

# D-arc zavarivanje čimova velikih debljina

---

Grd, David

Undergraduate thesis / Završni rad

2019

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://um.nsk.hr/um:nbn:hr:235:425053>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-25**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

**David Grd**

Zagreb, 2019.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Zoran Kožuh, dipl. ing.

Student:

David Grd

Zagreb, 2019.

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 završnog rada.

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

David Grd



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



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

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

## ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **DAVID GRD**

Mat. br.: 0035203605

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **D – ARC ZAVARIVANJE LIMOVA VELIKIH DEBLJINA**

Naslov rada na engleskom jeziku: **D – ARC WELDING 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 posebni 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 parametre zavarivanja za D – Arc način prijenosa metala za zavarivanje ploča velikih debljina u svrhu postizanje potpune penetracije. Dobivene zavarene spojeve potrebno je podvrgnuti razornim i/ili nerazornim ispitivanjima te ocijeniti kvalitetu zavarenog spoja. U konačnici je analizom dobivenih podataka potrebno dokazati ili opovrgnuti isplativost korištenja D – Arc modificiranog načina prijenosa metala spram konvencionalnog prijenosa (štrcajući luk).

Zadatak zadan:  
29. studenog 2018.

Rok predaje rada:  
1. rok: 22. veljače 2019.  
2. rok (izvanredni): 28. lipnja 2019.  
3. rok: 20. rujna 2019.

Predviđeni datumi obrane:  
1. rok: 25.2. - 1.3. 2019.  
2. rok (izvanredni): 2.7. 2019.  
3. rok: 23.9. - 27.9. 2019.

Zadatak zadao:

Prof.dr.sc. Zoran Kožuh

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Branko Bauer

## SADRŽAJ

SADRŽAJ .....	I
POPIS SLIKA .....	III
POPIS TABLICA.....	VI
POPIS KRATICA .....	VII
POPIS OZNAKA .....	IX
SAŽETAK.....	X
SUMMARY .....	XI
1. UVOD.....	1
2. MAG ZAVARIVANJE .....	2
2.1. Općenito o MAG postupku zavarivanja.....	2
2.2. Žice za MAG zavarivanje .....	4
2.3. Uloga plinova pri MAG zavarivanju .....	5
2.4. Strojevi i oprema za MAG zavarivanje.....	8
2.5. Prijenos metala pri MAG zavarivanju .....	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. Primjena D-arc sustava za zavarivanje većih debljina .....	38
5. EKSPERIMENTALNI DIO .....	42
5.2. Osnovni materijal .....	44
5.3. Dodatni materijal i zaštitni plin .....	45
5.4. Postupak zavarivanja uzoraka D-arc sustavom .....	46
5.4.1. Priprema uzoraka za zavarivanje .....	46
5.4.2. Postupak zavarivanja ispitnih uzoraka .....	50
5.5. Provedena ispitivanja .....	55
5.5.1. Analiza makroizbruska .....	55
5.5.2. Mjerenje tvrdoće .....	60
5.5.3. Radiografsko ispitivanje .....	62
5.6. Isplativost korištenja D-arc sustava zavarivanja .....	65
6. ZAKLJUČAK .....	67
LITERATURA .....	68
PRILOZI .....	69

## 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	Oprema za MAG zavarivanje [3] .....	9
Slika 2.7	Karakteristična rješenja dovođenja žice kod 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 prijena 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 zavarivanje zakopanim lukom [5] .....	37
Slika 5.1	Oprema D-arc sustava za zavarivanje [5].....	43
Slika 5.2	Specifikacija dodatnog materijala (EZ – SG 2) [12].....	45
Slika 5.3	Priprema spoja kod uzorka (1) .....	46
Slika 5.4	Priprema spoja kod uzorka (2) .....	47
Slika 5.5	Pripremljen uzorak (1).....	47
Slika 5.6	Uzorak (1) pozicioniran na stolu za zavarivanje .....	48
Slika 5.7	Pripremljen uzorak (2) bez krajnjih pločica .....	48
Slika 5.8	Pripremljen uzorak (2) sa krajnjim pločicama .....	49
Slika 5.9	Uzorak (2) pozicioniran na stolu za zavarivanje .....	49
Slika 5.10	Shema položaja zavarivanja uzorka (1).....	50
Slika 5.11	Shema zavarenog uzorka (1) sa označenim prolazima .....	51
Slika 5.12	Uzorak (1) nakon zavarivanja .....	52
Slika 5.13	Shema položaja zavarivanja uzorka (2).....	53
Slika 5.14	Shema zavarenog uzorka (2) sa označenim prolazima .....	53
Slika 5.15	Uzorak (2) nakon zavarivanja .....	54
Slika 5.16	Sučeljeni zavar uzorka (2).....	55
Slika 5.17	Grubo izrezan makroizbrusak iz uzorka (1) .....	56
Slika 5.18	Makroizbrusak nakon operacije ručnog brušenja.....	56
Slika 5.19	Uređaj za brušenje i poliranje (Phoenix alpha) .....	57
Slika 5.20	Makroizbrusak nakon nagrizanja u otopini .....	57
Slika 5.21	Oprema za slikanje makroizbruska (Kaiser RS2 + Canon).....	58
Slika 5.22	Zone/područja zavara vidljive na makroizbrusku uzorka (1).....	59
Slika 5.23	Dimenzije kutnog zavara uzorka (1) .....	59
Slika 5.24	Tvrdomjer Reicherter TM12 .....	60
Slika 5.25	Shema mjerenja tvrdoće .....	61

---

Slika 5.26 Grafički prikaz tvrdoća uzorka (1) – HV10 .....	62
Slika 5.27 Pripremljeni komad za radiografsko ispitivanje.....	64
Slika 5.28 Radiografski snimci zavara na uzorku (2).....	64

## 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 S355 [11] .....	44
Tablica 5.2 Vrijednosti granice razvlačenja i vlačne čvrstoće za čelik S355 [11].....	44
Tablica 5.3 Parametri zavarivanja za uzorak (1) .....	51
Tablica 5.4 Parametri zavarivanja za uzorak (2) .....	54
Tablica 5.5 Rezultati mjerenja tvrdoće.....	61
Tablica 5.6 Parametri snimanja i skeniranja te podaci o korištenoj opremi.....	63
Tablica 5.7 Prednosti i nedostaci D-arc i konvencionalnog MAG postupka [5] .....	65

**POPIS KRATICA**

<b>Kratika</b>	<b>Opis</b>
Ar	Argon
CO <sub>2</sub>	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**

<b>Oznaka</b>	<b>Jedinica</b>	<b>Opis</b>
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.

U eksperimentalnom dijelu provedena su ispitivanja kvalitete zavara dobivenih visokoučinskim D-Arc postupkom zavarivanja. Ispitivanja su se sastojala od vizualne analize makroizbruska, mjerenja tvrdoće te radiografskog snimanja zavara. Nakon provedenih ispitivanja dobiveni rezultati su uspoređeni sa konvencionalnim štrcajućim lukom.

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.

In the experimental part of the thesis, the quality of welds obtained by the high-efficient D-Arc welding process is tested. 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

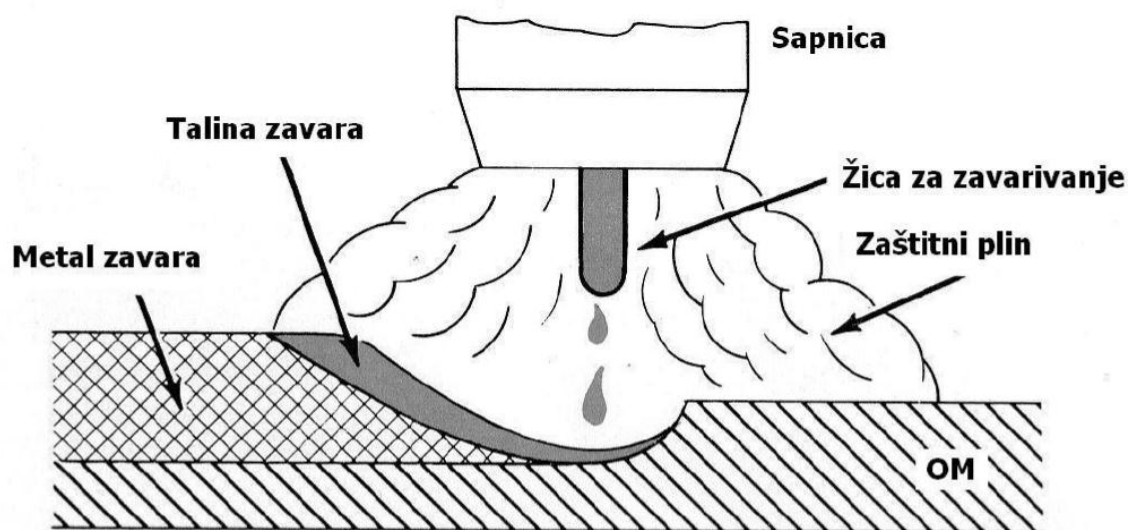
Zavarivanje je postupak spajanja dvaju ili više istovrsnih ili različitih materijala taljenjem ili pritiskom, sa ili bez dodavanja dodatnog materijala na način da se dobije homogeni zavareni spoj. Zavarivanje je jedna od najčešće primjenjivanih tehnologija za spajanje metalnih materijala u industriji. 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 ZAVARIVANJE

MIG/MAG postupak zavarivanja je elektrolučni postupak zavarivanja koji kao izvor topline potrebne za taljenje osnovnog i dodatnog materijala koristi električni luk uspostavljen između radnog komada i taljive, kontinuirano dobavljive elektrode u obliku žice. Cjelokupni proces se odvija u atmosferi zaštitnog plina. Ovisno o tome koristi li se aktivan ( $CO_2$ ,  $Ar - CO_2$  mješavine) ili inertni ( $Ar, He$ ) zaštitni plin postupak nosi oznaku MIG (**Metal Inert Gas**) ili MAG (**Metal Active Gas**). Sam uređaj je u oba slučaja principijelno isti, iako ima razlika u detaljima koje dolaze do izražaja kod suvremenih kompjuteriziranih programabilnih uređaja [1].

### 2.1. Općenito o MAG postupku zavarivanja

Pogonski sistem dodaje žicu konstantnom brzinom kroz cijevni paket i pištolj 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 dobava dodatnog materijala tj. žice je mehanizirana dok je vođenje pištolja ručno. Kod automatskog postupka i vođenje pištolja je mehanizirano ili je glava s pištoljem nepomična pa radni komad ima mehanizirano gibanje. Slika 2.1 daje shematski prikaz MAG postupka zavarivanja [1].



Slika 2.1 Shema MAG postupka zavarivanja [2]

**Prednosti [2]:**

- mogućnost zavarivanja širokog spektra materijala različitih debljina
- zavarivanje u svim položajima
- visoka iskoristivost dodatnog materijala
- visoka učinkovitost postupka u usporedbi s ostalim elektrolučnim postupcima
- odličan izgled zavarenih spojeva
- relativno jednostavna obuka zavarivača
- manji utjecaj zavarivača na proces zavarivanja
- stvaranje manje količine zavarivačkih plinova u usporedbi s REL postupkom
- lako i brzo čišćenje zavarenih spojeva, minimalno rasprskavanje kod prijenosa štrcajućim lukom
- nizak unos vodika u metal zavara (uglavnom manje od 5 ml/100 g metala zavara)
- manja deformacija osnovnih materijala u slučajevima primjene suvremenih MIG/MAG postupaka
- jednostavna automatizacija procesa
- niža cijena dodatnih materijala i općenito niža cijena zavara po jedinici duljine u usporedbi s ostalim elektrolučnim postupcima
- mogućnost primjene različitih plinskih mješavina
- mogućnost primjene praškom punjene žice
- manji unos topline kod prijenosa metala kratkim spojevima – pogodno za zavarivanje tanjih komada
- velik unos topline kod prijenosa metala štrcajućim lukom – pogodno za zavarivanje debljih komada

**Nedostaci: [2]**

- nemogućnost zavarivanja u prisilnim zavarivačkim položajima prilikom upotrebe aksijalnog prijenosa metala štrcajućim lukom
- potreba za primjenom skupljih zaštitnih plinova kod prijenosa metala štrcajućim lukom (mješavine zaštitnih plinova na bazi Ar, osjetno su skuplje od čistog  $CO_2$ )
- mogućnost pojave pogrešaka u zavarenim spojevima kod terenskih radova zbog vanjskih utjecaja

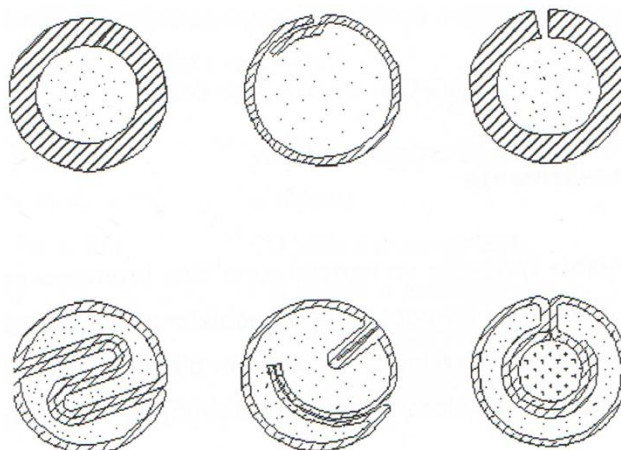
- problemi kod dovođenja dodatnog materijala (žice) kod zavarivanja aluminija i aluminijevih legura
- veći broj grešaka uslijed neodgovarajuće tehnike rada i parametara zavarivanja
- rasprskavanje kod prijenosa metala kratkim spojevima, potreba za dodatnim čišćenjem
- opasnost od grešaka u početku i završetku zavarivanja
- složenost uređaja i opreme za zavarivanje

**Parametri:**

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

**2.2. Žice za MAG zavarivanje**

Kod MAG zavarivanja najčešće se koriste pune žice promjera od 0,6 do 2,4 mm. Površina žica mora biti vrlo glatka, vrlo točnih dimenzija te uredno namotana na kolut kako bi se izbjegli problemi sa dodavanjem materijala prilikom zavarivanja. Čelične žice su pobakrene ili poniklane kako bi se osigurala otpornost na koroziju i poboljšao električni kontakt između žice i radnog komada. Za MAG zavarivanje mogu se koristiti i praškom punjene žice. Presjeci takvih žica mogu biti različiti, a ovisno o načinu proizvodnje (slika 2.2). Ovisno o vrsti punjene žice neke se koriste uz plinsku zaštitu, a neke same stvaraju zaštitnu atmosferu raspadanjem jezgre pa nema potrebe za dodatnim zaštitnim plinom [1].



**Slika 2.2 Presjeci praškom punjenih žica [1]**

### **2.3. Uloga plinova pri MAG zavarivanju**

Mjesto zavarivanja i kapljice rastaljenog metala za vrijeme leta kroz električni luk i talina moraju se zaštititi od djelovanja okolne atmosfere. Ta zaštita se uspješno može provesti uporabom odgovarajućih plinova. Ovisno o materijalu koji se zavaruje bira se odgovarajući plin koji može biti inertan ili aktivan [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 - 18 % u korist argona. Zaštitni plinovi se na mjesto zavarivanja dovode kroz sapnicu koja je smještena oko kontaktne cjevčice na samom pištolju.

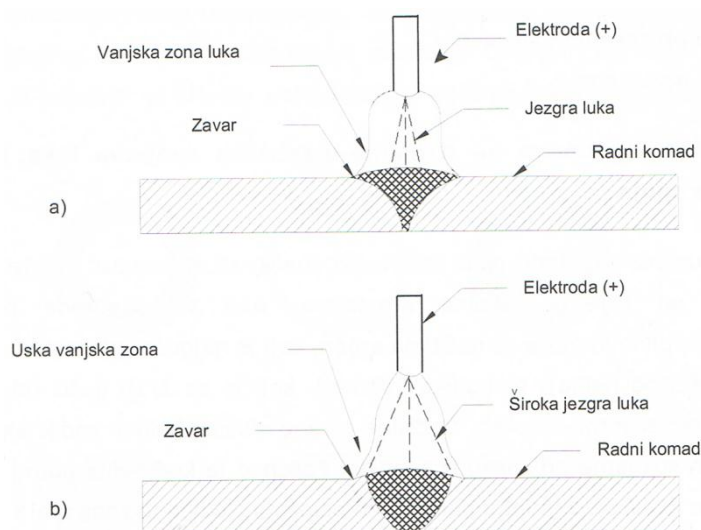
Utjecaj zaštitnih plinova odražava se na: [1]

- 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**

Za efikasnost zaštite mjesta zavarivanja veliki značaj ima specifična gustoća zaštitnog plina. Ako se usporede najčešće upotrebljavani plinovi, 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. S druge strane plinovi koji imaju manju gustoću kao npr. dušik, helij i vodik skloni su turbulentnom strujanju pri izlazu iz sapnice. Kod korištenja takvih plinova za postizanje iste kvalitete zavarenog spoja u položenom položaju potrebno je povećati protok plina. To je česti slučaj kod helija. Helij se na našim područjima rijetko kada koristi zbog svoje cijene, ali njegova uporaba dolazi do izražaja kod naglavnog zavarivanja i to upravo zbog njegove male gustoće. Toplinska vodljivost plinske atmosfere i pojave u njoj utječu na radijalne gubitke topline što utječe na oblik jezgre luka i njegovu geometriju. Argon daje usku zonu jezgre luka, za razliku od  $CO_2$  koji daje širu jezgru luka. Širina jezgre luka za pojedini spomenuti plin prikazana je na slici 2.3. Ovo svojstvo odražava se i na oblik penetracije u osnovnom metalu. Utjecaj plinova na metalurške reakcije s rastaljenim metalom uglavnom ovisi samo o vrsti plina ili količini pojedinih plinova u plinskoj mješavini. Može se reći da djelovanje zaštitnog plina ili mješavine plinova na rastaljeni metal može biti neutralno, oksidirajuće ili reducirajuće [1].

