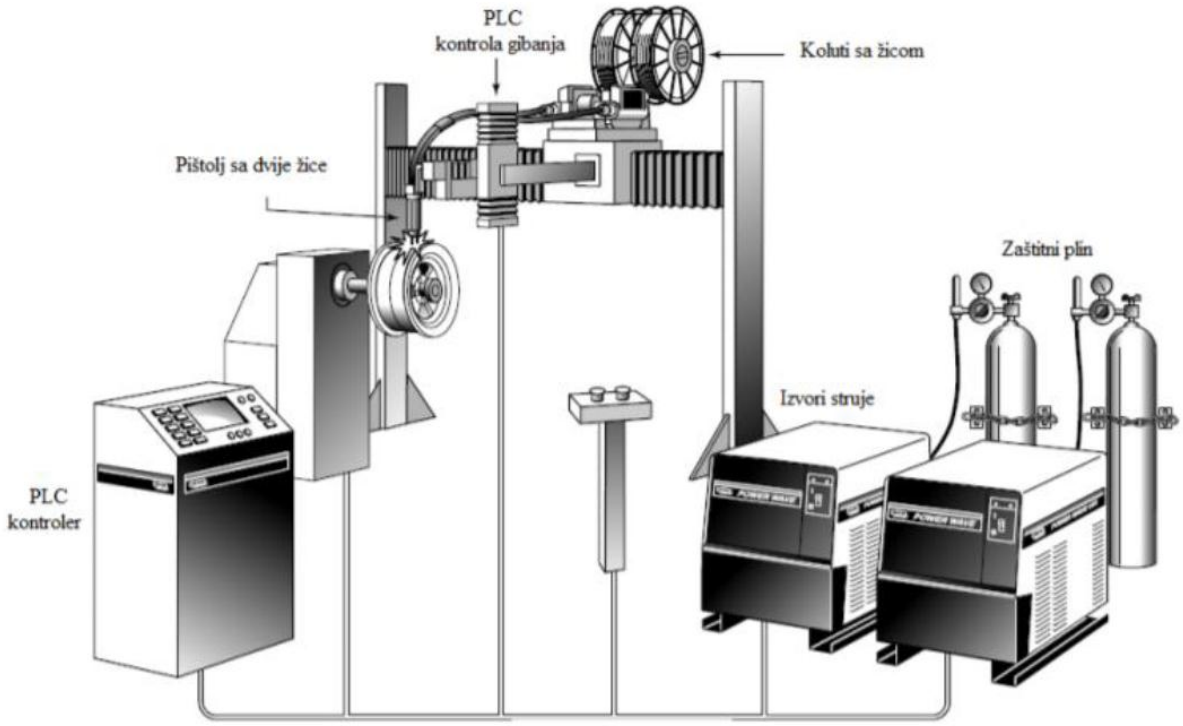
- veći depozit dodatnog materijala
- veća produktivnost
- bolja penetracija
- uz primjenu samozaštite moguće je zavarivanje u vjetrovitim uvjetima

Nedostaci: [8]

- velika količina plinova razvijenih izgaranjem praška iz žice
- veliko toplinsko zračenje
- neprimjenjiv za zavarivanje aluminija i njegovih legura

3.3.2. Tandem Welding

Tandem MAG postupak zavarivanja spada u grupu visokoučinskih postupaka zavarivanja, koristi dvije žice koje se kontinuirano tale i na taj način ostvaruju zavareni spoj. Prva žica (vodeća) koja je većeg promjera osigurava potrebnu penetraciju, dok druga žica (prateća) ispunjava i oblikuje zavar. Žice nisu u fizičkom kontaktu i svaka koristi zaseban izvor struje. Na slici 3.6 prikazan je sustav za tandem postupak zavarivanja. Najčešći način prijenosa metala kod ovog postupka je prijenos impulsnim lukom. Slika 3.7 prikazuje pištolj za tandem postupak zavarivanja. Vođenje pištolja je najčešće robotizirano, a postupak se najčešće primjenjuje u automobilskoj industriji, brodogradnji i željezničkoj industriji za zavarivanje čelika, nehrđajućih čelika te aluminija i njegovih legura [8].



Slika 3.6 Sustav za tandem postupak zavarivanja [8]

Slika 3.7 Pištolj za tandem postupak zavarivanja [8]

Prednosti: [8]

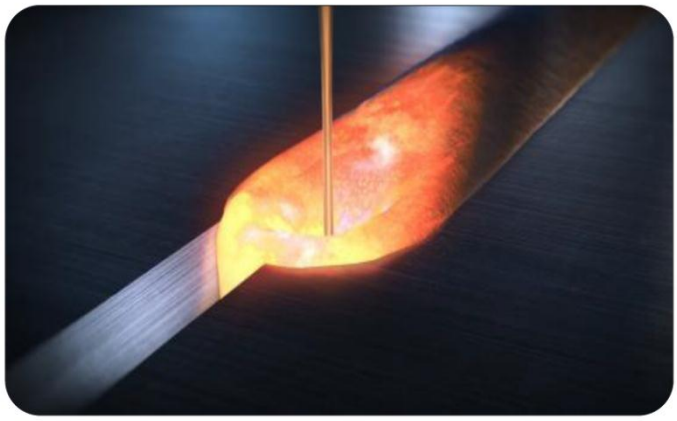
- veći depozit dodatnog materijala
- veća brzina zavarivanja
- manji unos topline
- veća penetracija
- manja razina rasprskavanja
- bolja kontrola taline preciznom regulacijom većeg broja parametara

Nedostaci: [8]

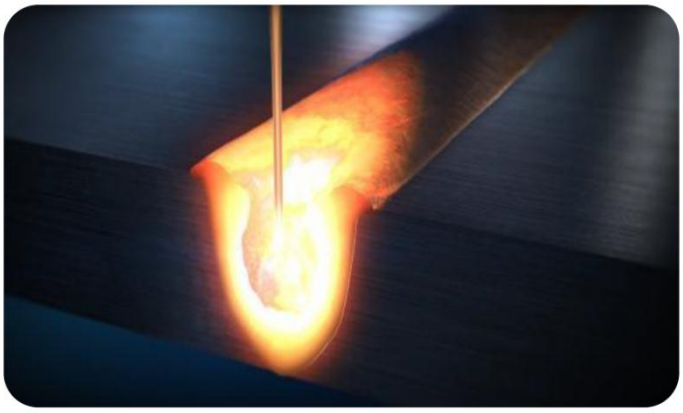
- potrebna automatizacija ili robotizacija
- potrebna dva izvora struje
- potreban poseban pištolj
- visoka cijena opreme

4. VISOKOUČINSKO ZAVARIVANJE PRIMJENOM ZAKOPANOG LUKA

Prilikom zavarivanja radnih komada većih debljina, vrlo je važno da postupak zavarivanja bude što učinkovitiji, tj. da daje dovoljno visoku stopu depozita materijala uz zadovoljavajuću penetraciju. Jedan od takvih postupaka je zavarivanje primjenom zakopanog luka koji spada u grupu visokoučinskih postupaka MAG zavarivanja. Zakopani električni luk (engl. buried arc) prikazan slikama 4.1 i 4.2 je fenomen pri kojem je električni luk zajedno sa vrhom rastaljene žice postavljen ispod površine rastaljenog metala zavara. Do takve pojave dolazi uslijed relativno malih vrijednosti napona električnog luka [9].



Slika 4.1 Zakopani električni luk, pogled izvana [2]



Slika 4.2 Zakopani električni luk, pogled iznutra [2]

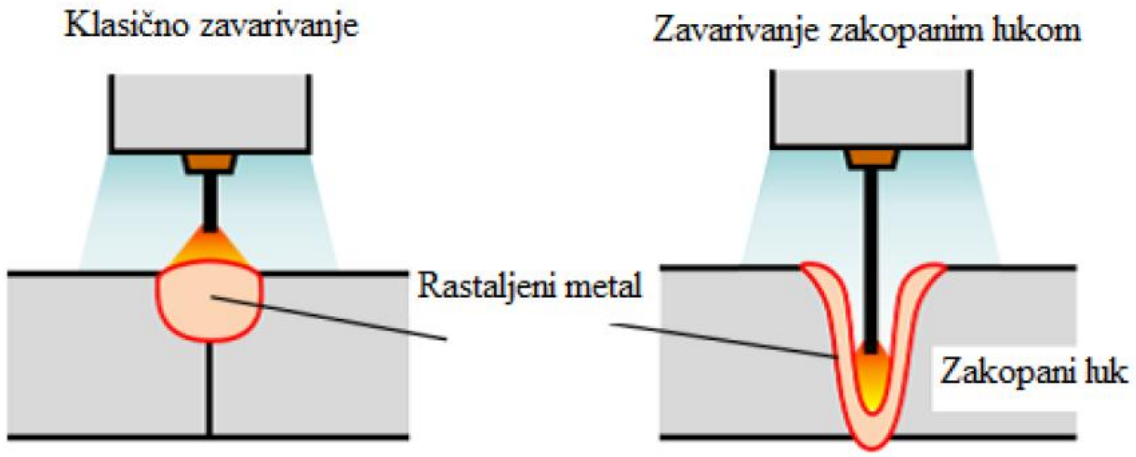
4.1. Usporedba zakopanog i štrcajućeg luka

Kod zavarivanja materijala većih debljina konvencionalnim MAG postupkom vrlo se često primjenjuje štrcajući luk kojeg karakterizira relativno visoka stopa depozita dodatnog materijala (u odnosu na preostale prijenose metala) uz zadovoljavajuću penetraciju, no kada je riječ o debljinama od 10 pa i više milimetara, traže se učinkovitija rješenja.

Tri glavna nedostatka MAG postupka zavarivanja štrcajućim lukom: [5]

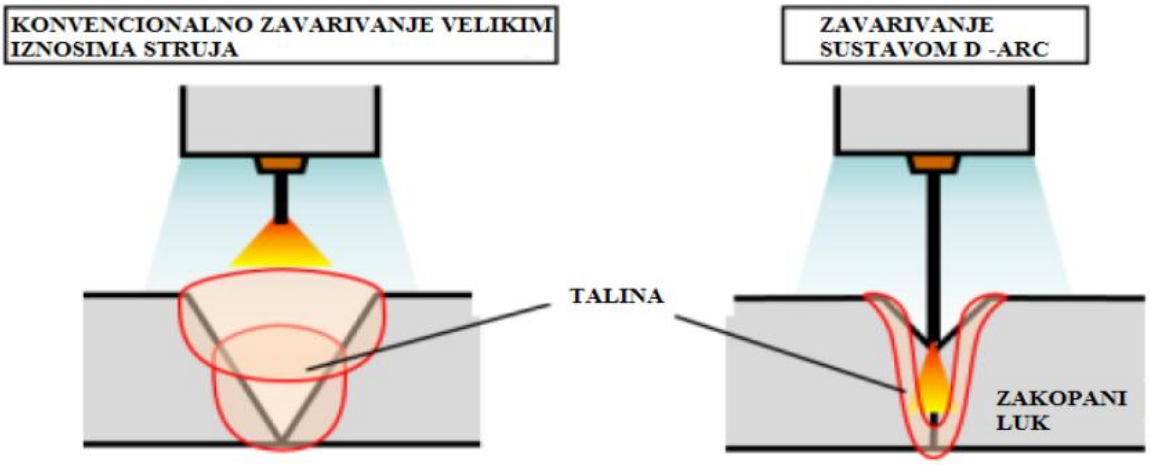
- potrebno je zavarivanje u više prolaza
- potrebna je velika količina dodatnog materijala
- velike deformacije i zaostala naprezanja

Pri zavarivanju primjenom štrcajućeg luka električni luk se nalazi iznad rastaljenog metala zavara što rezultira malom penetracijom, pa, ukoliko želimo potpuni provar na radnom komadu, priprema spoja mora biti po čitavoj debljini materijala. S obzirom na to da je izvor topline kod zakopanog luka postavljen dublje nego kod konvencionalnog MAG postupka, (slika 4.3), može se postići veća penetracija što za sobom donosi brojne prednosti u odnosu na konvencionalni MAG postupak. Primjenom zakopanog luka može se ostvariti veći depozit materijala što je vrlo važno kod zavarivanja velikih debljina [9].



Slika 4.3 Razlika između MAG zavarivanja štrcajućim i zakopanim lukom [2]

Kao što je vidljivo na slici 4.4, zbog prisutne velike penetracije, priprema spoja je jednostavnija i žlijeb je volumno i do nekoliko puta manji nego li je to slučaj kod konvencionalnog štrcajućeg luka, a zbog velikog depozita dodatnog materijala moguće je zavarivanje u jednom prolazu. Zbog manjeg ukupnog unosa topline, u odnosu na štrcajući luk, kod ovog postupka prisutne su manje deformacije [9].



Slika 4.4 Razlika u pripremi spoja između MAG zavarivanja štrcajućim i zakopanim lukom [2]

Nedostaci zakopanog luka u odnosu na štrcajući su nemogućnost zavarivanja u prisilnim položajima, fleksibilnost te nemogućnost ručnog vođenja pištolja. Zbog velikog unosa topline u jednom prolazu dolazi do pogrubljenja zrna čime se znatno narušavaju mehanička svojstva zavara. U višeprolaznom zavarivanju štrcajućim lukom to nije slučaj.

Zbog podložnosti nestabilnom ponašanju i povremenoj pojavi kratkih spojeva, zakopani luk je u prošlosti rijetko korišten, a njegova stabilizacija je vrlo zahtjevna, posebice u području jačih struja [2].

4.2. Promatranje i stabilizacija zakopanog luka

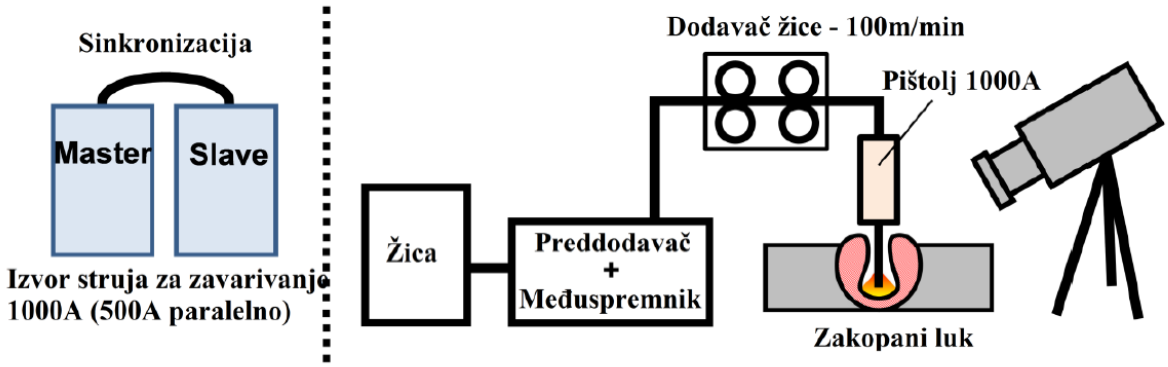
Zavarivanje zakopanim lukom naziva se još i D - arc postupak. Zbog svoje visoke učinkovitosti kod zavarivanja materijala velikih debljina, D - arc postupak zavarivanja je vrlo bitan i njegova stabilizacija je ključna za velikoserijsku proizvodnju.

Otvaranje šupljine unutar rastaljenog metala (zakopani prostor) je prilično nestabilno i pokazuje intenzivno gibanje taline. Pretpostavlja se da je uzrok ovakvog ponašanja u ponavljajućem ciklusu kako slijedi:

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

Drugim riječima, smatra se da zakopani luk postaje nestabilan u području visoke struje ako nema odgovarajućeg tlaka na rastaljeni metal bočnog zida zakopanog prostora, što je posebno naglašeno blizu površine taline [5].

Proces stabilizacija zakopanog luka pri strujama iznad 450 A opisan je sljedećim eksperimentom. Osnovni materijal primijenjen u eksperimentu bio je niskougljični čelik. Zavarivanje se izvodilo u zaštitnoj atmosferi sa 100 % CO_2. Brzina zavarivanja iznosila je 30 cm/min. Električni luk je promatran sustavom za snimanje na osnovi X-zraka te visokobrzinskom video kamerom. U svrhu provođenja eksperimenta razvijen je novi izvor struje koji može isporučiti i do 1000 A sa sustavom dodavanja žice i do 100 m/min. Shematski prikaz pokusa prikazan je slikom 4.5 [10].

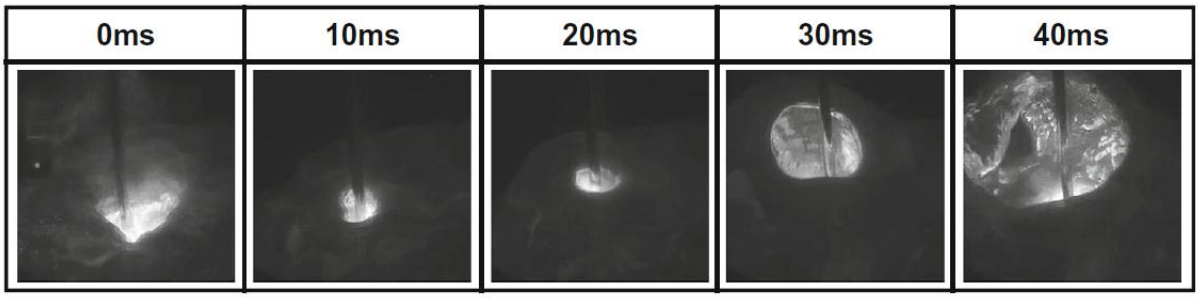


Slika 4.5 Shematski prikaz eksperimenta [5]

4.2.1. Promatranje zakopanog luka

Nagib karakteristike u svrhu promatranja zakopanog luka postavljen je na -1 V / 100 A što odgovara uobičajenim vrijednostima izvora struja za MAG zavarivanje. Slikom 4.6 dane su snimke navarivanja na čeličnu ploču dobivene visokobrzinskom kamerom pri sljedećim parametrima:

- Struja zavarivanja – 570 A
- Napon električnog luka – 48 V
- Brzina dodavanja žice – 40 m/min



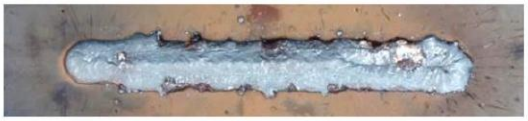
Slika 4.6 Rezultati snimanja nestabilnog zakopanog luka [10]

Svaki kadar predstavlja vremenski interval od 10 ms. Električni luk uočen je samo u trenutku 0 ms jer je bio uspostavljen ispod površine rastaljenog metala zavara. Zakopani električni luk nije bio stabilan iako se stalno održavao. Veličina otvora na površini taline se konstantno mijenjala, u nekim trenucima čak dolazi i do potpunog zatvaranja otvora, što rezultira pojavom kratkih spojeva te pojačanim prskanjem, a posljedično i nepravilnim izgledom navara [10].

4.2.2. Stabilizacija zakopanog luka

U svrhu postizanja bolje stabilnosti električnog luka, a samim time i estetskog izgleda zavara, modificiran je nagib karakteristike izvora struje, te su nadalje korištena tri različita nagiba, a to su: -2 V / 100 A, -10 V / 100 A i -20 V / 100 A. Dobiveni navari, kao i parametri koji su korišteni, dani su slikom 4.7. Korištenjem karakteristike nagiba -2 V / 100 A, uočena je velika širina navara uz estetski loš izgled. Zakopani luk bio je vrlo nestabilan, te je talina plitka i zato se otvara uz površinu metala s obzirom na to da je trenutna promjena struje prevelika uz promjenu napona. Korištenjem karakteristike nagiba -20 V / 100 A, navar je uži, a izgled navara je i dalje nepravilan, no zakopani luk je relativno stabilan uz poremećaje uslijed

kratkih spojeva do kojih dolazi zbog prevelike trenutne promjene napona uz promjenu struje. Kod karakteristike nagiba -10 V / 100 A može se postići zadovoljavajuća stabilnost zakopanog luka pri visokim strujama, promjena veličine navara je relativno mala uz česte nepravilnosti [5, 10].

