

# Primjena tehnike aktivnog hlađenja aditivne proizvodnje električnim lukom i žicom

---

**Grdić, Adriana**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2022**

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

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:977017>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-07-18**

*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **DIPLOMSKI RAD**

**Adriana Grdić**

Zagreb, 2022.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Ivica Garašić

Student:

Adriana Grdić

Zagreb, 2022.

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

Zahvaljujem mentoru prof. dr. sc. Ivici Garašiću na ukazanom povjerenju i stručnom vođenju kroz izradu diplomskog rada.

Zahvaljujem asistentima Ivanu Juriću, mag. ing. mech. i Mislavu Štefoku, mag. ing. mech. na svim savjetima, pruženoj pomoći i stručnom vođenju tijekom izrade diplomskog rada.

Veliko hvala mojim roditeljima, suprugu, sestri i cijeloj obitelji na velikoj podršci, razumijevanju i pomoći još od samog početka mog studiranja.

Posebno zahvaljujem svojoj dječici, Leoni i Emili na njihovoj strpljivosti i nepresušnoj motivaciji.

Adriana Grdić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
**FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE**



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

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

## DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **ADRIANA GRDIĆ** Mat. br.: 0035208851

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Primjena tehnike aktivnog hlađenja aditivne proizvodnje električnim lukom i žicom**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Application of active cooling technique during wire and arc additive manufacturing**

Opis zadatka:

U teorijskom dijelu ukratko opisati postupak aditivne proizvodnje električnim lukom i žicom te objasniti toplinski ciklus materijala pri takvoj proizvodnji. Objasniti tehniku aktivnog hlađenja kod aditivne proizvodnje električnim lukom i žicom. Detaljno obraditi AC MIG postupak s posebnim naglaskom na dinamičku karakteristiku procesa i opremu. Navesti utjecajne parametre i područje primjene takvog postupka.

U praktičnom dijelu postaviti eksperiment za izradu uzoraka aditivnom proizvodnjom električnim lukom i žicom uz praćenje i kontrolu toplinskog ciklusa. Provesti optimizaciju parametara aditivne proizvodnje električnim lukom i žicom uz primjenu AC MIG postupka na dupleks čeliku. Pri tome snimiti i analizirati dinamičku karakteristiku te, na temelju iste, ocijeniti stabilnost procesa. Primijeniti tehniku aktivnog hlađenja te ispitati njen utjecaj na geometriju, homogenost i mehanička svojstva proizvedenog elementa. Zaključno, odrediti primjenjivost tehnike aktivnog hlađenja za poboljšanje svojstava proizvoda načinjenog WAAM postupkom.

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

Zadatak zadan:  
5. svibnja 2022.

Rok predaje rada:  
7. srpnja 2022.

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

Zadatak zadao:  
prof. dr. sc. Ilica Garašić

Predsjedava Povjerenstva:  
prof. dr. sc. Eiserka Runje

**SADRŽAJ**

SADRŽAJ .....	I
POPIS SLIKA .....	III
POPIS TABLICA.....	V
POPIS OZNAKA .....	VI
POPIS KRATICA .....	VII
SAŽETAK.....	VIII
SUMMARY .....	IX
1. UVOD.....	1
2. Aditivna proizvodnja električnim lukom i žicom.....	2
2.1. Prednosti WAAM tehnologije.....	4
2.2. Ograničenja WAAM tehnologije .....	5
2.3. Tehnika aktivnog hlađenja.....	8
3. AC MIG POSTUPAK ZAVARIVANJA .....	11
3.1. Utjecajni parametri.....	15
3.2. Oprema za zavarivanje .....	19
3.2.1. Izvor struje za zavarivanje .....	19
3.3. Materijali .....	20
3.3.1. Aluminijske i aluminijske legure .....	20
3.3.2. Legure na bazi magnezija .....	21
3.3.3. Nehrđajući čelik .....	21
4. EKSPERIMENTALNI DIO .....	23
4.1. Oprema za izradu uzoraka.....	23
4.1.2. Dodatni materijal .....	25
4.1.3. Zaštitni plin .....	26
4.2. Optimiranje parametara zavarivanja .....	27
4.3. Izrada uzoraka .....	29
4.3.1. Izrada uzorka A .....	32

---

4.3.2. Izrada uzorka B .....	33
4.3.3. Izrada uzorka C .....	34
4.3.4. Izrada uzorka D .....	35
4.4. Priprema uzoraka za ispitivanje .....	38
4.5. Analiza procesa .....	41
4.5.1. Procjena stabilnosti procesa .....	41
4.5.2. Dinamička karakteristika procesa .....	47
4.5.3. Analiza toplinskog ciklusa .....	50
4.6. Analiza uzoraka.....	52
4.6.1. Makroanaliza.....	52
4.6.2. Mjerenje tvrdoće .....	54
4.6.3. Radiografsko ispitivanje .....	57
5. ZAKLJUČAK.....	62
LITERATURA.....	64

## POPIS SLIKA

Slika 1.	Shematski prikaz aditivne proizvodnje električnim lukom i žicom [1] .....	2
Slika 2.	Shematski prikaz zida izrađen WAAM postupkom [5] .....	3
Slika 3.	Oblik valjka za smanjenje zaostalih naprezanja i deformacija [9] .....	7
Slika 4.	Usporedba tehnike aktivnog hlađenja s normalnim i pasivnim hlađenjem [10] .....	9
Slika 5.	Prikaz snimanja temperature zida tijekom nanošenja slojeva WAAM postupkom [6] .....	9
Slika 6.	Usporedba toplinskog ciklusa tehnike aktivnog hlađenja s normalnim i pasivnim hlađenjem [10] .....	10
Slika 7.	Dinamička karakteristika AC MIG postupka [11] .....	12
Slika 8.	Valni oblik struje AC MIG-a [12] .....	13
Slika 9.	Numerička simulacija odvajanja rastaljene kapljice metala kod AC MIG-a [12] ..	13
Slika 10.	Izgled zavarenih spojeva primjenom AC i DC MIG postupka s istim parametrima zavarivanja [14] .....	14
Slika 11.	Utjecaj % EN na oblik zavara i geometriju zavarenog spoja [14] .....	16
Slika 12.	Tipovi krivulja dinamičke karakteristike za AC MIG postupa ( $i = f(t)$ ) [13] .....	17
Slika 13.	Utjecaj oblika krivulje (A, B, C, D tip prema slici 12.) na dubinu penetracije (lijevo) te utjecaj % EN na dubinu penetracije (desno) [13] .....	18
Slika 14.	Utjecaj oblika krivulje (A, B, C, D tip prema slici 12.) na širinu kapljice (lijevo) te utjecaj % EN na širinu kapljice (desno) [13] .....	18
Slika 15.	Shematski prikaz opreme za AC MIG zavarivanje [15] .....	19
Slika 16.	Izvor struje za zavarivanje DW-300 [14] .....	20
Slika 17.	Robotska stanica Almega OTC AX V6 i oprema za zavarivanje .....	24
Slika 18.	Izvor struje za zavarivanje Welbee W400 [20] .....	25
Slika 19.	Boca sa zaštitnim plinom Inoxline N2 .....	26
Slika 20.	Odabrani ulazni parametri na izvoru struje za zavarivanje W400 [20] .....	27
Slika 21.	Vizualni prikaz izračuna EN ratio [20] .....	28
Slika 22.	Pripremljena i pričvršćena podloga za zavarivanje .....	30
Slika 23.	Postav eksperimenta .....	31
Slika 24.	Uzorak A nakon zavarivanja .....	32
Slika 25.	Uzorak B nakon zavarivanja .....	34
Slika 26.	Uzorak C nakon zavarivanja .....	35



Slika 27.	Uzorak D nakon zavarivanja .....	36
Slika 28.	Uzorci nakon čišćenja i odmašćivanja .....	38
Slika 29.	Rezanje uzorka tračnom pilom.....	39
Slika 30.	Uzorak nakon rezanja.....	39
Slika 31.	Uzorak B nakon glodanja .....	40
Slika 32.	Grafički prikaz jakosti struje u vremenu za uzorak A.....	42
Slika 33.	Grafički prikaz napona u vremenu za uzorak A.....	42
Slika 34.	Grafički prikaz jakosti struje u vremenu za uzorak B.....	43
Slika 35.	Grafički prikaz napona u vremenu za uzorak B .....	44
Slika 36.	Grafički prikaz jakosti struje u vremenu za uzorak C .....	45
Slika 37.	Grafički prikaz napona u vremenu za uzorak C .....	45
Slika 38.	Grafički prikaz jakosti struje u vremenu za uzorak D.....	46
Slika 39.	Grafički prikaz napona u vremenu za uzorak D.....	47
Slika 40.	Dinamička karakteristika DC Pulse postupka zavarivanja.....	48
Slika 41.	Dinamička karakteristika AC MIG postupka zavarivanja .....	49
Slika 42.	Omjer površina struje za vrijeme pozitivnog i negativnog polariteta žice.....	50
Slika 43.	Usporedba toplinskog ciklusa normalnog i aktivnog hlađenja .....	51
Slika 44.	Makroizbrusak uzorka A .....	52
Slika 45.	Makroizbrusak uzorka B .....	53
Slika 46.	Makroizbrusak uzorka C .....	53
Slika 47.	Makroizbrusak uzorka D .....	54
Slika 48.	Točke mjerenja tvrdoće na uzorku A.....	54
Slika 49.	Grafički prikaz tvrdoće uzoraka .....	56
Slika 50.	Oprema za radiografsko ispitivanje.....	58
Slika 51.	Uzorci za radiografsko ispitivanje postavljeni na slikovnu ploču.....	58
Slika 52.	Radiografske snimke uzoraka A i B.....	59
Slika 53.	Radiografska snimka uzoraka C i D.....	60
Slika 54.	Površinske nepravilnosti na uzorcima za radiografsko ispitivanje .....	61

**POPIS TABLICA**

Tablica 1. Karakteristike pozitivnog i negativnog polariteta žice za zavarivanje [12] .....	14
Tablica 2. Značajke izvora Welbee W400 [19].....	25
Tablica 3. Orijentacijski kemijski sastav dodatnog materijala [20] .....	26
Tablica 4. Mehanička svojstva dodatnog materijala [20].....	26
Tablica 5. Optimalni parametri zavarivanja za AC MIG i DC Pulse postupak zavarivanja ..	29
Tablica 6. Skupni podaci o izrađenim uzorcima .....	37
Tablica 7. Vrijednosti tvrdoće HV 10 uzoraka.....	55
Tablica 8. Parametri snimanja i oprema korištena za radiografsko ispitivanje.....	57

## POPIS OZNAKA

Oznaka	Mjerna jedinica	Opis oznake
Ar	-	Argon
Cr	-	Krom
$E$	kJ/cm	Energija luka
$I_B$	s	Jakost pozadinske struje
$I$	A	Jakost struje zavarivanja
$I_N$	A	Jakost negativne struje
$I_P$	A	Jakost struje pulsa
Mo	-	Molibden
Ni	-	Nikal
N <sub>2</sub>	-	Dušik
O <sub>2</sub>	-	Kisik
$P_{EN}$	Ams	Površina pri kojoj je elektroda negativna
$P_{EP}$	Ams	Površina pri kojoj je elektroda pozitivna
$Q$	kJ/cm	Unos topline
$Q_{kond}$	J	Toplina odvedena kondukcijom
$Q_{konv}$	J	Toplina odvedena konvekcijom
$Q_{rad}$	J	Toplina odvedena zračenjem
$t$	s	Vrijeme
$t_B$	s	Vrijeme trajanja pozadinske struje
$t_N$	s	Vrijeme trajanja negativnog polariteta
$t_P$	s	Vrijeme trajanja pozitivnog polariteta
$U$	V	Napon električnog luka
$v_Z$	cm/min	Brzina zavarivanja
% EN	-	engl. <i>Electrode Negative</i>

**POPIS KRATICA**

<b>Kratika</b>	<b>Opis</b>
AC MIG	<i>Alternating Current Metal Inert Gas</i> – elektrolučno zavarivanje izmjeničnom strujom
CMT	<i>Cold Metal Transfer</i>
DCEN	<i>Direct Current Electrode Negative</i>
DCEP	<i>Direct Current Electrode Positive</i>
DED	<i>Directed Energy Deposition</i> – taloženje usmjerenom energijom
EBM	<i>Electron Beam Melting</i> – taloženje elektronskim snopom
GMAW	<i>Gas Metal Arc Welding</i> – elektrolučno zavarivanje metala
GTAW	<i>Gas Tungsten Arc Welding</i> - elektrolučno zavarivanje netaljivom elektrodom u zaštiti inertnog plina
HV 10	Tvrdoća prema Vickersu
LEWD	<i>Layer Edge to Water Distance</i> – udaljenost razine vode od zadnjeg sloja
LMD	<i>Laser Metal Deposition</i> – taloženje metala laserom
MAG	<i>Metal Active Gas</i> – elektrolučno zavarivanje taljivom žicom u prisutnosti aktivnog plina
MIG	<i>Metal Inert Gas</i> – elektrolučno zavarivanje taljivom žicom u prisutnosti inertnog plina
NIAC	<i>Near Immersion Active Cooling</i> – aktivno hlađenje bliskim uranjanjem
PAW	<i>Plasma Arc Welding</i> – elektrolučno zavarivanje plazmom
PREN	<i>Pitting Resistance Equivalent Number</i> - označava djelotvornu sumu koja se koristi za procjenu otpornosti na rupičastu koroziju
TIG	<i>Tungsten Inert Gas</i> – zavarivanje netaljivom elektrodom u prisutnosti zaštitnog plina
VP	<i>Variable Polarity Gas Metal Arc Welding</i> – elektrolučno zavarivanje pomoću promjenjivog polariteta
WAAM	<i>Wire and Arc Additive Manufacturing</i> – aditivna proizvodnja električnim lukom i žicom
WFS	<i>Wire feed speed</i> – brzina dodavanja žice

## **SAŽETAK**

Tema diplomskog rada je primjena tehnike aktivnog hlađenja pri aditivnoj proizvodnji električnim lukom i žicom. Diplomski rad sastoji se od teorijskog i praktičnog dijela.