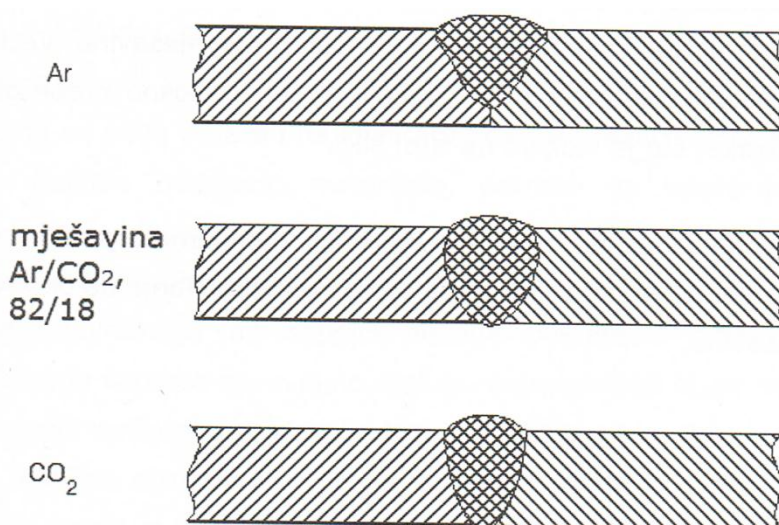


**Slika 2.3 Karakterističan oblik električnog luka i njegova geometrija [1]**

- a) u argonu
- b) u ugljikovom dioksidu

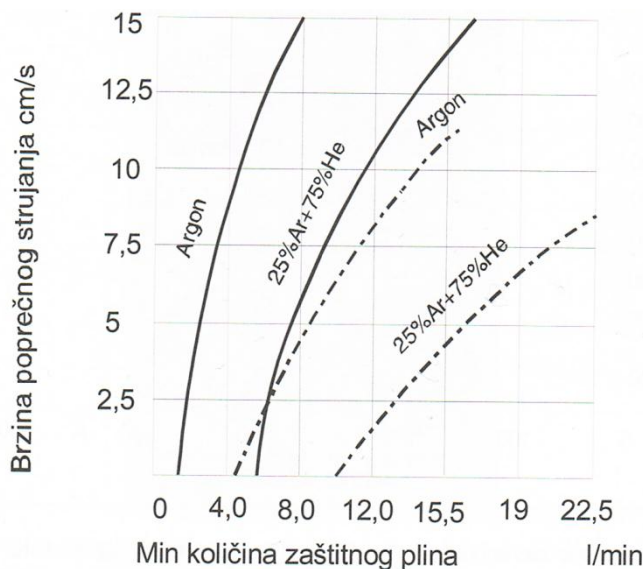
S obzirom na prije spomenute fizikalne karakteristike pojedinih plinova i njihov utjecaj na geometriju i svojstva električnog luka, izbor odgovarajuće plinske mješavine je od velike važnosti. Izborom sastava i omjera zaštitne plinske mješavine moguće je u kombinirati svojstva pojedinih plinova tako da rezultirajuća mješavina ima optimalna svojstva za zadane uvjete. Slika 2.4 prikazuje karakterističan oblik penetracije kod MIG/MAG postupka

zavarivanja u zaštitnoj atmosferi argona odnosno ugljičnog dioksida koji se dosta razlikuju. Korištenjem ugljičnog dioksida kao zaštitnog plina dobivaju se zavari sa širom penetracijom, čime se mogu kompenzirati netočnosti pripreme i vođenja pištolja, no dobiveni oblik zavara je nepovoljniji. Mješavina ovih plinova u pogodnom omjeru ima kompromisna svojstva u pogledu penetracije. 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]

Za kvalitetno zavarivanje potrebno je osigurati dovoljno veliku količinu zaštitnog plina na mjestu zavarivanja, tj. protok plina mora biti dovoljno velik. Strujanje zraka može ozbiljno narušiti zaštitu plinske atmosfere, stoga je u takvim slučajevima potrebno povećati protok plina. Potrebna količina plina na mjestu zavarivanja izravno ovisi o brzini strujanja zraka i o gustoći samog plina (slika 2.5). Do takvih slučajeva često dolazi kod montažnog zavarivanja. Pri montažnom zavarivanju nije dovoljno samo povećati protok plina nego je potrebno zaštititi mjesto zavarivanja od nepovoljnih utjecaja vjetrova koji odnose plin. Za takva zavarivanja 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 [1].



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

#### 2.4. Strojevi i oprema za MAG zavarivanje

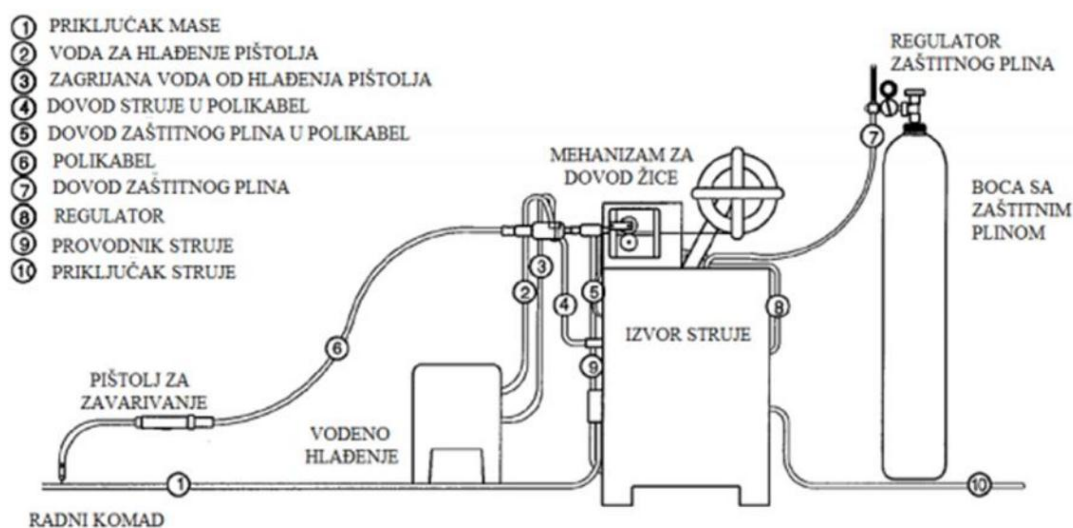
Osnovna oprema za konvencionalni MAG postupak zavarivanja je relativno jednostavna i jeftina. Najskuplji dio opreme je izvor struje, a njegova cijena ovisi o mogućnostima izvora struje (mogućnost pulsog zavarivanja, zračno ili vodeno hlađenje pištolja, sinergijsko ili ručno podešavanje parametara i sl.). Uz osnovnu opremu važno je i napomenuti zaštitnu opremu potrebnu za zavarivanje, a to su zavarivačke rukavice, maska i radno odijelo.

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

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

Osnovna oprema za MAG postupak zavarivanja prikazana je slikom 2.6.

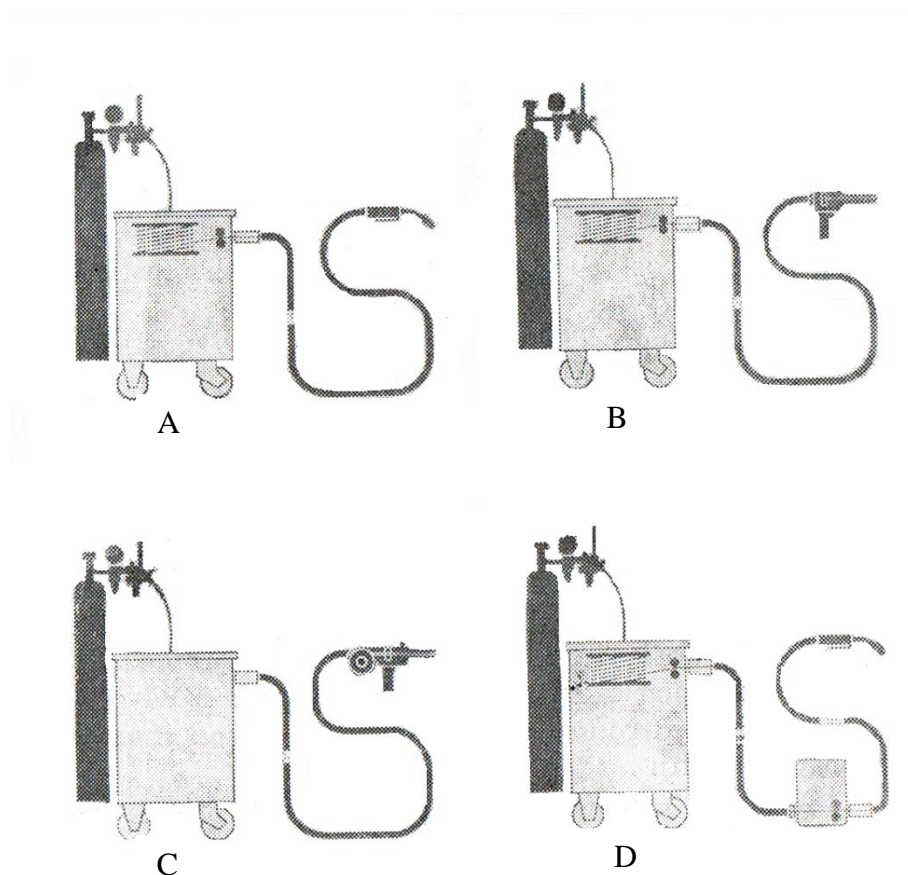




**Slika 2.6 Oprema za MAG zavarivanje [3]**

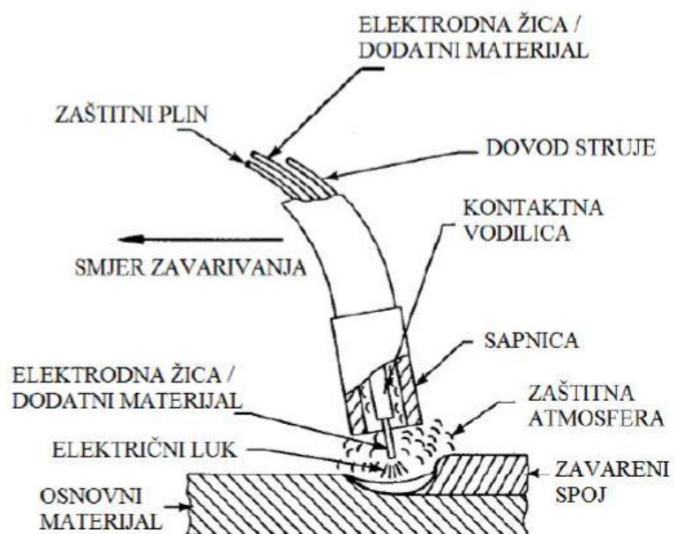
Struja potrebna za zavarivanje dovodi se iz izvora za zavarivanje. Proces zavarivanja započinje zatvaranjem strujnog kruga do čega dolazi uslijed električnog kontakta između žice i radnog komada. Naime, radni komad je spojen pomoću mase na negativni pol istosmjernog izvora struje, a dodatni materijal je spojen na pozitivni pol. Struja ne prolazi cijelom duljinom žice, nego samo kroz krajnjih nekoliko centimetara, a to se omogućava pomoću kontaktne cjevčice koja se nalazi u samom pištolju. Kontaktne cjevčice se biraju prema promjeru dodatnog materijala (0,8; 1,0; 1,2; itd.). Na pištolju se još nalazi sapnica koja služi za usmjeravanje toka zaštitnog plina. Polikabel ima u sebi jedan poseban bužir kroz koji prolazi dodatni materijal zajedno s crijevom za dovod plina i ostalim električnim vodičima koji služe za dovod struje iz izvora za zavarivanje do kontaktne cjevčice te za kontrolu gumba na samom pištolju. Pritiskom na gumb 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.

Najčešće pogreške u radu uređaja za zavarivanje MAG postupkom jesu zastoji u sistemu dovođenja dodatnog materijala. Postoji nekoliko načina dovođenja dodatnog materijala i oni su prikazani na slici 2.7 [4].



**Slika 2.7** Karakteristična rješenja dovođenja žice kod 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 prienosnoj 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]

Slikom 2.8 prikazani su dijelovi pištolja za MAG postupak zavarivanja, a stroj za MAG postupak zavarivanja prikazan je na slici 2.9.



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

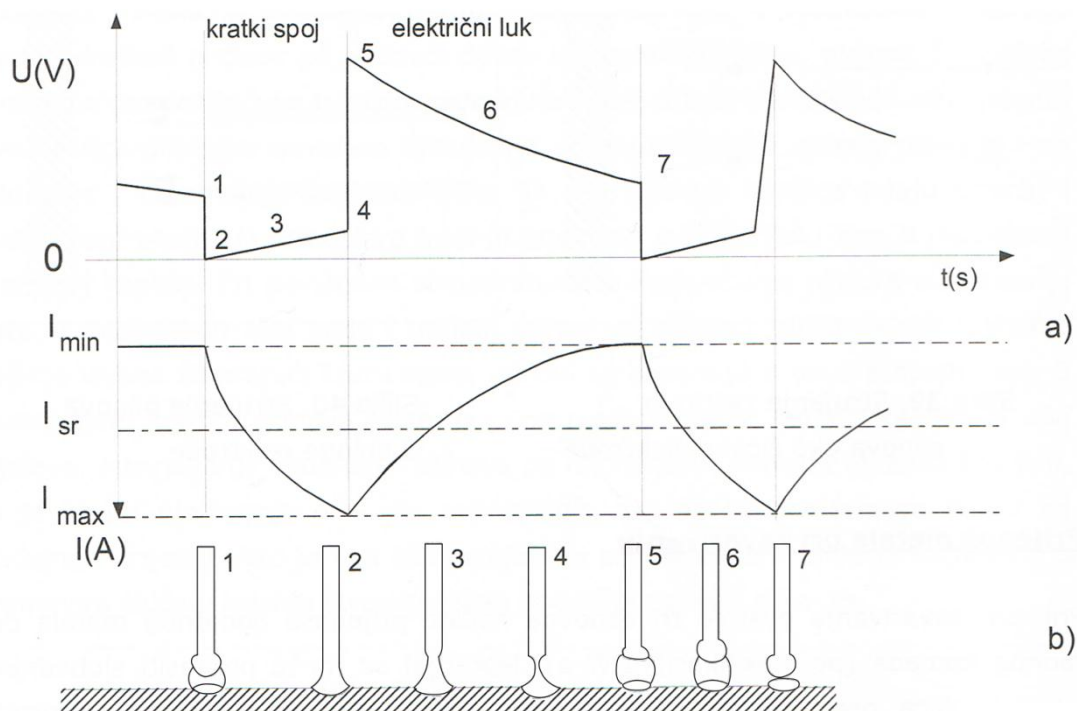
## 2.5. Prijenos metala pri MAG zavarivanju

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].