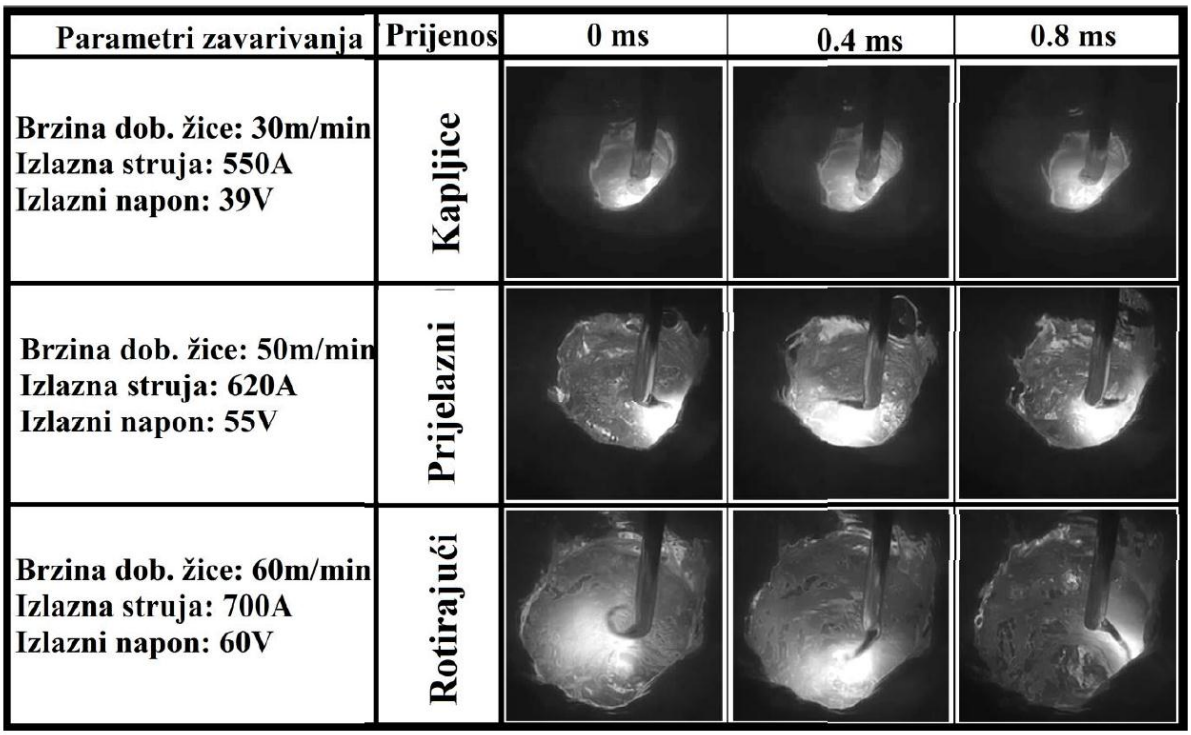
PARAMETRI ZAVARIVANJA		Vanjska karakteristika	Izgled navara 30mm
Brzina dodavanja žice: 40m/min Prosječna jakost struje: 570 A Prosječni iznos napona: 48V	(1)	-2V/100A	
	(2)	-10V/100A	
	(3)	-20V/100A	

Slika 4.7 Utjecaj nagiba vanjske karakteristike na izgled navara [5]

Prijenos metala kod zakopanog luka pri većim strujama

Pri karakteristici nagiba -10 V / 100 A uočen je prilično stabilan zakopani luk. Snimci visokobrzinske kamere pri brzini dovođenja žice od 30, 50 i 60 m/min dani su slikom 4.8. Pri brzini dovođenja žice od 30 m/min, naponom električnog luka od 39 V i jakosti struje 450 A, može se vidjeti vrh žice zbog stabilnog otvora na površini rastaljenog metala zavara. U ovom slučaju otvor na površini bio je najmanji i uočen je prijenos metala kapljicama usmjeren prema dnu šupljine zakopanog luka i to bez prskanja. Pri brzini dovođenja žice od 60 m/min, naponu električnog luka od 65 V i jakosti struje od 700 A, otvor na površini rastaljenog metala zavara bio je najveći. U ovom slučaju uočen je prijenos metala rotirajućim lukom. Gusjenica rastaljenog metala stvara se na vrhu žice te se zbog rotacije velikom brzinom odvaja prema zidu šupljine zakopanog luka i to uz intenzivno rasprskavanje. Valja napomenuti da na slici 4.8 vremenski interval kadra iznosi 0,4 ms da bi se jasno vidjela visokobrzinska rotacija. Pri brzini dodavanja žice od 50 m/min, naponu od 55 V i jakosti struje od 620 A, zapažen je svojevrsni prijelazni način prijenosa metala. Na vrhu žice stvara se gusjenica rastaljenog metala kao i kod rotirajućeg luka, no ponaša se kao njihalo koje rotira velikom brzinom. Treba napomenuti da je ovaj modalitet prijenosa vrlo sličan njihajućem rasprskavajućem luku kod MAG zavarivanja te se zbog toga u ovom radu naziva njihalo, tj.

prijelazni luk između prijenosa kapljicama i rotirajućeg luka. Veličina otvora šupljine zakopanog luka, kao i intenzitet prskanja, u ovom slučaju je veći nego kod prijenosa kapljicama, a manji nego kod rotirajućeg luka [5, 10].



Slika 4.8 Prijenos metala u zakopanom luku pri visokim strujama [5]

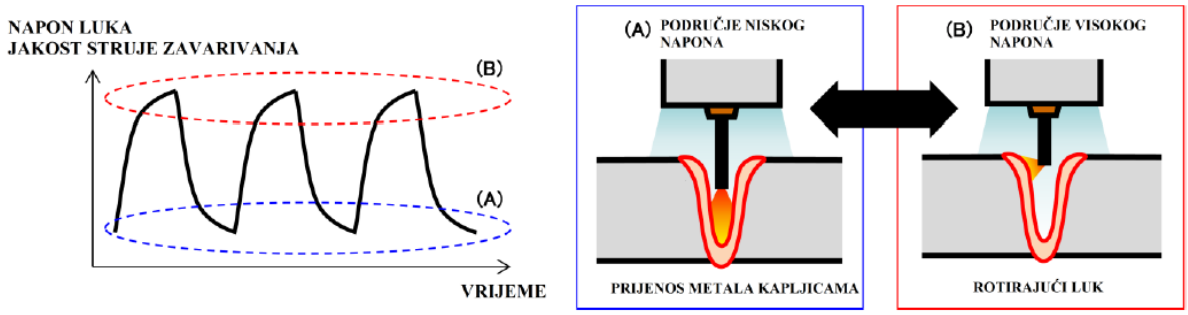
Posljedično, pri strujama zavarivanja većim od 450 A mogu se izdvojiti tri osnovna načina prijenosa metala s dva prijelazna stanja. Osnovni načini prijenosa metala kod zakopanog luka su prijenos metala kapljicama, njihanjem i rotirajući luk. Jedno prijelazno stanje je mješavina prijenosa kapljicama i njihanjem, a drugo prijelazno stanje je mješavina njihanja i rotirajućeg luka. Modaliteti prijenosa metala pri zakopanom luku dani su tablicom 4.1 [5, 10].

Tablica 4.1 Modaliteti prijenosa metala pri zakopanom luku [5]

Način prijenosa metala	*Smjer luka u šupljini*	*Rasprkavanje kapljica*
Kapljicom	Dno	Nema (malo)
Njihanjem	Dno i zid	Relativno malo
Rotacijom	Zid	Jako

Modulirana kontrola napona niskom frekvencijom

U svrhu poboljšanja izgleda navara i dodatne stabilizacije zakopanog luka primjenjuje se niskofrekventna modulirana kontrola napona. Slika 4.9 prikazuje novo dobiveni valni oblik struje koji kontinuirano pridržava rastaljeni zid zakopanog prostora uz cikličko ponavljanje vrijednosti napona i struje [5].



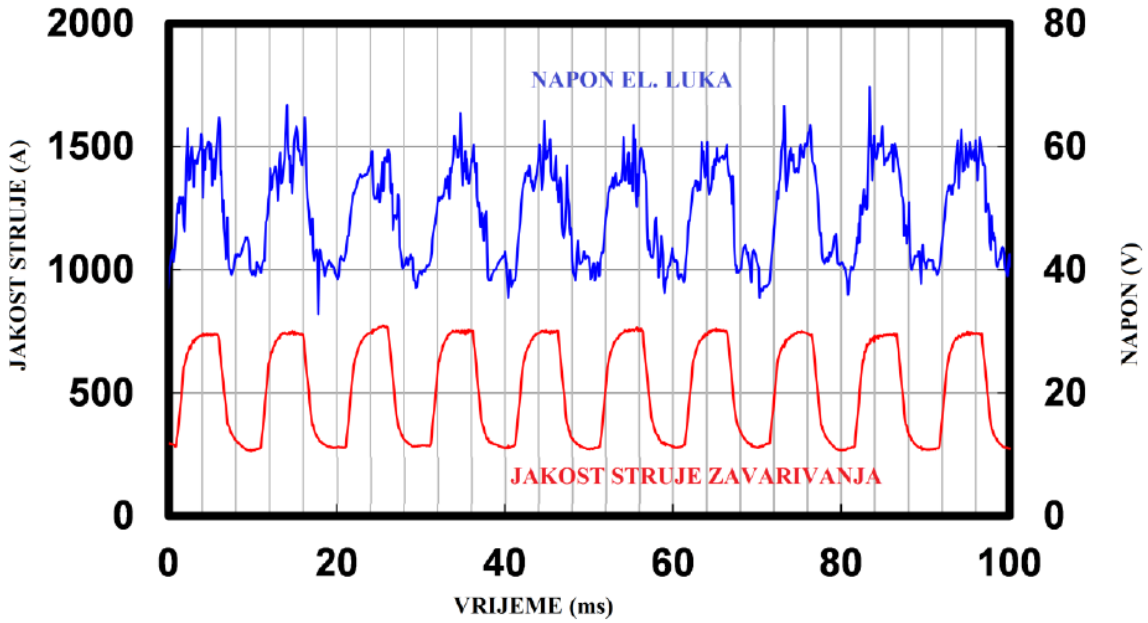
Slika 4.9 Valni oblik struje i napona sa shematskim prikazom prijenosa metala [5]

Namješteni napon mijenja se frekvencijom od 100 Hz, a samim time mijenja se i struja ovisno o opterećenju na sekundarnoj strani izvora struje za zavarivanje. Isprekidana linija (A) prikazuje područje niskog napona, a isprekidana linija (B) prikazuje područje visokog napona. U području niskih vrijednosti napona žica je postavljena dublje u talinu pri čemu se tali dno šupljine, a prijenos metala je u obliku kapljica. U području viših vrijednost napona vrh žice je postavljen pliće, pri čemu se električni luk uspostavlja na zidove šupljine. S obzirom na to da dolazi do prijenosa metala rotirajućim lukom rastaljeni metal se potiskuje prema zidnoj stjenci. Kombinacijom ova dva načina rada dolazi do stabilizacije zakopanog luka i boljeg izgleda navara. Razlika između navara dobivenog konvencionalnim i stabiliziranim zakopanim lukom prikazana je slikom 4.10 [5].

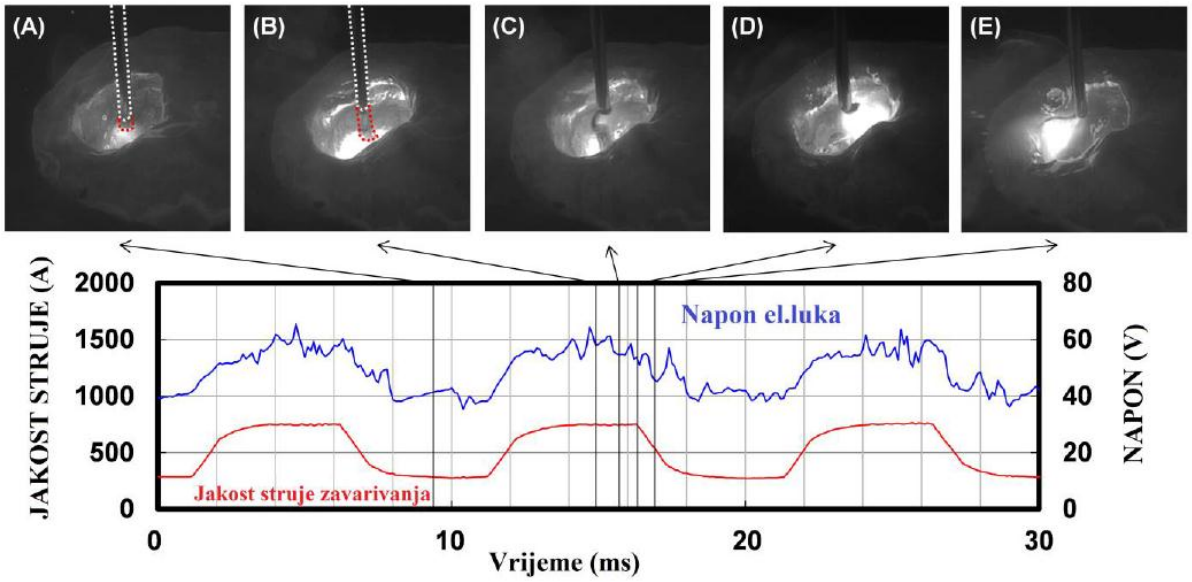
Parametri zavarivanja	Br.	Vanjska karakteristika	Upravljanje naponom	Izgled navara 30mm
Brzina dob. žice: 40m/min Izlazna struja: 570A Izlazni napon: 48V	(1)	-10V/100A		
	(2)	-10V/100A	±10V 100Hz	

Slika 4.10 Izgled navara dobiven konvencionalnim (1) i stabiliziranim (2) zakopanim lukom [10]

Na slici 4.11 prikazan je tipičan valni oblik struje i napona dobivenog ovakvim načinom upravljanja i kontrole. Proces navarivanja prikazan slikom 4.10 snimljen je visokobrzinskom kamerom pri brzini dodavanja žice od 40 m/min, jačini struje od 570A te podešenom naponu od 48 $\pm$ 10 V, nagibom vanjske karakteristike -10 V / 100 A i frekvencijom od 100 Hz. Rezultati dobiveni visokobrzinskom kamerom prikazani su slikom 4.12 [10].



Slika 4.11 Valni oblik struje i napona dobiven moduliranom kontrolom napona niske frekvencije [5]



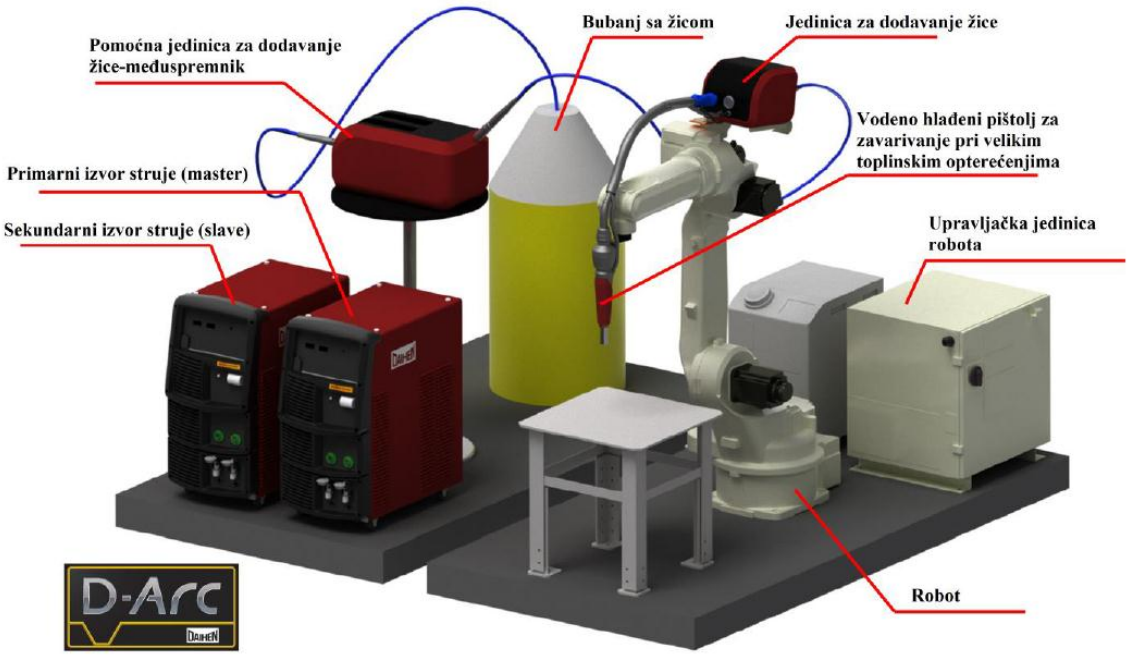
Slika 4.12 Fenomen stabiliziranog zakopanog luka pri moduliranom upravljanju naponom niske frekvencije [5]

U trenutku (A) prijenos metala je u obliku kapljica pri niskim vrijednostima struje i napona. Nakon određenog vremena upravljačka jedinica aktivira područje visokog napona. U trenutku (B) dolazi do podizanja vrha žice zbog povećane brzine taljenja te se formira gusjenica rastaljenog metala na vrhu žice. Trenutak (C) prikazuje nestabilnu gusjenicu rastaljenog metala na početku rotacije dok trenutak (D) prikazuje završnu fazu visoke struje i napona. Mala kapljica se odvaja u talinu i rotirajući luk se zatvara prema zidu taline u šupljini zakopanog luka. Kao što je već spomenuto, tlak plazme luka pridržava zid i održava dovoljan otvor na površini rastaljenog metala zavara sprječavajući njegovo zatvaranje. Trenutak E prikazuje prijelazno stanje s područja više struje i napona u područje niže struje i napona. Duljina električnog luka se smanjuje zajedno sa strujom, a samim time položaj vrha žice se povlači natrag na dno šupljine zakopanog luka. Ovakvo ponašanje se periodički ponavlja te je zahvaljujući takvom upravljanju realiziran stabilan zakopani luk s dubokom penetracijom i to bez velikog rasprskavanja [5, 10].

4.3. D-arc sustav za zavarivanje zakopanim lukom pri visokim strujama

D - arc sustav (slika 4.13) za zavarivanje limova većih debljina je robotiziran i relativno kompleksan, a sastoji se od numerički upravljane robotske ruke, primarnog i sekundarnog inverterskog izvora struje koji međusobno povezani mogu isporučiti struju i do 1000 A, dodavača koji može dodavati žicu brzinom i do 100 m/min. Dodavač žice smješten je na tijelu

robota, a spojen je s pomoćnom jedinicom za dodavanje žice (međuspremnik). Pištolj za zavarivanje je vodom hlađeni, izrađen od posebne bakrene legure koja omogućava visoka opterećenja (650A na 100 %-tnoj intermitenciji). Na glavni (primarni) izvor struje spojeno je modularno niskofrekventno upravljanje naponom kako bi se izračunala trenutna struja ovisno o odgovarajućem nagibu vanjske karakteristike. Puna žica koja je koristi kao dodatni materijal, zbog velike potrošnje, nije smještena na kolutovima već u posebnim spremnicima žice. [5].

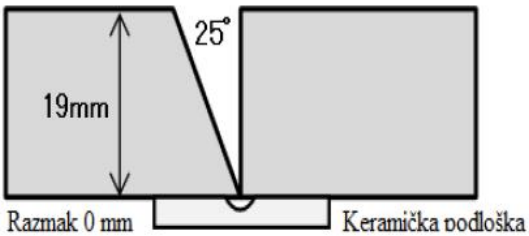
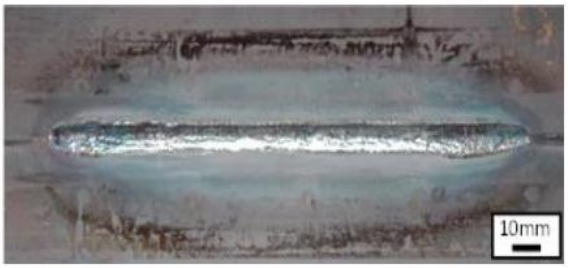


Slika 4.13 D-arc sustav za zavarivanja [5]

4.4. Usporedba D-arc sustava sa konvencionalnim MAG postupkom

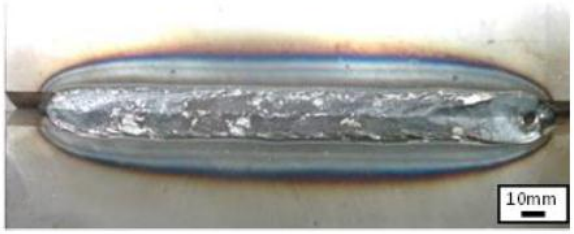
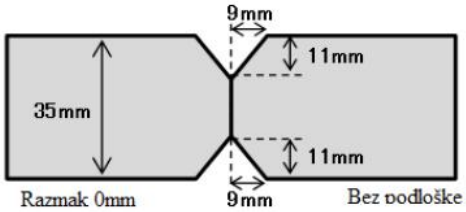
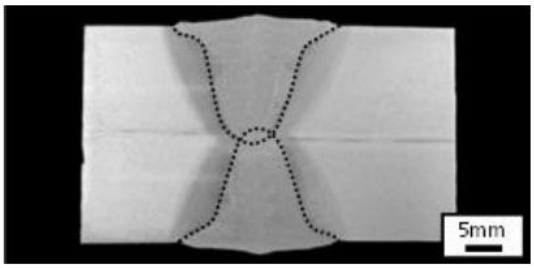
U sljedećim tablicama dani su neki primjeri primjene D - arc sustava za zavarivanje. Valja obratiti pozornost na pripremu spoja koja je volumenski i do nekoliko puta manja nego što je to slučaj kod konvencionalnog MAG postupka zavarivanja. Tablicom 4.2 dan je postupak spajanja dva lima debljine 19mm. Postignut je potpuni provar uz volumenski manju pripremu spoja u odnosu na konvencionalni MAG postupak [5].