U teorijskom dijelu ukratko je opisana aditivna proizvodnja električnim lukom i žicom te su navedene glavne prednosti i ograničenja te proizvodnje. Objašnjena je tehnika aktivnog hlađenja i toplinski ciklus kod aditivne proizvodnje električnim lukom i žicom. U drugom poglavlju detaljno je obrađen AC MIG postupak s posebnim naglaskom na dinamičku karakteristiku procesa i opremu. Također, navedeni su utjecajni parametri i primjenjivi materijali AC MIG postupka zavarivanja.

U praktičnom dijelu izrađeni su uzorci aditivnom proizvodnjom električnim lukom i žicom pomoću AC MIG i DC Pulse postupka uz praćenje i kontrolu toplinskog ciklusa. Provedena je optimizacija parametara zavarivanja za izradu uzoraka aditivnom proizvodnjom električnim lukom i žicom od dupleks čelika. Snimanjem i analizom dinamičke karakteristike ocijenjena je stabilnost procesa. Utvrđen je utjecaj tehnike aktivnog hlađenja na geometriju, homogenost i mehanička svojstva proizvedenih uzoraka. Pored toga, prikazan je doprinos tehnike aktivnog hlađenja u poboljšanju aditivne proizvodnje električnim lukom i žicom.

Ključne riječi: aditivna proizvodnja električnim lukom i žicom, tehnika aktivnog hlađenja, AC MIG, dupleks čelik

## **SUMMARY**

The topic of this thesis is application of active cooling technique during wire and arc additive manufacturing. The paper consists of a theoretical and experimental part.

In theoretical part is briefly described wire and arc additive manufacturing with its main advantages and limitations. Active cooling technique and thermal cycle during wire and arc additive manufacturing are described. In the second chapter, AC MIG welding process is detailed explained with special emphasis on voltage and current waveform and equipment for this process. Also, influence welding parameters and applicable materials for AC MIG process are specified.

In experimental part, samples are fabricated by wire and arc additive manufacturing using AC MIG and DC Pulse welding processes. Optimization of wire and arc additive manufacturing parameters for fabrication samples of duplex stainless steel is conducted. Process stability is assessed by recording and analysing voltage and current waveform. Impact of active cooling technique on geometric properties, homogeneity and mechanical properties is observed. Additionally, contribution of active cooling technique on improvement of wire and arc additive manufacturing is shown.

Key words: wire and arc additive manufacturing, active cooling technique, AC MIG, duplex steel

## 1. UVOD

Posljednjih nekoliko godina, aditivna proizvodnja potpuno je promijenila proizvodni obrazac zahvaljujući mogućnosti izrade kompleksnih komponenti uz veliku uštedu materijala, što je nezamislivo konvencionalnim proizvodnim postupcima. Svaka metoda aditivne proizvodnje koja se temelji na taloženju materijala ima svoju nišu koja se uspostavlja ovisno o prednostima i ograničenjima te metode. Aditivna proizvodnja električnim lukom i žicom omogućuje brzu i jednostavnu izradu velikih komponenti od širokog raspona materijala kada nije potrebno postići visoku dimenzijsku točnost elementa [1].

U vrijeme kada su mnoge tvrtke suočene s problemom nedostatka sirovina i materijala te dugačkim rokovima isporuke istih, aditivna proizvodnja električnim lukom i žicom pruža mogućnost izrade polugotovih proizvoda, vrlo blizu konačnih dimenzija, u vlastitim proizvodnim pogonima. Oprema koja je za to potrebna uključuje robotiziranu stanicu te izvor struje za zavarivanje što većina proizvodno orijentiranih tvrtki već posjeduje [1].

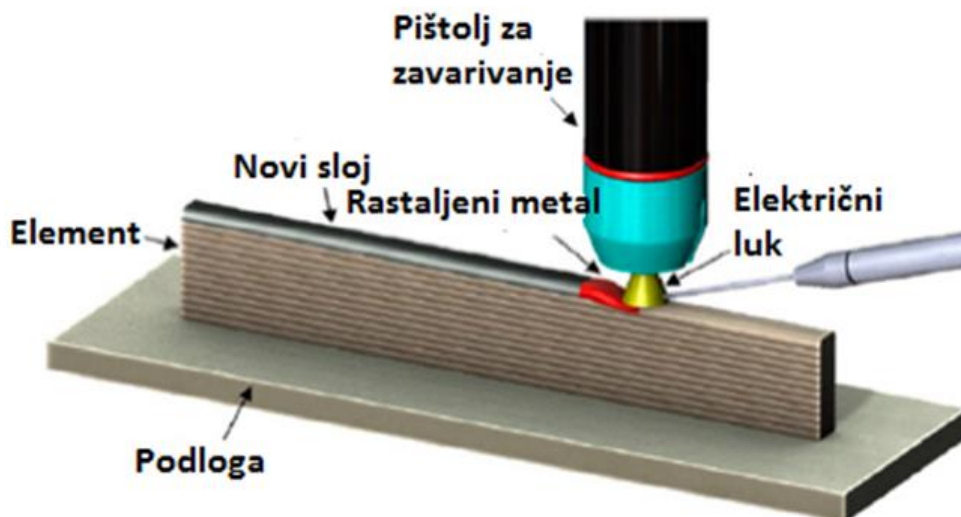
Suvremeni postupci zavarivanja pružaju odgovor na zahtjeve tržišta za povećanjem produktivnosti, kontrolom unosa topline, smanjenjem deformacije te otpornost zavarenog spoja na koroziju. Također, suvremeni postupci zavarivanja nastali su zbog uvođenja novih materijala (visokočvrsti čelici, dupleks čelici, pocinčani limovi itd.) koji su teže zavarljivi standardnim postupcima zavarivanja. Do sada se razvilo najviše poboljšanja kod MIG/MAG postupka zavarivanja zbog mogućnosti preciznog upravljanja prijenosom metala u električnom luku.

AC MIG nova je inačica MIG postupka čijom se primjenom dobiva veći depozit materijala uz manju penetraciju. AC MIG postupak primjenjuje se pri zavarivanju aluminijskih i magnezijevih legura, ali i ostalih konstrukcijskih metala kada je potrebno postići bolju kontrolu procesa u odnosu na standardni MIG postupak [2].

## 2. Aditivna proizvodnja električnim lukom i žicom

Aditivna proizvodnja električnim lukom i žicom – WAAM (engl. *Wire and Arc Additive Manufacturing*) temelji se na izradi metalnih dijelova taloženjem materijala sloj na sloj. Prema ASTM-u, WAAM pripada skupini taloženja usmjerenom energijom – DED (engl. *Directed Energy Deposition*) s postupcima EBM - taljenje s elektronskim snopom (engl. *Electron Beam Melting*) i LMD – taloženje metala pomoću lasera (engl. *Laser Metal Deposition*). Zajednička karakteristika ovih postupaka je korištenje usmjerene toplinske energije za spajanje materijala taljenjem. Iako se EBM-om i LMD-om izrađuju komponente koje imaju vrlo precizne dimenzijske tolerancije, nizak je depozit materijala čime se povećava vrijeme izrade. Kod WAAM postupka električni luk se koristi kao izvor energije, a žica je polazni materijal, pri tome je postignut velik depozit materijala i kratko vrijeme izrade [3].

WAAM postupak izvodi se u robotiziranoj stanici gdje robot upravlja procesom i osigurava automatsko gibanje pištolja za zavarivanje. Pištolj stvara konačni oblik navarivanjem rastaljenog metala na podlogu. WAAM postupak završava navarivanjem određenog broja prolaza i postizanjem tražene visine radnog komada. Nakon toga slijedi rezanje komada od podloge i daljnja strojna obrada (glodanje, brušenje i dr.). Shematski prikaz WAAM postupka dan je na slici (Slika 1.) [1].



Slika 1. Shematski prikaz aditivne proizvodnje električnim lukom i žicom [1]



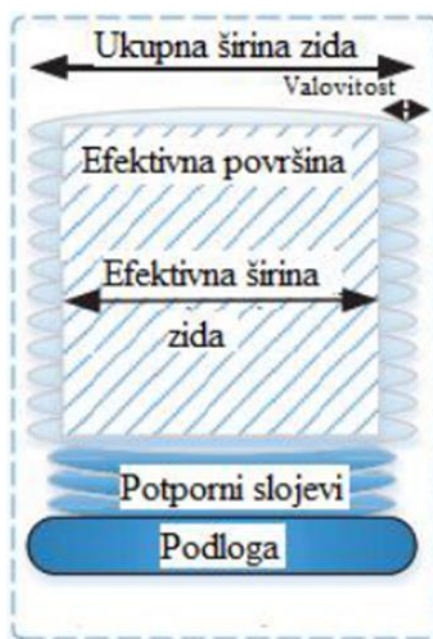
Oprema za WAAM postupak uključuje [4]:

- standardnu opremu za zavarivanje (pištolj i izvor struje za zavarivanje, polikabel)
- robota ili CNC portalni stroji, kontrolnu jedinicu
- dodavač žice.

Dodavač žice upravlja količinom nataloženog materijala koja se kreće od 50 do 130 g/min. Širina WAAM zida, dobivenog taloženjem kapljica rastaljenog metala, najmanje iznosi 1 do 2 mm [4].

Zavarivanje u više prolaza uzrokuje površinske nepravilnosti (valovitost površine). Površinske nepravilnosti mogu se ukloniti naknadnom strojnom obradom odvajanjem čestica.

Slika 2. prikazuje shematski prikaz zida izrađenog WAAM postupkom. Efektivna širina zida dobiva se uklanjanjem valovitosti te rezanjem zida od podloge i potpornih slojeva [5].



Slika 2. Shematski prikaz zida izrađen WAAM postupkom [5]

WAAM se temelji na osnovnim načelima automatiziranog zavarivanja, pri tome se oslanja na postupke [1]:

- elektrolučno zavarivanje u zaštiti plina (engl. *Metal Inert Gas* -MIG ili engl. *Gas Metal Arc Welding* - GMAW)

- elektrolučno zavarivanje plazmom (engl. *Plasma Arc Welding* - PAW)
- elektrolučno zavarivanje netaljivom elektrodom u zaštiti inertnog plina (engl. *Gas Tungsten Arc Welding* – GTAW ili engl. *Tungsten Inert Gas* - TIG)
- suvremeni postupci MIG/MAG (npr. CMT – engl. *Cold Metal Transfer*) postupak.

Odabrani postupka zavarivanja za izradu komponente WAAM tehnologijom ovisi najviše o materijalu, potom i zahtijevanim geometrijskim značajkama te traženoj kvaliteti površine zida. Kod WAAM-a najčešće korišteni postupci su MIG i MAG (engl. *Metal Active Gas*) pri čemu se električni luk uspostavlja između vrha taljive žice i radnog komada pod zaštitom inertnog ili aktivnog plina. Količina nataloženog materijala ovisi o parametrima zavarivanja i dodatnom materijalu, ali se kreće od 15 do 160 g/min što omogućuje izradu velikih komponenti u kratkom vremenskom rasponu [1].

Zajednička karakteristika plazma zavarivanja i TIG-a je da koriste netaljivu volframovu elektrodu za uspostavu električnog luka pod zaštitom inertnog plina te je potreban dodatni mehanizam za dobavu dodatnog materijala, dok je kod MIG/MAG-a automatizirano dodavanje žice. Plazma zavarivanje koristi se najčešće kod titana i njegovih legura, a količina nataloženog materijala iznosi oko 30 g/min [1].

Suvremeni CMT postupak omogućuje poboljšanje stabilnosti procesa i upravljanje taloženjem rastaljenog metala sa smanjenim unosom topline zbog čega je sve više korišten u aditivnoj proizvodnji [1].

U ovom radu ispituje se primjenjivost relativno novog AC MIG postupka u aditivnoj proizvodnji električnim lukom i žicom. Povoljna karakteristika AC MIG postupka je veći depozit materijala u odnosu na klasični MIG postupak, što je vrlo važno kod WAAM tehnologije. No, ograničenje AC MIG-a je stabilnost u vrlo uskom rasponu parametara te je upitno može li se održati stabilnost električnog luka tijekom izrade komponente WAAM tehnologijom. U eksperimentalnom dijelu prikazani su rezultati i zaključak tog ispitivanja.

## **2.1. Prednosti WAAM tehnologije**

Prednosti WAAM postupka su brojne, a najvažnija prednost je velika ušteda materijala u odnosu na konvencionalne proizvodne postupke. U usporedbi s ostalim postupcima aditivne proizvodnje metalnih dijelova, WAAM ima puno niže investicijske troškove te su cijene

dodatnog materijala (žice) puno niže u odnosu na cijene praha. Investicijski troškovi uključuju nabavu robotizirane stanice i izvora struje za zavarivanje, što većina proizvodno orijentiranih tvrtki već posjeduje. WAAM omogućuje brzu i jeftinu izradu komponenti od širokog raspona primjenjivih materijala. Jedini uvjet koji materijal mora ispuniti je da se može rastaliti, odnosno mora biti zavarljiv. Uz visoki depozit materijala moguće je izraditi složene i jednostavne oblike, neograničenih dimenzija. Koristeći WAAM postupak moguće je izraditi oblike vrlo blizu zahtijevanih, konačnih dimenzija te tako uštedjeti na materijalu, što je vrlo značajno kod skupih materijala. Pretpostavlja se da će WAAM uskoro ući u širu primjenu u mnogobrojnim granama industrije, posebice zrakoplovnoj, svemirskoj te nuklearnoj industriji [5].