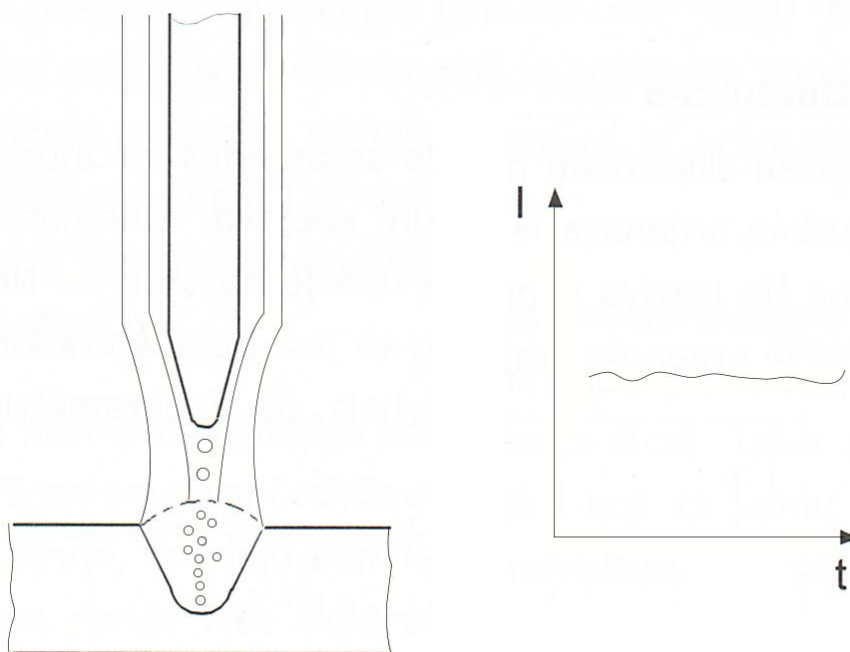
**Slika 2.10 Prijenos metala kratkim spojevima [1]**

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].

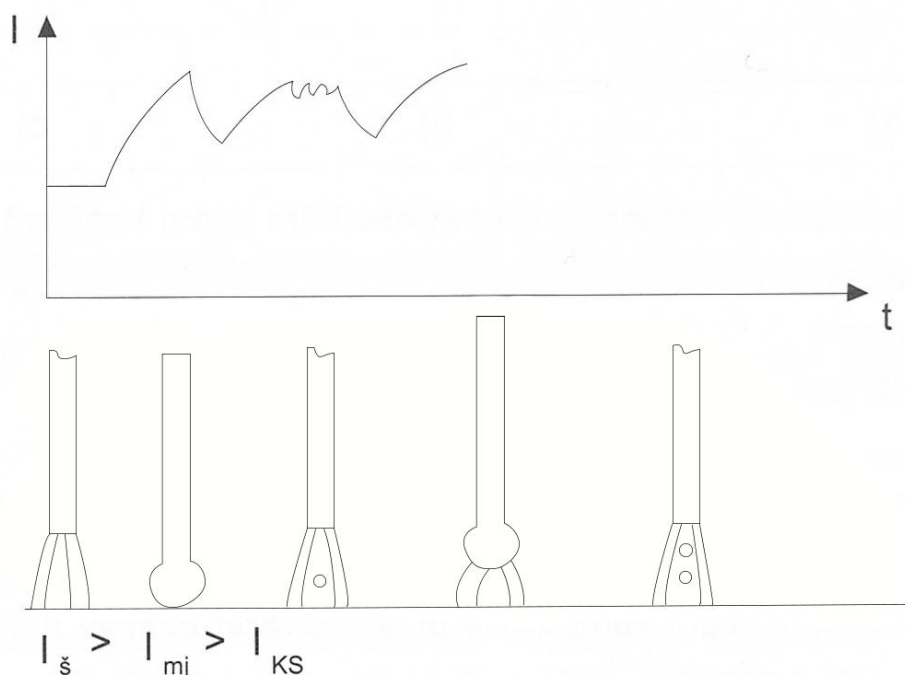


**Slika 2.11 Prijenos metala štrcajućim lukom kod MAG postupka zavarivanja [1]**

### **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 osciloscopske 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].

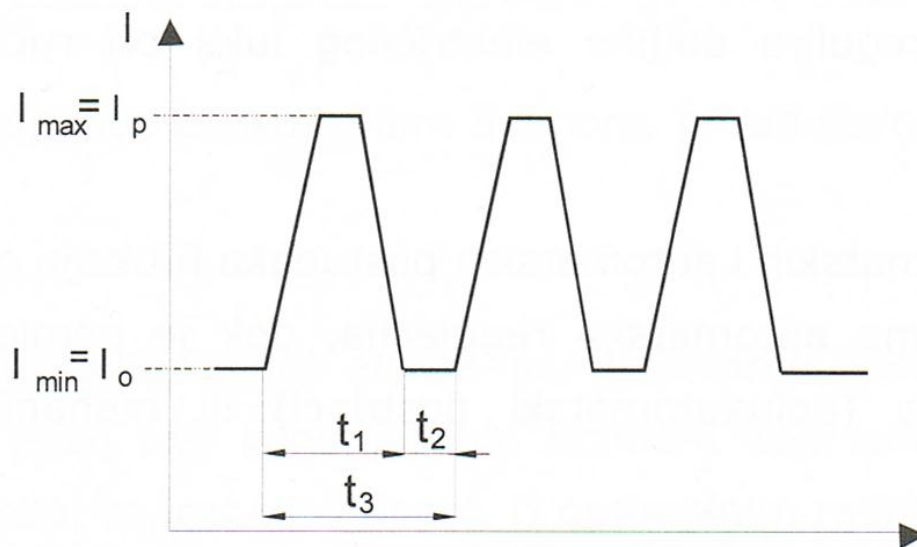


**Slika 2.12 Prijenos metala mješovitim lukom [1]**

#### **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]**

$I_0$  - osnovna razina jakosti struje

$I_p$  - jakost struje impulsa

$t_1$  - vrijeme trajanja impulsa

$t_2$  - vrijeme trajanja osnovne struje

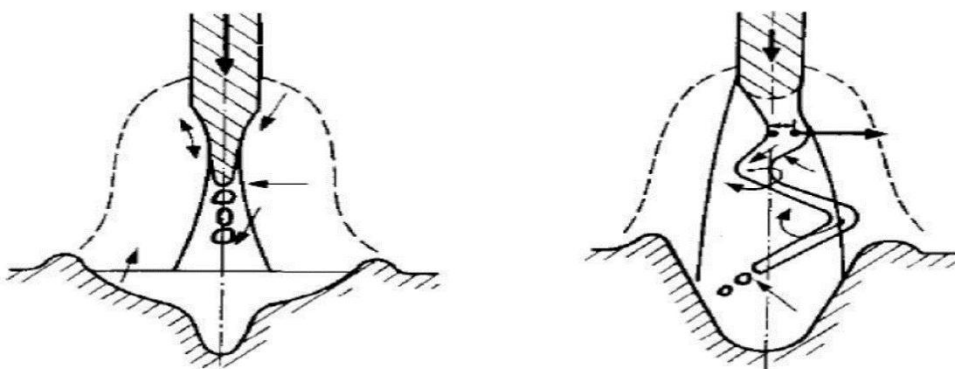
$t_3$  - vrijeme jednog ciklusa

### **2.5.5. Prijenos metala rotirajućim električnim lukom**

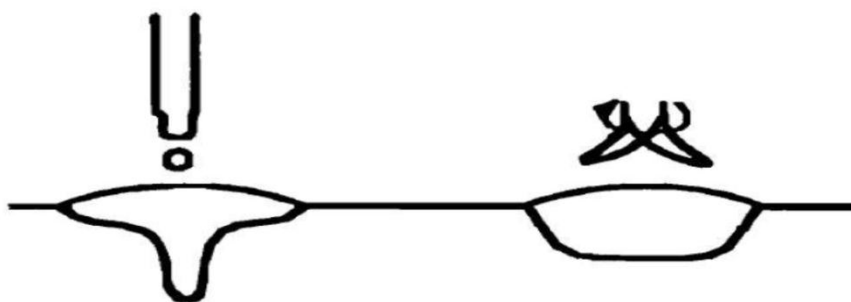
Rotirajući luk je način prijenosa metala u električnom luku koji spada u grupu visokoučinskih MAG postupaka zavarivanja. Visokoučinski postupci MAG zavarivanja su oni postupci koji imaju mogućnost dodavanja jedne ili više žica brzinom većom od 15 m/min. Time se povećava volumen nataljenog metala, brzina 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 zavora. 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 zavora 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 zavora 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*

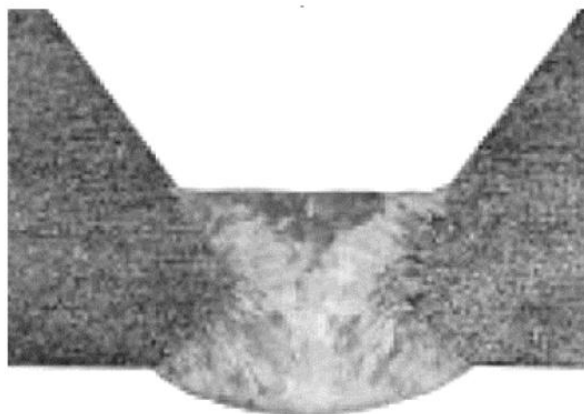
STT (engl. **S**urface **T**ension **T**ransfer) je modificirani MAG postupak zavarivanja koji koristi unaprijeđen način prijenosa metala kratkim spojevima, a odvajanje kapljice metala vrši se silama površinske napetosti. Ovaj postupak se najčešće koristi za zavarivanje materijala manjih debljina, zavarivanje 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

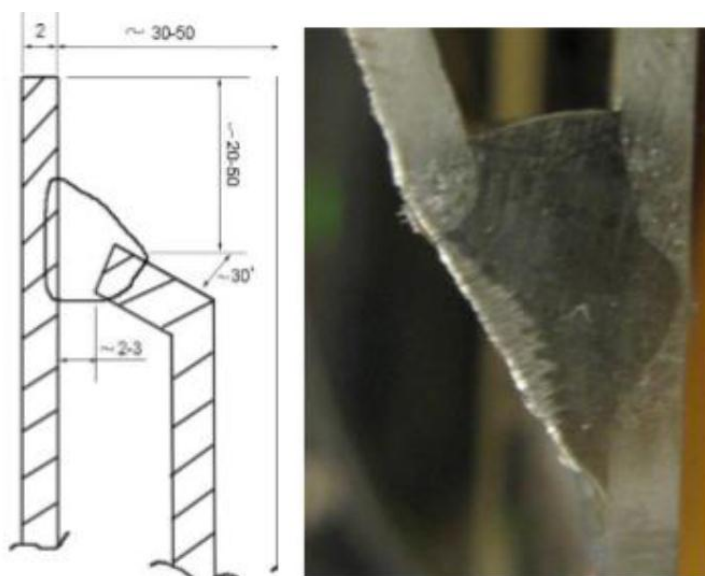


**Slika 3.1 Korijski zavar dobiven STT postupkom [8]**

**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***

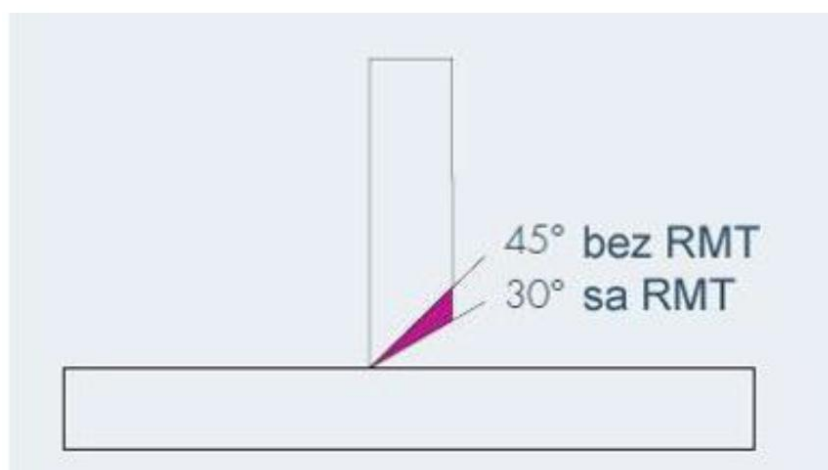
CBT (engl. **C**ontrolled **B**ridge **T**ransfer) je modificirana metoda prijenosa metala koja kombinira prednosti impulsnog i klasičnog MAG zavarivanja. Temelji se na preciznom podešavanju jakosti struje u odnosu na napon električnog luka što omogućava stabilizaciju električnog luka i upravljanje prijenosom 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].

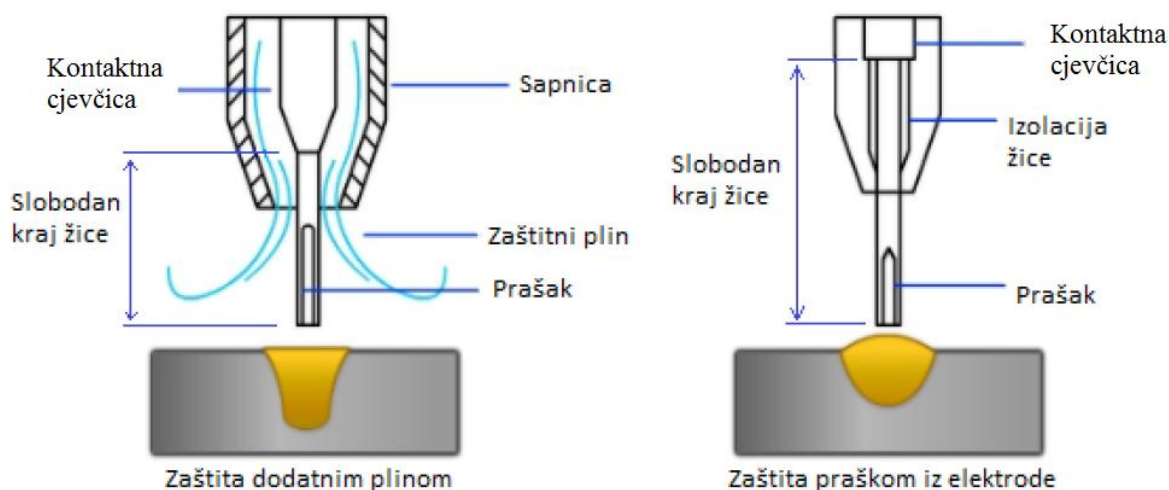
## 3.3. **Visokoučinski postupci MAG zavarivanja**

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. Flux Cored Arc Welding) 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

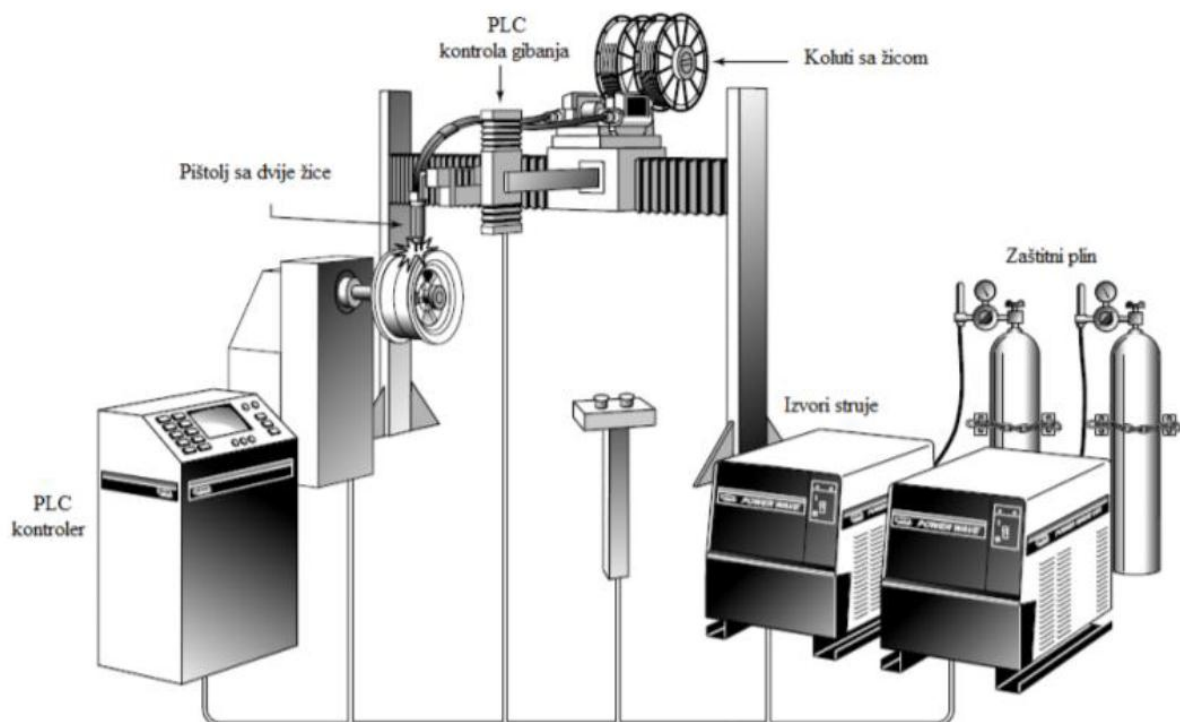


**Nedostaci: [8]**

- 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

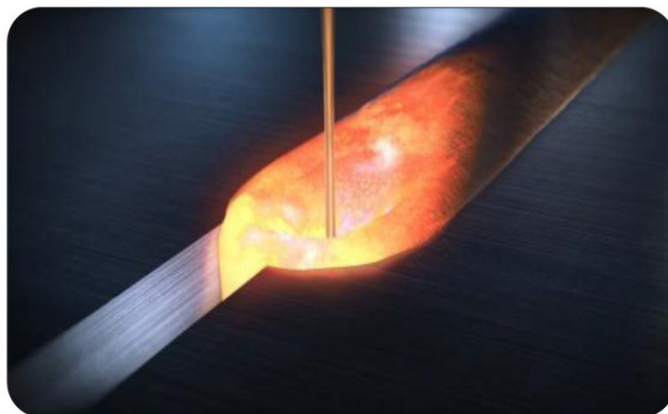
**Nedostaci: [8]**

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

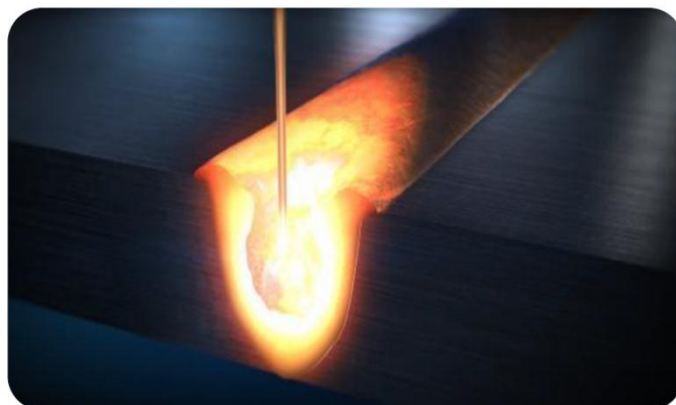
#### 4. VISOKOUČINSKO ZAVARIVANJE PRIMJENOM ZAKOPANOG LUKA

##### LUKA

Kod zavarivanja limova velikih debljina važno je da postupak zavarivanja bude što učinkovitiji, tj. da stopa depozita dodatnog materijala bude što veća. Jedan od takvih postupaka je zavarivanje primjenom zakopanog luka. Takav postupak spada u grupu visokoučinskog 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]