Tablica 4.2 Primjer sučeljenog zavara na limu debljine 19 mm [5]

Struja zavarivanja: 580 A, Napon el. luka: 48V, Brzina zavarivanja: 24 cm / min Promjer žice: $Ø_ž$ = 1,4 mm (puna žica), Zaštitni plin: CO_2 (30 L / min)	
Izgled lica zavara	Priprema spoja
	
Izgled korijena zavara	Makroizbrusak (presjek)
	

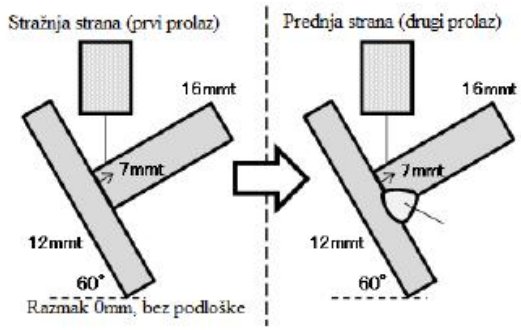
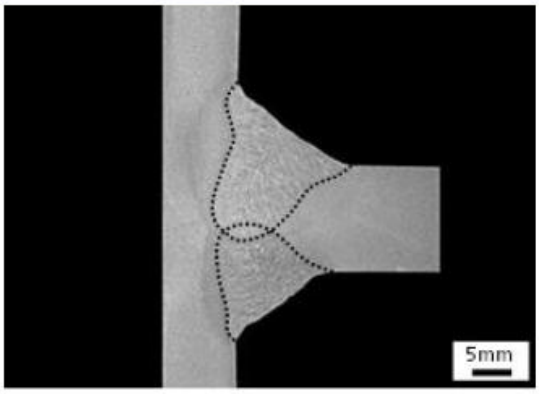
Tablicom 4.3 dan je primjer potpune penetracije na sučeljenom spoju debljine 35 mm sa prethodnom X pripremom spoja. Postupak zavarivanja je izveden u 2 prolaza uz okretanje radnog komada nakon prvog prolaza.

Tablica 4.3 Primjer sučeljenog zavara na limu debljine 35 mm [5]

Struja zavarivanja: 620 A, Napon el. luka: 47 V, Brzina zavarivanja: 30 cm / min Promjer žice: $Ø_ž$ = 1,4 mm (puna žica), Zaštitni plin: CO_2 (30 L / min)	
Izgled lica zavara	Priprema spoja
	
Izgled korijena zavara	Makroizbrusak (presjek)
	

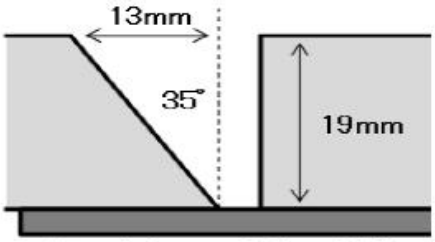
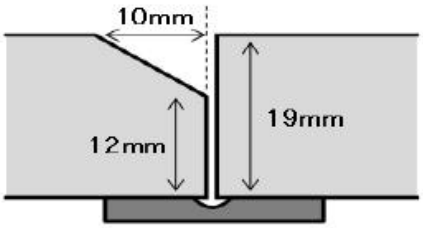
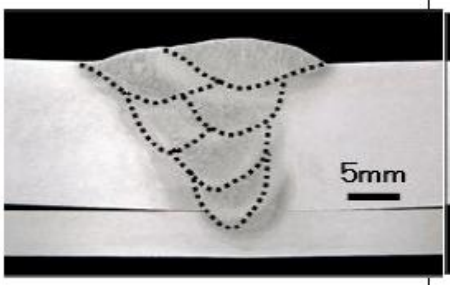
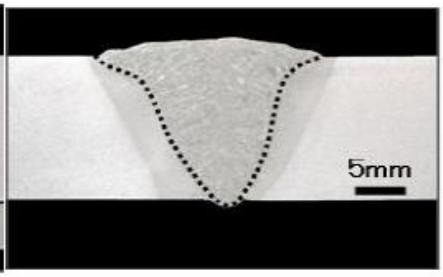
Tablicom 4.4 dan je postupak zavarivanja na T spoju sa potpunom penetracijom bez dodatne pripreme i bez razmaka. Zavarivanje je provedeno u dva prolaza i to u vodoravnom položaju uz okretanje radnog komada između prolaza [5].

Tablica 4.4 Primjer obostranog kutnog zavara [5]

I PROLAZ: Struja zavarivanja: 440 A, Napon luka: 38 V, Brzina zavarivanja: 30 cm / min **II PROLAZ**: Struja zavarivanja: 530 A, Napon luka: 43 V, Brzina zavarivanja: 30 cm / min Promjer žice: $Ø_ž$ = 1,4 mm (puna žica), Zaštitni plin: CO_2 (30 L / min)	
Izgled I strane kutnog zavara	Priprema spoja
	
Izgled II strane kutnog zavara	Makroizbrusak (presjek)
	

Tablicom 4.5 dana je usporedba postupka zavarivanja sučeljenog spoja na limu debljine 19 mm sa D - arc sustavom u odnosu na konvencionalni štrcajući luk [5].

Tablica 4.5 Usporedba zavara dobivenih štrcajućim i zakopanim lukom [5]

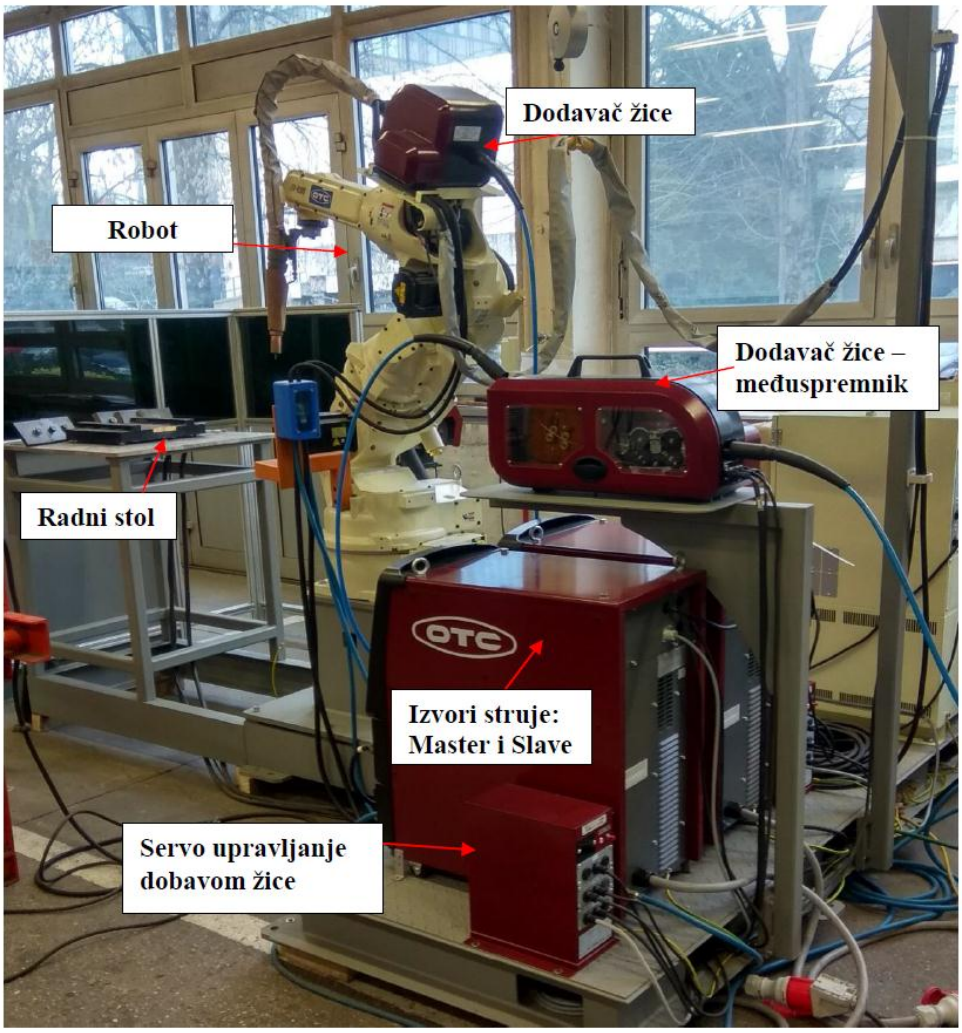
	Konvencionalno	*D-Arc*
Parametri	Struja zavarivanja: 300 A Napon luka: 30 V Brzina zav.: v_{zav}=30 cm / min Promjer žice:$Ø_ž$=1,4 mm (puna) Zaštitni plin: CO_2 (30 L / min)	Struja zavarivanja: 620 A Napon luka: 44 V Brzina zav.: v_{zav}=30 cm / min Promjer žice:$Ø_ž$=1,4 mm (puna) Zaštitni plin: CO_2 (30 L / min)
Priprema spoja	 Razmak 1mm, podloška od čelika	 Razmak 1mm, bakrena podloška
Makroizbrusak (presjek)		
Broj prolaza	6	1
Površina žlijeba [mm^2]	123,5	38,5
Kutna deformacija	7°	1°

5. EKSPERIMENTALNI DIO

Eksperimentalni dio rada proveden je u svrhu definiranja optimalnih parametara za D-arc postupak zavarivanja limova debljine 8 milimetara uz postizanje potpune penetracije. Dobivena su 3 različita uzorka zavarena D-arc sustavom zavarivanja sa točno poznatim parametrima zavarivanja. U svrhu optimizacije parametara za ovakav sustav zavarivanja, uzorci su podvrgnuti odgovarajućim nerazornim/razornim metodama ispitivanja. Radi usporedbe sa konvencionalnim MAG postupkom zavarivanja, napravljena su još dva uzorka na istom osnovnom materijalu zavarena sa MAG postupkom zavarivanja. Veći dio eksperimenta proveden je u Laboratoriju za zavarivanje Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu, dok je ostatak (zavarivanje uzoraka konvencionalnim MAG postupkom) proveden u proizvodnom prostoru tvrtke „Proizvodnja metalne galanterije PISKAČ“. Svi uzorci su najprije podvrgnuti nerazornim metodama ispitivanja i to radiografiji i vizualnoj metodi, a potom su iz spomenutih uzoraka izrađeni makroizbrusci na kojima je, nakon brušenja i nagrizanja provedena dodatna analiza mikrostrukture i mjerenje tvrdoće po Vickersovoj metodi. Uzorci su označeni na način da oni koji su dobiveni D-arc sustavom zavarivanja sadrže slovnu oznaku A, a to su A-1 i A-2 (sučeljeni spojevi debljine 8mm) i A-3 (kutni T spoj na materijalu debljine 16 mm), a uzorci označeni slovnom oznakom B dobiveni konvencionalnim MAG postupkom zavarivanja, a to su B-1 i B-2 (sučeljeni spojevi debljine 8 mm).

5.1. Oprema za D - arc sustav zavarivanja

D-arc sustav za zavarivanje sastoji se od već robotske ruke, koja u ovom slučaju ima 7 stupnjeva slobode gibanja koji omogućuju precizno vođenje zavarivačkog pištolja, zatim od međusobno povezanih primarnog i sekundarnog izvora struje, uređaja za servo upravljanje dodatnim materijalom, međuspremnika i dodavača žice. Tako povezani primarni i sekundarni izvor struje mogu isporučiti struju zavarivanja i do 1000 A. Ostala dodatna oprema i uređaji koje valja napomenuti su: jedinica za upravljanje robotom, privjesak za učenje, uređaj za hlađenje, boce sa zaštitnim plinovima i kolut žice dodatnog materijala. Osnovna oprema D-arc sustava za zavarivanje limova velikih debljina prikazana je slikom 5.1.



Slika 5.1 Oprema D-arc sustava za zavarivanje [5]

5.2. Osnovni materijal

Na uzorcima koji su zavarivani D-arc postupkom zavarivanja (slovna oznaka A) korišten je osnovni materijal čelik kvalitete S375. Ovaj čelik spada u skupinu nelegiranih, niskougljičnih, konstrukcijskih čelika koje karakterizira nizak udio ugljika, ali isto tako i vrlo dobra zavarivačka svojstva što znači da uz pravilno odabrane parametre zavarivanja ovaj čelik nije sklon nastajanju grešaka i nepravilnosti u metalu zavara. Kemijski sastav čelika S375 dan je tablicom 5.1, dok tablica 5.2 daje vrijednosti granice razvlačenja i vlačne čvrstoće. Na uzorcima zavarenim konvencionalnim MAG postupkom zavarivanja (slovna oznaka B) kao osnovni materijal korišten je čelik oznake S355. Ovaj čelik spada u skupinu nelegiranih, niskougljičnih, konstrukcijskih čelika koji je po svojim svojstvima sa aspekta zavarivanja vrlo sličan čeliku S375, ali uz nešto lošija mehanička svojstva, konkretno manju granicu razvlačenja. Kemijski sastav čelika S355 dan je tablicom 5.3, a vrijednosti njegove granice razvlačenja i vlačne čvrstoće prikazane su tablicom 5.4. Zbog svoje dobre zavarljivosti i niske cijene ovi se čelici vrlo često koriste u građevinskoj, proizvodnoj i brodogradilišnoj industriji. Isporučuju se u obliku hladno valjanih ploča lima, profila i cijevi različitih duljina. Uzorci A-1 i A-2 sastoje se od dva sučeljeno spojena lima debljine 8 milimetara, uzorak A-3 od dva kutno spojena lima debljine 16 milimetara, dok su uzorci B-1 i B-2 sastavljeni od dva sučeljeno spojena lima debljine 8 milimetara.

Tablica 5.1 Kemijski sastav čelika S375 [11]

ČELIK	C %	Mn %	P %	S %	Si %	Cr %	N %	Cu %
S355	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 5.2 Vrijednosti granice razvlačenja i vlačne čvrstoće za čelik S375 [11]

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

Tablica 5.3 Kemijski sastav čelika S355 [12]

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

Tablica 5.4 Vrijednosti granice razvlačenja i vlačne čvrstoće za čelik S355 [12]

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

5.3. Dodatni materijal i zaštitni plin

Za zavarivanje svih uzoraka korištena je žica proizvođača Elektroda Zagreb d.d. Kod zavarivanja uzoraka A-1 i A-2 korištena je puna žica promjera 1,2 mm trgovačkog imena EZ – SG 3, dok je uzorak A-3 zavaren istom žicom većeg promjera, i to 1,6 mm. Slika 5.2 prikazuje specifikaciju žice EZ – SG 3. Za uzorke zavarene konvencionalnim MAG postupkom (B-1 i B-2) korištena je žica trgovačkog imena EZ – SG 2 promjera 1,0 mm čija je specifikacija dana slikom 5.3.

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	HI (1.0345) HII (1.0425)	P235GH P265GH
	Č 3133 Č 3105	17Mn4 (1.0481) 19Mn6 (1.0473)	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	
Sitnoznati 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 0500	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 5.2 Specifikacija dodatnog materijala (EZ – SG 3) [13]

NORME

HRN EN ISO 14341-A	AWS / ASME SFA-5.18	DIN 8559	W. Nr.
G 42 4 C/M 3Si1	ER70S-6	SG 2	1.5125

SVOJSTVA I PODRUČJE PRIMJENE

Pobakrena ili pobrončana žica za zavarivanje u zaštitnoj atmosferi plina CO_2 ili mješavine plinova Ar/CO_2. Za zavarivanje nelegiranih i niskolegiranih čelika čvrstoće do 590 N/mm².

Grupa čelika	HRN (stari)	DIN (W. Nr.)	HRN / EN / ISO
Konstrukcijski čelici	Č 0261 do Č 0545	St 33 (1.0035) do St 52-2N (1.0050)	S 185 do E 295 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 350 ČRV 250 do ČRV 350	StE 285 (1.0486) StE 355 (1.0562) WStE 285 (1.0487) WStE 355 (1.0565)	P275N P355N P275NH P355NH
Čelični lijev	ČL 0300 do ČL 0500	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
> 430	500 - 640	> 22	≥ 47

ORIJENTACIJSKI KEMIJSKI SASTAV ŽICE

	C	Mn	Si	Cu
%	0,06 - 0,13	1,4 - 1,6	0,7 - 1,0	≤ 0,3

ZAŠTITNI PLIN

C1 ili M21

PAKIRANJE

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

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

ODOBRENJA

ABS (3YSA); BV (SA 3Y M); CRS (3YS); DB; DNV (IIIYMS); GL (3YS); LR (3S,3YS); RINA (3YS); TÜV

= +

Slika 5.3 Specifikacija dodatnog materijala (EZ – SG 2) [14]

Za zaštitni plin korištena je mješavina Ar i CO_2 u omjeru sa 82 % Ar i 18 % CO_2(oznaka M21 prema normi HRN EN ISO 14175).

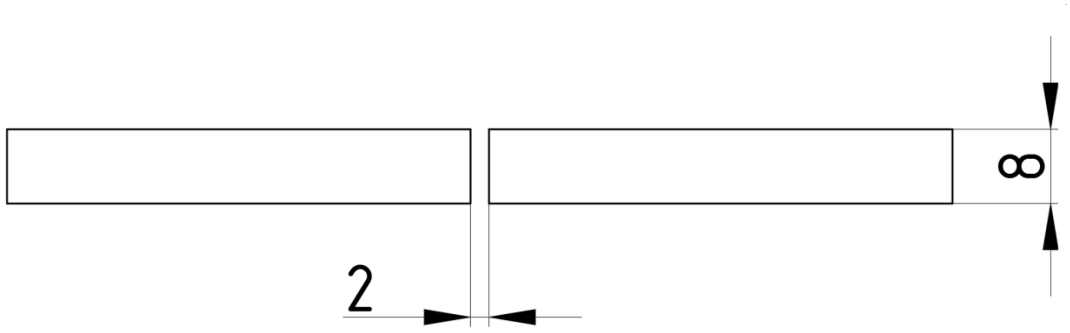
5.4. Postupak zavarivanja uzoraka

5.4.1. Priprema uzoraka za zavarivanje

Priprema uzoraka sastoji se od sljedećih operacija:

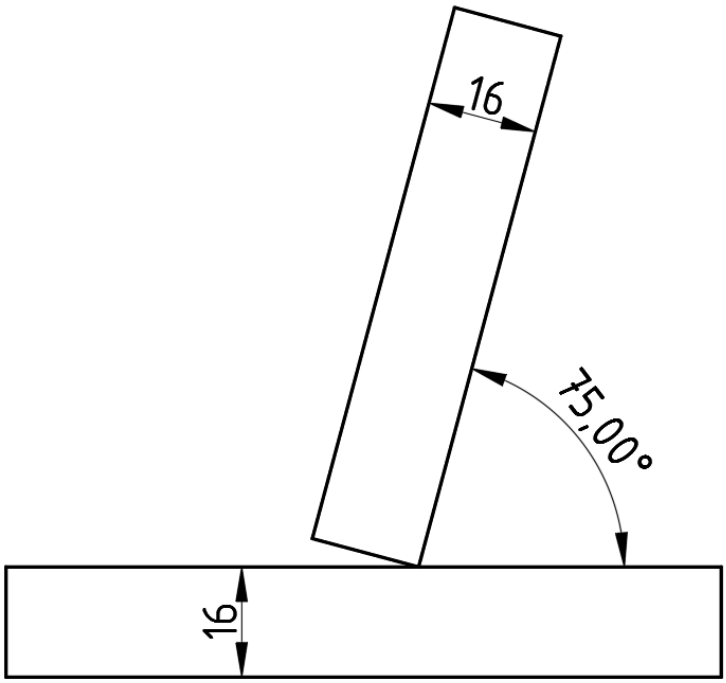
- priprema spoja – rezanje i priprema ploča (plazmom ili plinsko)
- brušenje i čišćenje površine spoja
- pripajanje ploča
- postavljanje krajnjih pločica
- pozicioniranje radnog komada na stol robota za D - arc sustav zavarivanja

Kod uzorka A-1 i A-2 nije bilo dodatne pripreme spoja osim brušenja i čišćenja površine neposredno prije zavarivanja. Priprema spoja za spomenute uzorke dana je slikom 5.4.



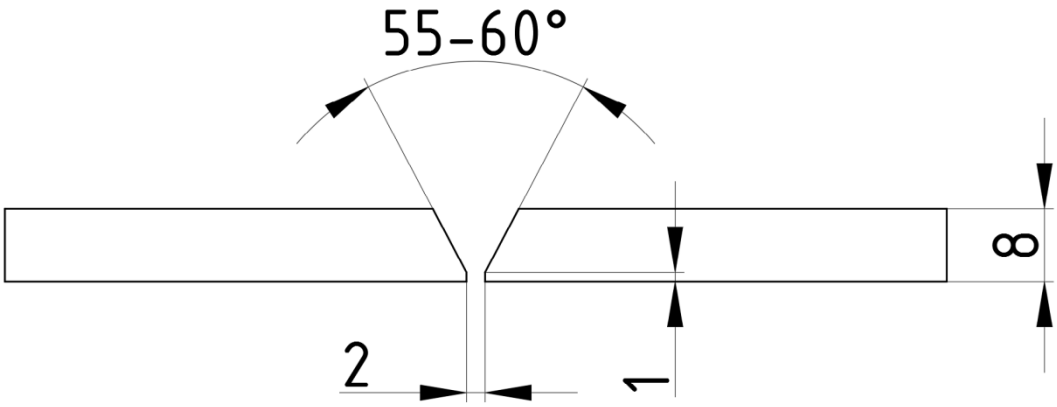
Slika 5.4 Priprema spoja za uzorke A-1 i A-2

Kod uzorka A-3, koji je isto tako zavaren D - arc sustavom, nije bilo posebne pripreme žlijeba osim brušenja i čišćenja površine neposredno prije zavarivanja. Kod ovog uzorka gornja ploča nije u potpunosti vertikalno postavljena na donju nego je skošena za 15°. Priprema spoja uzorka A-3 dana je slikom 5.5.