## 2.2 Ograničenja WAAM tehnologije

Usprkos brojnih prednosti, WAAM postupak obilježavaju i određena ograničenja koja sputavaju širu primjenu WAAM-a. Ipak, provode se mnoga istraživanja s ciljem eliminacije ili smanjenja postojećih ograničenja WAAM postupka.

Prvenstveno, WAAM postupak puno je prikladniji za izradu velikih i manje složenih, nego malih i složenih komponenti. Također, WAAM postupak nije moguće primijeniti kada je zahtijevana visoka rezolucija i dimenzijska točnost komponente. Upravo to ograničenje jasno definira područje primjene WAAM-a [6].

Uobičajene pogreške zavarivanja također su povezane s WAAM postupkom, a to su poroznost, ugorine i nadvišenja. Odabirom i regulacijom protoka zaštitnog plina, optimiranjem parametara zavarivanja moguće je spriječiti ili barem ublažiti pojavu navedenih pogrešaka [5].

Dijelovi proizvedeni WAAM postupkom imaju značajan problem sa zaostalim naprezanjem i deformacijom kao i gruboznatu strukturu. Deformacije nastaju zbog velikog unosa topline pri čemu se osnovna metalna podloga savija, a pri tome deformira i zid koji se izrađuje. Zaostala naprezanja povezana su s nejednolikim širenjem i skupljanjem materijala tijekom hlađenja. Hlađenje rastaljenog metala na krutoj podlozi uzrokuje plastične i elastične deformacije. Zaostala naprezanja najveća su u uzdužnom smjeru. Ona za čelik mogu biti visoka kao granica razvlačenja tog čelika pri sobnoj temperaturi [7].

Kontrola zaostalih napreznja i deformacija ima veliku važnost zato što utječe na tolerancije dijela i uzrokuje greške u materijalu. Postoji više metoda kojima se nastoji reducirati zaostala napreznja i deformacije, neke od njih su [7]:

- uklještenje podloge za zavarivanje
- selektivan način taloženja metala
- optimalan izbor putanje taloženja materijala
- određivanje optimalne temperature međuprolaza
- vertikalno valjanje međuprolaza i dr.

Ključni korak pri izradi komponente WAAM postupkom je pričvršćenje podloge čime se eliminira mogućnost da se podloga tijekom navarivanja savije i zatim deformira navareni zid.

Najbolja metoda za reduciranje zaostalih napreznja i deformacija je kontrola napreznja prilikom nanošenja slojeva materijala. Mnoga istraživanja usmjerena na smanjenje zaostalih napreznja pokazala su da se taloženjem u nizu, predgrijavanjem ili hlađenjem između prolaza učinkovito smanjuju napreznja [7].

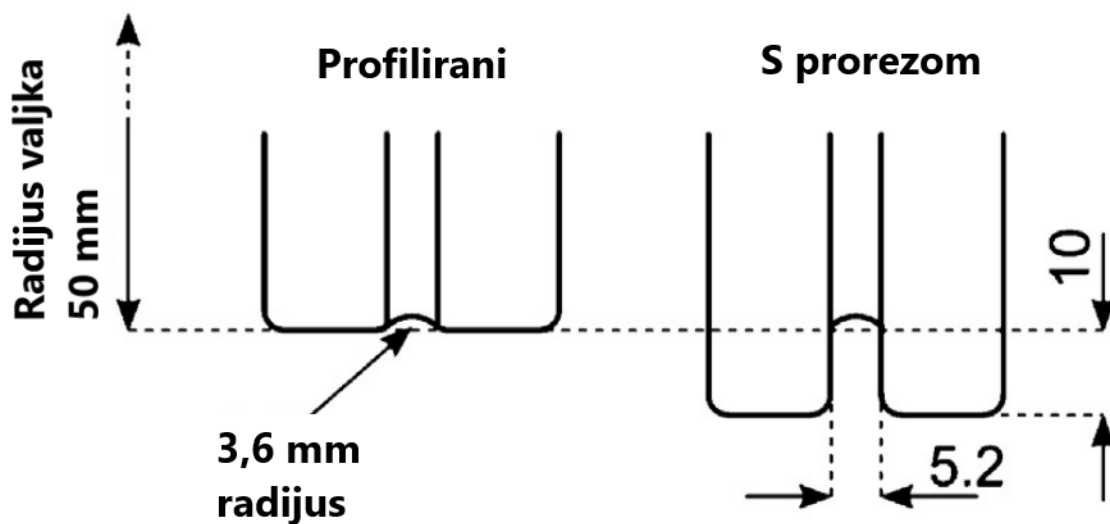
Uklještenjem podloge smanjuje se deformacija, ali se zaostala napreznja nakon otpuštanja i dalje nalaze u zidu. Potencijalno rješenje za uklanjanje deformacije je razvijanje strategije nanošenja slojeva tako da se odredi najpogodnija ravnina simetrije komada i da se osnovna podloga pozicionira na sredinu komada. Zatim se slojevi nanose naizmjenično s jedne i s druge strane kako bi se napreznja međusobno anulirala. Ta strategija naziva se *Balanced Building Strategy* ili *Symmetrical Building* [8].

Jedan od načina smanjenja deformacija je i selektivni pristup taloženju gdje se prvo natalože serije malih dijelova, a nakon toga se ti dijelovi spajaju zajedno u jednu cjelinu. Manji dijelovi postavljeni su okomito na smjer druge putanje. Selektivno taloženje može smanjiti deformacije konačnog dijela zbog činjenice da se deformacije nastale hlađenjem pojave prije nego što je nataložen potpuni sloj [7].

Utvrđeno je da i oblik putanje pištolja ima utjecaj na zaostala napreznja. Kraća linearna raster putanja uzrokuje manje izvijanje podloge. Istraživanja su pokazala da kontinuirano taloženje bez hlađenja između prolaza rezultira manjim deformacijama. Ipak, kontinuirano taloženje može uzrokovati preveliki unos topline što uzrokuje odstupanje od tolerancije i lošije površinske parametre. Potrebno je ostvariti ravnotežu između hlađenja među prolazima i

održavanja dovoljne temperature predgrijavanja za smanjenje deformacija, odnosno pomoću razvijene termo-mehaničke analize odrediti optimalnu temperaturu međuprolaza [7].

Drugi način smanjivanja zaostalih napreznja je vertikalnim valjanjem između navarenih slojeva. Pri tome često dolazi do deformiranja zida u poprečnom smjeru, umjesto smanjenja longitudinalnih zaostalih napreznja. Novija istraživanja usmjerena su na primjenu profiliranih valjaka i valjak s prorezom za vertikalno valjanje (Slika 3.). Profilirani valjci imaju oblik utora kao nataloženi sloj metala, a valjci s prorezom sprječavaju deformiranje zida u poprečnom smjeru. Oba valjka smanjuju deformacije i površinske nepravilnosti, ali je valjak s prorezom učinkovitiji u smanjivanju deformacija. Također, valjak s prorezom također osigurava bolje parametre površine i veću efektivnu širinu zida [9].



Slika 3. Oblik valjka za smanjenje zaostalih napreznja i deformacija [9]

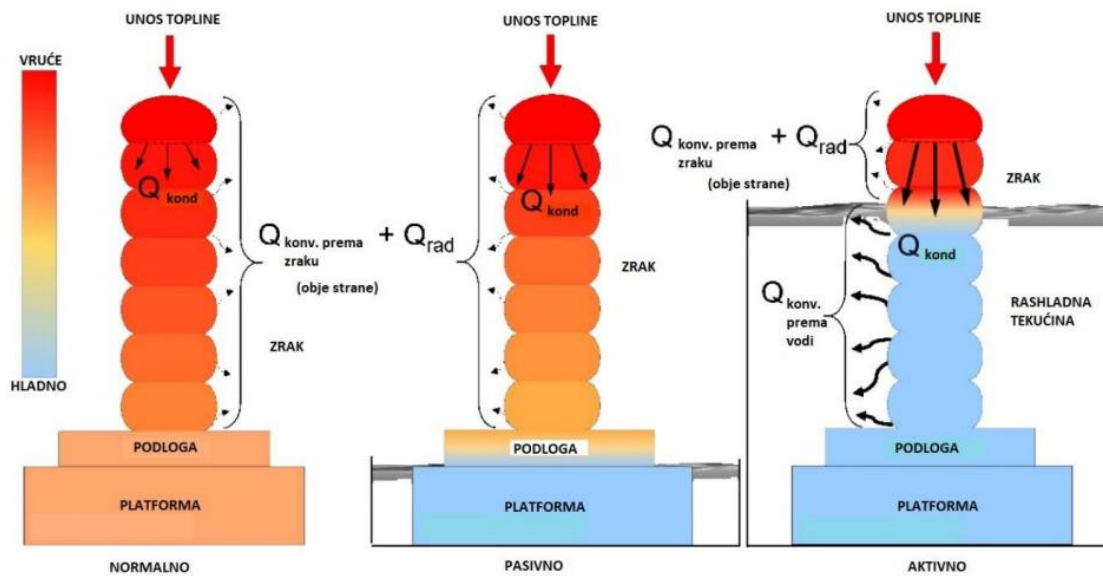
Ograničenja WAAM-a su također povezana s povišenim unosom topline. Visok unos topline posljedica je zahtjeva za velikim depozitom materijala i visokom jakosti struje. Utvrđeno je da akumulacija topline postaje intenzivnija povećanjem visine komponente što rezultira deformacijama i zaostalim napreznjima, grubozrnatom strukturom te geometrijskim nepravilnostima. Postoji nekoliko pristupa rješavanju tog problema, a jedan od njih je upravljanje unosom topline pomoću tehnike aktivnog hlađenja što je detaljnije objašnjeno u narednom poglavlju [7].

## 2.2. Tehnika aktivnog hlađenja

Tehnika aktivnog hlađenja - NIAC (engl. *Near Immersion Active Cooling*) razvijena je s ciljem smanjenja unosa topline u zid (izradak) tijekom WAAM postupka. Tehnika se temelji na odvođenju topline putem kondukcije i konvekcije na rashladno sredstvo. Kao rashladno sredstvo koristi se najčešće voda, a glavni parametar koji se regulira je udaljenost razine vode od zadnjeg prolaza – LEWD (engl. *Layer Edge to Water Distance*). Parametar LEWD održava se konstantnim tijekom cijelog procesa tako da se razina vode povećava sukladno porastu visine WAAM zida [8].

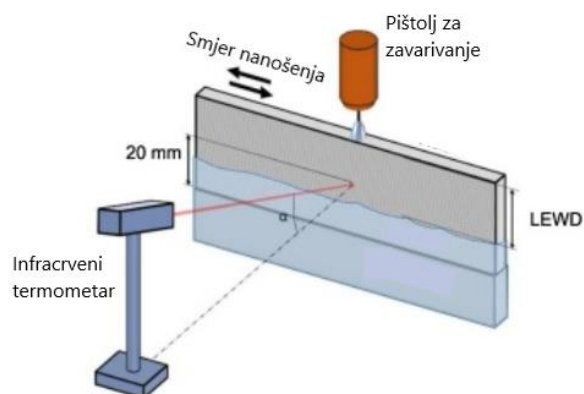
Rezultat tehnike aktivnog hlađenja je značajno smanjenje akumulacije topline u izratku tijekom navarivanja novih slojeva, održavanje niske te gotovo nepromijenjene međuprolazne temperature. Temperatura međuprolaza je najniža temperatura prethodnog sloja prije nanošenja novog sloja. Tehnika aktivnog hlađenja omogućuje veću produktivnost procesa zbog skraćivanja ili potpunog uklanjanja vremena čekanja između prolaza. Vrijeme čekanja odnosi se na vrijeme potrebno za hlađenje do određene međuprolazne temperature (obično temperatura međuprolaza iznosi manje od 200 °C). Osim toga, tehnika aktivnog hlađenja ima pozitivan utjecaj na geometrijska i mehanička svojstva izratka, odnosno WAAM zida [8].

Slika 4. shematski prikazuje usporedbu aktivnog hlađenja s pasivnim i normalnim hlađenjem. Hlađenje bez rashladnog sredstva (tzv. normalno hlađenje) najčešći je način upravljanja toplinom kod WAAM postupka, a toplina se odvodi konvekcijom i zračenjem ( $Q_{\text{konv}}$  i  $Q_{\text{rad}}$ ). Drugi način upravljanja toplinom je pasivno hlađenje pri kojem su podloga i platforma uronjene u rashladno sredstvo. Tako se toplina također odvodi konvekcijom i zračenjem, ali se slojevi na dnu zida brže hlade nego kod normalnog hlađenja. Za provođenje aktivnog hlađenja potreban je spremnik s vodom ili drugom rashladnom tekućinom. Slojevi uronjeni u vodu hlade se kondukcijom ( $Q_{\text{kond}}$ ) i konvekcijom, a njihova temperatura je značajno niža nego kod ostalih pristupa upravljanja toplinom. Slojevi koji nisu uronjeni u vodu hlade se konvekcijom i zračenjem [10].



Slika 4. Usporedba tehnike aktivnog hlađenja s normalnim i pasivnim hlađenjem [10]

Snimanjem promjene temperature u jednoj točki na zidu u određenom vremenskom intervalu dobije se toplinski ciklus. Na slici (Slika 5.) dan je shematski prikaz snimanja temperature u točki koja se nalazi otprilike na sredini zida. Kontinuirano mjerenje temperature izvodi se najčešće infracrvenim termometrom ili termalnom kamerom. Snimanje započinje kada se visina zida izjednači s visinom pozicionirane točke mjerenja. Vremenski interval u kojem je moguće pratiti promjenu temperature traje sve dok razina vode ne prijeđe visinu točke mjerenja. Trajanje vremenskog intervala ovisi o definiranoj udaljenosti razine vode od zadnjeg prolaza (*LEWD*) te visini jednog prolaza [10].