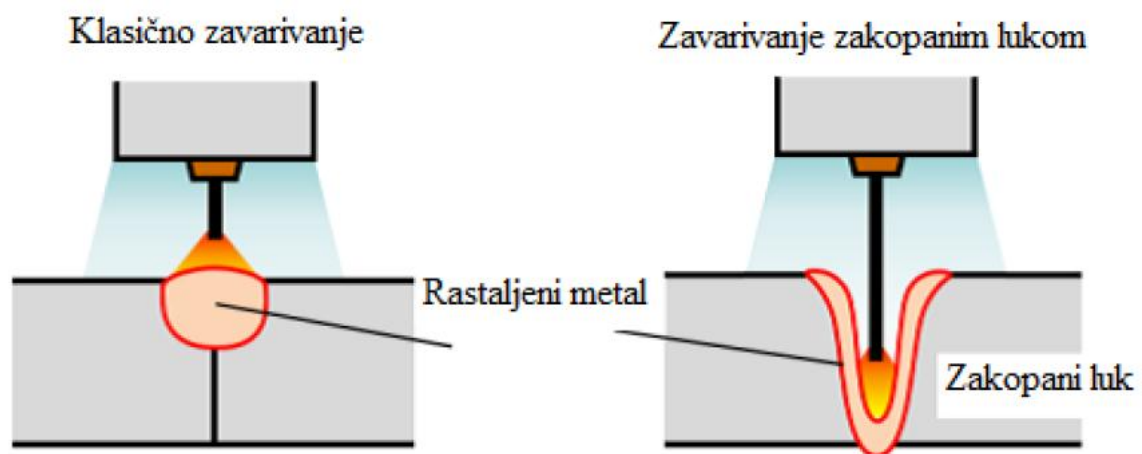
#### 4.1. Usporedba zakopanog i štrcajućeg luka

Za zavarivanje velikih debljina konvencionalnim MAG postupkom zavarivanja koristi se štrcajući luk. Kod štrcajućeg luka je relativno veliki depozit materijala u odnosu na ostale postupke zavarivanja, no ipak, kod debljina iznad 10 i više milimetara traže se učinkovitija rješenja.

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

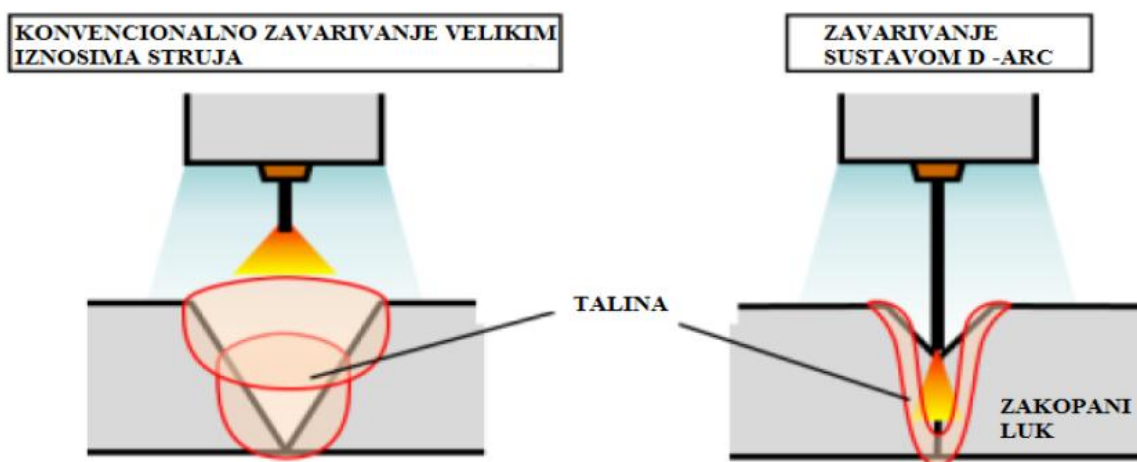
- potrebno je zavarivanje u više prolaza
- potrebna je velika količina dodatnog materijala
- velike deformacije i zaostala naprezanja

Kod MAG postupka zavarivanja štrcajućim lukom električni luk se nalazi iznad rastaljenog metala zavara što rezultira malom penetracijom, pa je potrebna priprema spoja po cijeloj debljini materijala koji se zavaruje. S obzirom na to da je izvor topline kod zakopanog luka postavljen dublje nego kod konvencionalnog MAG postupka, što je prikazano slikom 4.3, može se postići veća penetracija. Postizanje veće penetracije 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]

Zbog velike penetracije priprema spoja je jednostavnija i manja, što se vidi na slici 4.4, te je moguće zavarivanje u jednom prolazu. Budući da je pripremljeni spoj manjih dimenzija potreban je i manji volumen dodatnog materijala pa su troškovi zavarivanja niži. Deformacije do kojih dolazi primjenom zakopanog luka su i do nekoliko puta manje nego kod MAG zavarivanja štrcajućim lukom [9].



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

Prednosti primjene štrcajućeg luka nad zakopanim lukom su mogućnost zavarivanja u prisilnim položajima, velika fleksibilnost i mogućnost ručnog vođenja pištolja. Primjenom višeprolaznog zavarivanja štrcajućim lukom postiže se povoljna mikrostruktura zavara.

Zakopani luk podložan je nestabilnom ponašanju i povremenoj pojavi kratkih spojeva tako da je stabilizacija samog procesa vrlo zahtjevna, posebice u području jačih struja. Iz tih razloga i ograničenja u primjeni, zakopani luk u prošlosti nije često upotrebljavan u proizvodnji [2].

#### 4.2. Promatranje i stabilizacija zakopanog luka

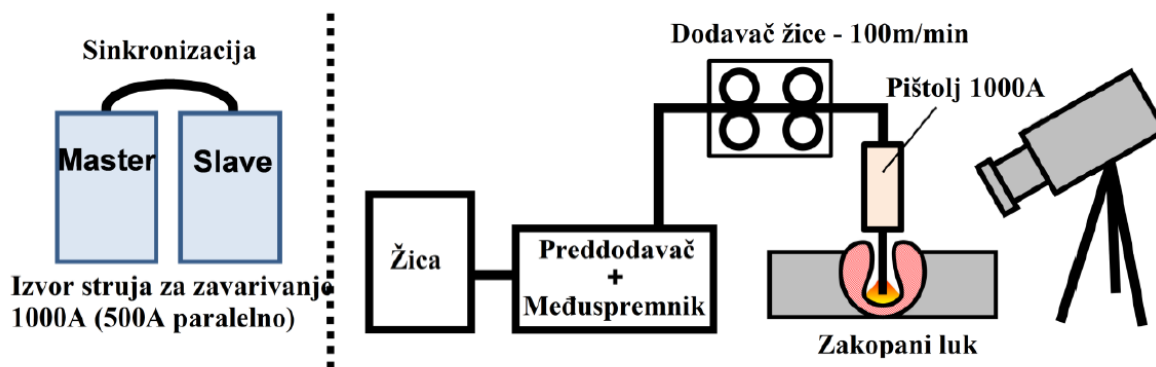
Postupak zavarivanja zakopanim lukom naziva se još i D-arc postupak. S obzirom na to da je D-arc postupak zavarivanja visokoproduktivan kod zavarivanja materijala većih debljina, stabilizacija njegova luka je od velikog značaja.

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].

Daljnijim eksperimentom objasniti će se proces stabilizacije zakopanog luka pri strujama iznad 450 A. 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 dan je slikom 4.5 [10].

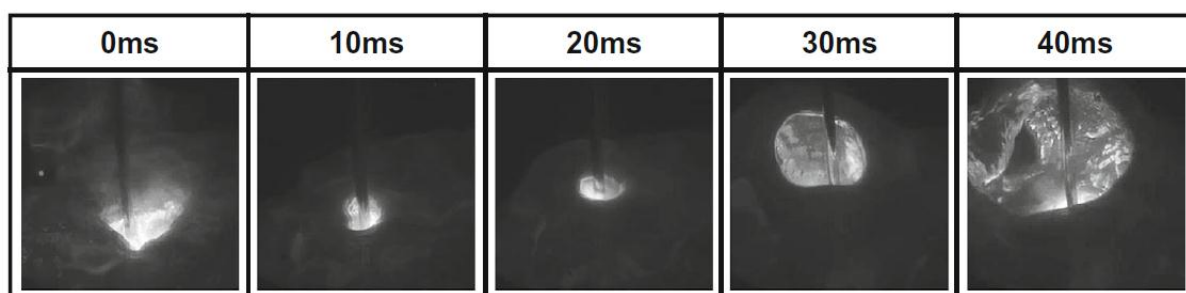


Slika 4.5 Shematski prikaz eksperimenta [5]

#### 4.2.1. Promatranje zakopanog luka

Nagib karakteristike u svrhu promatranja zakopanog luka postavljen je na  $-1 \text{ V} / 100 \text{ A}$  i ta vrijednost odgovara uobičajenim vrijednostima izvora struja za MAG zavarivanje. Slika 4.6 prikazuje snimke navarivanja na čeličnu ploču dobivene visokobrzinskom kamerom pri sljedećim parametrima:

- Struja zavarivanja –  $570 \text{ A}$
- Napon električnog luka –  $48 \text{ V}$
- Brzina dodavanja žice –  $40 \text{ m/min}$



**Slika 4.6 Rezultati snimanja nestabilnog zakopanog luka [10]**

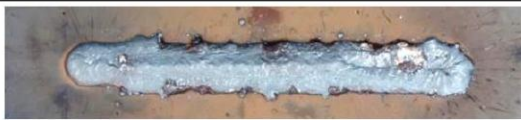


Svaki kadar predstavlja vremenski interval od  $10 \text{ ms}$ . Električni luk uočen je samo u trenutku  $0 \text{ ms}$  zbog toga jer je bio uspostavljen ispod površine rastaljenog metala zavara. Zakopani električni luk nije bio stabilan iako se stalno održavao. Veličina otvora na površini taline se 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

Kako bi se postigao stabilniji električni luk i bolji izgled zavara modificiran je nagib karakteristike izvora struje. U daljnjem eksperimentu korištena su tri različita nagiba, a to su:  $-2 \text{ V} / 100 \text{ A}$ ,  $-10 \text{ V} / 100 \text{ A}$  i  $-20 \text{ V} / 100 \text{ A}$ . Dobiveni navari, kao i parametri koji su korišteni, dani su slikom 4.7. Korištenjem karakteristike nagiba  $-2 \text{ V} / 100 \text{ A}$ , koja predstavlja blago padajuću karakteristiku, može se uočiti nepravilan izgled te relativno velika širina navara. Smatra se da je zakopani luk 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  $-20 \text{ V} / 100 \text{ A}$ , što se može smatrati strmopadajućom



statičkom karakteristikom, 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  $-10\text{ V} / 100\text{ A}$  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 <span style="border: 1px solid black; padding: 2px;">30mm</span>
<b>Brzina dodavanja žice:</b> <b>40m/min</b> <b>Prosječna jakost struje:</b> <b>570 A</b> <b>Prosječni iznos napona:</b> <b>48V</b>	(1)	$-2\text{V}/100\text{A}$	
	(2)	$-10\text{V}/100\text{A}$	
	(3)	$-20\text{V}/100\text{A}$	

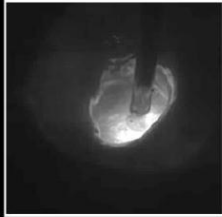
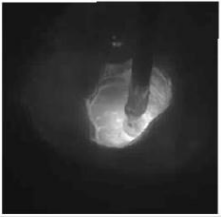
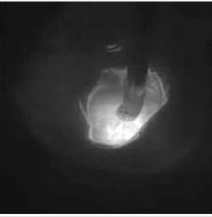
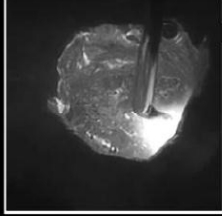
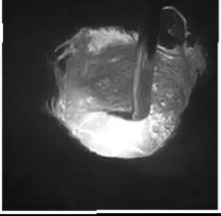
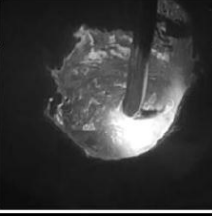
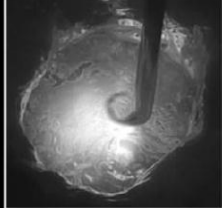
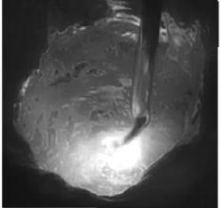
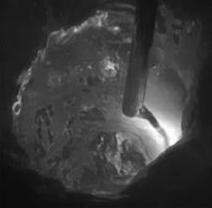
**Slika 4.7 Utjecaj nagiba vanjske karakteristike na izgled navara [5]**

### Prijenos metala kod zakopanog luka pri većim strujama

Relativno stabilan zakopani luk zapažen je pri karakteristici nagiba  $-10\text{ V} / 100\text{ A}$ . Slika 4.8 prikazuje snimke visokobrzinske kamere pri brzini dovođenja žice od 30, 50 i 60 m/min. Pri brzini dovođenja žice od 30 m/min, jakosti struje 450 A i naponom električnog luka od 39 V 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 dodavanja žice od 60 m/min, jakosti struje od 700 A i naponu električnog luka od 65 V 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, jakosti struje 620 A i naponu od 55 V 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].

Parametri zavarivanja	Prijenos	0 ms	0.4 ms	0.8 ms
Brzina dob. žice: 30m/min Izlazna struja: 550A Izlazni napon: 39V	Kapljice			
Brzina dob. žice: 50m/min Izlazna struja: 620A Izlazni napon: 55V	Prijelazni			
Brzina dob. žice: 60m/min Izlazna struja: 700A Izlazni napon: 60V	Rotirajući			

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

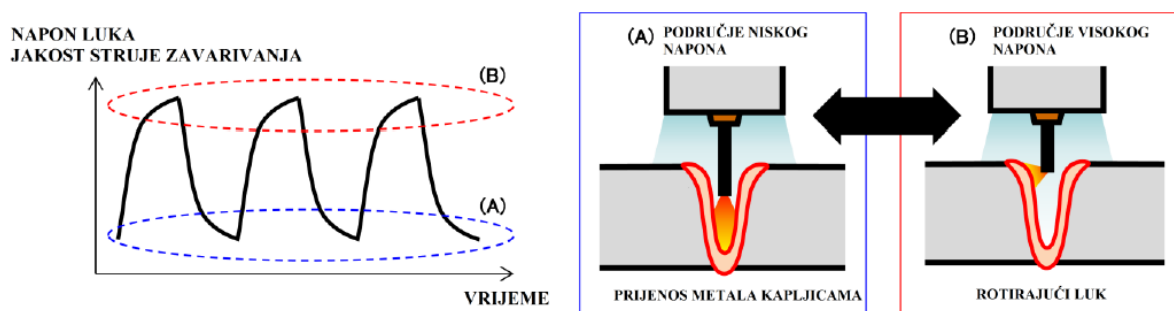
Posljedično, pri strujama zavarivanja većim od 450 A mogu se izdvojiti tri osnovna načina prijenosa metala s dva prijelazna stanja. Osnovni načini prijenosa metala kod zakopanog luka su prijenos metala kapljicama, njihanjem i rotirajući luk. Jedno prijelazno stanje je mješavina prijenosa kapljicama i 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. Novo dobiveni valni oblik struje prikazan slikom 4.9 kontinuirano pridržava rastaljeni zid zakopanog prostora uz cikličko ponavljanje vrijednosti struje i napona [5].