Slika 5.5 Priprema spoja za uzorak A-3

Kod uzoraka koji su zavareni konvencionalnim MAG postupkom (B-1 i B-2), napravljena je V priprema spoja prema slici 5.6. U ovom slučaju priprema je napravljena kutnom brusilicom, a slika 5.7 daje prikaz jedne polovice uzorka sa pripremljenim žlijebom.



Slika 5.6 Priprema spoja za uzorke B-1 i B-2

Slika 5.7 Pripremljen žlijeb na jednoj polovici uzorka B

Nakon pripremljenog žlijeba slijedi postupak pripajanja. U ovom slučaju pripoji su izvedeni na počecima i krajevima uzoraka pomoću spojnih pločica na kojima je ujedno i započet postupak zavarivanja. Slika 5.8 prikazuje pripremljena oba uzorka (B-1 i B-2) za postupak MAG zavarivanja.

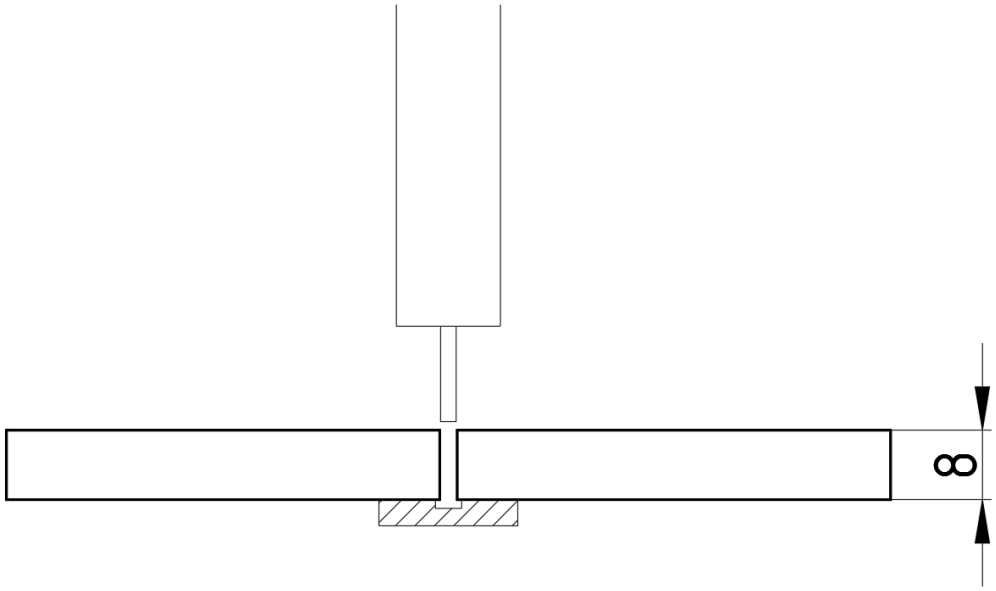
Slika 5.8 Pripremljeni uzorci B-1 i B-2 za postupak zavarivanja

5.4.2. Postupak zavarivanja ispitnih uzoraka

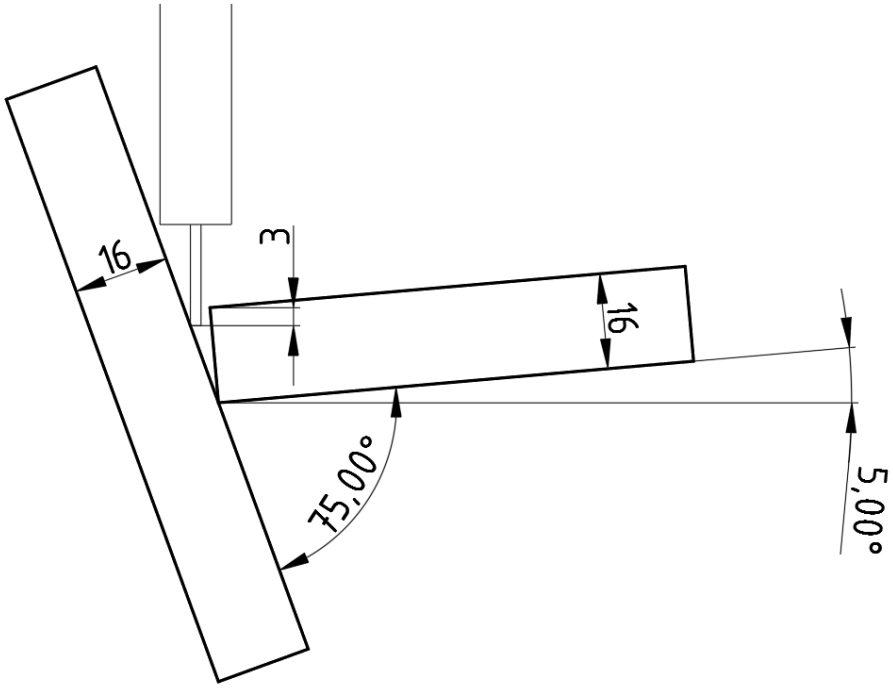
Zavarivanje uzoraka A-1, A-2 i A-3

Kao što je već napomenuto uzorci A-1, A-2 i A-3 zavareni su d-arc postupkom zavarivanja. Uzorci A-1 i A-2 izvedeni su kao sučeljeni spoj na limu debljine 8 milimetara. Nakon pripajanja i postavljanja keramičke pločice, uzorci se postavljaju na postolje gdje nakon pozicioniranja i programiranja robotske ruke za vođenje zavarivačkog pištolja započinje proces zavarivanja. Keramičke podloške omogućuju zavarivanje sa većim parametrima koji osiguravaju potpuni provar korijena, a opet ne dolazi do propaljivanja. Shema položaja zavarivanja uzoraka A-1 i A-2 dana je slikom 5.9. Uzorak A-3 izveden je kao kutni T spoj, ali gornja ploča je smaknuta za 15° od vertikale. S obzirom na to da je i ovaj uzorak zavaren na robotskoj stanici, uzorak je postavljen na način da bi se omogućilo zavarivanje sa što većim

parametrima kako bi se osigurala potpuna penetracija. Shema položaja zavarivanja uzorka A-3 dana je slikom 5.10.

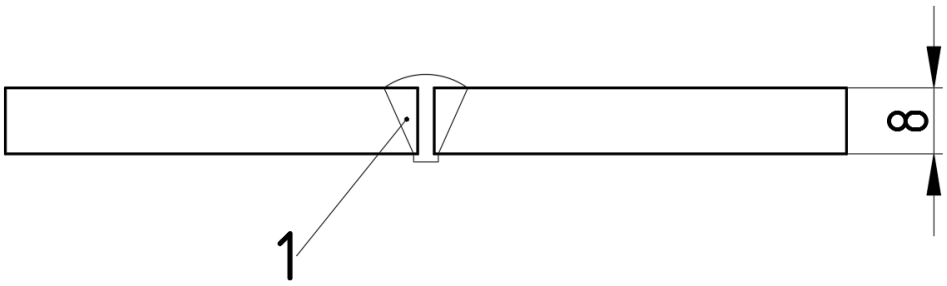


Slika 5.9 Shema položaja zavarivanja uzoraka A-1 i A-2

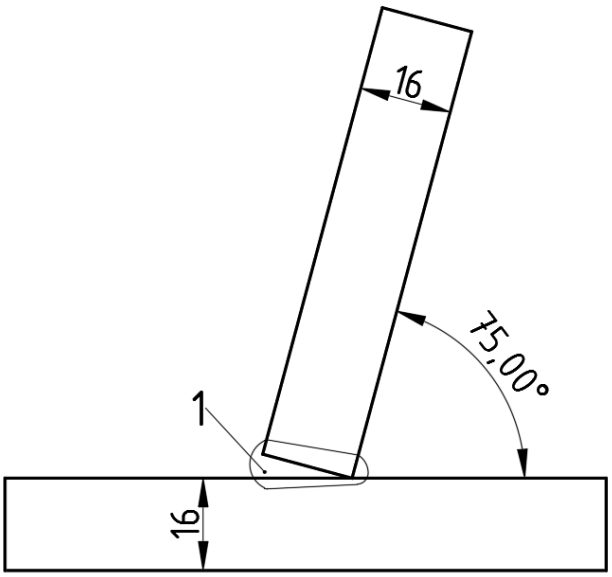


Slika 5.10 Shema položaja zavarivanja uzorka A-3

S obzirom da D - arc sustav spada u skupinu visokoučinskih postupaka MAG zavarivanja, uzorke A-1, A-2 i A-3 je bilo moguće zavariti i u jednom prolazu, naravno uz pravilno izvedenu pripremu žlijeba. Na taj način se uveliko smanjuje vrijeme zavarivanja, a samim time raste i produktivnost. Ujedno se smanjuje i ukupan unos topline čime se ostvaruje manji stupanj deformacija. S obzirom na to da je unos topline u tom jednom prolazu ipak veći nego je to slučaj kod konvencionalnog MAG zavarivanja, postoji mogućnost pogrubljenja zrna kao i porasta tvrdoće na mjestu zavarivanja što negativno utječe na preostala mehanička svojstva. Na slikama 5.11 i 5.12 dani su shematski prikazi istih uzoraka sa označenim prolazima, a tablica 5.5 prikazuje parametre zavarivanja za pojedini uzorak. Slikama 5.13, 5.14 i 5.15 prikazani su uzorci nakon provedenog postupka zavarivanja.



Slika 5.11 Shematski prikaz zavarenih uzoraka A-1 i A-2 sa označenim prolazima



Slika 5.12 Shematski prikaz zavarenog uzorka A-3 sa označenim prolazima

Unos topline računan je prema sljedećem izrazu:

$$Q = k \times \frac{U \times I}{v_z} \times \frac{60}{1000}\ ,\mathrm{kJ/cm}$$

Gdje je:

Q - unos topline u zavar, kJ/cm

k - stupanj iskorištenja (za MAG postupak iznosi 0,8 i sa tom vrijednošću je i ovdje računato)

U - napon električnog luka, V

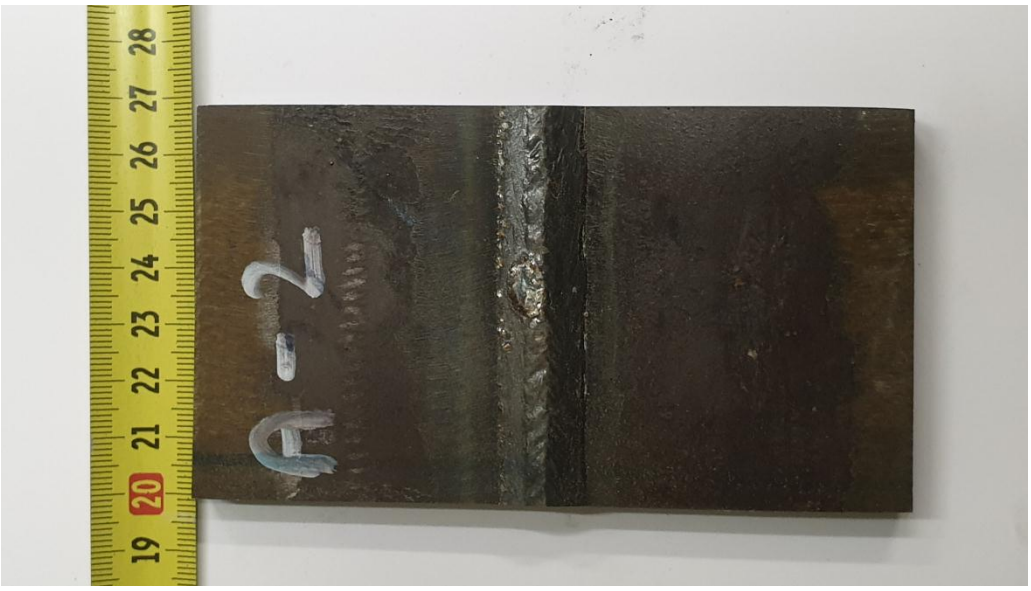
I - struja zavarivanja, A

v_z - brzina zavarivanja, cm/min

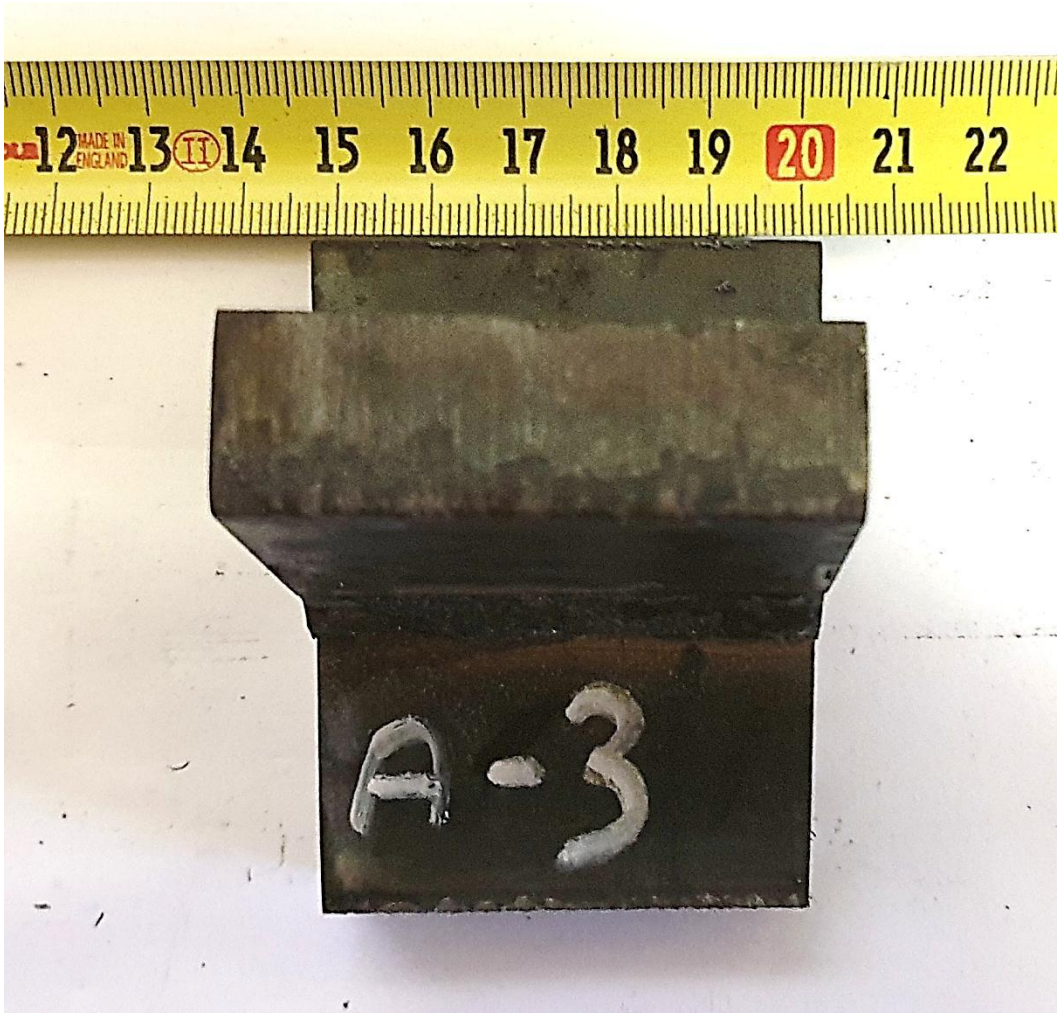
Tablica 5.5 Parametri zavarivanja za uzorke A-1, A-2 i A-3

Uzorak	Jakost struje, A	Napon, V	Brzina zavarivanja, cm/min	Slobodni kraj žice, mm	Unesena toplina, kJ/cm	Protok plina, l/min	Promjer žice
A-1	320	30	28	25	16,457	20	1,2
A-2	320	30	28	25	16,457	20	1,2
A-3	360	32	23	30	25,135	24	1,6

Slika 5.13 Uzorak A-1 nakon provedenog postupka zavarivanja



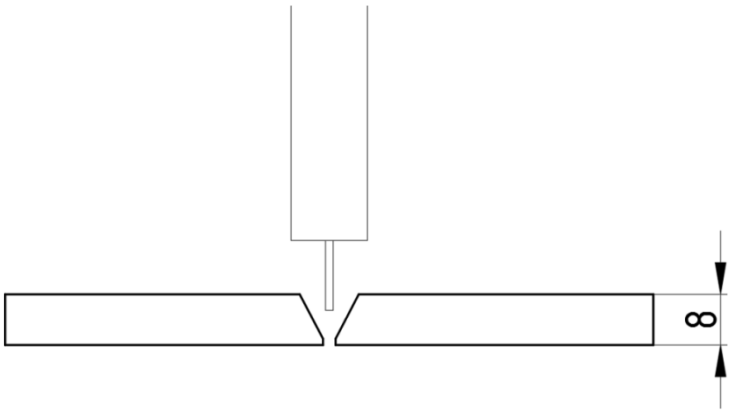
Slika 5.14 Uzorak A-2 nakon provedenog postupka zavarivanja



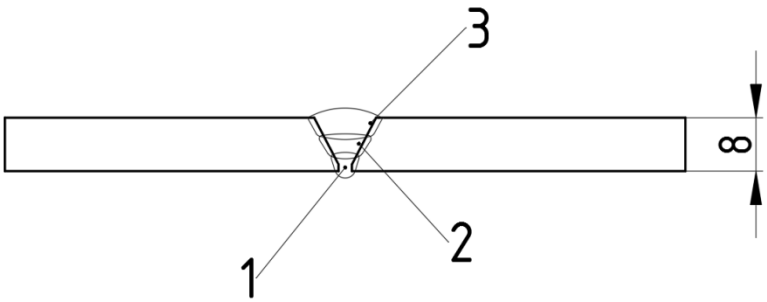
Slika 5.15 Uzorak A-3 nakon provedenog postupka zavarivanja

Zavarivanje uzoraka B-1 i B-2

Uzorci B-1 i B-2 zavareni su konvencionalnim MAG postupkom sa potpuno istim parametrima zavarivanja. Izvor struje koji je korišten u tu svrhu bio je inverter njemačkog proizvođača *Lorch* (Lorch MicorMig 400) koji može isporučiti struju zavarivanja i do 400A. Da bi se mogao iskoristiti taj kapacitet, zavarivački pištolj mora biti vodom hlađen. Dodatni materijal bila je puna žica promjera 1,0 mm proizvođača *Elektroda Zagreb* trgovačkog imena EZ – SG2. Za zaštitni plin korištena je mješavina 82 % Ar i 18 % CO_2. Svaki uzorak je zavaren u 3 prolaza uz prethodnu V pripremu žlijeba. U ovom slučaju, zavarivanje nije izvedeno na robotu nego je vođenje pištolja bilo ručno. Slika 5.16 daje shematski prikaz položaja zavarivanja, a slika 5.17 daje shematski prikaz zavarenog uzorka sa označenim prolazima.



Slika 5.16 Shematski prikaz položaja zavarivanja uzoraka B-1 i B-2



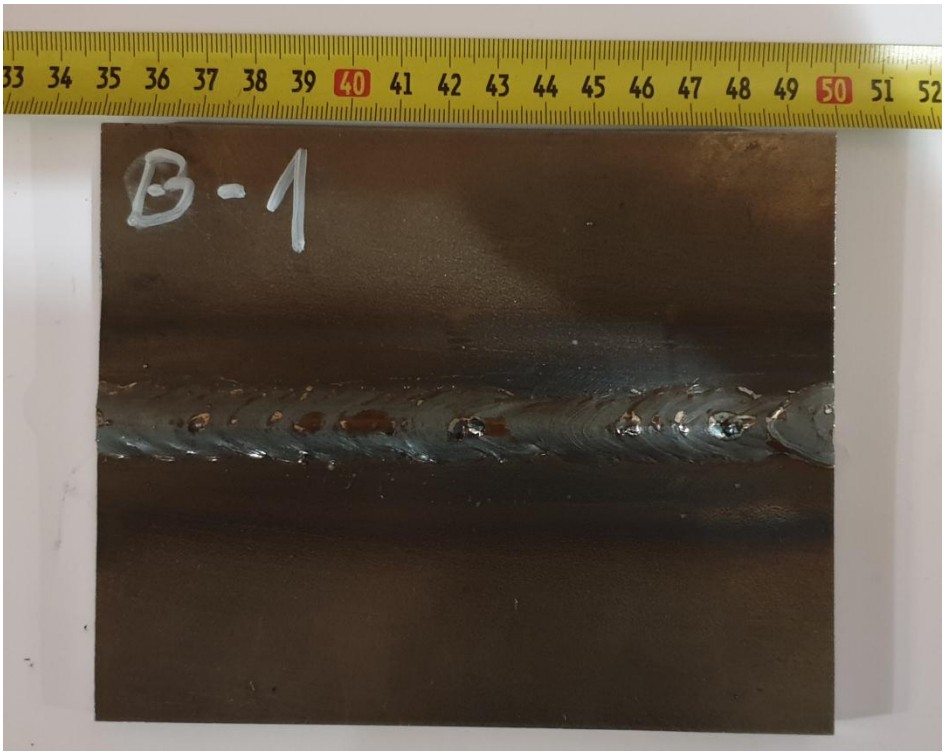
Slika 5.17 Shematski prikaz zavarenih uzoraka B-1 i B-2 sa označenim prolazima

U prvom prolazu cilj je bio uspješno napraviti korijen zavara bez propaljivanja i naljepljivanja taline. Da bi se to postiglo, namješteni su parametri koji osiguravaju prijenos metala kratkim spojevima kojeg karakterizira nizak unos topline i mali stupanj deformacija, ali isto tako slabija produktivnost. Popune, tj. 2. i 3. prolaz napravljeni su sa nešto višim parametrima zavarivanja tako da je osiguran prijenos metala štrcajućim lukom. Između svakog prolaza, površina zavara je brušena i očišćena kutnom brusilicom kako bi se što više smanjila mogućnost nastanka grešaka i nepravilnosti u zavaru. Slika 5.18 prikazuje očišćenu površinu zavara nakon 2. prolaza. Parametri zavarivanja za svaki pojedini prolaz dani su tablicom 5.6, Slike 5.19 i 5.20 prikazuju uzorke nakon provedenog postupka zavarivanja, a slikama 5.21 i 5.22 prikazani su isti uzorci sa korijenske strane.