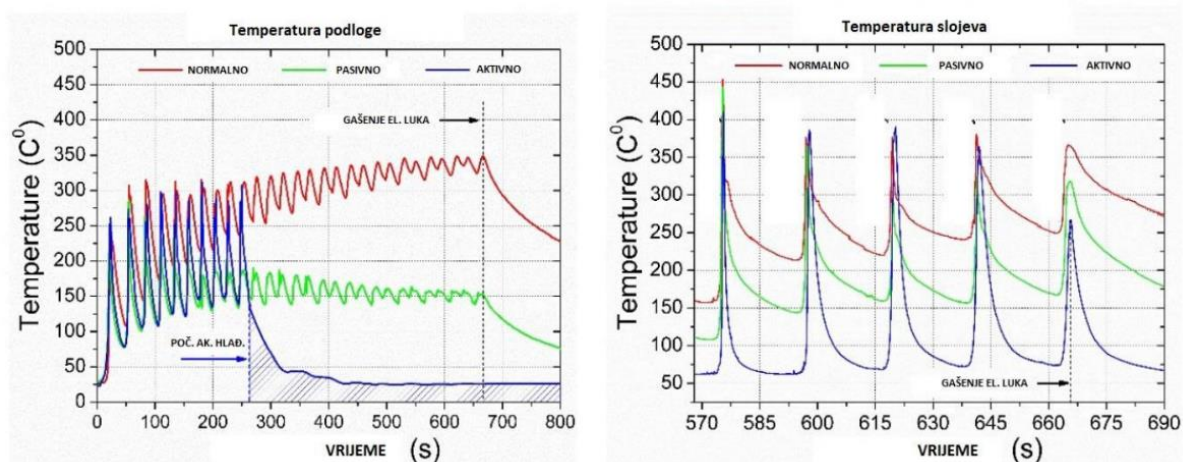


Slika 5. Prikaz snimanja temperature zida tijekom nanošenja slojeva WAAM postupkom [8]

Na slici (Slika 6.) dan je grafički prikaz promjene temperature u jednoj točki za tri različita pristupa upravljanju toplinom. Maksimalan iznos temperature postiže se u trenutku kada električni luk prolazi iznad točke mjerenja. Udoline na grafu, koje predstavljaju međuprolaznu temperaturu, nastaju između nanošenja svakog prolaza. Lijeva slika (Slika 6.) prikazuje promjenu temperature na podlozi mjerenu u fiksnoj točki na sredini podloge. Crvena krivulja prikazuje toplinski ciklus za normalno upravljanje toplinom pri kojem srednja temperatura kontinuirano raste s vremenom, odnosno povećanjem visine zida. Najveći porast temperature, odnosno najveća akumulacija topline zabilježena je kod normalnog hlađenja. Zelena krivulja prikazuje toplinski ciklus za pasivno hlađenje kod kojeg srednja temperatura podloge ostaje približno konstantna u vremenu, a razlika između najniže i najviše temperature se smanjuje s porastom visine zida. Plava krivulja prikazuje toplinski ciklus za aktivno hlađenje kod kojeg je najveća razlika između najniže i najviše temperature. Uranjanjem podloge u vodu temperatura podloge ostaje konstantna [10].

Desna slika (Slika 6.) prikazuje toplinske cikluse mjerene u točki na 23. prolazu i promjenu temperature u toj točki za pet narednih prolaza. Sve tri krivulje imaju gotovo isti iznos maksimalne temperature. Najniža (međuprolazna) temperatura kod normalnog hlađenja iznosi oko 220 °C, a kod pasivnog hlađenja iznosi približno 150 °C. Međuprolazna temperatura najniža je kod tehnike aktivnog hlađenja i ostaje gotovo nepromijenjena do kraja procesa. Ta činjenica potvrđuje da tehnika aktivnog hlađenja eliminira akumulaciju topline [10].

U eksperimentalnom dijelu diplomskog rada prikazan je toplinski ciklus za uzorke od dupleks čelika.



**Slika 6. Usporedba toplinskog ciklusa tehnike aktivnog hlađenja s normalnim i pasivnim hlađenjem [10]**



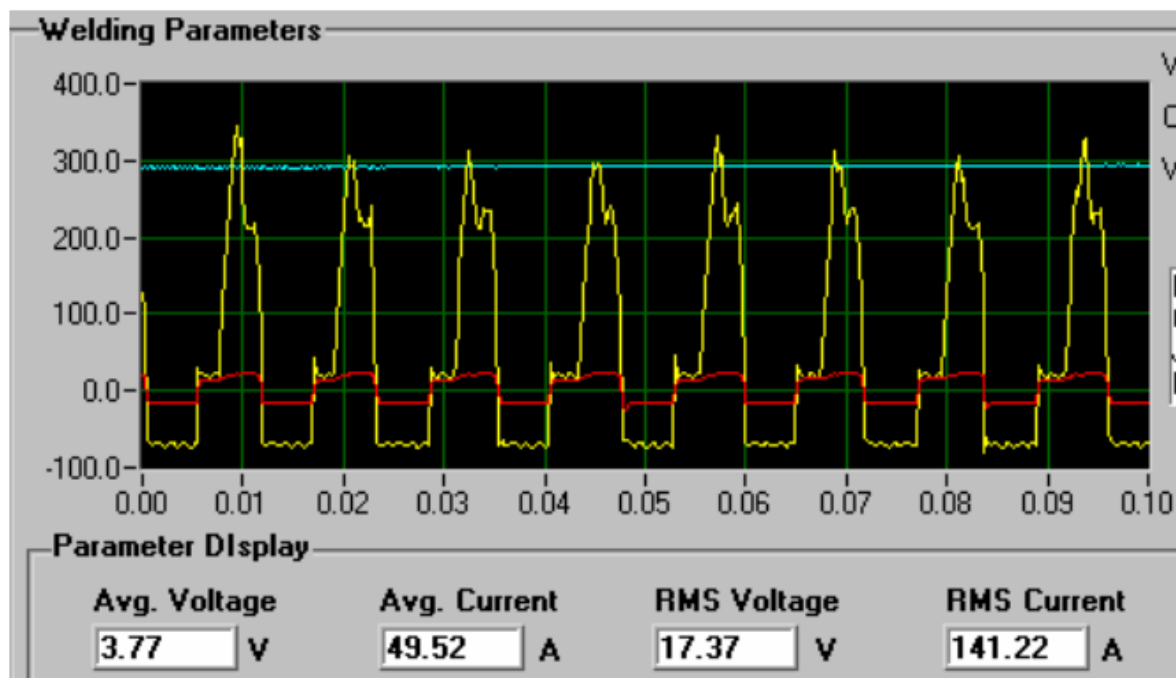
### 3. AC MIG POSTUPAK ZAVARIVANJA

AC MIG (engl. *Alternating Current Metal Inert Gas*) je modificirani postupak zavarivanja električnim lukom i žicom pod zaštitom inertnog plina. Kod standardnog MIG postupka primjenjuje se pretežno pozitivan polaritet na žici (DCEP – engl. *Direct Current Electrode Positive*), dok se kod AC MIG postupka primjenjuje promjenjiv polaritet na žici, odnosno izmjenjuje se pozitivan i negativan ciklus. Svrha promjenjivog polariteta je postizanje glavnih prednosti negativnog i pozitivnog polariteta na žici. Pozitivan polaritet na žici kod MIG postupka pruža stabilniji električni luk nego u slučaju negativnog polariteta. Negativan polaritet na žici kod elektrolučnog zavarivanja pod zaštitnim praškom (EPP) omogućuje veću brzinu taljenja te veći depozit materijala uz manju penetraciju. Spajanjem žice kod MIG postupka na negativan polaritet rezultira prskanjem i nepravilnim ponašanjem električnog luka. Izmjenom negativnog i pozitivnog polariteta na žici kod AC MIG postupka omogućuje bolju kontrolu procesa te premošćivanje većih zazora kod tanjih materijala. Izmjenom polariteta postiže se precizna kontrola distribucije topline u električnom luku, a time i dubina penetracije te unos topline [11].

Nedostatak ovog postupka je kompleksnost i složenost izvor struje za zavarivanje. Pored toga, stabilnost električnog moguće je održati u vrlo uskom rasponu parametara [11].

Strujna karakteristika AC MIG postupka slična je valnom obliku izmjenične struje koja alternira između pozitivnog i negativnog polariteta. Razlika je tome što valni oblik struje kod AC MIG postupka može imati različit omjer trajanja dva polariteta. Zbog varijabilnog polariteta, ovaj postupak naziva se i VP-GMAW (engl. *Variable Polarity Gas Metal Arc Welding*) [11].

Na slici (Slika 7.) prikazana je izgled uobičajene dinamičke karakteristike AC MIG postupka. Žutom krivuljom prikazana je ovisnost struje o vremenu  $i = f(t)$ , a crvenom krivuljom prikazana je ovisnost napona o vremenu  $u = f(t)$ .



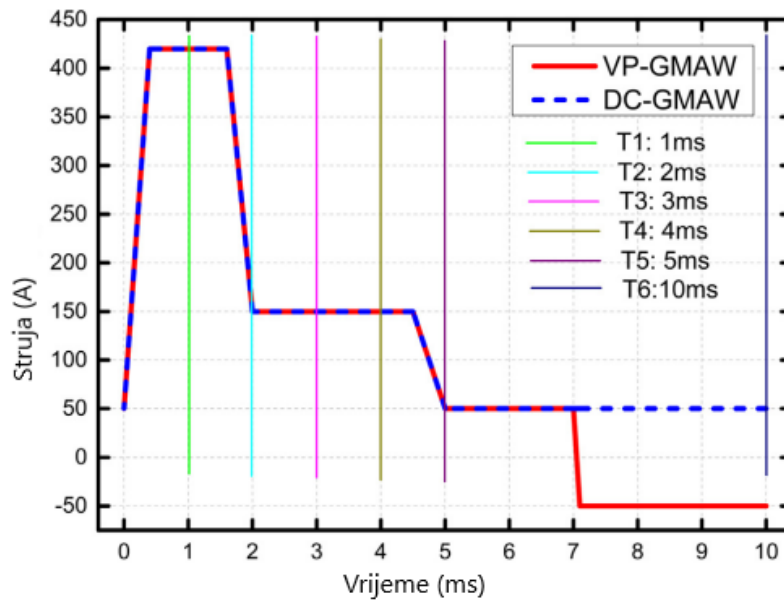
Slika 7. Dinamička karakteristika AC MIG postupka [11]

Na slici (Slika 9.) prikazan je proces odvajanja rastaljene kapljice metala pomoću numeričke simulacije tijekom AC MIG zavarivanja za strujnu karakteristiku prikazanu na slici (Slika 8.). Ulazni parametri prikazanog procesa su [12]:

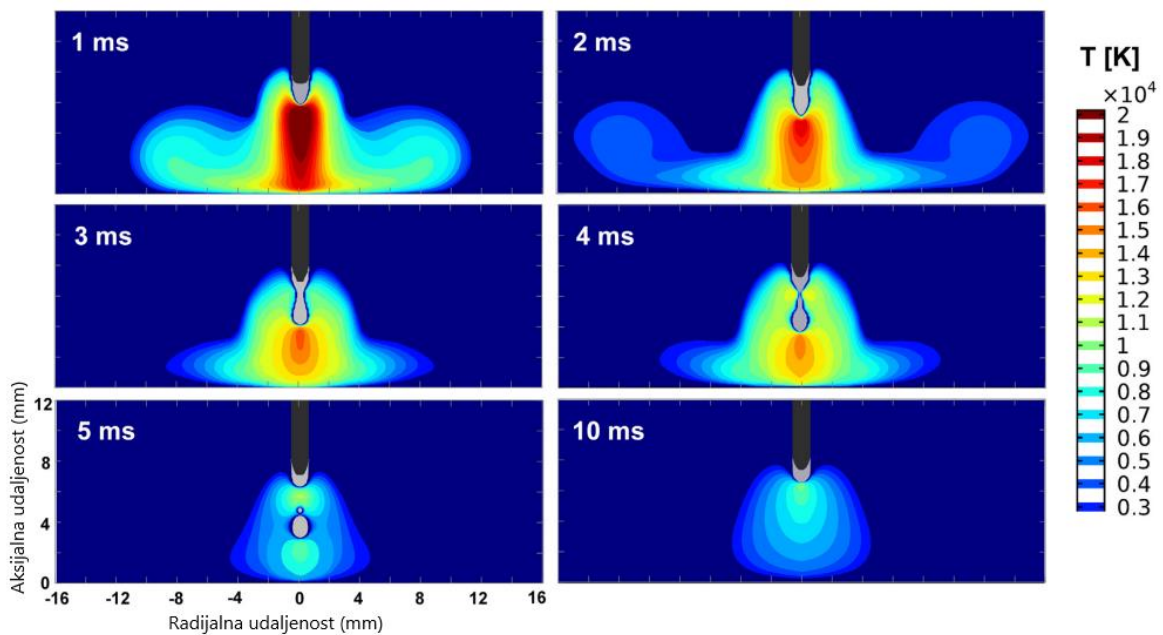
- promjer žice: 1,2 mm
- brzina žice: 4 m/min
- protok zaštitnog plina (argon): 18 l/min
- prosječna struja: 125 A
- trajanje negativnog polariteta: 30 %.