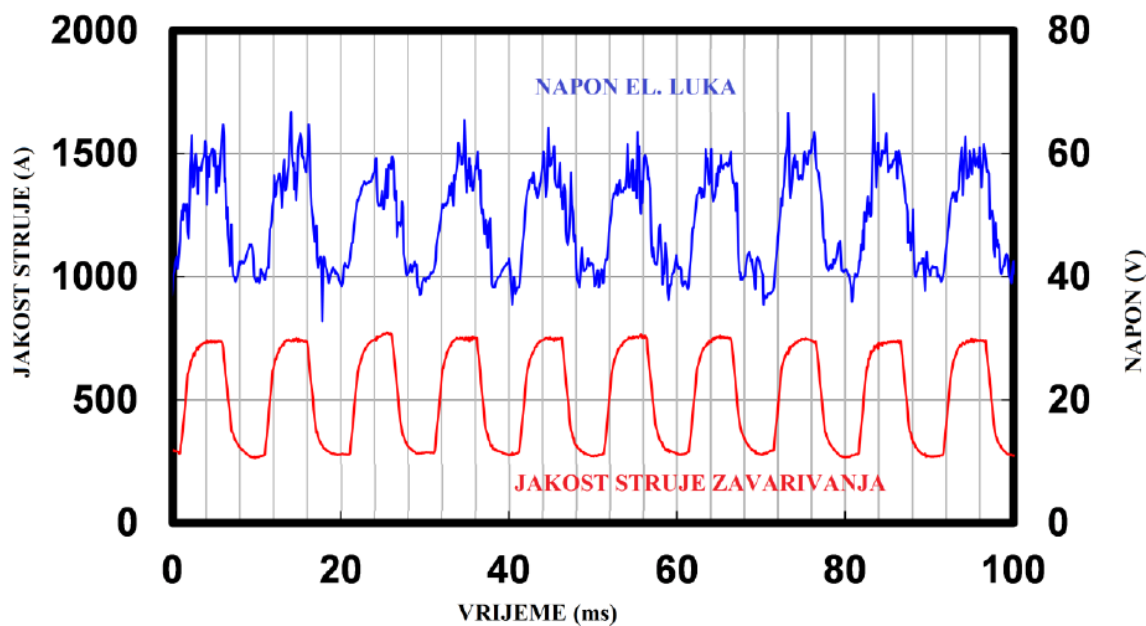
**Slika 4.9** Valni oblik struje i napona sa shematskim prikazom prijenosa metala [5]

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 vrijednosti 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 stijenci. 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].

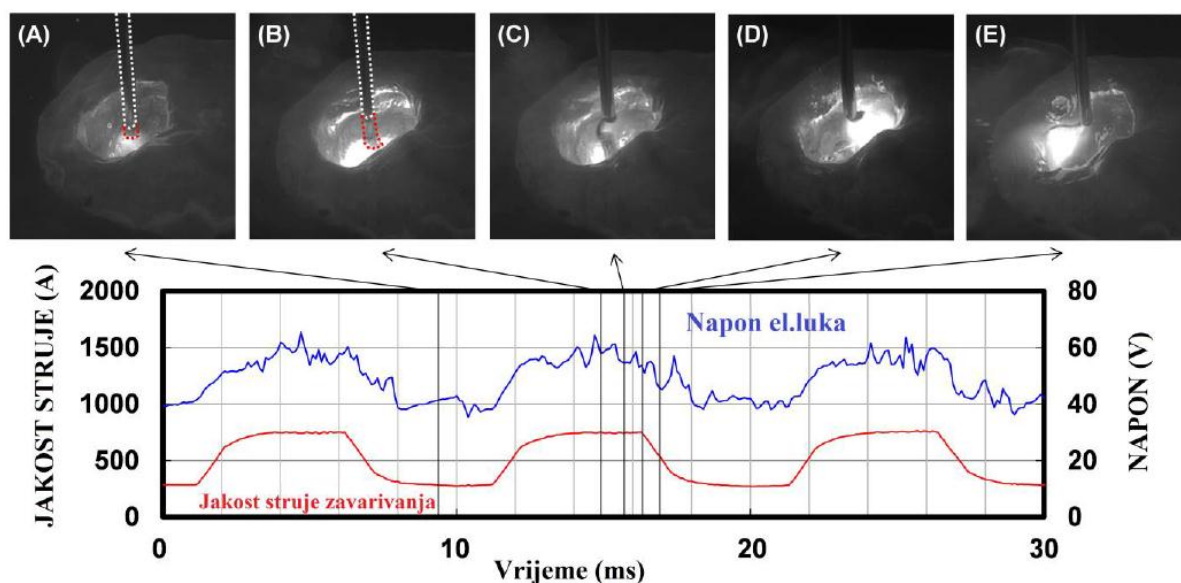
Parametri zavarivanja	Br.	Vanjska karakteristika	Upravljanje naponom	Izgled navara
Brzina dob. žice: 40m/min Izlazna struja: 570A Izlazni napon: 48V	(1)	-10V/100A		
	(2)	-10V/100A	±10V 100Hz	

**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]



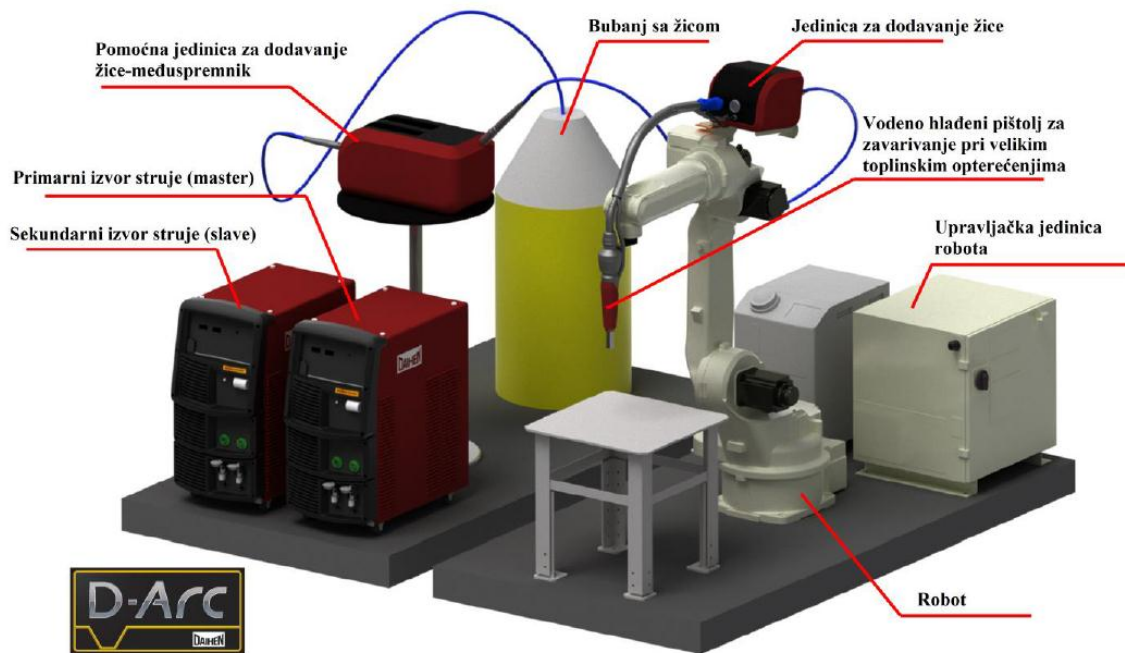
**Slika 4.12 Fenomen stabiliziranog zakopanog luka pri moduliranom upravljanju naponom niske frekvencije [5]**

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 zavarajući 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 za zavarivanje limova većih debljina prikazan slikom 4.13 je robotiziran i relativno kompleksan. Sustav se sastoji od numerički upravljane robotske ruke, dva međusobno povezana digitalna inverterski upravljana izvora struje sa ravnom karakteristikom (primarni i sekundarni) koji mogu isporučiti i do 1000 A, posebnog 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 vodeno hlađeni, izrađen aditivnom 3D tehnologijom od posebne bakrene legure koja omogućava opterećenje od 650 A pri 100 % intermitenciji. Na glavni (primarni) izvor struje spojeno je modularno niskofrekventno upravljanje naponom kako bi se izračunala trenutna struja ovisno o odgovarajućem nagibu vanjske karakteristike. Žica koja se koristi kod ovakvog sustava za zavarivanje nije u kolotovima po 15 kg, već se nalazi u bubnjevima, a razlog tome je velika potrošnja žica [5].


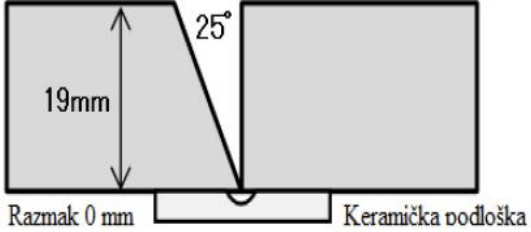
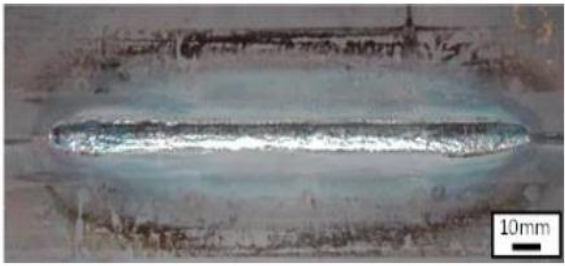



Slika 4.13 D-arc sustav za zavarivanje zakopanim lukom [5]

#### 4.4. Primjena D-arc sustava za zavarivanje većih debljina

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. U tablici 4.2 prikazan je primjer spajanja lima debljine 19mm. Postignut je potpuni provar, a izgled zavara na strani lica i korijena je zadovoljavajuć [5].

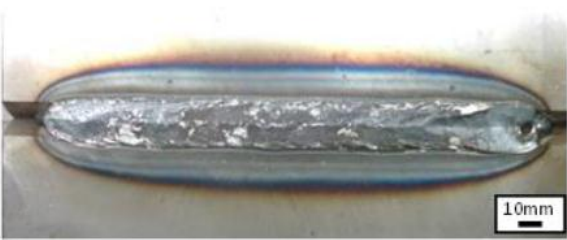
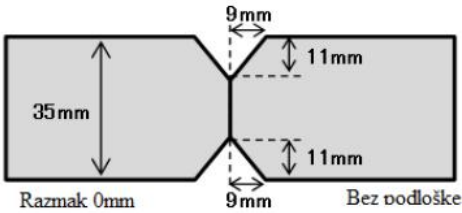

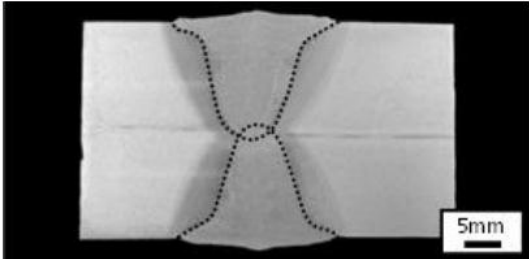
**Tablica 4.2 Primjer sučeljenog zavara na limu debljine 19 mm [5]**

Struja zavarivanja: 580 A, Napon el. luka: 48V, Brzina zavarivanja: 24 cm / min Promjer žice: $\varnothing_z = 1,4$ mm (puna žica), Zaštitni plin: CO <sub>2</sub> (30 L / min)	
Izgled lica zavara	Priprema spoja
	
Izgled korijena zavara	Makroizbrusak (presjek)
	




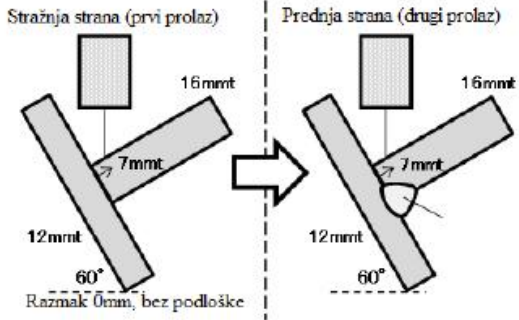

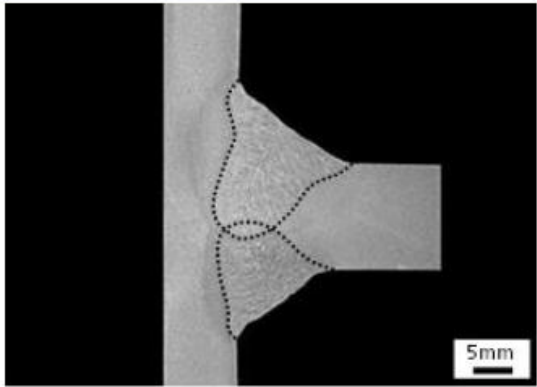
U tablici 4.3 prikazan je primjer zavarivanja sučeljenog spoja na limu debljine 35 mm. Napravljena je X priprema sa grlom visine 13 mm. Zavarivanje je provedeno obostrano u vodoravnom položaju [5].

**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: $\varnothing_z = 1,4$ mm (puna žica), Zaštitni plin: CO <sub>2</sub> (30 L / min)	
Izgled lica zavara	Priprema spoja
	
Izgled korijena zavara	Makroizbrusak (presjek)
	

U tablici 4.4 dan je primjer potpune penetracije na T spoju bez dodatne pripreme i bez razmaka. Zavarivanje je provedeno s obje strane u vodoravnom položaju uz okretanje radnog komada [5].

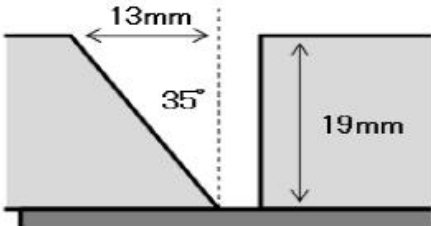
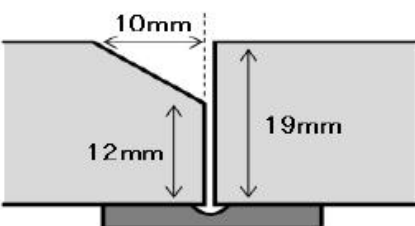
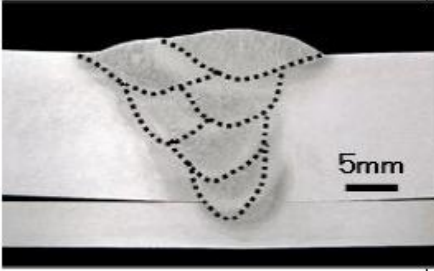
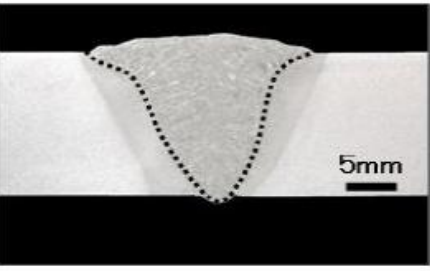
**Tablica 4.4** Primjer obostranog kutnog zavara [5]

<p>I PROLAZ: Struja zavarivanja: 440 A, Napon luka: 38 V, Brzina zavarivanja: 30 cm / min</p> <p>II PROLAZ: Struja zavarivanja: 530 A, Napon luka: 43 V, Brzina zavarivanja: 30 cm / min</p> <p>Promjer žice: <math>\varnothing_z = 1,4</math> mm (puna žica), Zaštitni plin: CO<sub>2</sub> (30 L / min)</p>	
Izgled I strane kutnog zavara	Priprema spoja
	
Izgled II strane kutnog zavara	Makroizbrusak (presjek)
	



U tablici 4.5 prikazana je usporedba sučeljenog zavora na limu debljine 19 mm načinjenog konvencionalnim MAG postupkom (štrcajući luk) i D-arc sustavom (zakopani luk) [5].