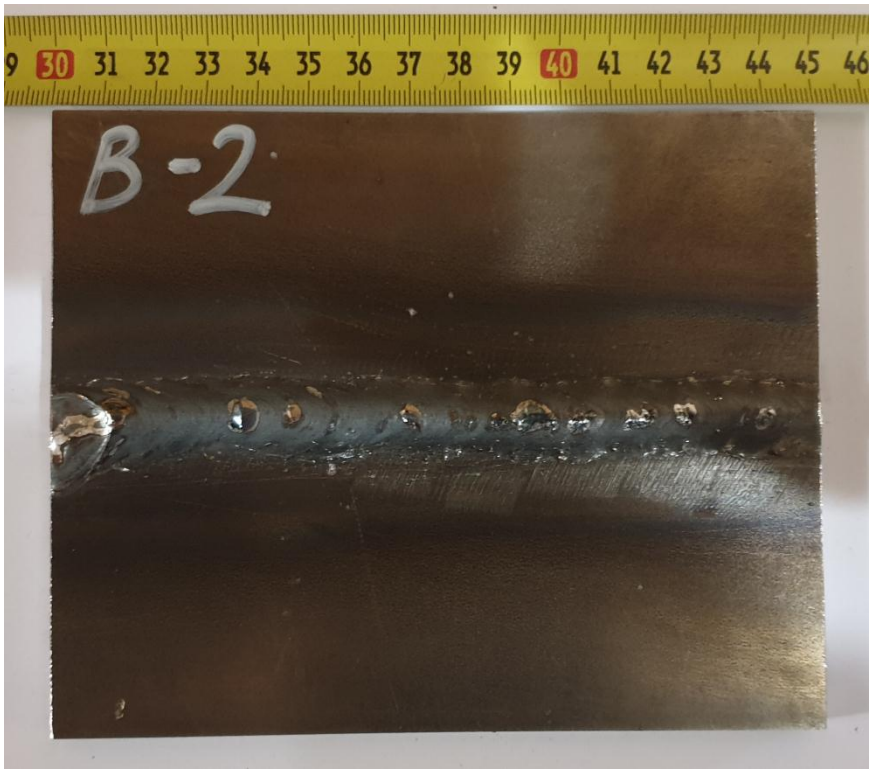
Slika 5.18 Čišćenje površine zavara između prolaza

Tablica 5.6 Parametri zavarivanja za uzorke B-1 i B-2

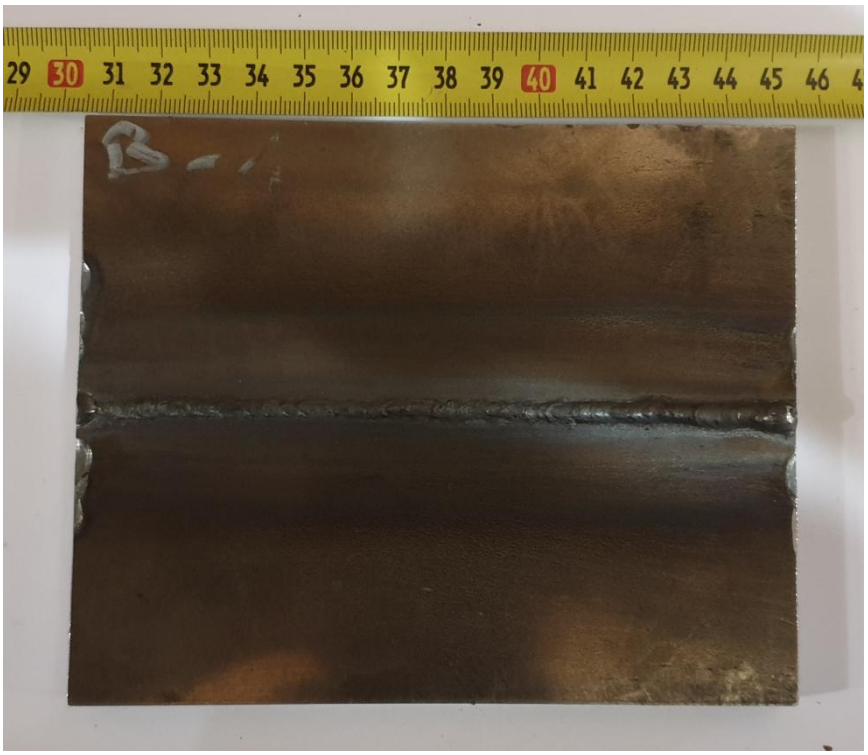
Prolaz	Jakost struje, A	Napon, V	Brzina zavarivanja, cm/min	Slobodni kraj žice, mm	Unesena toplina, kJ/cm	Protok plina, l/min	Promjer žice
1	125	21,2	16	20	7,95	12	1,0
2	190	31,2	18	20	15,808	12	1,0
3	230	33,9	20	20	18,713	12	1,0



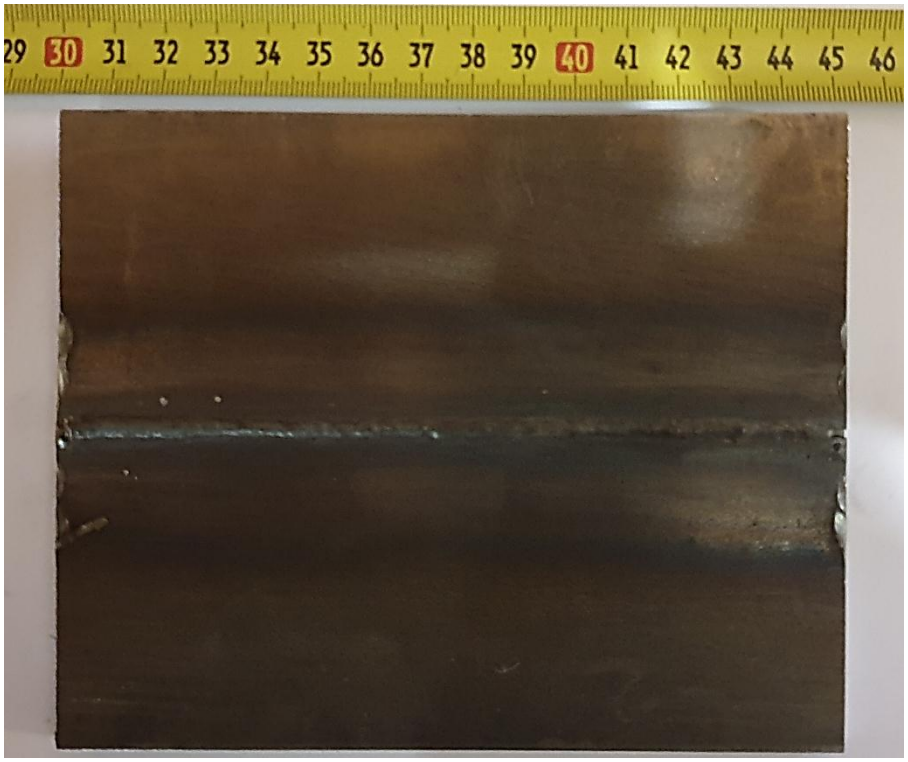
Slika 5.19 Uzorak B-1 nakon zavarivanja



Slika 5.20 Uzorak B-2 nakon zavarivanja



Slika 5.21 Korijenska strana uzorka B-1



Slika 5.22 Korijenska strana uzorka B-2

5.5. Provedena ispitivanja

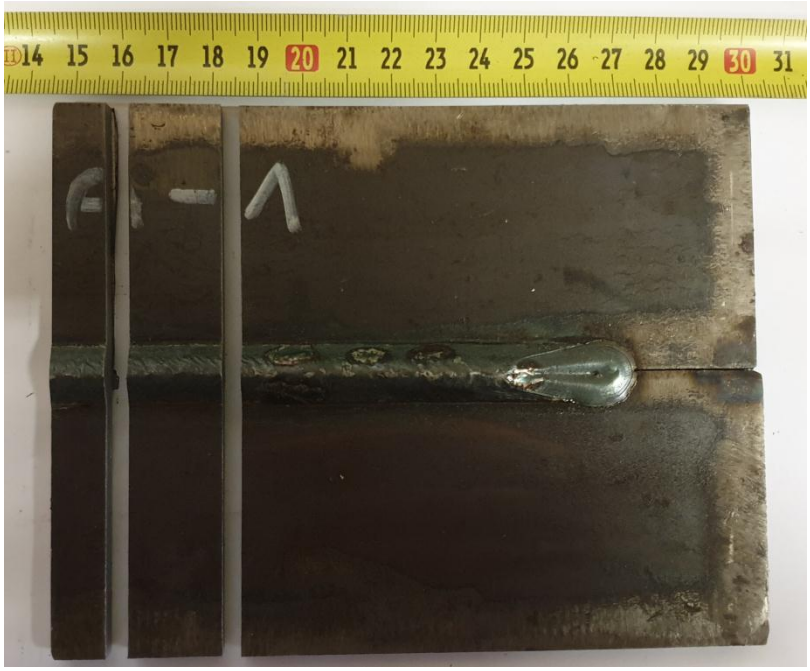
U svrhu ocjene kvalitete zavara dobivenih D-arc sustavom zavarivanja za odabrani niz parametra te usporedbe njegove isplativosti u odnosu na konvencionalni MAG postupak provedena su sljedeća ispitivanja:

- Analiza makroizbruska
- Mjerenje tvrdoće Vickers metodom HV10
- Radiografsko ispitivanje

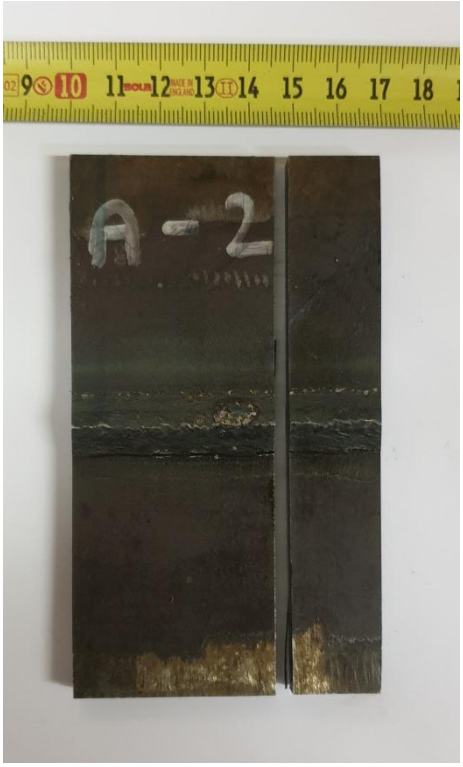
5.5.1. Analiza makroizbruska

Iz svih uzoraka grubo su izrezani makroizbrusci na tračnoj pili, a potom je proveden postupak ručnog brušenja. Ručno brušenje provedeno je na brusnom papiru sa granulacijama 80, 100, 120, 180 i na kraju je završeno sa vodobrusnim papirom granulacije 400. Na slikama 5.23,

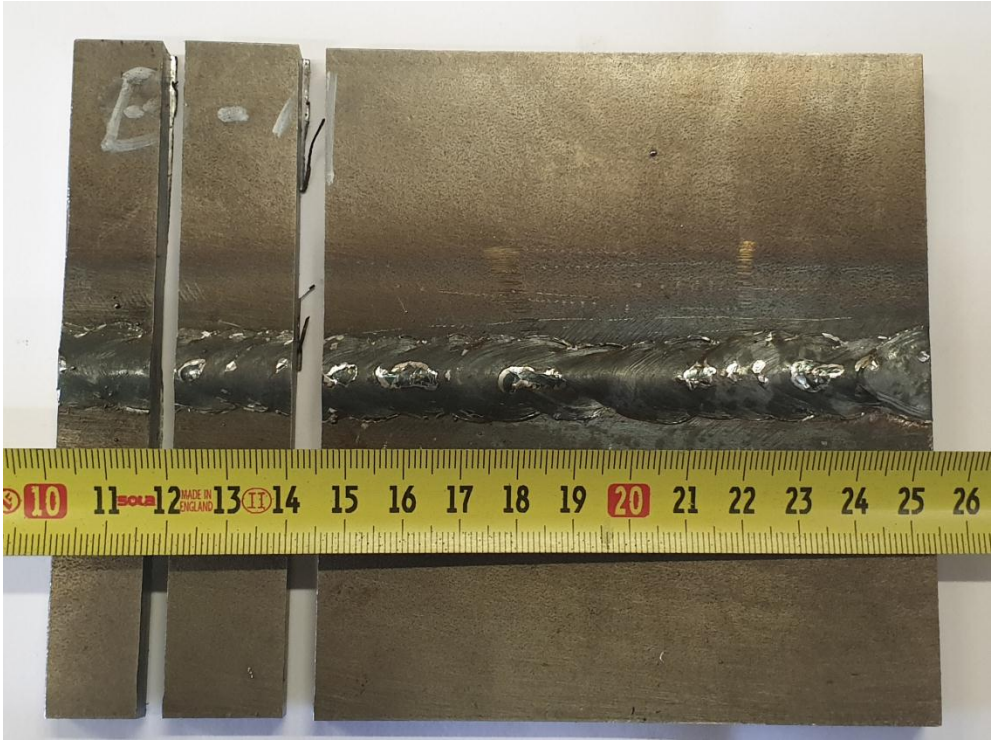
5.24, 5.25 i 5.26 prikazani su pojedini uzorci nakon grubog izrezivanja makroizbruska, a slikom 5.27 dna je prikaz uzorka A-3 nakon provedene operacije ručnog brušenja.



Slika 5.23 Grubo izrezan makroizbrusak iz uzorka A-1

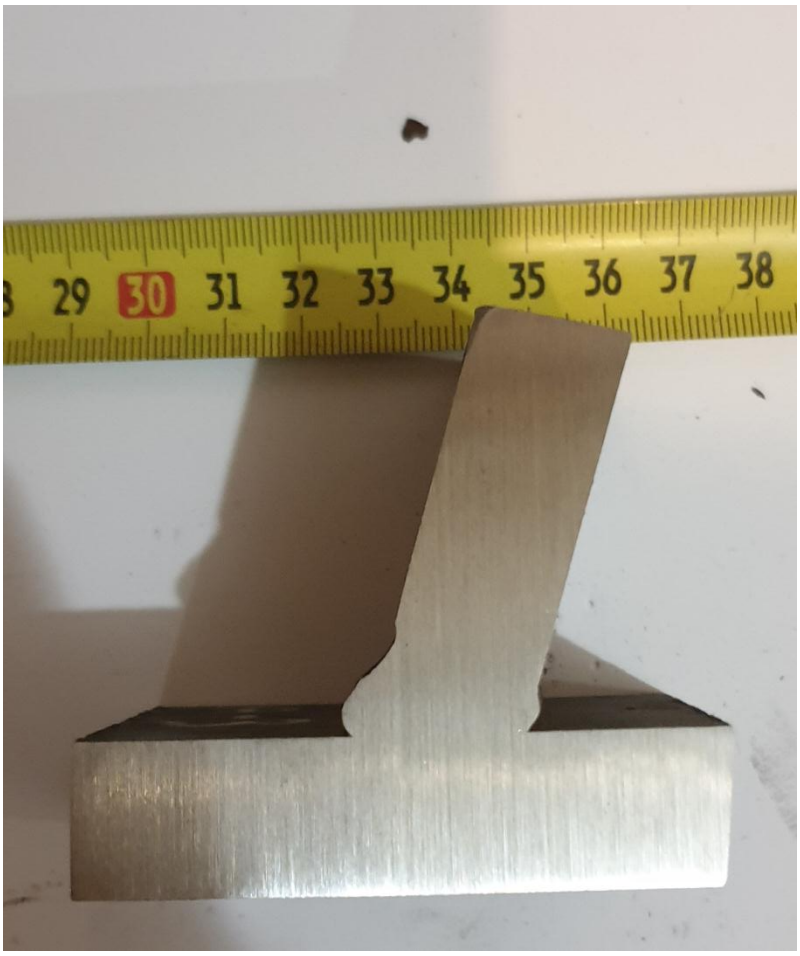


Slika 5.24 Grubo izrezan makroizbrusak iz uzorka A-2



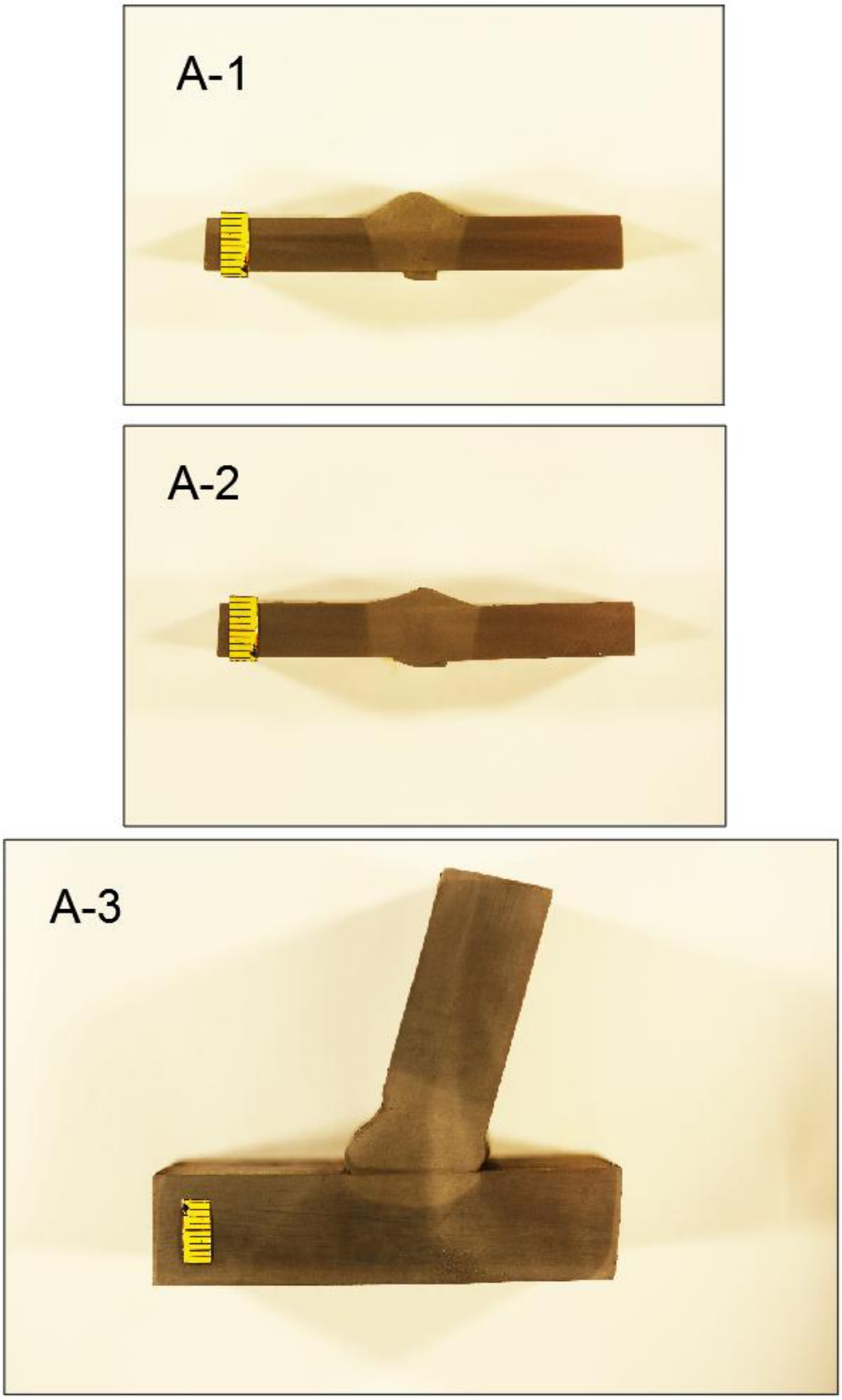
Slika 5.25 Grubo izrezan makroizbrusak iz uzorka B-1