Jedan ciklus odvajanja kapljice prikazan je pomoću šest karakterističnih točaka. U trenutku vršne struje (424 A, 1-2 ms) započinje taljenje vrha žice duž aksijalne osi zbog djelovanja elektromagnetske sile. U trenutku srednje vrijednosti struje (150A, 3-4 ms) dolazi do sužavanja presjeka žice na mjestu odvajanja kapljice zbog djelovanja površinske napetosti te na kraju ovog ciklusa dolazi do odvajanja kapljice od žice. Tijekom pozadinske struje (50 A, 5 ms) odvojena kapljica metala zaprima okrugli oblik. Za to vrijeme, povezuje se neodvojeni metal na žici i stvara zaobljeni vrh. Za vrijeme trajanja negativnog polariteta (3 ms) unosi se 60 % više topline na elektrodu nego za vrijeme pozitivnog polariteta (7 ms). Ta činjenica utječe na

veličinu iduće odvojene kapljice metala koja je značajno veća kod AC MIG postupka u odnosu na DC MIG postupak (za isti iznos prosječne struje od 125 A) [12].



Slika 8. Valni oblik struje AC MIG-a [12]



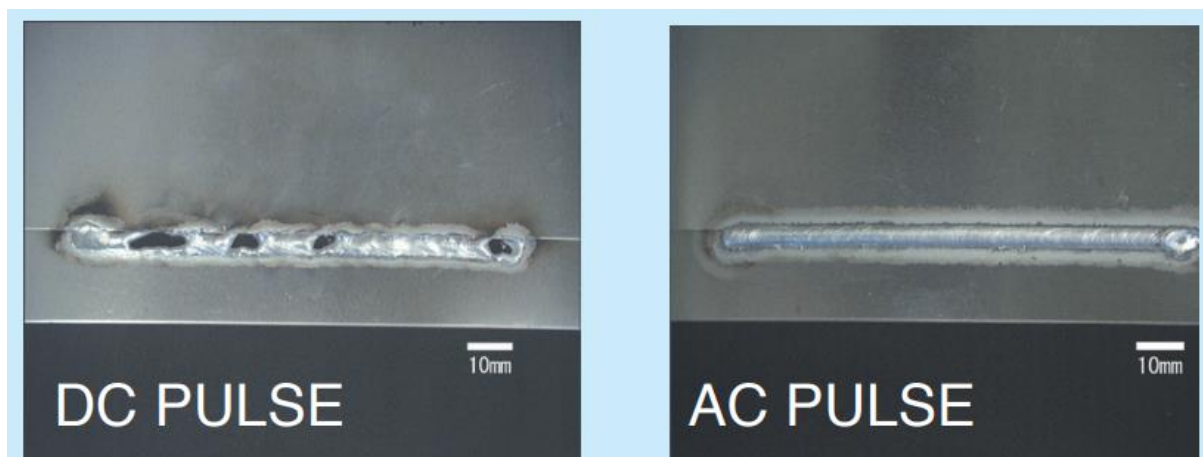
Slika 9. Numerička simulacija odvajanja rastaljene kapljice metala kod AC MIG-a [12]

Na osnovu prikazanog procesa mogu se sumirati karakteristike pozitivnog (DCEP – engl. *Direct Current Electrode Positive*) i negativnog polariteta (DCEN – engl. *Direct Current Electrode Negative*) na žici (Tablica 1.).

**Tablica 1. Karakteristike pozitivnog i negativnog polariteta žice za zavarivanje [13]**

DCEP	DCEN
Elektroni putuju od radnog komada prema žici.	Elektroni putuju od žice za zavarivanje prema radnom komadu.
Slabija iskoristivost taljenja.	Veća iskoristivost taljenja.
Većina topline je koncentrirana u osnovnom materijalu.	Većina topline je koncentrirana u dodatnom materijalu.

Na slici (Slika 10.) je prikazan izgled zavarenog spoja primjenom DC MIG i AC MIG postupka na aluminiju s istim parametrima zavarivanja (jakost struje 50 A, napon 15 V). AC MIG omogućuje zavarivanje s manjim unosom topline te ne dolazi do nastanka ugorina u osnovnom metalu [14].



**Slika 10. Izgled zavarenih spojeva primjenom AC i DC MIG postupka s istim parametrima zavarivanja [14]**

Ograničenje koje onemogućuje primjenu negativnog polariteta kod MAG postupka zavarivanja je nestabilnost električnog luka. Taj problem rješava se dodavanjem stabilizirajućih elemenata koji se koriste za električni luk. Veći problem je pojava nestabilnosti na žici za zavarivanje te

je ujedno to i razlog zašto se gotovo uvijek primjenjuje pozitivan polaritet na žici. DCEN polaritet primjenjuje se jedino kod prijenosa metala globularnim lukom, ali rijetko zbog neprihvatljivog štrcanja i nestabilnosti električnog luka. Glavni problem svojstven DCEN polaritetu korištenom kod MAG-a je odbojna sila koja djeluje ispod rastaljene kapljice na vrhu elektrode (katode). Tijekom prijenosa elektrona od žice prema radnom komadu, odbojna sila pojavljuje se zbog emisije elektrona, stvarajući nepravilan korijen te asimetrično odvajanje kapljice. Primjena mješovitih zaštitnih plinova (Ar i O<sub>2</sub> i/ili CO<sub>2</sub>) pokazala se kao korisna kod zavarivanja u DCEN zbog održavanja stabilnost električnog luka [13].

Tijekom prijelaza iz pozitivnog u negativni polaritet struje, potrebno je povisiti iznos napona zbog problema s uspostavljanjem električnog luka. Primjena visokog polariteta koristi se zbog održavanja ionizacije električnog luka. Iznos napona koji se primjenjuje kada struja prolazi kroz nulu ovisi o količini ugljikovog dioksida u zaštitnom plinu te može postići 400 V [13].

### 3.1. Utjecajni parametri

Postoji velik broj parametara koji se mogu podešavati s ciljem dobivanja optimalnih karakteristika zavarenog spoja. Sinergijsko upravljanje omogućuje da izvor struje za zavarivanje podešava određene parametre ovisno o osnovnom i dodatnom materijalu, zaštitnom plinu i brzini dodavanja žice (engl. WFS – *Wire Feed Speed*). Također, kod AC MIG postupka postoji nekoliko oblika krivulja dinamičke karakteristike. Svaki tip krivulja ima mogućnost podešavanja jakosti struje ovisno o fazi. Najveći utjecaj na izgled zavara i oblik krivulje dinamičke karakteristike ima udio % EN (engl. *electrode negative*). % EN označava postotak vremena trajanja negativnog polariteta u odnosu na ukupno vrijeme jednog ciklusa. Računa se prema formuli (1) [13].

$$\% EN = \frac{t_N}{t_N + t_P} \quad (1)$$

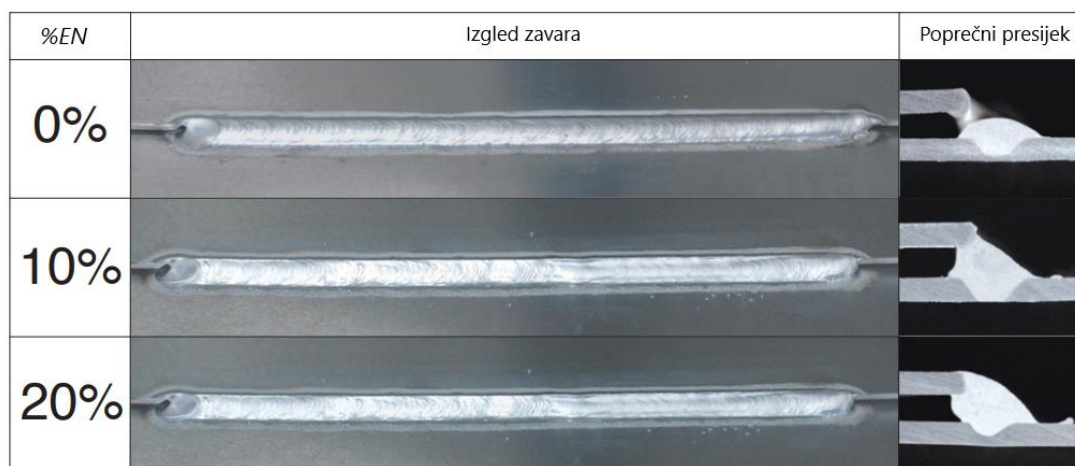
Pri čemu je:

$t_N$  - vrijeme trajanja struje negativnog polariteta

$t_P$  - vrijeme trajanja pozitivnog polariteta.

Primjenom negativnog polariteta na žici (% EN) utječe se na geometriju zavarenog spoja, dubinu penetracije te mogućnost premošćivanja većih razmaka pri zavarivanju tankih limova.

Na slici (Slika 11.) je prikazan utjecaj % EN na oblik zavora i geometriju spoja limova aluminijske legure AlMg4,5Mn debljine 1,5 mm [14].



Slika 11. Utjecaj % EN na oblik zavora i geometriju zavarenog spoja [14]

Parametri koji osiguravaju stabilnost procesa, odnosno osiguravaju stabilnost električnog luka i prijenos metala su [13]:

- $I_P$  i  $t_P$  – jakost struje pulsa i vrijeme trajanja pulsa koji osiguravaju odvajanje jedne kapljice po pulsu – ODPP (engl. *One drop per pulse*)
- $I_B$  – pozadinska struja koja osigurava kriterij stabilnosti električnog luka (mora biti veća od 20 A)
- $t_B$  – vrijeme trajanja pozadinske struje koji se određuje prema traženom % EN
- $I_N$  – jakost negativne struje pri čemu brzina dodavanja žice WFS mora biti jednaka za vrijeme trajanja oba polariteta [13]:

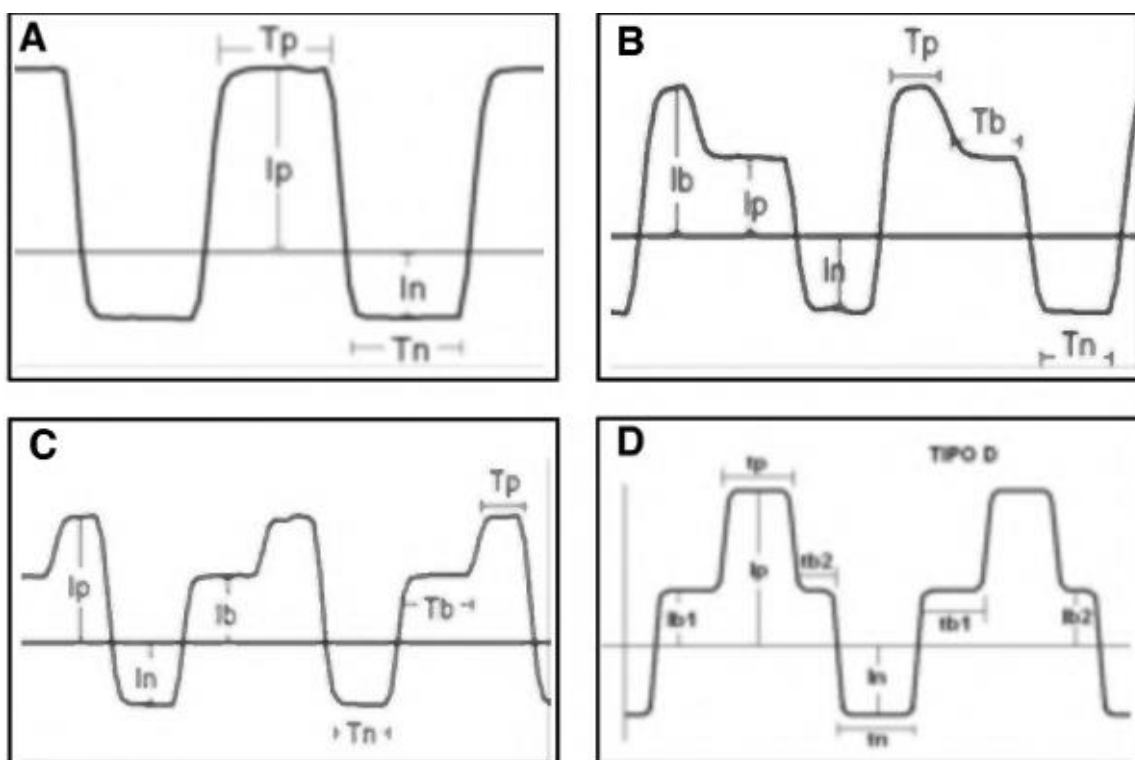
$$WFS + = WFS - \quad (2)$$

Upravo održavanje konstantne vrijednosti brzine dodavanja žice u negativnom i pozitivnom polaritetu (jednadžba (2)) osigurava konstantan i stabilan luk i ujednačene kapljice rastaljenog metala [13].

- $t_N$  – vrijeme trajanja negativnog polariteta ovisno o traženom % EN prikazano je jednadžbom (3)

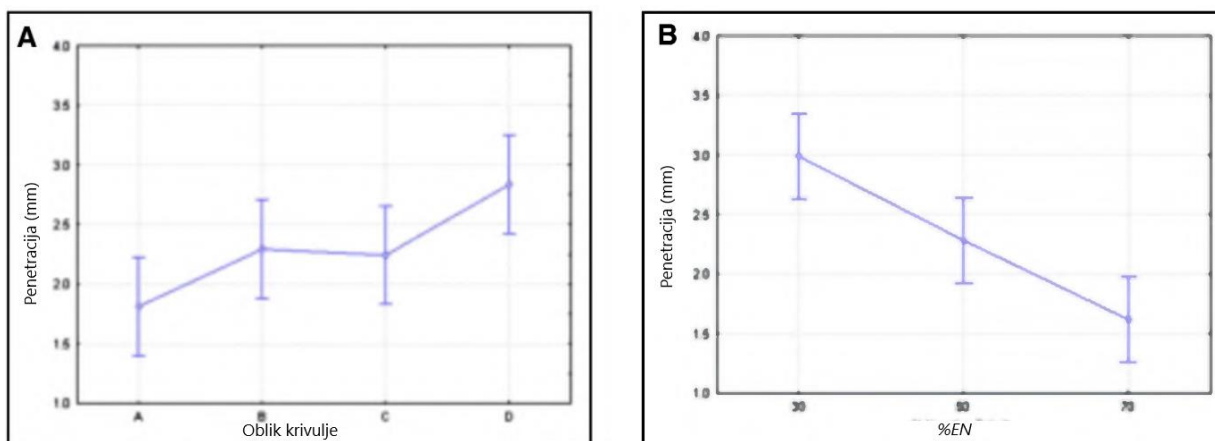
$$t_N = \frac{\% EN * t_P}{1 - \% EN} \quad (3)$$

Navedeni parametri definiraju dinamičku karakteristiku procesa. U literaturi postoji nekoliko različitih tipova krivulja dinamičke karakteristike AC MIG procesa (Slika 12.). Oblik krivulje, pored % EN, utječe na penetraciju i geometrijske karakteristike odvojene kapljice. Na slici (Slika 13) prikazana je ovisnost penetracije o tipu krivulje i % EN. Utvrđeno je da smanjenje struje prije i poslije vršne struje povoljno utječe na naglu promjenu polariteta (krivulja D). Također, oblik krivulja C i D osiguravaju stabilan električni luk te C oblik krivulje smanjuje prskanje prilikom odvajanja kapljice [13].