**Tablica 4.5** Usporedba zavora dobivenih štrcajućim i zakopanim lukom [5]

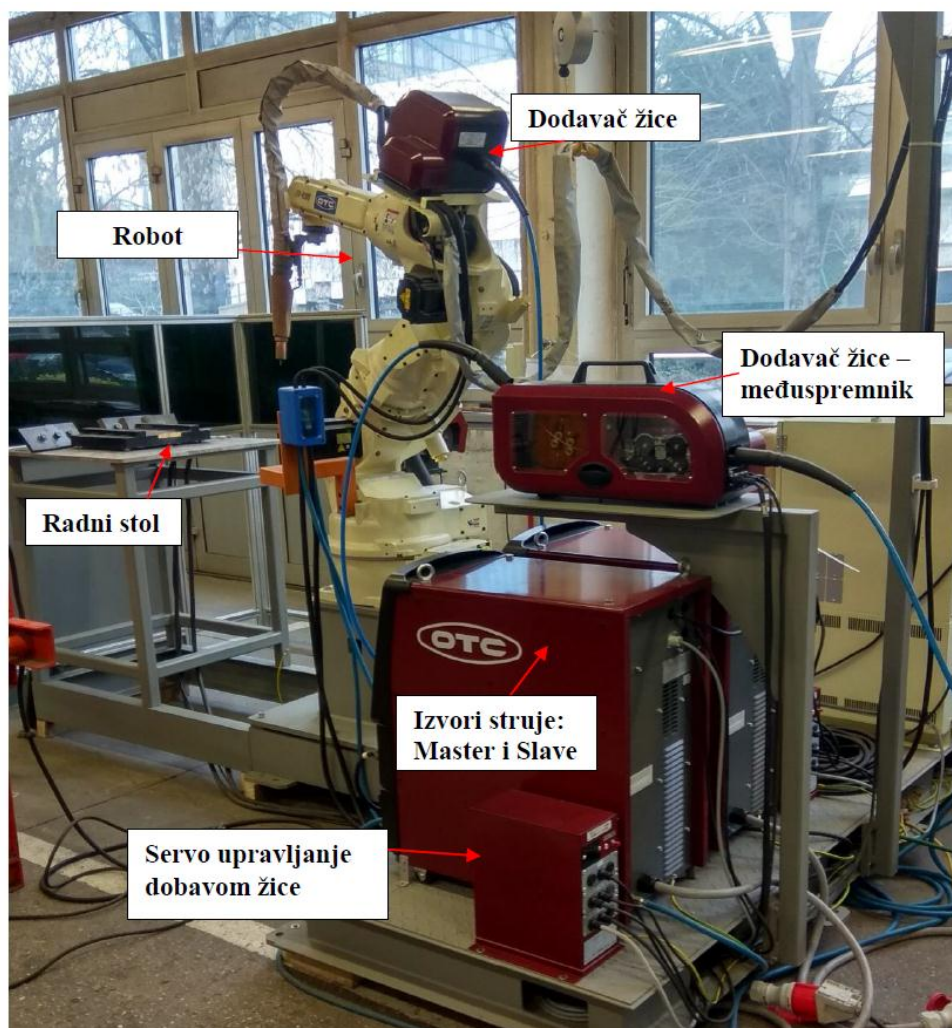
	Konvencionalno	D-Arc
Parametri	Struja zavarivanja: 300 A Napon luka: 30 V Brzina zav.: $v_{zav}=30$ cm / min Promjer žice: $\varnothing_z=1,4$ mm (puna) Zaštitni plin: CO <sub>2</sub> (30 L / min)	Struja zavarivanja: 620 A Napon luka: 44 V Brzina zav.: $v_{zav}=30$ cm / min Promjer žice: $\varnothing_z=1,4$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

## 5. EKSPERIMENTALNI DIO

Ekperimentalni dio ovog rada proveden je u Laboratoriju za zavarivanje Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. Cilj ovog eksperimenta je da se ispita isplativost korištenja D-arc sustava zavarivanja u odnosu na konvencionalni MAG postupak kod zavarivanja limova većih debljina. U svrhu provođenja eksperimentalnog dijela dobivena su dva uzorka zavarena D-arc sustavom zavarivanja. Prvi uzorak (1) bio je kutni T spoj zavaren s obje strane bez dodatne pripreme spoja, a drugi uzorak (2) bio je sučeljeni spoj zavaren u dva prolaza (svaki s jedne strane) sa prethodnom K pripremom spoja. Iz uzorka pod brojem (1) napravljen je makroizbrusak na kojem je nakon brušenja i nagrivanja u otopini provedena analiza mikrostrukture i ispitivanje tvrdoće po Vickersovoj metodi. Uzorak pod brojem (2) podvrgnut je nerazornoj metodi ispitivanja, u ovom slučaju radiografiji, kako bi se utvrdila kvaliteta spoja, tj. prisutnost uključaka, pora, naljepljivanja, pukotina i sl.

## 5.1. Oprema D-arc sustava za zavarivanje

Postupak zavarivanja za oba uzorka proveden je na robotskoj stanici OTC Daihen. Robotska ruka ima 7 stupnjeva slobode gibanja kojima se omogućava precizno vođenje pištolja za zavarivanje. D-arc sustav za zavarivanje sastoji se od već spomenute robotske ruke, međusobno povezanih primarnog i sekundarnog izvora struje, uređaja za servo upravljanje dodatnim materijalom, međuspremnik 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

Kao osnovni materijal za oba uzorka korišten je čelik oznake S355. Taj čelik spada u skupinu niskougličnih nelegiranih konstrukcijskih čelika. S obzirom na to da sadrži nizak udio ugljika, takav čelik se relativno lako zavaruje te nije sklon nastajanju grešaka u metalu zavara poput nekih drugih čelika boljih mehaničkih svojstava. Zbog svoje dobre zavarljivosti i niske cijene često se koristi u građevinskoj, proizvodnoj i brodogradilišnoj industriji. Isporučuje se hladno valjan u pločama lima, profilima i cijevima različitih duljina. Osnovni materijal kod uzorka (1) bio je lim debljine 20 mm, a kod uzorka (2) bio je lim debljine 30 mm. Tablica 5.1 prikazuje kemijski sastav čelika S355, dok tablica 5.2 daje vrijednosti granice razvlačenja i vlačne čvrstoće.

**Tablica 5.1 Kemijski sastav čelika S355 [11]**

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

**Tablica 5.2 Vrijednosti granice razvlačenja i vlačne čvrstoće za čelik S355 [11]**

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

### 5.3. Dodatni materijal i zaštitni plin

Za zavarivanje oba uzorka korištena je ista žica, a to je puna žica promjera 1,6 mm proizvođača Elektroda Zagreb d.d. trgovačkog imena EZ – SG 2. Slika 5.2 prikazuje specifikaciju žice EZ – SG 2. Kao zaštitni plin korišten je 100 %-tni  $CO_2$  (oznake C1 prema normi HRN EN ISO 14175), a protok plina bio je 20 l/min.

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/mm <sup>2</sup> .			
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 ljev	ČL 0300 do ČL 0500	GS-38 (1.0416) do GS-52 (1.0551)	C18D do S355JRC

MEHANIČKA SVOJSTVA ČISTOG METALA ZAVARA			
R <sub>el</sub> N/mm <sup>2</sup>	R <sub>m</sub> N/mm <sup>2</sup>	A <sub>5</sub> %	KV (-40°C) J
> 430	500 - 640	> 22	≥ 47

ORIJENTACIJSKI KEMIJSKI SASTAV ŽICE			
	C	Mn	Si
%	0,06 - 0,13	1,4 - 1,6	0,7 - 1,0

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 5.2 Specifikacija dodatnog materijala (EZ – SG 2) [12]

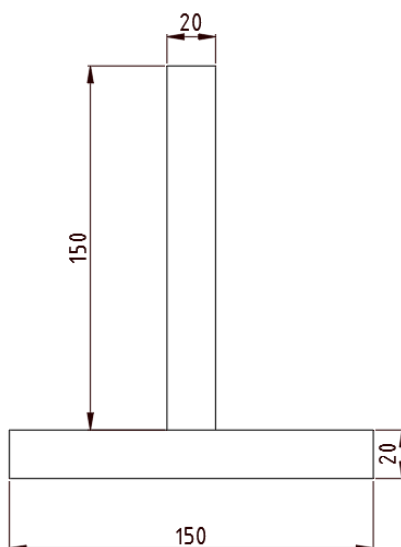
## 5.4. Postupak zavarivanja uzoraka D-arc sustavom

### 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

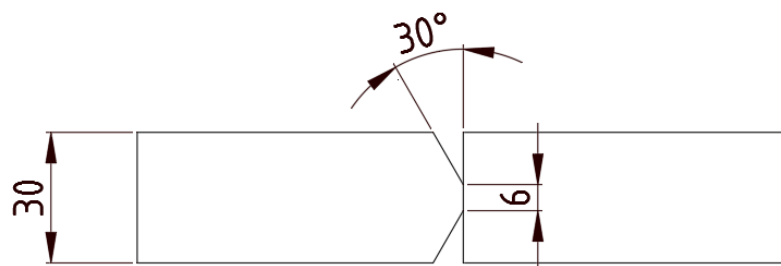
Kod uzorka (1) nije bilo dodatne pripreme spoja osim brušenja i čišćenja površine neposredno prije zavarivanja. Slika 5.3 prikazuje pripremu spoja uzorka (1).



**Slika 5.3 Priprema spoja kod uzorka (1)**

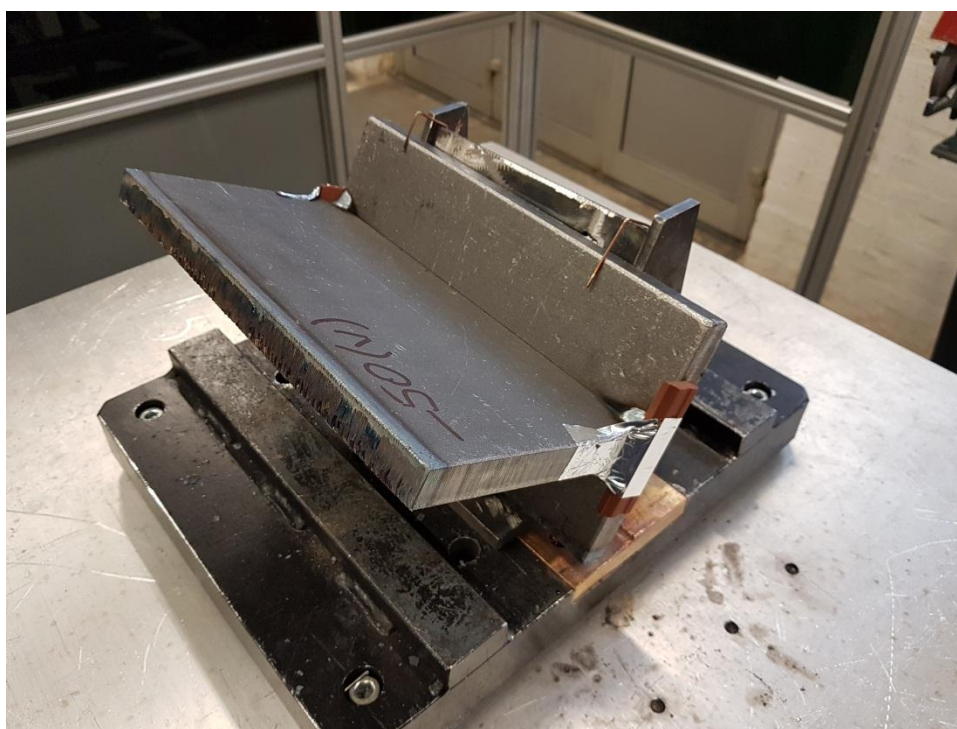


Kod uzorka (2) je nakon rezanja napravljena K priprema spoja prema slici 5.4.



**Slika 5.4** Priprema spoja kod uzorka (2)

Slike 5.5 i 5.6 prikazuju uzorak (1) pripremljen i pozicioniran za zavarivanje, a slike 5.7, 5.8 i 5.9 prikazuju uzorak (2) pripremljen i pozicioniran za zavarivanje. Kod oba uzorka i prvi i drugi prolaz pozicionirana su jednako na radnom stolu.



**Slika 5.5** Pripremljen uzorak (1)



**Slika 5.6**      **Uzorak (1) pozicioniran na stolu za zavarivanje**

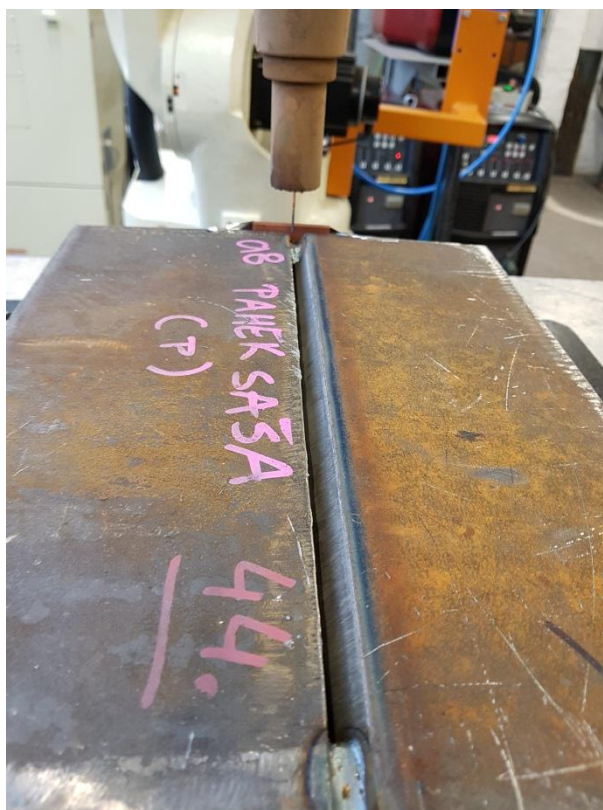


**Slika 5.7**      **Pripremljen uzorak (2) bez krajnjih pločica**





**Slika 5.8** Pripremljen uzorak (2) sa krajnjim pločicama



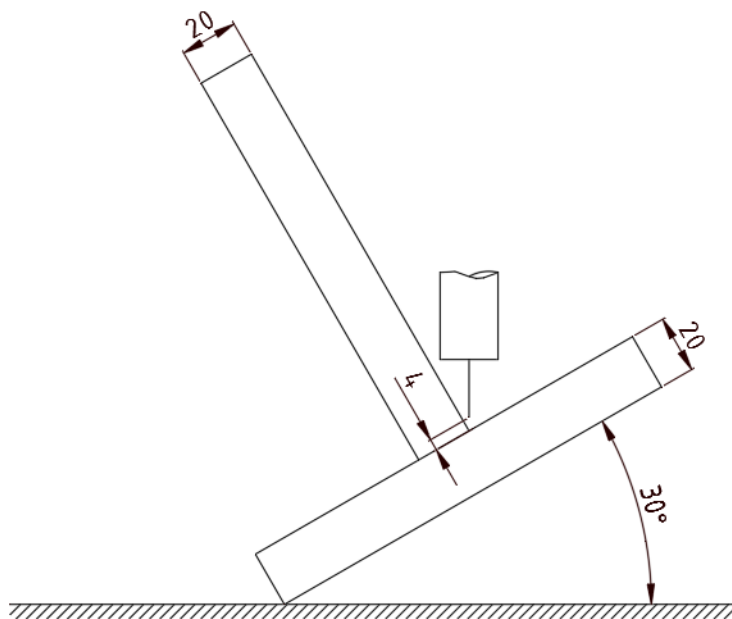
**Slika 5.9** Uzorak (2) pozicioniran na stolu za zavarivanje

### 5.4.2. Postupak zavarivanja ispitnih uzoraka

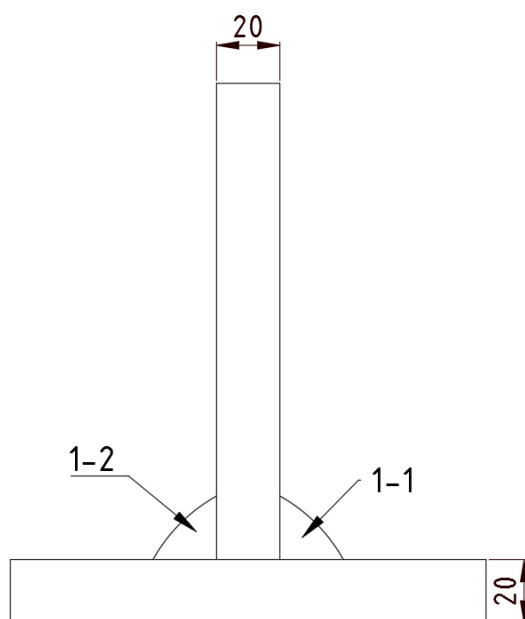
Oba uzorka zavarena su D-arc sustavom zavarivanja. Uzorak (1) sastoji se od dva lima debljine 20 mm koji su kutno spojeni (T spoj). Kutni zavari provedeni su s obje strane. Uzorak (2) sastoji se od dva lima debljine 30 mm sučeljeno spojenih. Kod ovog uzorka napravljena je K priprema spoja, a limovi su zavareni s obje strane. Kod oba uzorka je sa svake strane provedeno zavarivanje u jednom prolazu.