Slika 5.26 Grubo izrezan makroizbrusak iz uzorka B-2

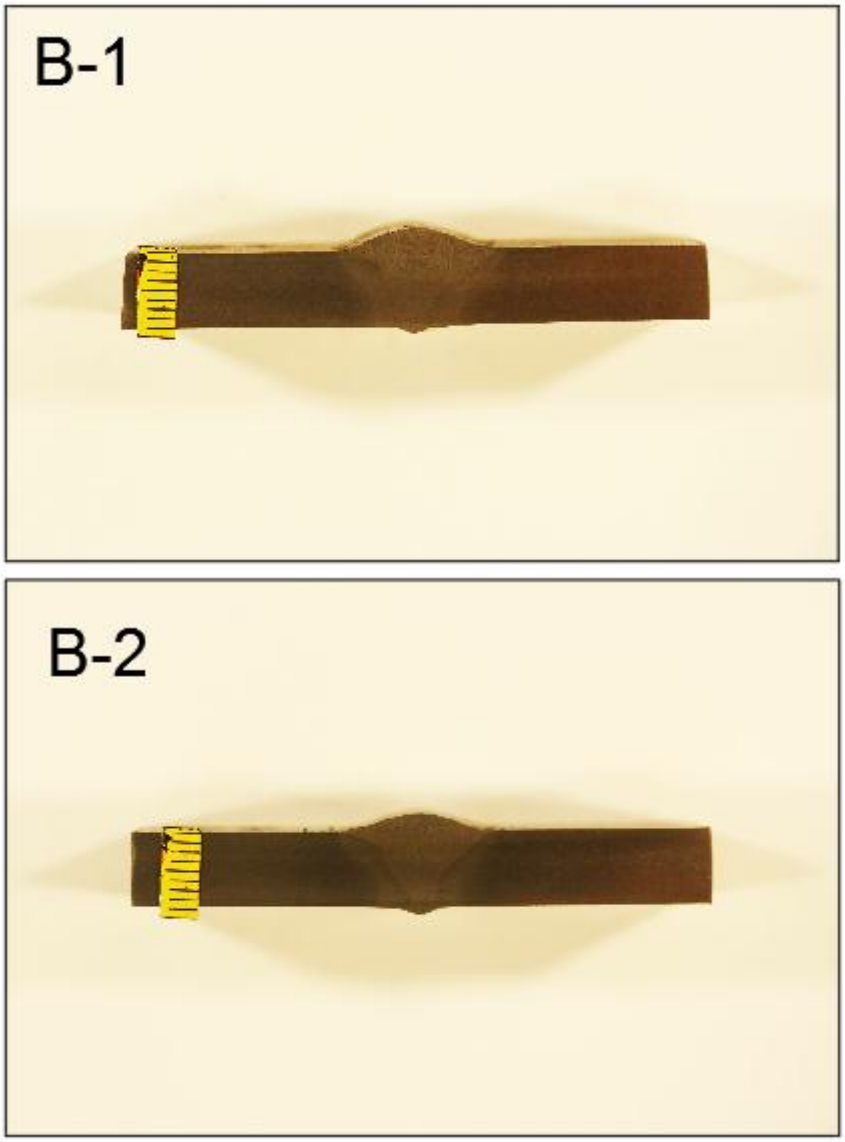


Slika 5.27 Uzorak A-3 nakon operacije ručnog brušenja

Nakon provedenog postupka ručnog brušenja, makroizbrusak je spreman za proces nagrizanja u otopini. Svrha nagrizanja makroizbruska je ta da se poveća kontrast kako bi se lakše uočila granica između osnovnog materijala, ZUT-a i metala zavara. Slikom 5.28 prikazani su makroizbrusci iz uzoraka zavarenih D - arc sustavom, a slikom 5.29 prikazani su makroizbrusci uzoraka zavarenih konvencionalnim MAG postupkom nakon nagrizanja u otopini (5 % nital – otopina dušične kiseline u alkoholu).



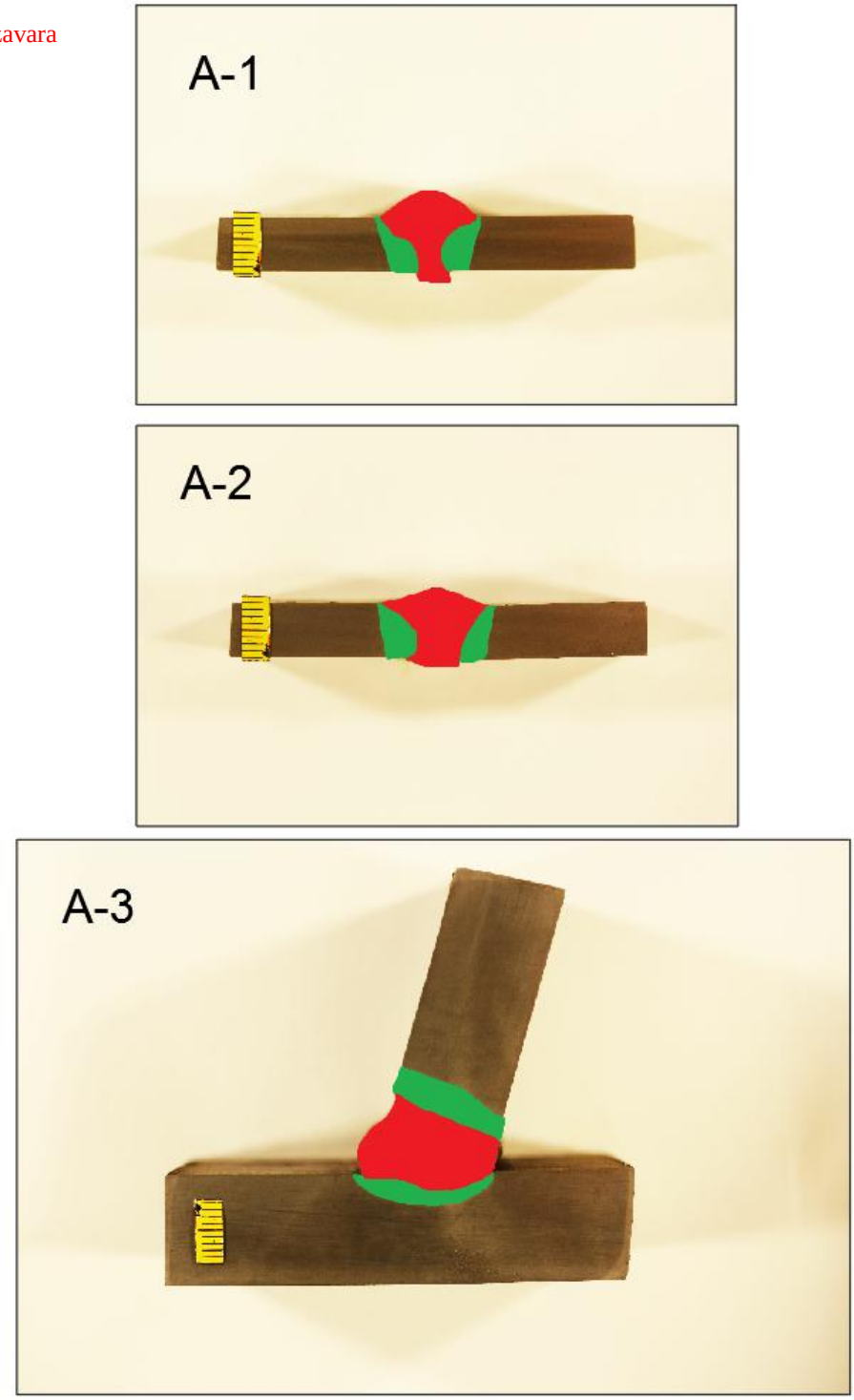
Slika 5.28 Makroizbrusci (A-1, A-2 i A-3) nakon nagrizanja



Slika 5.29 Makroizbrusci (B-1 i B-2) nakon nagrizanja

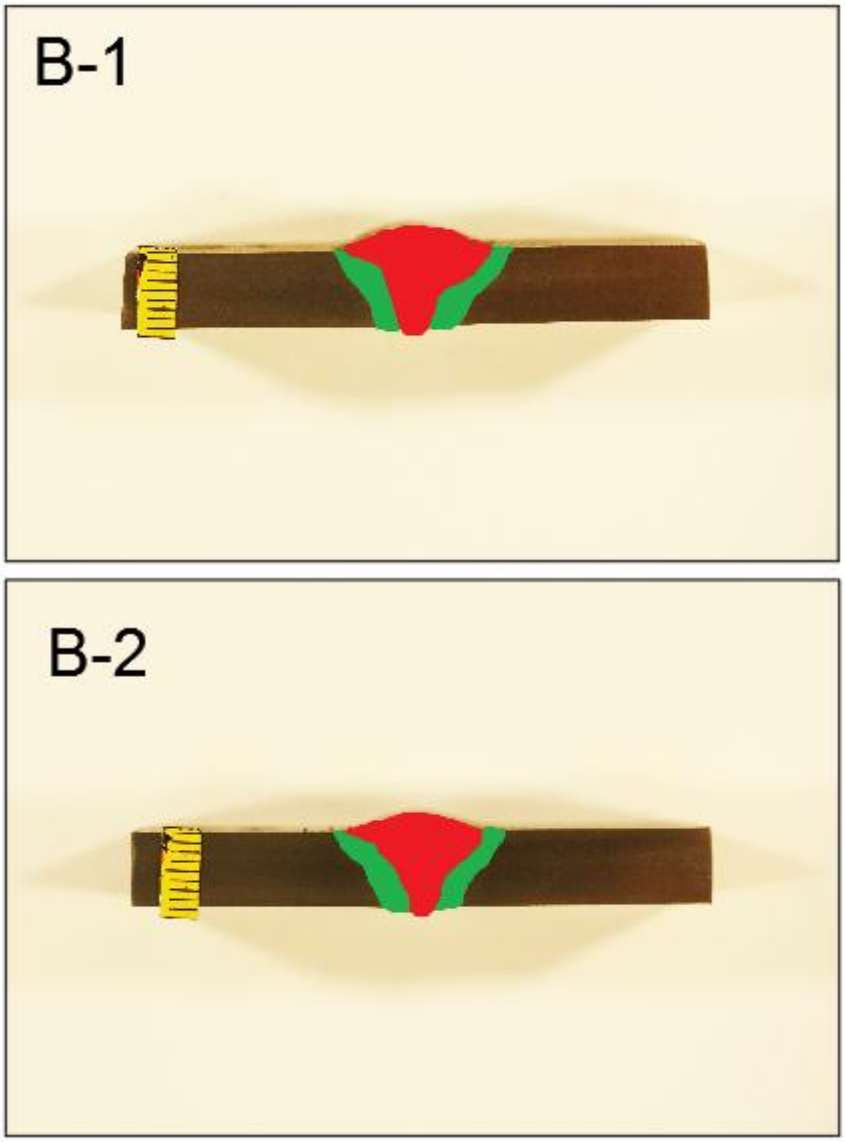
Nakon analize makroizbrusaka, posebna pozornost može se dati uzorku A-3 kod kojeg, na prvu, izgleda kao da je došlo do naljepljivanja na donjoj ploči kutnog spoja. Detaljnijom analizom može se zaključiti da ipak nije došlo do naljepljivanja, već tako izgleda zbog slabijeg nagrizanja ili pojave nečistoća koje daju dojam zavara lošije kvalitete. Na preostalim uzorcima nisu uočene veće nepravilnosti osim jedne (pora, uključak ili nečistoća) na makroizbrusku uzorka B-2, ali za preciznije otkrivanje takvih nepravilnosti uzorci su podvrgnuti nerazornim metodama ispitivanja, u ovom slučaju radiografiji. Označene zone/područja zavara na makroizbrusku pojedinih uzoraka vidljive su na slikama 5.30 i 5.31.

- Metal zavara
- ZUT



Slika 5.30 Zone/područja zavara vidljive na makruizbrusku uzoraka A-1, A-2 i A-3

- Metal zavara
- ZUT

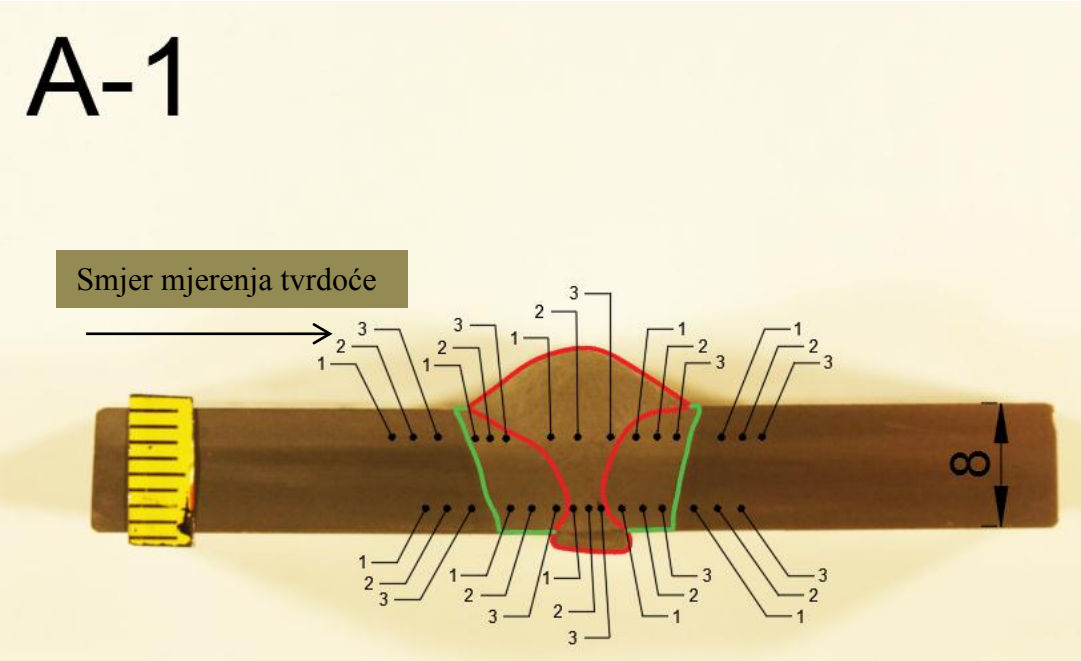


Slika 5.31 Zone/područja zavara vidljive na makroizbrusku uzorka B-1 i B-2

5.5.2. *Mjerenje tvrdoće*

Ispitivanje tvrdoće provedeno je Vickersovom metodom (HV10) na makroizbruscima svih uzoraka. Ispitivanje je provedeno u dvije linije, tj. sa strane lica zavara i sa korijenske strane. Tvrdoća je mjerena na tvrdomjeru Reicherter TM12 prikazan slikom 5.32, a primijenjena sila je iznosila 10 kiloponda, odnosno 98,04 N. Ova metoda mjerenja tvrdoće se zasniva na utiskivanju dijamantnog indentora u obliku četverostrane piramide u materijal određenom silom (u ovom slučaju 98,04 N) te mjerenju veličine otiska u materijalu. Ukoliko je otisak veći, materijal je mekši. U ovom slučaju tvrdoća je mjerena u osnovnom materijalu, ZUT-u i metalu zavara, a vrijeme utiskivanja iznosilo je 10 s. Sheme mjerenja tvrdoće prikazane su slikama 5.33, 5.35, 5.37, 5.39 i 5.41, rezultati mjerenja su dani tablicama 5.7, 5.8, 5.9, 5.10 i 5.11, a grafički prikazi su dani slikama 5.34, 5.36, 5.38, 5.40 i 5.42.

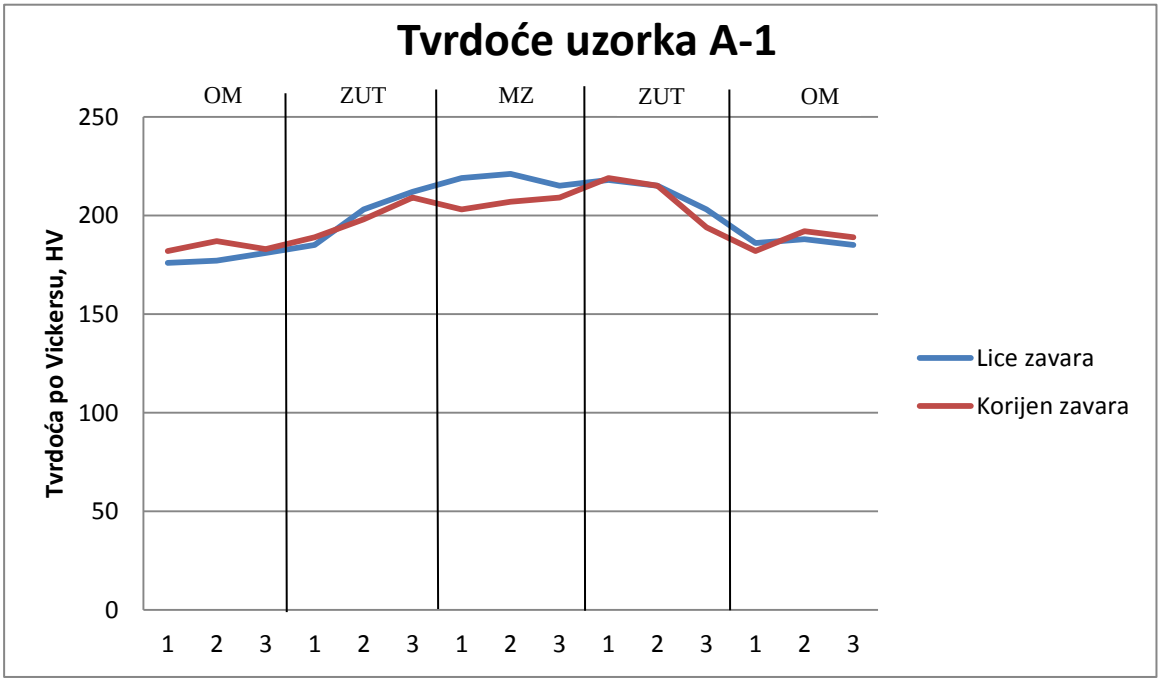
Slika 5.32 Tvrdomjer Reicherter TM12



Slika 5.33 Shema mjerenja tvrdoće uzorka A-1

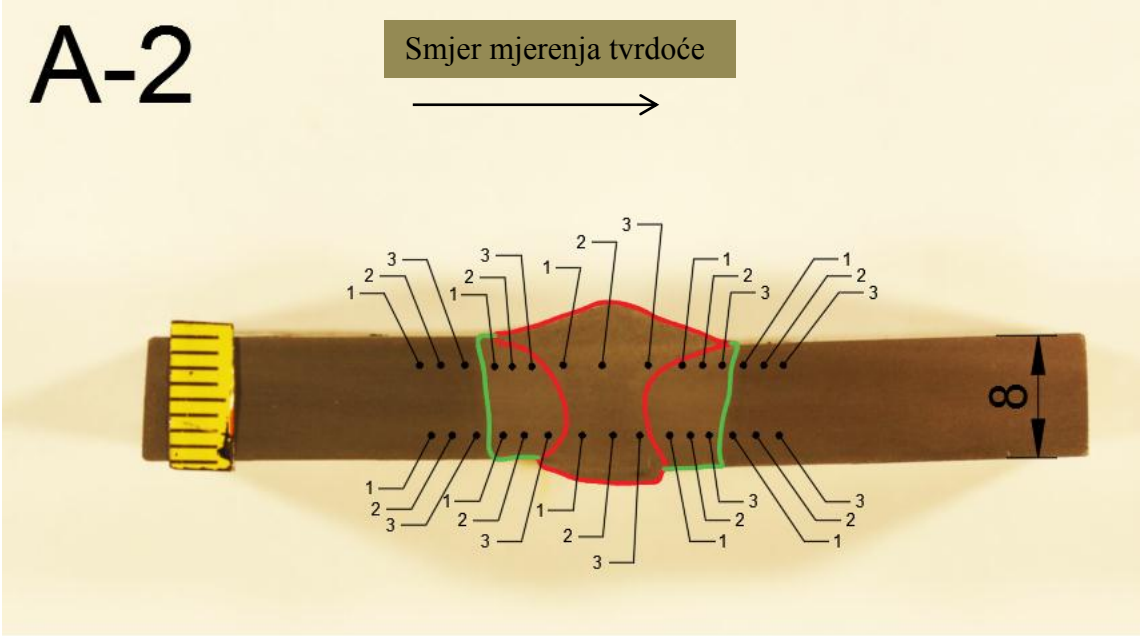
Tablica 5.7 Rezultati mjerenja tvrdoće uzorka A-1

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 5.34 Grafički prikaz tvrdoća uzorka A-1 – HV10

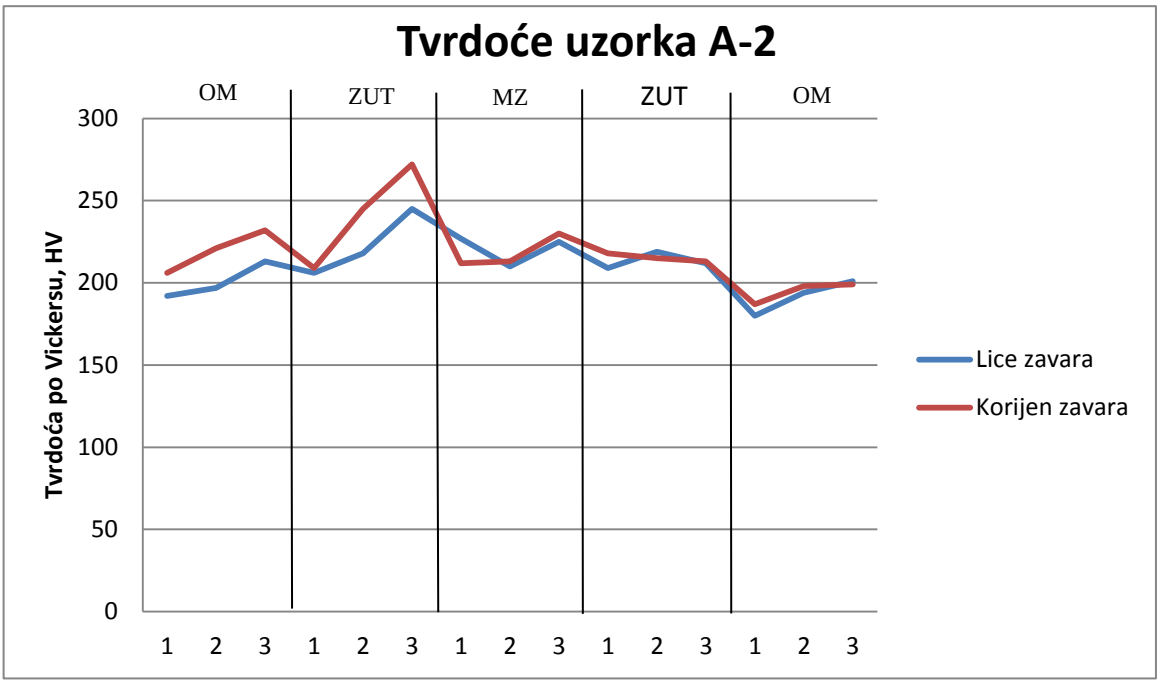
Slikom 5.33 dan je grafički prikaz izmjerenih tvrdoća. Analizom dijagrama može se zaključiti kako je tvrdoća najveća u ZUT-u, ali sa korijenske strane, a sa strane lica zavara je najviša baš u metalu zavara. Tvrdoća je najmanja u osnovnom materijalu kao što je i očekivano.