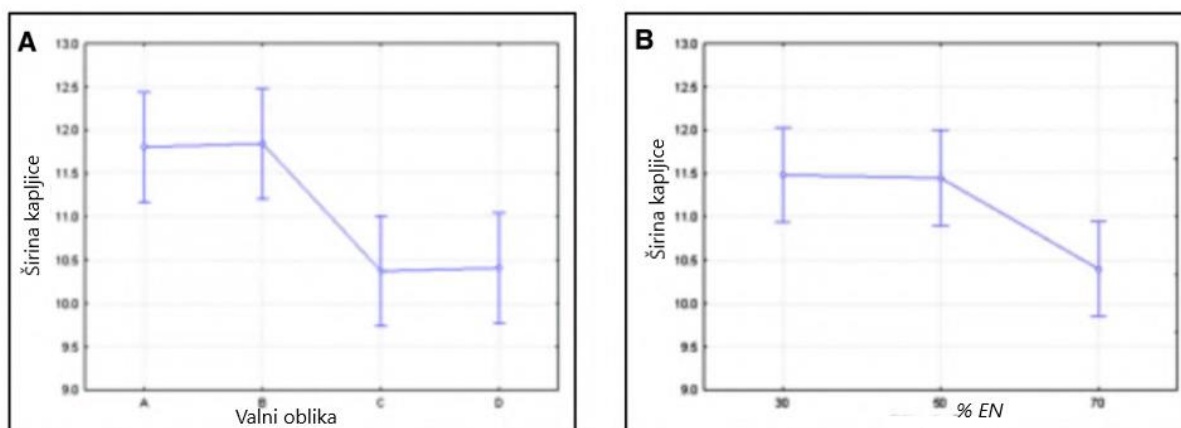
Slika 12. Tipovi krivulja dinamičke karakteristike za AC MIG postupa ( $i = f(t)$ ) [13]

Prema slici (Slika 13., desno) može se zaključiti da pri povećanju % EN dolazi do smanjenja dubine penetracije zbog činjenice da za vrijeme trajanja negativnog polariteta unos topline koncentriran je na elektrodu, a ne na osnovni metal. Prema tome, manji unos topline u osnovnom metalu rezultira slabijom penetracijom što olakšava zavarivanje tankih metala [13]. Iz slike (Slika 13., lijevo) može se zaključiti da se najveća penetracija postiže primjenom krivulje tipa D, a najmanja penetraciju postiže se tipom krivulje A [13].



**Slika 13. Utjecaj oblika krivulje (A, B, C, D tip prema slici 12.) na dubinu penetracije (lijevo) te utjecaj %EN na dubinu penetracije (desno) [13]**

Na slici (Slika 14.) prikazan je utjecaj oblika krivulje (A, B, C, D) i % EN na širinu kapljice rastaljenog metala. Oblik krivulje C i D te veći iznos parametra % EN uzrokuju manju širinu kapljice rastaljenog metala, pa tako i manju količinu nataloženog metala. Odvojena kapljica rastaljenog metala obično je 1,5 do 2 puta veća od promjera žice [13].



**Slika 14. Utjecaj oblika krivulje (A, B, C, D tip prema slici 12.) na širinu kapljice (lijevo) te utjecaj % EN na širinu kapljice (desno) [13]**

Ulazni parametri koji također utječu na tehnologiju zavarivanja, te utječu na oblik i penetraciju su [13]:

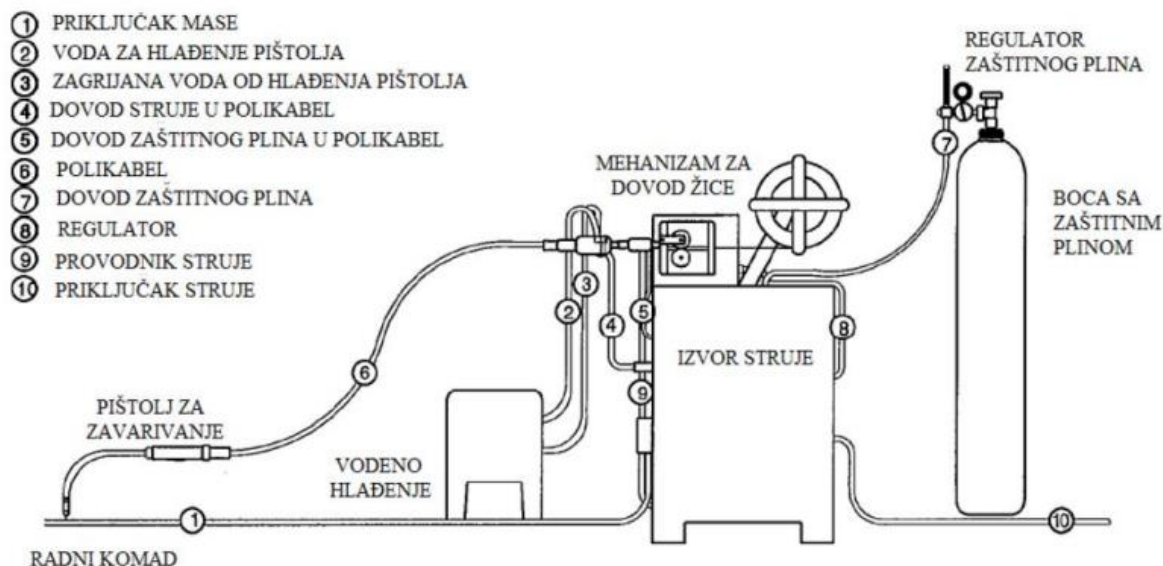
- vrsta i protok zaštitnog plina
- vrsta i promjer dodatnog materijala
- osnovni materijal



- brzina dodavanja žice
- duljina električnog luka.

### 3.2. Oprema za zavarivanje

Oprema za AC MIG postupak zavarivanja sastoji se od istih komponenti kao ostali MIG/MAG postupci. Shematski prikaz osnovne opreme za zavarivanje prikazan je na slici (Slika 15.). Glavna razlika u odnosu na ostale postupke je u izvoru struje za zavarivanje [15].



Slika 15. Shematski prikaz opreme za AC MIG zavarivanje [15]

#### 3.2.1. Izvor struje za zavarivanje

Izvor struje za zavarivanje AC MIG postupkom karakterizira mogućnost kontrole unosa topline te mogućnost zavarivanja sa žicom spojenom na negativan i pozitivan polaritet. Na slici (Slika 16.) je prikazan izvor struje za AC MIG zavarivanje koji ima sljedeće karakteristike [14]:

- mogućnost ručnog i robotiziranog zavarivanja
- mogućnost zavarivanja vrlo tankih materijala (do 0,8 mm)
- mogućnost kontrole unosa topline i penetracije

- smanjenje unosa topline za 30~40 % za isti WFS kao DC MIG postupak, te posljedično smanjenje deformacija
- 36 prethodno optimiziranih oblika pulsnog vala za različite tipove žica i promjere i dr.



The DW-300

**Slika 16. Izvor struje za zavarivanje DW-300 [14]**

### 3.3. Materijali

AC MIG postupak prvenstveno je namijenjen za zavarivanje materijala koji zahtijevaju nizak unos topline kao i za zavarivanje tankih materijala. Problem koji se javlja kod zavarivanja takvih materijala je pregorijevanje osnovnog materijala. AC MIG olakšava kontrolu unosa topline i smanjuje deformacije. Ovaj postupak primjenjuje se za navedene materijale [16]:

- aluminij i aluminijske legure
- legure na bazi magnezija
- nehrđajući (Cr-Ni) čelik.

#### 3.3.1. Aluminij i aluminijske legure

Aluminij je materijal koji ima visok koeficijent toplinske dilatacije i dobru električnu vodljivost, ali i povećanu sklonost deformiranju. Najčešće greške koje se javljaju pri zavarivanju aluminija su porozitet, naljepljivanje, ugorine i pukotine u krateru na kraju zavara.

Naljepljivanje je posljedica preniske energije električnog luka i loše tehnike rada, pri čemu ne dolazi do miješanja osnovnog i dodatnog materijala i čišćenja oksida. Vodik i nečistoće su posljedica pojave poroziteta dok se pukotine javljaju zbog odabira neadekvatnog dodatnog materijala. Dovoljan unos topline osigurava kvalitetno protaljivanje i penetraciju. Za vrijeme trajanja pozitivnog polariteta tali se više žice i osnovnog materijala, dok je pri negativnom polaritetu unos topline usmjeren na elektrodu, pri čemu se osigurava veći depozit rastaljenog metala [17].

Na površini aluminijskih legura nalazi se aluminijski oksid  $Al_2O_3$  koji ima visoku točku tališta (2050 °C) za razliku od legura aluminija (520 – 660 °C). Zbog toga se aluminijski oksid teško tali i lako uključuje u talinu zavara. Pri zavarivanju AC MIG postupkom, za vrijeme trajanja pozitivnog polariteta dolazi do otapanja aluminijskog oksida [17].

### **3.3.2. Legure na bazi magnezija**

Magnezijske legure često se primjenjuju kao alternativa aluminijskim legurama s ciljem smanjenja težine pojedinih dijelova. Magnezij ima HCP strukturu što rezultira lošom duktilnošću, ali odličnom istezljivošću. Magnezijske legure karakterizira nisko talište, dobra mehanička svojstva. Pogreške koje se javljaju kod zavarivanja magnezijskih legura su pregorijevanje, gubitak legirajućih elemenata, prskanje te uključci troske. Prednosti korištenja AC MIG postupka pri zavarivanju legura na bazi magnezija su [18]:

- veći depozit materijala
- nizak unos topline (što uključuje sprječavanje pregorijevanja materijala, nižu prosječnu temperaturu zavarivanja, smanjenje deformacija)
- ograničavanje poroznosti
- poboljšana mehanička svojstva.

### **3.3.3. Nehrđajući čelik**

Nehrđajući čelici velika su skupina visokolegiranih čelika koji su korozijski postojani zbog minimalnog udjela kroma od 10,5 % i dodatak ostalih legirajućih elemenata poput nikla,

molibdena, titana, dušika i dr. Dodatkom legirajućih elemenata znatno se poboljšava njihova otpornost na koroziju, obradljivost, čvrstoća te žilavost na sniženim temperaturama [19].

Postoje četiri osnovne grupe nehrđajućih čelika, pri čemu se podjela temelji na njihovim mikrostrukturnim svojstvima. Osnovne skupine nehrđajućih čelika su [19]:

- martenzitni
- feritni
- austenitni
- dupleks (austenitno – feritni).

U eksperimentalnom dijelu diplomskog rada osnovni materijal koji je korišten je dupleks čelik. Dupleks čelik ima dvofaznu strukturu i sastoji se od približno 50 % ferita i 50 % austenita. Karakteristike dupleks čelika su povećana otpornost prema napetostnoj, općoj i rupičastoj koroziji te veću čvrstoću u odnosu na austenitne nehrđajuće čelike [19].

Duplex čelici mogu se podijeliti u nekoliko skupina prema kemijskom sastavu, a oznaka *PREN* (engl. *Pitting Resistance Equivalent Number*) označava djelotvornu sumu koja se koristi za procjenu otpornosti na rupičastu koroziju, računa se prema formuli (4) [19].

$$PREN = \% Cr + 3,3 \times (\% Mo) + 30 \times (\% N) \quad (4)$$

Podjela dupleks čelika [19]:

1. Dupleks čelici prve generacije – ne sadrže dušik.
2. Dupleks čelici druge generacije – sadrže dušik (između 0,1 i 0,25 % dušika)
3. Dupleks čelici treće generacije –  $PREN \leq 40$
4. Superdupleks čelici -  $40 \leq PREN \leq 45$
5. Hiper-dupleks čelici -  $PREN \geq 45$ .

Zavarljivost dupleks čelika ovisi o unosu topline i parametrima zavarivanja koje je potrebno kontrolirati kako ne bi došlo do feritizacije strukture. Feritizacija strukture je povećani udio feritne strukture (više od 80 %) te je nepoželjna pojava jer dovodi do stvaranja krhkih struktura i smanjenja korozijske postojanosti. Zbog toga se koriste dodatni materijali predviđeni za zavarivanje dupleks čelika te dodatak dušika u zaštitnom plinu, čime se postiže pozitivan utjecaj na stvaranje austenitne strukture [19].

## 4. EKSPERIMENTALNI DIO

Eksperimentalni dio diplomskog rada proveden je u Laboratoriju za zavarivanje na Fakultetu strojarstva i brodogradnje, Sveučilišta u Zagrebu. Zadatak je bio ispitati utjecaj tehnike aktivnog hlađenja i stabilnost AC MIG postupka pri izradi uzoraka aditivnom proizvodnjom električnim lukom i žicom. Cilj rada bio je optimizirati parametre zavarivanja AC MIG postupka pri izradi uzoraka od dupleks čelika te odrediti utjecaj aktivnog hlađenja na toplinski ciklus i svojstva dobivenog materijala.