#### Zavarivanje uzorka (1)

Kao što je već napomenuto, uzorak (1) je zavaren primjenom D-arc sustava i to u dva prolaza, sa svake strane po jedan prolaz. Slika 5.10 prikazuje položaj zavarivanja uzorka (1), a slikom 5.11 prikazana je shema zavarenog spoja sa označenim prolazima. Tablicom 5.3 dane su vrijednosti parametara za zavarivanje pojedinog prolaza za uzorak (1), a slika 5.12 prikazuje zavareni uzorak (1).



Slika 5.10 Shema položaja zavarivanja uzorka (1)



**Slika 5.11** Shema zavarenog uzorka (1) sa označenim prolazima

Unos topline računat je prema sljedećem izrazu:

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

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 5.3** Parametri zavarivanja za uzorak (1)

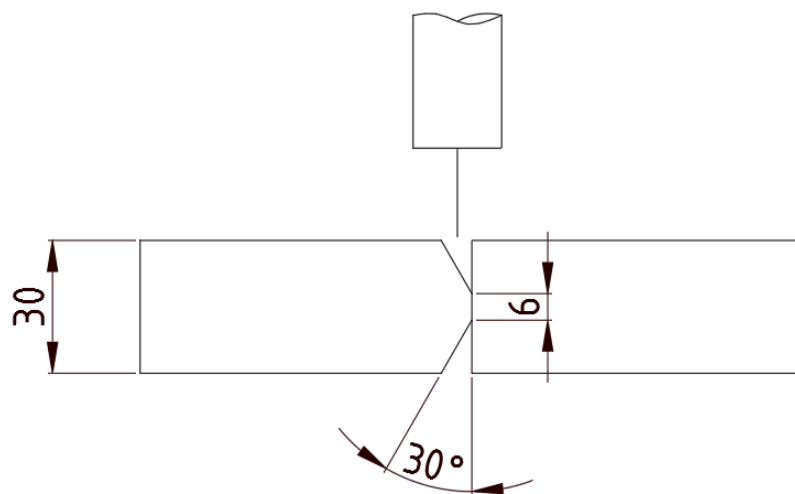
Prolaz	Jakost struje, A	Napon, V	Brzina zavarivanja, cm/min	Slobodni kraj žice, mm	Unesena toplina, kJ/cm
1-1	550	39	25	30	41,184
1-2	550	39	25	30	41,184



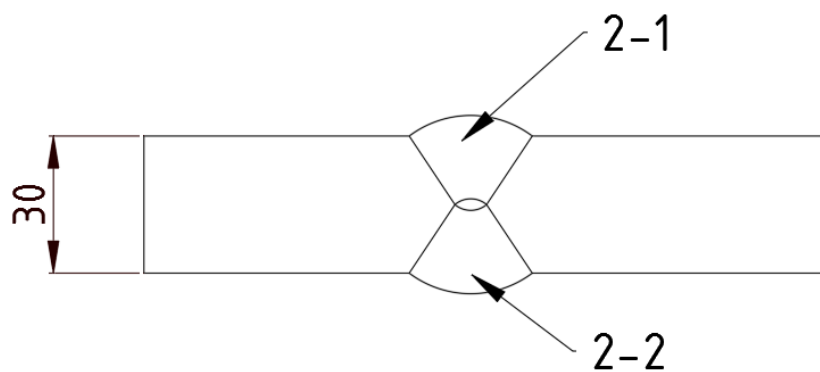
**Slika 5.12    Uzorak (1) nakon zavarivanja**

### **Zavarivanje uzorka (2)**

Uzorak (2) zavaren je obostrano uz prethodnu K pripremu spoja. Sa svake strane napravljen je jedan prolaz. Položaj zavarivanja prikazan je slikom 5.13, a slika 5.14 prikazuje shemu zavarenog spoja ovog uzorka sa oznakama prolaza. Vrijednosti parametara svakog prolaza dane su tablicom 5.4, a slikom 5.15 i 5.16 prikazan je radni komad nakon zavarivanja oba prolaza.



Slika 5.13 Shema položaja zavarivanja uzorka (2)



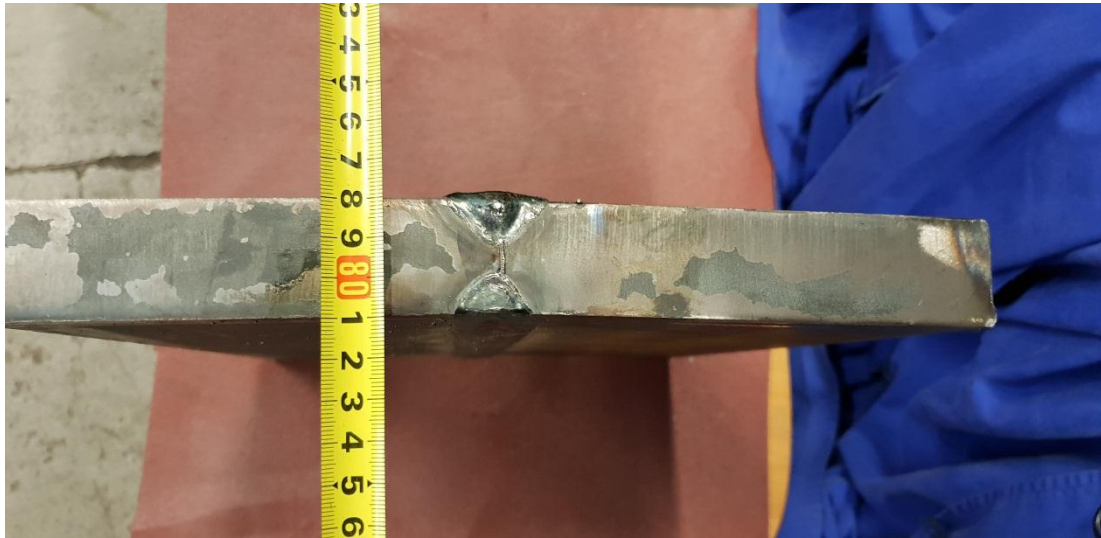
Slika 5.14 Shema zavarenog uzorka (2) sa označenim prolazima



**Tablica 5.4 Parametri zavarivanja za uzorak (2)**

Prolaz	Jakost struje, A	Napon, V	Brzina zavarivanja, cm/min	Slobodni kraj žice, mm	Unesena toplina, kJ/cm
2-1	550	39	25	30	41,184
2-2	550	39	25	30	41,184

**Slika 5.15 Uzorak (2) nakon zavarivanja**



**Slika 5.16 Sučeljeni zavar uzorka (2)**

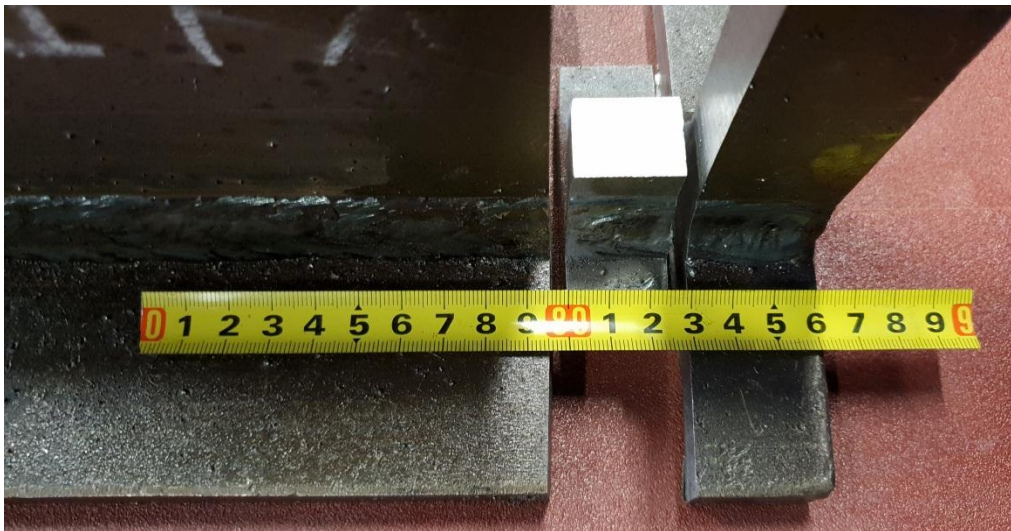
## **5.5. Provedena ispitivanja**

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 uz kratki osvrt na mikrostrukturu
- Mjerenje tvrdoće Vickers metodom HV10
- Radiografsko ispitivanje

### **5.5.1. Analiza makroizbruska**

Iz uzorka (1) izrezan je makroizbrusak na tračnoj pili. Slika 5.17 prikazuje grubo izrezan makroizbrusak. Sljedeći korak bilo je brušenje makroizbruska brusnim papirima granulacije 80, 100, 120, 150, 180 i 280. Ovaj se postupak provodio ručno. Slikom 5.18 prikazan je makroizbrusak nakon operacije ručnog brušenja.



**Slika 5.17** Grubo izrezan makroizbrusak iz uzorka (1)



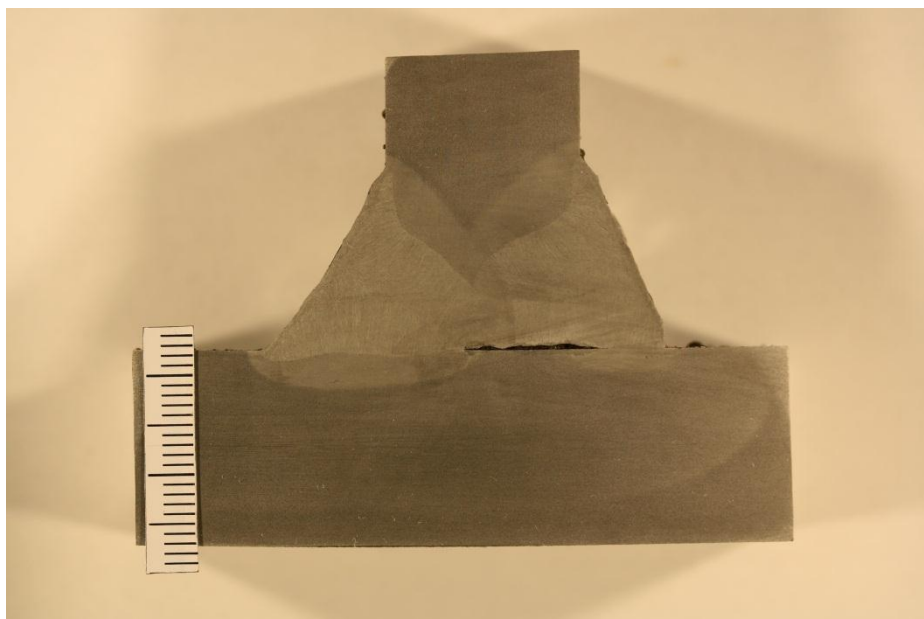
**Slika 5.18** Makroizbrusak nakon operacije ručnog brušenja

Nakon provedenog ručnog brušenja makroizbrusak je strojno brušen i poliran kako bi se u potpunosti pripremio za proces nagrivanja u otopini. Sljedeće granulacije korištenog brusnog papira su: 320, 600, 1000, 2400, 4000. Slika 5.19 prikazuje uređaj za brušenje i poliranje makroizbrusaka s mogućnošću polijevanja vodom. Slika 5.20 prikazuje makroizbrusak nakon nagrivanja u otopini, a slika 5.21 prikazuje opremu kojom je slikan makroizbrusak nakon nagrivanja u otopini.