Slika 5.35 Shema mjerenja tvrdoće uzorka A-2

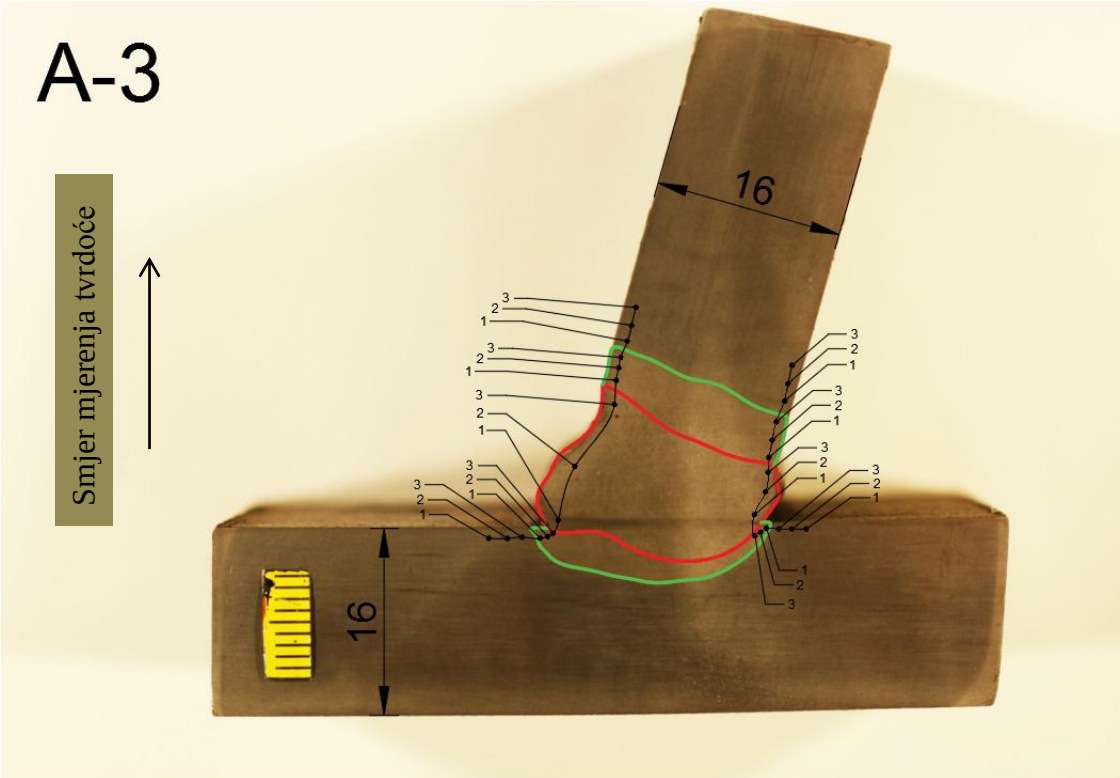
Tablica 5.8 Rezultati mjerenja tvrdoće uzorka A-2

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 5.36 Grafički prikaz tvrdoća uzorka A-2 – HV10

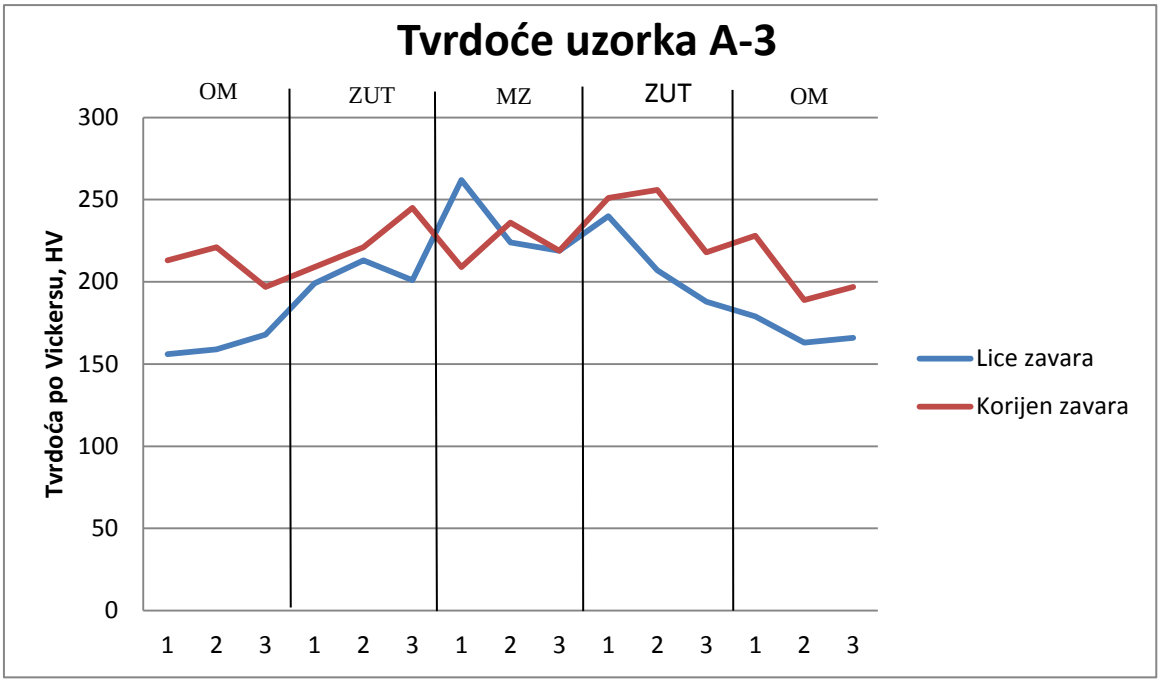
Analizom rezultata tvrdoće može se zaključiti da je ona nešto viša u ZUT-u nego u metalu zavara, a najniža je u osnovnom materijalu.



Slika 5.37 Shema mjerenja tvrdoće uzorka A-3

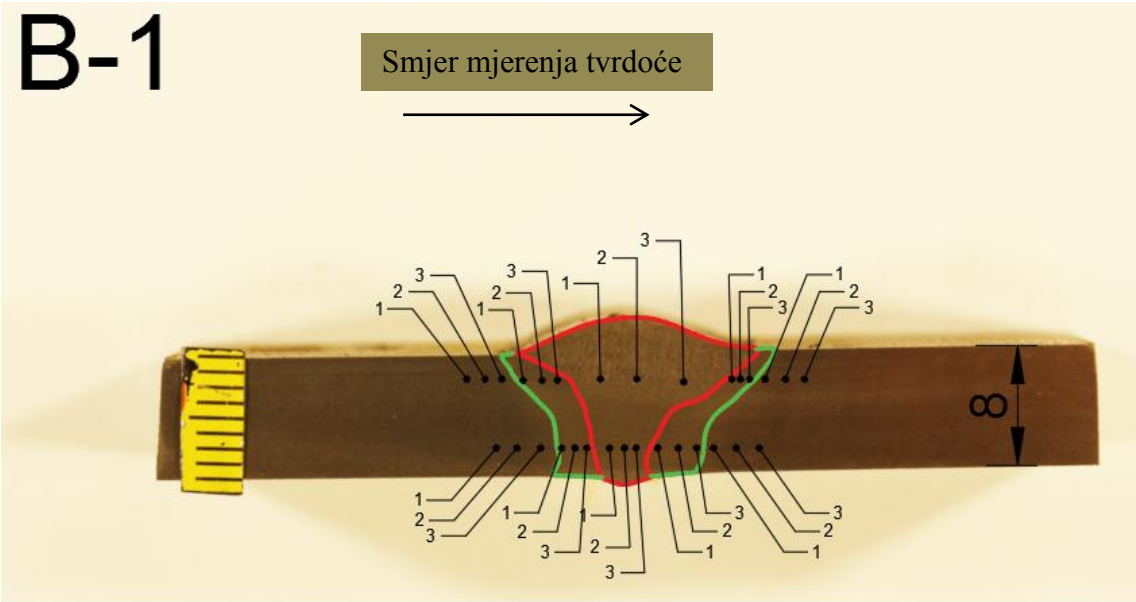
Tablica 5.9 Rezultati mjerenja tvrdoće uzorka A-3

Oznaka		Lice zavara	Korijen zavara
1	Osnovni materijal	156	213
2		159	221
3		168	197
1	ZUT	199	209
2		213	221
3		201	245
1	Metal zavara	262	209
2		224	236
3		219	219
1	ZUT	240	251
2		207	256
3		188	218
1	Osnovni materijal	179	228
2		163	189
3		166	197



Slika 5.38 Grafički prikaz tvrdoća uzorka A-3 – HV10

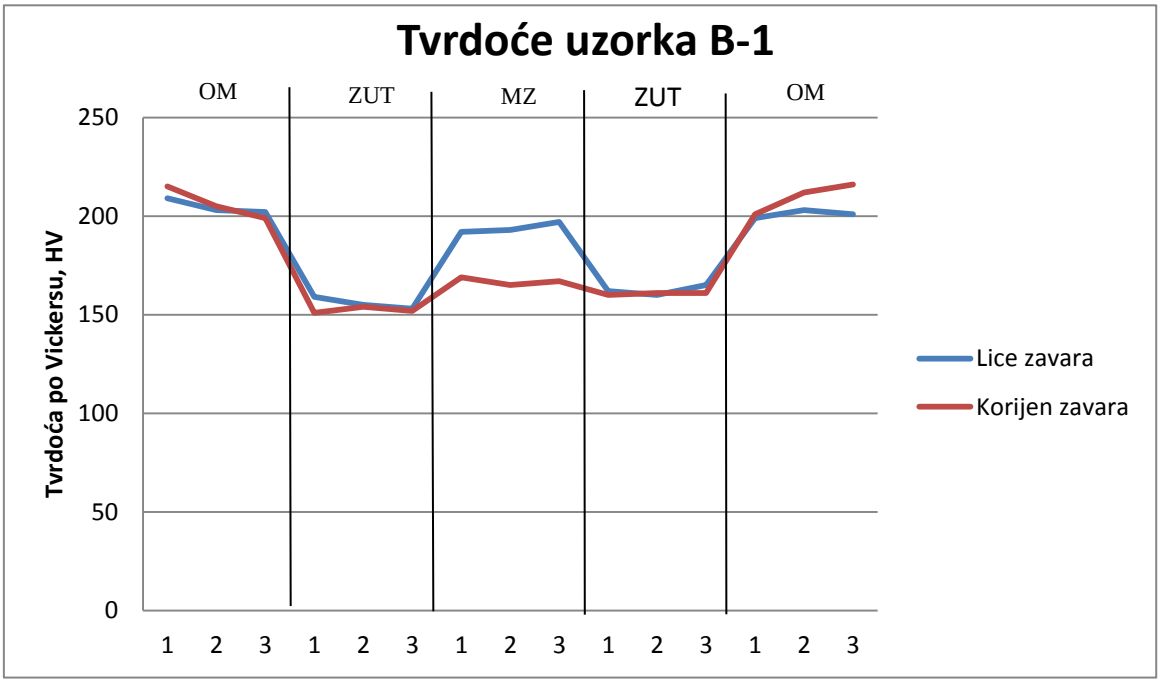
Nakon analize rezultata mjerenja tvrdoće možemo zaključiti da je tvrdoća najveća u ZUT-u, nešto manja u metalu zavara, a najmanja u osnovnom materijalu.



Slika 5.39 Shema mjerenja tvrdoće uzorka B-1

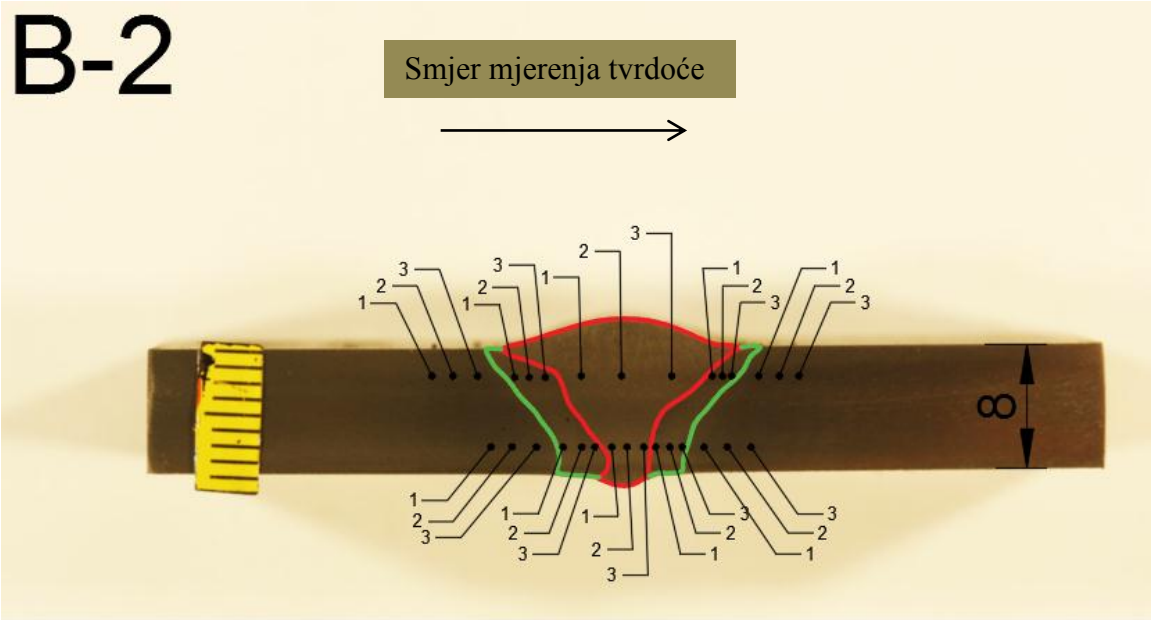
Tablica 5.10 Rezultati mjerenja tvrdoće uzorka B-1

Oznaka		Lice zavara	Korijen zavara
1	Osnovni materijal	209	215
2		203	205
3		202	199
1	ZUT	159	151
2		155	154
3		153	152
1	Metal zavara	192	169
2		193	165
3		197	167
1	ZUT	162	160
2		160	161
3		165	161
1	Osnovni materijal	199	201
2		203	212
3		201	216



Slika 5.40 Grafički prikaz tvrdoća uzorka B-1 – HV10

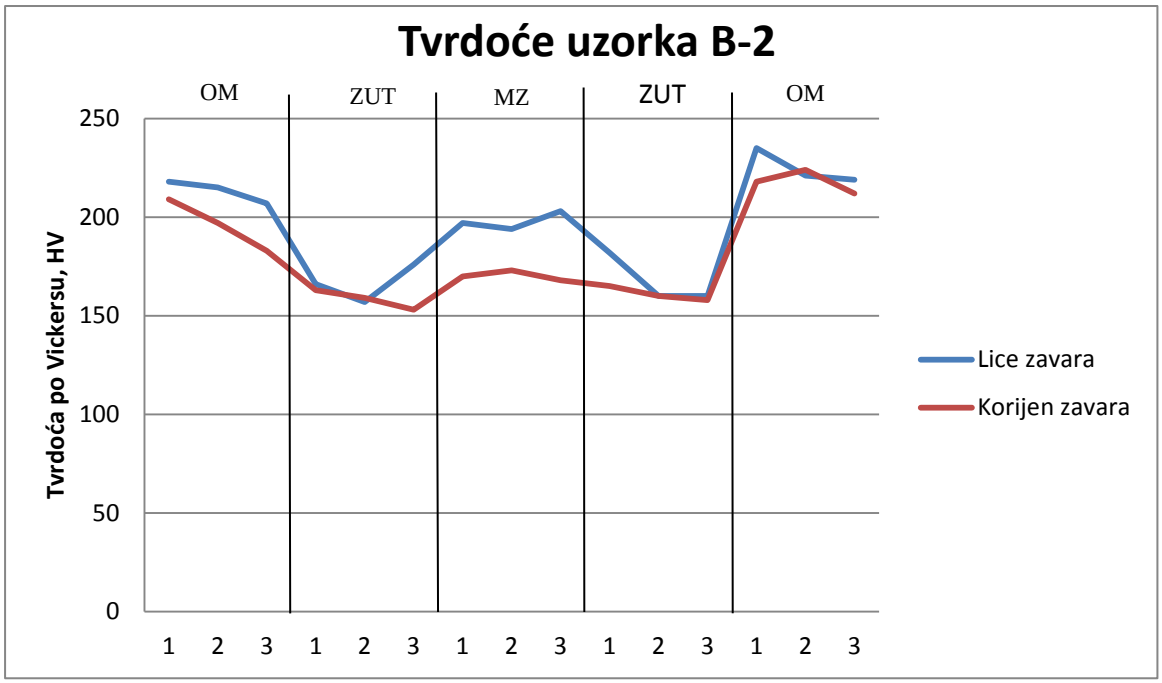
Analizom dobivenih rezultata može se zaključiti da je tvrdoća najviša u osnovnom materijalu i metalu zavara, a nešto niža u ZUT-u.



Slika 5.41 Shema mjerenja tvrdoće uzorka B-2

Tablica 5.11 Rezultati mjerenja tvrdoće uzorka B-2

Oznaka		Lice zavara	Korijen zavara
1	Osnovni materijal	218	209
2		215	197
3		207	183
1	ZUT	166	163
2		157	159
3		176	153
1	Metal zavara	197	170
2		194	173
3		203	168
1	ZUT	182	165
2		160	160
3		160	158
1	Osnovni materijal	235	218
2		221	224
3		219	212



Slika 5.42 Grafički prikaz tvrdoća uzorka B-2 – HV10

Analizom dobivenih rezultata može se zaključiti da je tvrdoća najviša u osnovnom materijalu i metalu zavara, a nešto niža u ZUT-u.