Eksperimentalni dio može se podijeliti na nekoliko faza:

- optimiranje parametara zavarivanja
- izrada uzoraka na robotskoj stanici
- praćenje dinamičke karakteristike, toplinskog ciklusa te parametara zavarivanja tijekom izrade zidova
- priprema uzoraka za analizu
- analiza uzoraka.

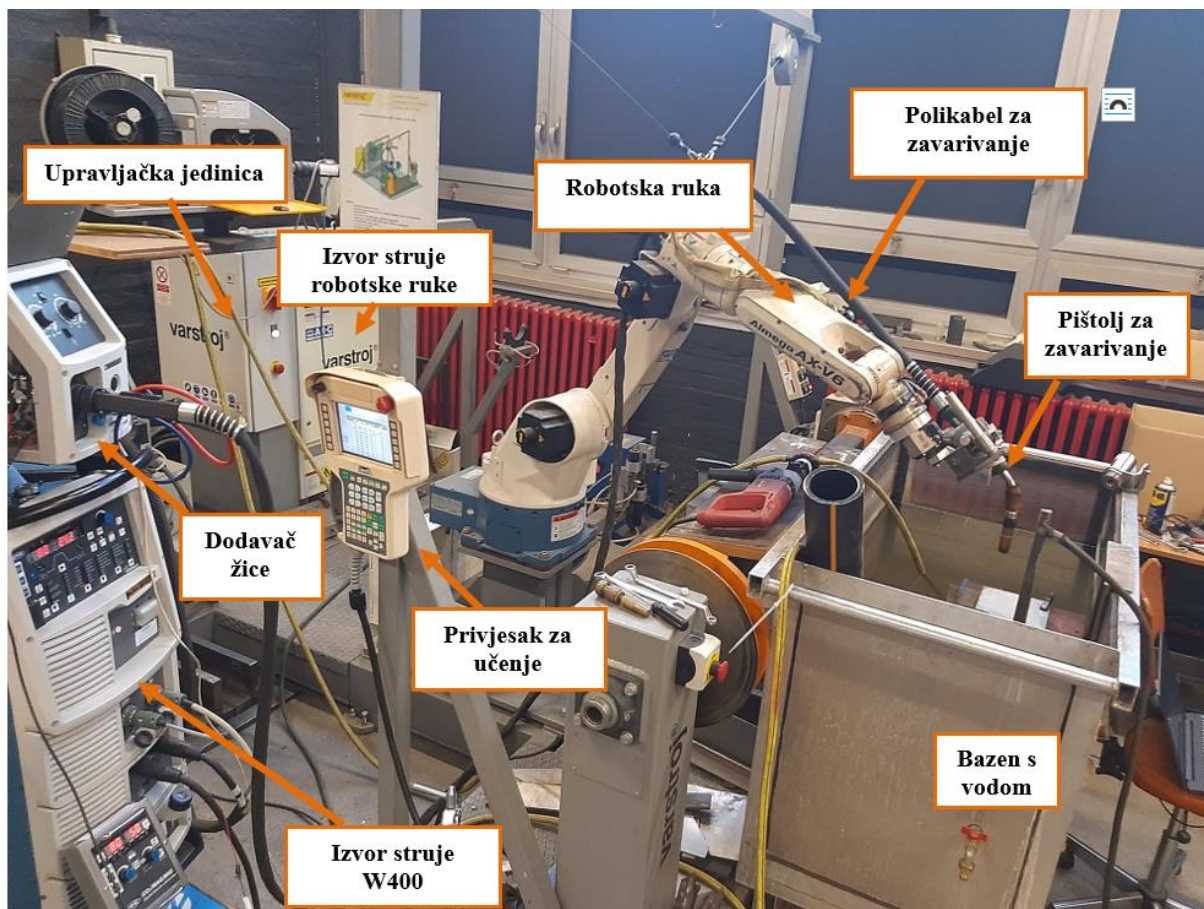
### 4.1. Oprema za izradu uzoraka

Izrada uzoraka izvedena je robotiziranim AC MIG postupkom na robotskoj stanici Almega OTC AX V6 (Slika 17.). Robotska stanica složeni je uređaj koji se sastoji od robotske ruke sa šest stupnjeva slobode gibanja na koju je spojen pištolj za zavarivanje. Programiranje se izvodilo *on-line* metodom programiranja pomoću privjeska za programiranje. Programiranje se sastojalo od određivanja putanje gibanja pištolja za zavarivanje i tehnoloških parametara zavarivanja.

Oprema za zavarivanje sastoji se od izvora za zavarivanje, dodavača žice, polikabela za zavarivanje, zaštitnog plina i pištolja za zavarivanje.

Za provedbu tehnike aktivnog hlađenja korišten je bazen s vodom unutar kojeg se nalazi postolje za zavarivanje.

Sva spomenuta oprema prikazana je na slici (Slika 17.).



Slika 17. Robotska stanica Almega OTC AX V6 i oprema za zavarivanje

#### 4.1.1. Izvor struje za zavarivanje

Za izradu uzoraka korišten je izvor struje Welbee W400. Uređaj je primjenjiv za zavarivanje postupcima [20]:

- AC Pulse
- DC Pulse
- AC Wave Pulse
- DC Wave Pulse
- DC.

Za izradu eksperimentalnog rada korišteni su postupci AC Pulse i DC Pulse. Na slici (Slika 18.) prikazan je izvor struje za zavarivanje, a u tablici (Tablica 2.) dane su njegove značajke.



Slika 18. Izvor struje za zavarivanje Welbee W400 [20]

Tablica 2. Značajke izvora Welbee W400 [20]

Specifikacija	Vrijednost
<b>Broj faza</b>	3
<b>Nazivna frekvencija</b>	50/60 Hz
<b>Nazivna ulazna snaga</b>	14,8 kW
<b>Nazivna struja zavarivanja</b>	400 A
<b>Područje struje zavarivanja</b>	30 A – 400 A
<b>Područje napona zavarivanja</b>	15,5 V – 34 V
<b>Intermitencija (za 400 A)</b>	40 %
<b>Intermitencija (za 350 A)</b>	100 %
<b>Masa</b>	75 kg

#### 4.1.2. Dodatni materijal

Za izradu uzoraka korištena je nehrđajuća puna žica promjera 1,2 mm trgovačkog naziva G 22 9 3 N L, odnosno naziv prema DIN EN ISO je 14343-A. Žica je namijenjena za zavarivanje austenitno – feritnih nehrđajućih čelika (dupleks čelika). Metal zavara ima visoku čvrstoću i žilavost te je otporan na napetosnu i rupičastu koroziju čak i u agresivnim medijima poput slane vode, kloridne i sumporovodične kiseline. U tablici (Tablica 3.) je prikazan orijentacijski kemijski sastav žice prema normi EN 10204 – 3.1, a u tablici (Tablica 4.) dana su mehanička svojstva žice G 22 9 3 N L [21].

Tablica 3. Orijentacijski kemijski sastav dodatnog materijala [21]

Legirni element	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	N
Maseni udio, %	≤ 0,02	1,7	0,4	22,5	9	3,2	0,15

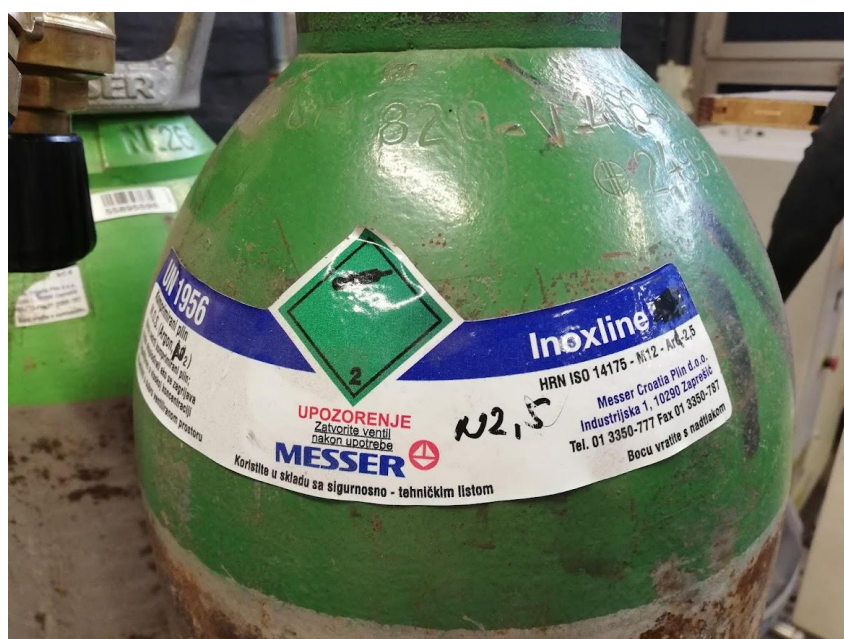
Tablica 4. Mehanička svojstva dodatnog materijala [21]

$R_{p0,2}$ , N/mm <sup>2</sup>	$R_m$ , N/mm <sup>2</sup>	$A_5$ , %	$KV$ (+20 °C), J
≥ 510	> 680 - 890	> 20	≥ 47

#### 4.1.3. Zaštitni plin

Zaštitni plin koji je korišten za vrijeme eksperimenta je mješavina argona i dušika, a volumni sastav iznosio je 97,5 % Ar i 2,5 % N<sub>2</sub>. Naziv plina je Inoxline N2, a prema normi ISO 14175 plin ima oznaku N2. Primjenom takve mješavine zaštitnih plinova dobivaju se optimalna mehanička svojstva metala zavara [22].

Protok plina iznosio je 18 l/min.



Slika 19. Boca sa zaštitnim plinom Inoxline N2

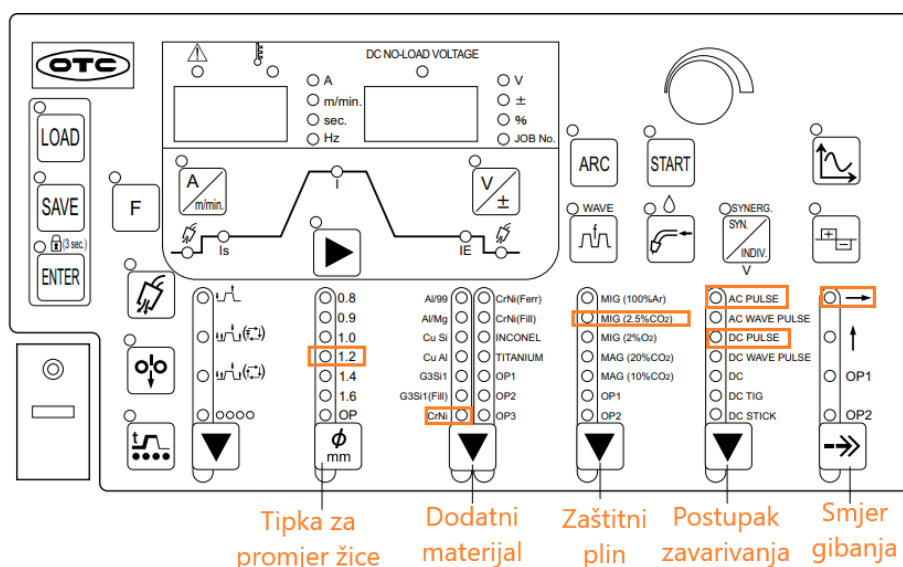


## 4.2. Optimiranje parametara zavarivanja

Predeksperimentom su utvrđeni optimalni parametri zavarivanja AC MIG i DC Pulse postupka za izradu zidova od dupleks čelika. Cilj predeksperimenta bio je utvrditi parametre zavarivanja koji osiguravaju stabilnost procesa. Pri tome, definirani su idući parametri:

- jakost struje zavarivanja
- napon električnog luka
- brzina zavarivanja
- *EN ratio* (kod AC MIG postupka)
- protok zaštitnog plina
- slobodni kraj žice.

Izvor struje za zavarivanje ima mogućnost sinergijskog upravljanja parametrima zavarivanja za ponuđene kombinacije zaštitnog plina i dodatnog materijala. Međutim, izvor nema ponuđene parametre za zaštitni plin koji je odabran za provođenje eksperimenta (97,5 % Ar i 2,5 % N<sub>2</sub>) pa je odabran plin sa sličnim svojstvima. Pored toga, kao dodatni materijal odabran je općenito CrNi čelik. Na slici (Slika 20.) su prikazani dostupni ulazni parametri na izvoru struje W400, a pravokutnicima su označeni korišteni parametri za izradu uzoraka.



Slika 20. Odabrani ulazni parametri na izvoru struje za zavarivanje W400 [20]

Kod AC MIG postupka, jedan od najutjecajnijih parametara je *EN ratio*. *EN ratio* označava postotak pri kojem je struja na elektrodi negativna za jedan AC ciklus. Definiran je izrazom (5).

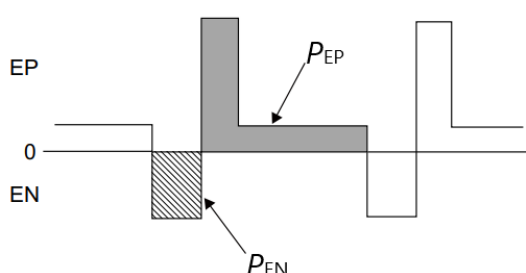
$$EN\ ratio = \frac{P_{EN}}{P_{EN} + P_{EP}} \times 100\ \% \quad (5)$$

Gdje je:

$P_{EN}$  – površina pri kojoj je elektroda na negativnom polu, Ams

$P_{EP}$  – površina pri kojoj je elektroda na pozitivnom polu, Ams.