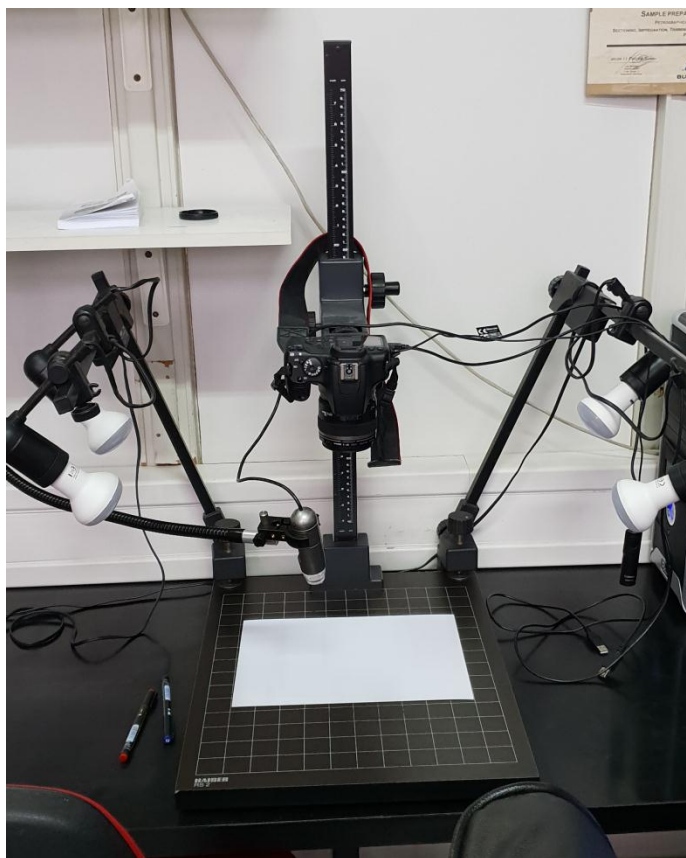




**Slika 5.19** Uredaj za brušenje i poliranje (Phoenix alpha)

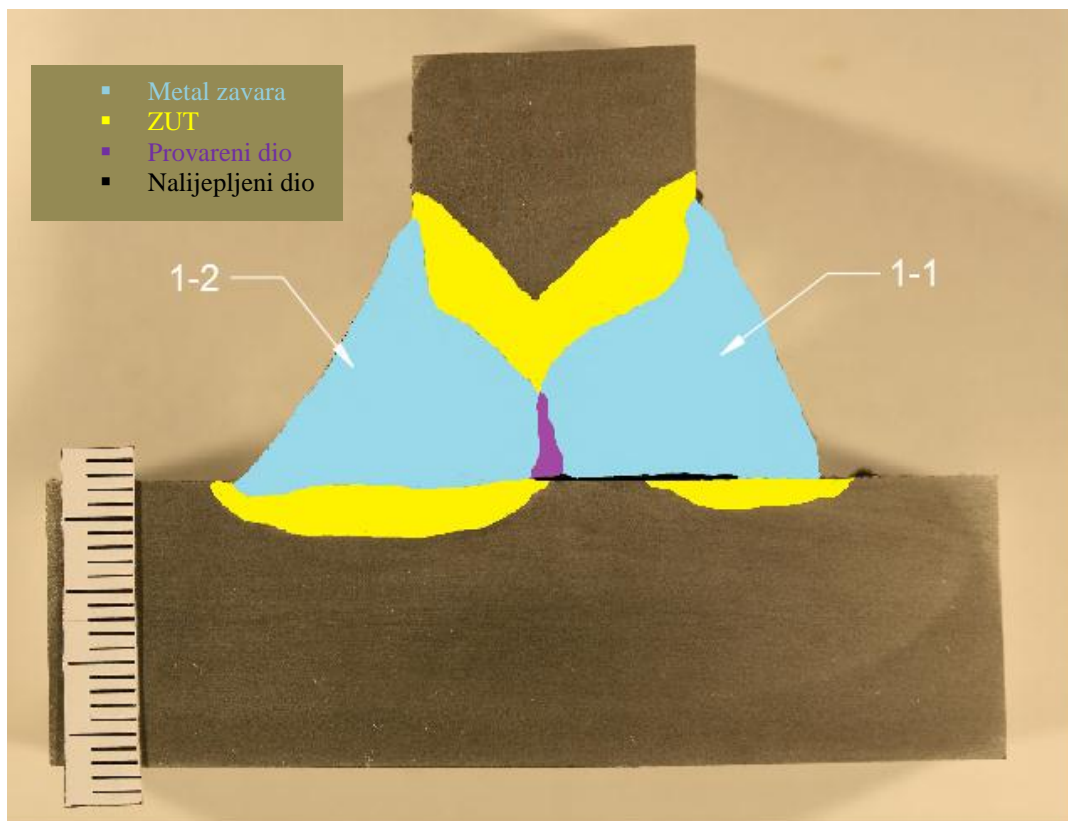


**Slika 5.20** Makroizbrusak nakon nagrizanja u otopini

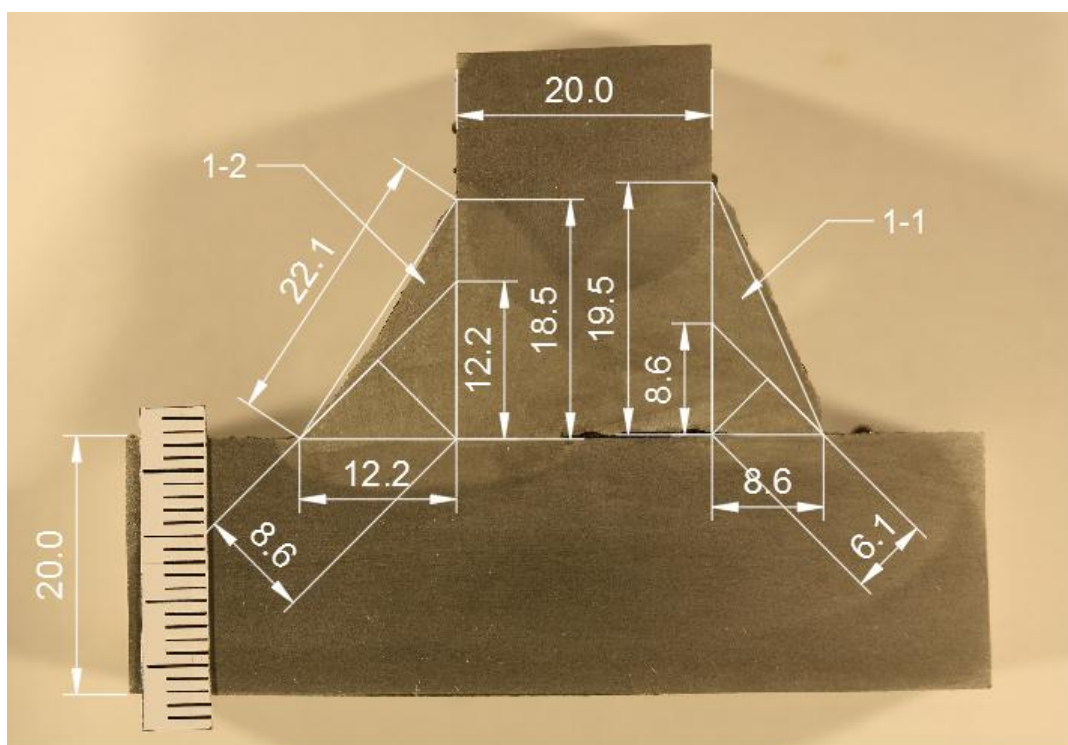


**Slika 5.21 Oprema za slikanje makroizbruska (Kaiser RS2 + Canon)**

Nakon analize makroizbruska odmah je vidljivo naljepljivanje na desnoj strani, tj. kod zavara 1-1 nastalog nakon prvog prolaza. Do naljepljivanja najčešće dolazi zbog slabijeg unosa topline u materijal. Naime, ovdje se radi o relativno velikim debljinama pa se toplina vrlo brzo odvodi od mjesta zavarivanja. Ukoliko usporedimo zavare 1-1 i 1-2, vidimo da je protaljenost na strani zavara 1-2 veća, a razlog tome može biti temperatura radnog komada koja je bila veća na početku zavarivanja 2. prolaza, nego na početku zavarivanja 1. prolaza ili loš položaj pištolja, tj. pištolj je bio previše orijentiran na vertikalnu ploču. Ovakva vrsta pogreške smanjuje kvalitetu zavara, a može se izbjeći povećanjem parametara zavarivanja (struje zavarivanja) ili primjenom odgovarajuće pripreme spoja (K spoj). Slika 5.22 prikazuje područja/zone metala zavara, ZUT-a, provarenog dijela i naljepljivanja, a slikom 5.23 prikazane su dimenzije zavara gdje je moguće uočiti da se veći dio zavara nalazi na vertikalnoj ploči. Zrna su u metalu zavara nešto sitnija nego u ZUT-u i osnovnom materijalu i ono se smanjuje prema sredini metala zavara, tj. zrno je grublje na granici metala zavara zbog veće brzine hlađenja.



Slika 5.22 Zone/područja zavara vidljive na makroizbrusku uzorka (1)



Slika 5.23 Dimenzije kutnog zavara uzorka (1)

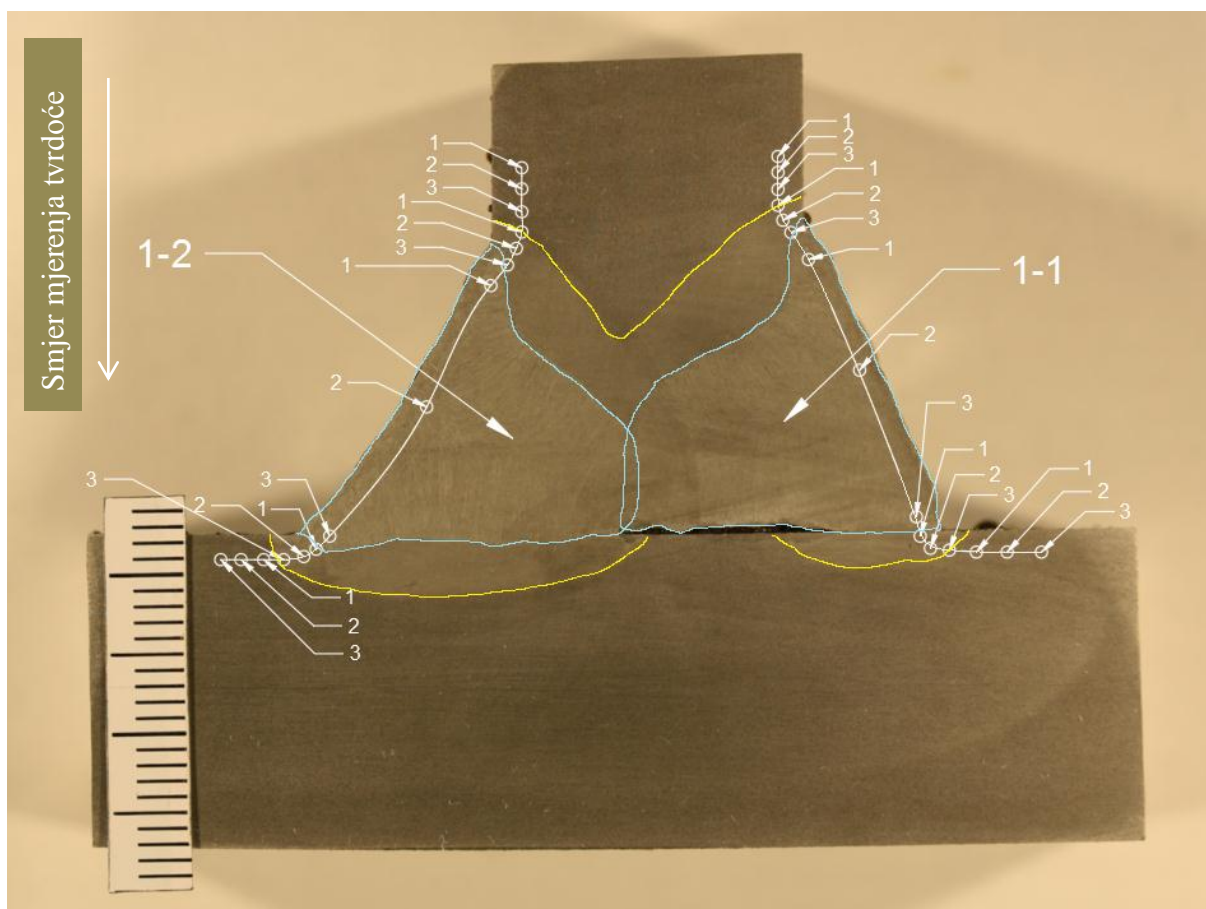
### 5.5.2. Mjerenje tvrdoće

Ispitivanje tvrdoće provedeno je Vickersovom metodom (HV10) na makroizbrusku uzorka (1). Ispitivanje je provedeno s obje strane, tj. na oba prolaza. Tvrdoća je mjerena na tvrdomjeru Reicherter TM12 prikazan slikom 5.24, a primijenjena sila je iznosila 10 kiloponda, odnosno 98,04 N. Ova metoda mjerenja tvrdoće se zasniva na utiskivanju dijamentnog 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. Shema mjerenja tvrdoće prikazana je slikom 5.25, a dobiveni rezultati dani su tablicom 5.5.



**Slika 5.24 Tvrdomjer Reicherter TM12**

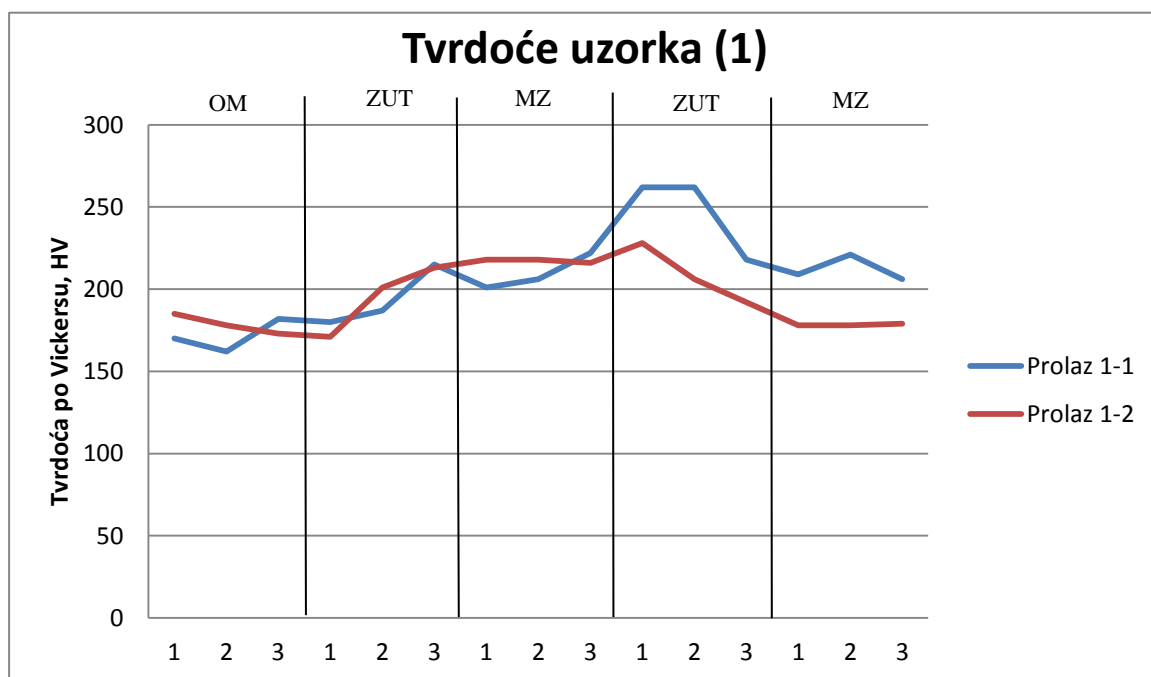




Slika 5.25 Shema mjerenja tvrdoće

Tablica 5.5 Rezultati mjerenja tvrdoće

Oznaka		Prolaz 1-1	Prolaz 1-2
1	Osnovni materijal	170	185
2		162	178
3		182	173
1	ZUT	180	171
2		187	201
3		215	213
1	Metal zavara	201	218
2		206	218
3		222	216
1	ZUT	262	228
2		262	206
3		218	192
1	Osnovni materijal	209	178
2		221	178
3		206	189



**Slika 5.26 Grafički prikaz tvrdoća uzorka (1) – HV10**

Slikom 5.26 dan je grafički prikaz izmjerenih tvrdoća. Analizom dijagrama možemo zaključiti kako je tvrdoća najveća u ZUT-u, nešto manja u metalu zavara, a najmanja u osnovnom materijalu.

### 5.5.3. Radiografsko ispitivanje

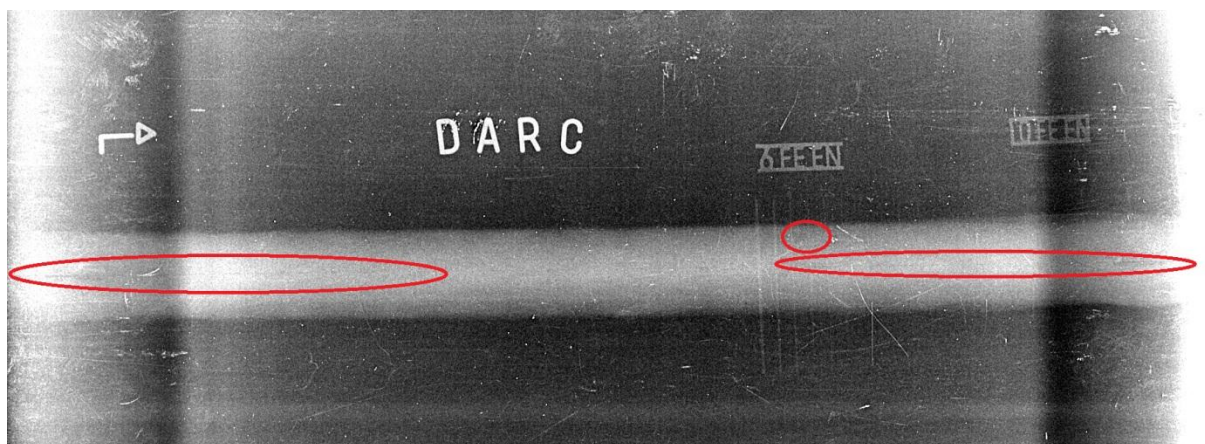
Radiografsko ispitivanje provodi se s ciljem uočavanja nepravilnosti zavara poput pora, uključaka, neprovarenosti, pukotina i sl. Na temelju pronađenih nepravilnosti može se ocijeniti kvaliteta zavara, tj. dali zavar zadovoljava određene zahtjeve ili ne. Ispitivanje je provedeno izvorom zračenja (RTG) na slikovne ploče te se skeniranjem slikovni zapis prebacuje u digitalni gdje se analizira prikladnim alatom (u ovom slučaju *iSee*). Tablicom 5.6 dani su podaci o korištenoj opremi kao i parametri snimanja i skeniranja, a slika 5.27 prikazuje pripremljeni komad za radiografsko ispitivanje. U ovom eksperimentalnom dijelu samo je uzorak (2) tj. sučeljeni spoj podvrgnut radiografskom ispitivanju.

**Tablica 5.6 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	250 kV
Struja	4 mA
Film fokus udaljenost	700 mm
Vrijeme	5 min
Parametri skeniranja	
Napon lasera	15 V
Napon fotomultiplikatora	5,25 V
Rezolucija skeniranja	50 $\mu\text{m}$



Slika 5.27 Pripremljeni komad za radiografsko ispitivanje



Slika 5.28 Radiografski snimci zavara na uzorku (2)



Radiografski snimci zavara na uzorku (2) prikazani su slikom 5.28. Detaljnom analizom tih snimaka može se uočiti nepotpuni provar skoro po cijeloj dužini zavara i poneki uključak. Moguće rješenje za izbjegavanje nepotpunog provara u ovom slučaju bilo bi povećanje parametara (struje zavarivanja) ili drugačije oblikovanje pripreme spoja.

## 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 5.7 dane su prednosti i nedostaci za D-arc i konvencionalni MAG postupak zavarivanja.

**Tablica 5.7 Prednosti i nedostaci D-arc i konvencionalnog MAG postupka [5]**

KRITERIJ	POSTUPAK	
	<i>D-ARC</i>	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. Provođenjem eksperimentalnog dijela ovog rada ipak su uočeni neki ključni nedostaci koji čine štrcajući luk trenutno nezamjenjivim. Naime, tijekom ispitivanja dobivenih uzoraka uočene su česte greške poput neprovarenosti i naljepljivanja kojima se smanjuje kvaliteta zavara. Analizom mikrostrukture vidljiva je i grubozrnata struktura na makroizbrusku koja se prostire od sredine prema licu zavara. Te nepravilnosti mogu biti uzrokovane bilo nepravilnim izborom parametara, bilo nepravilnom pripremom spoja. D-arc sustav zavarivanja je relativno nov i slabo razvijen postupak zavarivanja, no pokazuje brojne prednosti u odnosu na konvencionalni štrcajući luk i definitivno ima potencijala za daljnji razvoj.

## 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] <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=6022>, preuzeto s interneta 11.02.2019.
- [12] <https://www.ezg.hr/>, preuzeto s interneta 11.02.2019.

## **PRILOZI**

I. CD-R disc