5.5.3. Radiografsko ispitivanje

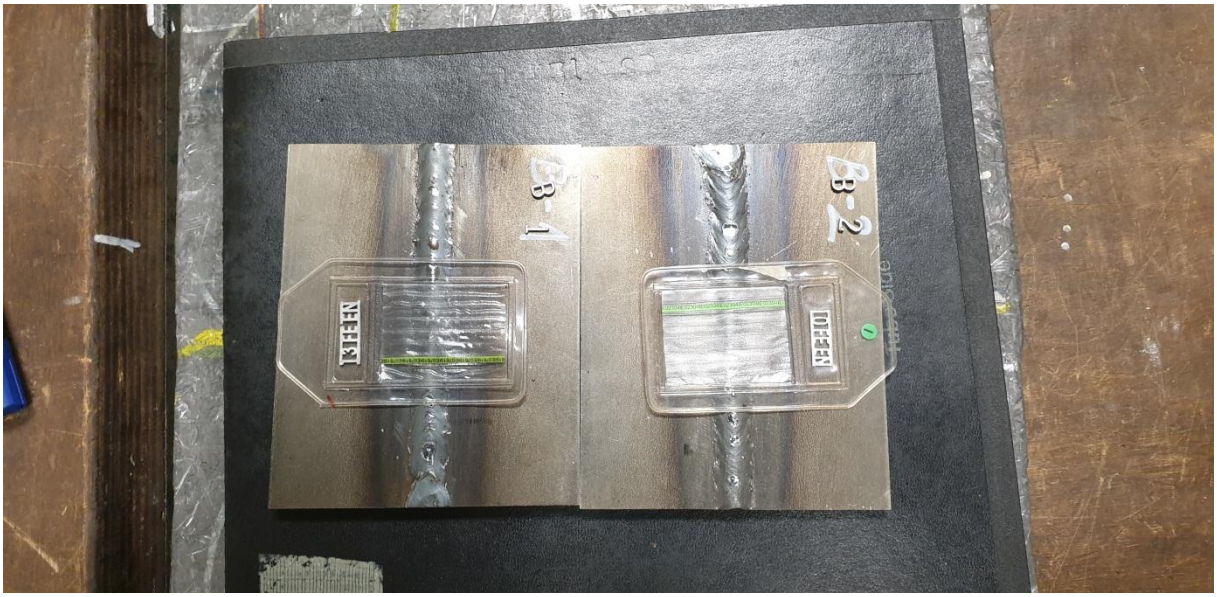
Radiografsko ispitivanje provodi se s ciljem uočavanja nepravilnosti zavara poput pora, uključaka, neprovarenog korijena, pukotina i sl. Na temelju pronađenih nepravilnosti može se ocijeniti kvaliteta zavara, tj. dali zavar zadovoljava određene zahtjeve ili ne. Ispitivanje je provedeno izvorom zračenja (RTG) na slikovne ploče te se skeniranjem slikovni zapis prebacuje u digitalni gdje se analizira prikladnim alatom (u ovom slučaju *iSee*). Tablicom 5.12 dani su podaci o korištenoj opremi kao i parametri snimanja i skeniranja, a slike 5.43 i 5.44 prikazuju pripremljene uzorke za radiografsko ispitivanje. U ovom eksperimentalnom dijelu uzorci A-1, A-2, B-1 i B-2 (sučeljeni spojevi) su podvrgnuti radiografskom ispitivanju, a rezultati su dani slikama 5.45, 5.46, 5.47 i 5.48.

Tablica 5.12 Parametri snimanja i skeniranja te podaci o korištenoj opremi

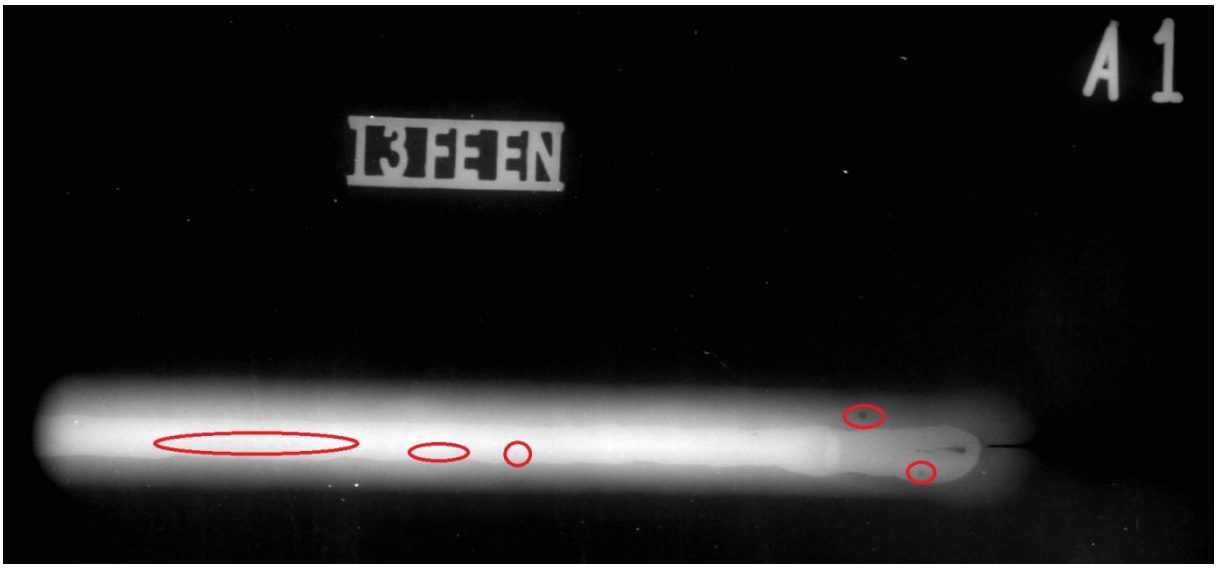
Korištena oprema	
RTG uređaj	Balteau 300 D
Skener	VMI 5100
Slikovna ploča	Kodak industrex flex Blue
Parametri snimanja	
Napon	150 kV
Struja	4 mA
Film fokus udaljenost	700 mm
Vrijeme	4,5 min
Parametri skeniranja	
Napon lasera	15 V

Napon fotomultiplikatora	5,25 V
Rezolucija skeniranja	50 μm

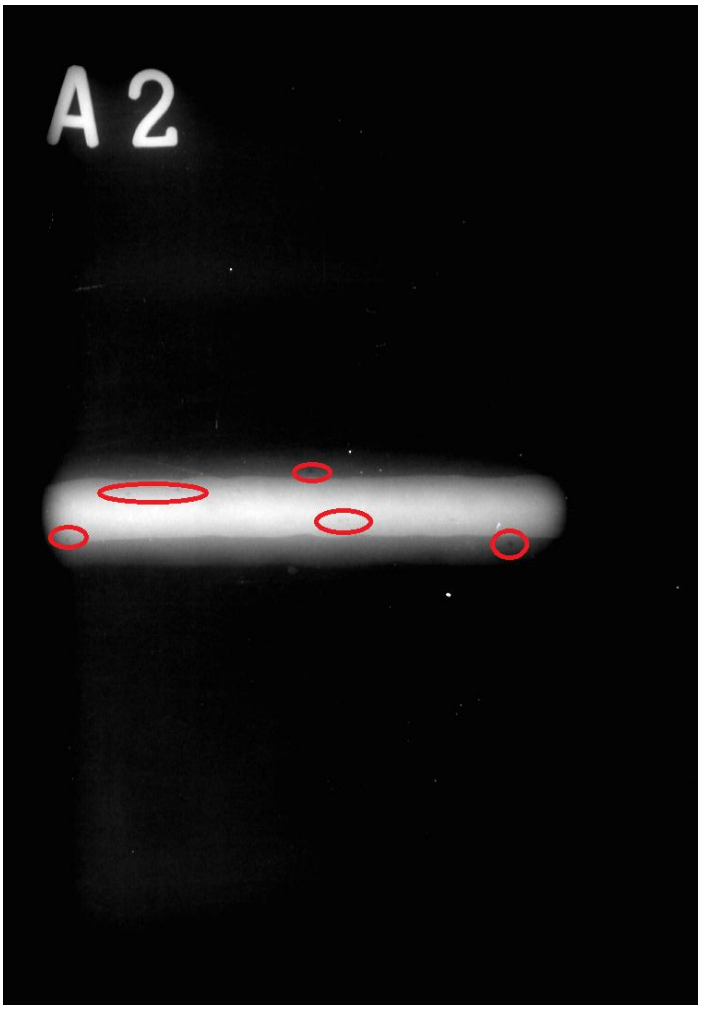
Slika 5.43 Uzorci A-1 i A-2 pripremljeni za rendgensko snimanje



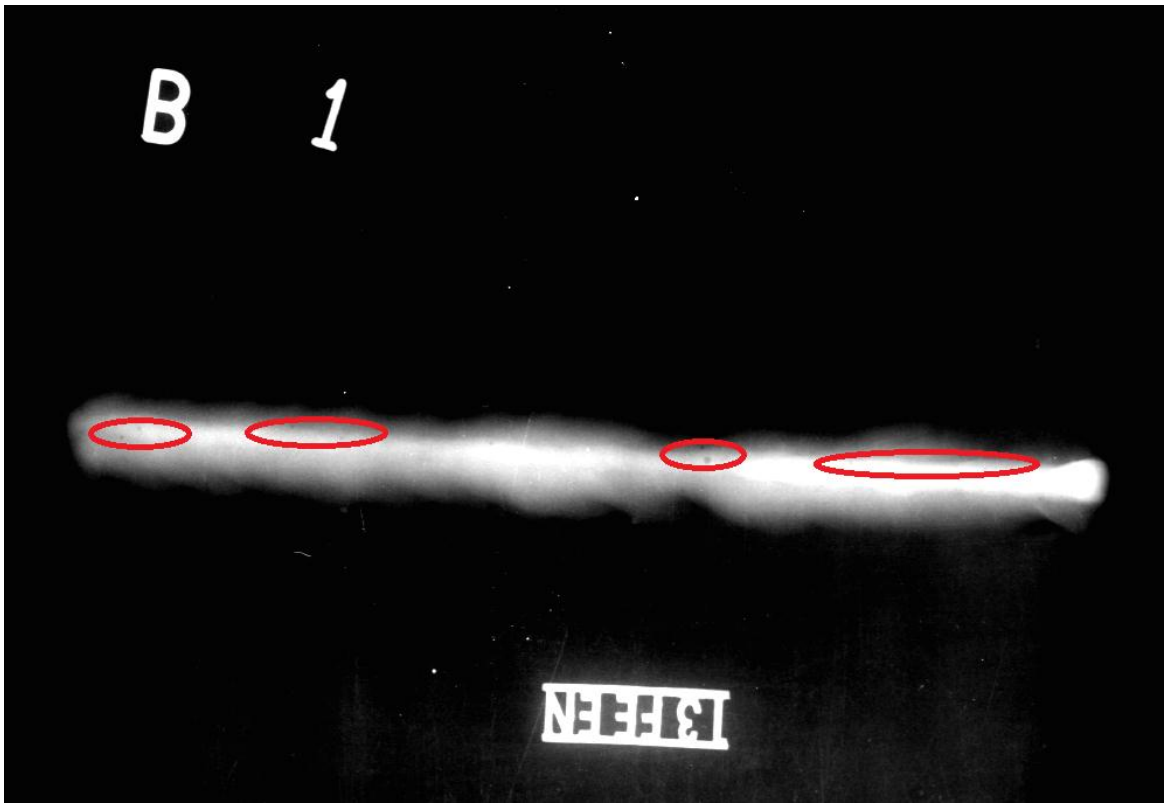
Slika 5.44 Uzorci B-1 i B-2 pripremljeni za rendgensko snimanje



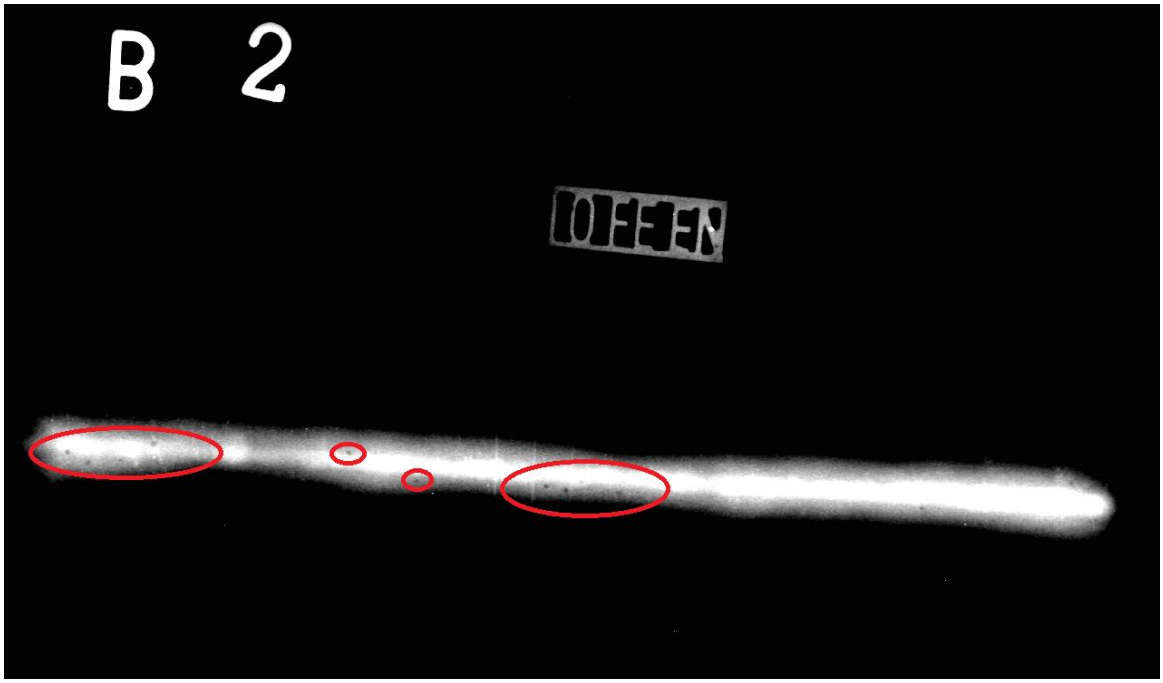
Slika 5.45 Rendgenski snimak uzorka A-1



Slika 5.46 Rendgenski snimak uzorka A-2



Slika 5.47 Rendgenski snimak uzorka B-1



Slika 5.48 Rendgenski snimak uzorka B-2

Detaljnom analizom radiografskih snimaka može se uočiti jedna nepravilnost koja je zajednička svim uzorcima, a to je porozitet. Poroznost, bilo u obliku pojedinačnih pora ili gnijezda pora, je vrlo česta pojava u zavarivanju, a neki od mogućih razloga su nedostatak plina, nečistoće u osnovnom materijalu, nedovoljno čišćenje površine između prolaza i slično. Osim poroznosti, kod uzoraka B-1 i B-2 (konvencionalni MAG postupak) može se uočiti i loša geometrija lica zavara, a razlog tomu može biti prevelika struja prilikom zavarivanja završnog prolaza pa dolazi do otežane kontrole taline i pojave zajeda.

5.6. Isplativost korištenja D-arc sustava zavarivanja

Kod analize isplativosti korištenja pojedinog postupka zavarivanja potrebno je uz tehničke faktore uzeti u obzir i ekonomske faktore poput cijene opreme i vremena trajanja samog procesa zavarivanja. Tablicom 5.13 dane su prednosti i nedostaci za D-arc i konvencionalni MAG postupak zavarivanja.

Tablica 5.13 Prednosti i nedostaci D-arc i konvencionalnog MAG postupka [5]

KRITERIJ	POSTUPAK	
	D–ARC	MAG KONVENCIONALNI
Intermitencija	+	-
Brzina zavarivanja	+	-
Mogućnost jednoprolaznog zavarivanja debljih stijenki (do 20 mm)	+	-
Geometrija zavara (uglađenost površine)	+/-	+
Pojava nepravilnosti u zavaru	+/-	+
Mikrostruktura	+/-	+
Proizvodnost	+	-
Spektar debljina stijenki koji se zavaruje	-	+
Cijena investicije u opremu (robotizirani sustav)	-	+
Pojava deformacija tijekom zavarivanja	+	-
Mogućnost primjene postupka na raznorodnim metalima	-	+
Jednostavnija priprema/izvedba spoja	+	-

Analizom prethodne tablice može se zaključiti da oba postupka imaju neke određene prednosti. Konvencionalnim MAG postupkom dobiva se visoka kvaliteta zavara, no primjenom D - arc sustava za zavarivanje konstrukcijskih čelika i pravilnim odabirom parametara dobiva se zadovoljavajuća kvaliteta zavara uz mnoge druge prednosti poput manjeg ukupnog unosa topline, a samim time i manjim deformacijama, skraćeno vrijeme pripreme i zavarivanja, što izravno utječe na proizvodnost. Neki od nedostataka D-arc sustava koje valja napomenuti su visoka cijena opreme, a samim time što je postupak potpuno automatiziran, potreban je i robot koji smanjuje fleksibilnost postupka. Analizom prednosti i nedostataka D - arc sustava može se zaključiti da je ovakav sustav isplativ za ona poduzeća koja proizvode dijelove od konstrukcijskih čelika većih debljina i to u većim serijama gdje nije potrebna visoka fleksibilnost sustava zavarivanja.

6. ZAKLJUČAK

Kod zavarivanja nelegiranih čelika većih debljina poželjna je što veća učinkovitost postupka zavarivanja. Učinkovitost konvencionalnog štrcajućeg luka postaje nedostatna pa dolazi do razvoja brojnih njegovih modifikacija kojima je cilj ostvariti što veći depozit materijala i time skratiti vrijeme zavarivanja i tako povećati proizvodnost. Kod takvih postupaka postoji jedan veliki nedostatak, a to je relativno niska penetracija štrcajućeg luka. Primjenom zakopanog luka osigurava se veća penetracija pa je njegov razvoj vrlo poželjan u industriji. Naime, zakopani luk je prije nekoliko godina proučavan u Japanu, gdje je zabilježena njegova penetracija od 10 milimetara u jednom prolazu. U prošlosti se ovaj način prijenosa metala rijetko koristio zbog svoje podložnosti nestabilnom ponašanju. Zahvaljujući niskofrekventnoj moduliranoj kontroli napona zakopani luk je stabiliziran te je razvijen novi visokoučinski postupak MAG zavarivanja nazvan "D - Arc" sustav koji omogućava veliku penetraciju i visoku stopu depozita materijala. Kao takav, sa sobom nosi veliki niz prednosti u odnosu na konvencionalni MAG postupak. D - arc sustav daje mogućnost zavarivanja većih debljina u jednom prolazu s manjim troškovima pripreme spoja, višestruko smanjuje vrijeme pripreme i procesa zavarivanja i osigurava manji stupanj deformacija. S teorijskog aspekta D-arc sustav zavarivanja čini se kao vrlo efikasna i isplativa investicija za zavarivanje konstrukcijskih čelika većih debljina unatoč skupoj opremi (robot, izvori struje i sl.) i manjem stupnju fleksibilnosti. Eksperimentalni dio ovoga rada sastojao se od ispitivanja kvalitete zavarenih spojeva dobivenih D - arc sustavom zavarivanja te njihovom usporedbom sa zavarenim spojevima dobivenih konvencionalnim štrcajućim lukom. Nakon detaljne analize dobivenih rezultata može se zaključiti kako, pravilnim odabirom parametara zavarivanja i pravilnom pripremom spoja, D - arc postupak zavarivanja ipak ima velikih prednosti u odnosu na konvencionalni štrcajući luk, a neke od njih su velika penetracija sa mogućnošću velikog depozita materijala što izravno povećava produktivnost, a samim time smanjuje proizvodne troškove stoga je ovakav sustav zavarivanja itekako isplativ u velikoserijskoj proizvodnji. Analizom rezultata dobivenih mjerenjem tvrdoće može se ustanoviti kako kod D - arc postupka zavarivanja nema pada tvrdoće u ZUT-u, dok kod konvencionalnog štrcajućeg luka to nije slučaj. Naravno, uz neke, već spomenute, nedostatke D - arc sustav zahtijeva precizno podešavanje parametara pa je njihova optimizacija od ključnog značaja za dobivanje zavara zahtijevane kvalitete. S obzirom na to da je ovakav sustav još relativno nov i slabo korišten u industriji, potencijala za daljnji razvoj i napredak definitivno ima.

LITERATURA

[1] Kralj, S., Kožuh, Z., Andrić, Š.: Zavarivački i srodni postupci, Zagreb, 2015.

[2] Golubić, M.: Usporedna analiza zavarenih spojeva izrađenih konvencionalnim MAG i D-arc postupkom, Diplomski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2018.

[3] Torer, I.: Primjena MAG CBT postupka za aditivnu proizvodnju električnim lukom i žicom, Diplomski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2017.

[4] Pavelić, A.: Elektrolučno zavarivanje, Školska knjiga, Zagreb, 1987.

[5] Cerovečki, B.: Primjena D-Arc postupka za zavarivanje debelostjenih konstrukcija, Diplomski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2018.

[6] http://www.daihen-varstroj.si/, preuzeto s interneta 01.02.2019.

[7] Dzelnitzki, D.: Prednosti visokoučinskog MAG zavarivanja, Zavarivanje vol.55, pp. 15.-21., siječanj-travanj, 2012

[8] Mikulić, M.: Modificirani MAG postupci za visokoučinsko zavarivanje, Diplomski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2018.

[9] Vuherer, T., Garašič, I., Kastelic, P.: Properties of Butt-weld joint welded by new D-arc process, Doc.XII-2373-18 /212-1537-18 /IV-1374-18, FSB Zagreb, Slovenija, 2018.

[10] Hayato, B.: Single pass full penetration joining for heavy plate steel using high current GMA process (D-ARC); Zbornik radova zavarivačke tehnologije, Japan, 2017.

[11] http://www.splav-kharkov.com/en/e_mat_start.php?name_id=886 , preuzeto s interneta 03.01.2021.

[12] https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=6022, preuzeto s interneta 03.01.2021

[13] https://www.ezg.hr/proizvodi/wire/EZSG3.html , preuzeto s interneta 03.01.2021.

[14] https://www.ezg.hr/proizvodi/wire/EZSG2.html , preuzeto s interneta 03.01.2021.

PRILOZI

I. CD-R disc