Vizualni prikaz dan je na slici.



**Slika 21. Vizualni prikaz izračuna *EN ratio* [20]**

Važno je napomenuti da je parametar *EN ratio* samo vodilja, odnosno približna vrijednost. Stvarni iznos *EN ratio*-a može se razlikovati s obzirom na stvarne uvjete zavarivanja i okruženja zavarivanja. Stvarni iznos *EN ratio*-a izračunat je iz dinamičke karakteristike jednog ciklusa u poglavlju 4.5.2.

Za odabrane ulazne parametre, optimalna stabilnost električnog luka postignuta je s parametrima prikazanim u tablici (Tablica 5.).

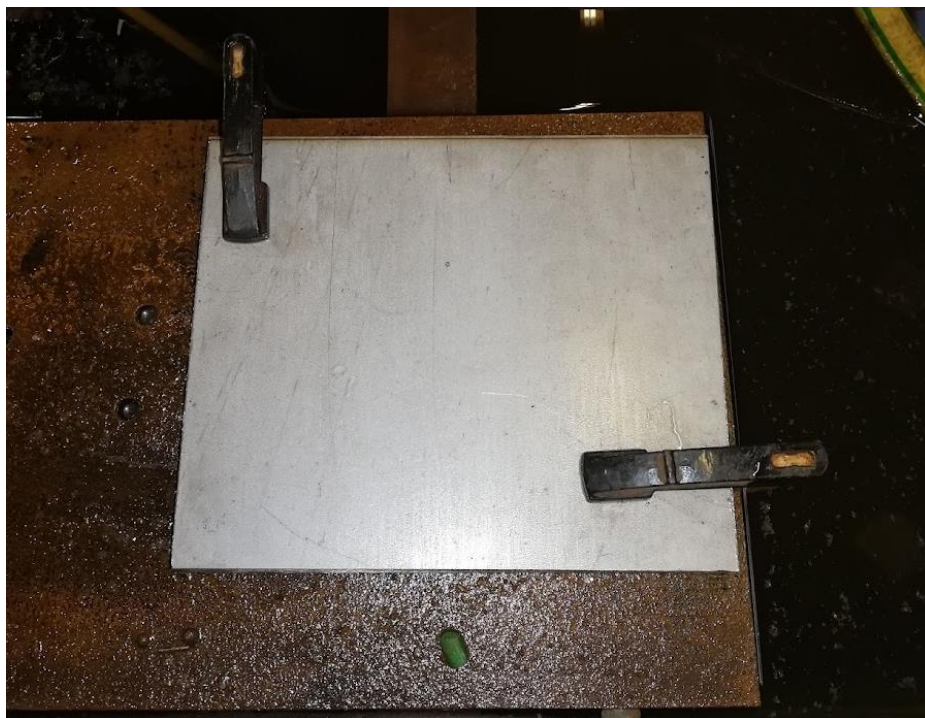
**Tablica 5. Optimalni parametri zavarivanja za AC MIG i DC Pulse postupak zavarivanja**

Postupak zavarivanja	AC MIG	DC Pulse
Jakost struje, A	80	60
Napon, V	23,2	35
Brzina zavarivanja, cm/min	20	20
Odstupanje napona od sinergijske krivulje, V	+4	+2
<i>EN ratio</i>	-30	-
Slobodni kraj žice, mm	10 – 12	10 – 12
Protok zaštitnog plina, l/min	18	18

### 4.3. Izrada uzoraka

U eksperimentalnom radu izrađena su četiri uzorka, odnosno WAAM zida. Pri tome, dva uzorka izrađena su pomoću tehnike aktivnog hlađenja, od koji je jedan izrađen AC MIG postupkom (uzorak B), a drugi DC Pulse postupkom (uzorak C). Uzorak A izrađen je AC MIG postupkom i hlađen je pasivnim hlađenjem, tako da je razina vode bila u ravnini s podlogom za zavarivanje. Uzorak D izrađen je DC Pulse postupkom bez aktivnog hlađenja, odnosno toplina se je odvodila konvekcijom i zračenjem.

Prvi korak kod izrade uzoraka je čišćenje i odmašćivanje podloge za zavarivanje. Čišćenje se provodilo četkom, a odmašćivanje alkoholom kako bi se uklonile eventualne nečistoće. Podloga za zavarivanje debljine 10 mm napravljena je od nehrđajućeg čelika AISI 304. Nakon čišćenja, podloga je stegama pričvršćena na postolje za zavarivanje. Prikaz pripremljene podloge za zavarivanje prikazan je na slici (Slika 22.).



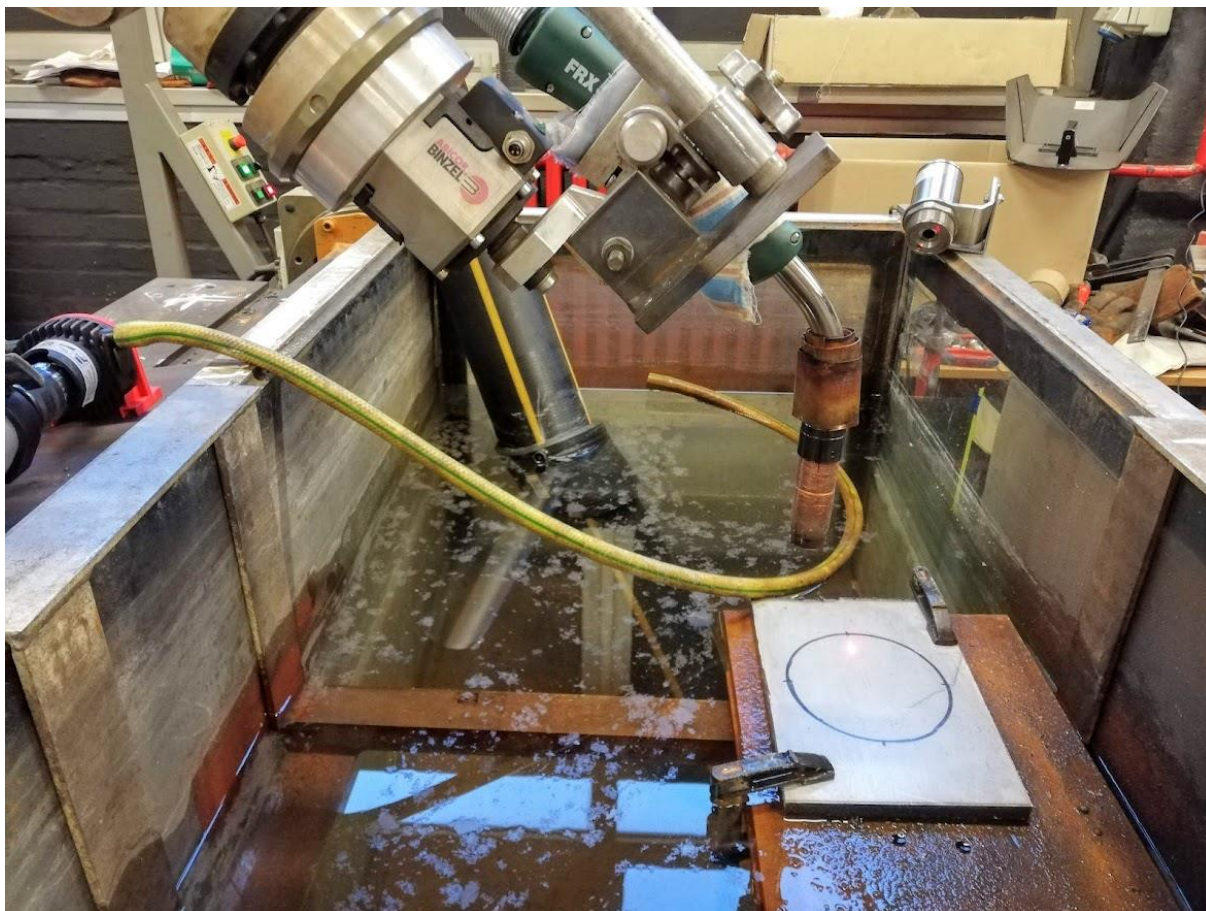
**Slika 22. Pripremljena i pričvršćena podloga za zavarivanje**

Nakon stezanja podloge za zavarivanje provedeno je programiranje pomoću privjeska za programiranje. Programiranje je uključivalo dovođenje pištolja za zavarivanje u željenu poziciju i snimanje te pozicije. Na podlozi je prethodno nacrtana kružnica kao predložak gibanja pištolja za zavarivanje. Tijekom izrade programa za uzorke koji su napravljeni pomoću tehnike aktivnog hlađenja cilj je bio osigurati kontinuirano navarivanje i putanju gibanja pištolja za zavarivanje, odnosno bez zaustavljanja između prolaza.

Nakon što su predeksperimentom utvrđeni optimalni parametri zavarivanja, navareno je nekoliko prolaza kako bi se utvrdila visina prolaza za svaki postupak. Taj podatak potreban je za određivanje iznosa vertikalnog odmaka pištolja prije početka sljedećeg prolaza. Također, kod aktivnog hlađenja bilo je potrebno održavati konstantan iznos udaljenosti zadnjeg prolaza od vode.

Zavarivanje se izvodilo u PA položaju, pri čemu je nagib pištolja za zavarivanje neutralan.

Na slici (Slika 23.) je prikazan postav eksperimenta, a može se vidjeti crijevo za ispumpavanje vode, infracrveni termometar te početni položaj pištolja za zavarivanje.



**Slika 23. Postav eksperimenta**

Za vrijeme navarivanja prolaza, pomoću infracrvenog termometra praćena je temperatura u jednoj točki na zidu što je služilo za analizu toplinskog ciklusa. Toplinski ciklus prikazan je u poglavlju 4.5.3. Također, mjerenje temperature korišteno je za kontrolu međuprolazne temperature.

Prije početka mjerenja, kalibriran je termometar i određen je koeficijent emisivnosti za dobiveni materijal i površinu na kojoj je mjerena temperatura. Kalibracija je provedena pomoću dodatnog infracrvenog termometra i termokrede. WAAM zid izrađen u predeksperimentu zagrijan je pomoću plinskog plamena na visoku temperaturu (oko 300 °C) te je istovremeno mjerena temperatura pomoću oba termometra. Koeficijent emisivnosti namještao se dok oba uređaja nisu pokazivala istu temperaturu. Za dodatnu sigurnost korištena je i termokreda koja ima svojstvo da se tali pri određenoj temperaturi. Ako kreda ima svojstvo da se tali pri temperaturi većoj od 250 °C, nanošena je na zid sve dok se nije prestala taliti, a to znači da se temperatura zida spustila ispod 250 °C. U tom trenutku i termometri bi trebali pokazivati

temperaturu od 250 °C ili malo nižu. Uređaji su pokazivali najbližnju temperaturu za koeficijent emisivnosti 0,9.

Pored mjerenja temperature, osciloskopom je snimljena dinamička karakteristika AC MIG i DC Pulse procesa. Dinamičke karakteristike procesa prikazane se u poglavlju 4.5.2.

Tijekom zavarivanja, na zaslonu izvora struje za zavarivanje prikazuju se stvarni iznosi struje i napona u tom trenutku. Snimanjem i analizom tih podataka moguće je odrediti stabilnost procesa što je isto prikazano u poglavlju 4.5.1.

#### **4.3.1. Izrada uzorka A**

Prvi uzorak (uzorak A) izrađen je AC MIG postupkom bez aktivnog hlađenja. Pri tome, razina vode bila je u ravnini s podlogom za zavarivanje i takva metoda hlađenja naziva se pasivno hlađenje. S obzirom na to da je ovaj uzorak izrađivan bez aktivnog hlađenja, nakon svakog prolaza, zavarivanje je zaustavljeno te je čekano da se međuprolazna temperatura spusti ispod 200 °C. Prosječna visina jednog prolaza iznosila je 2,5 mm, a širina zida iznosila je 8,7 mm. Parametri zavarivanja za izradu zida prikazani su u tablici (Tablica 5.).

Izgled zida nakon zavarivanja prikazan je na slici (Slika 24.).



**Slika 24. Uzorak A nakon zavarivanja**

#### 4.3.2. Izrada uzorka B

Drugi uzorak (uzorak B) izrađen je tehnikom aktivnog hlađenja AC MIG postupkom zavarivanja. Parametri zavarivanja za izradu zida prikazani su u tablici (Tablica 5.). Tijekom zavarivanja bilo je potrebno dodavati vodu kako bi se osigurala konstantna udaljenost zadnjeg prolaza od razine vode. Udaljenost zadnjeg prolaza od razine vode (*LEWD*) iznosila je približno 10 mm s odstupanjem  $\pm 2$  mm. Na 12 mm visine zida nalazila se točka u kojoj je mjerena temperatura za analizu toplinskog ciklusa. Toplinski ciklus uzorka B (isti je kao i za uzorak C) prikazan je na slici (Slika 43.). Iz toplinskog ciklusa vidljivo je da je najniža temperatura iznosila 220 °C, što je približno jednako međuprolaznoj temperaturi.

Cilj je bio postići kontinuirano navarivanje, bez zaustavljanja između prolaza. Međutim, nakon četvrtog prolaza došlo je do nestabilnosti, odnosno prskanja i prekida uspostave električnog luka. Nakon toga, očišćena je sapnica pištolja za zavarivanje i nastavljeno je navarivanje prolaza. Ipak, nakon svaka dva ili tri prolaza ponovno je došlo do prekida uspostave električnog luka. Takvo prekidanje postalo je učestalije što je navareno više prolaza i nakon što je razina vode prešla visinu podloge za zavarivanje. Glavni razlog tome je pojava vodene pare uslijed isparavanja vode u bazenu. Osim toga, s većom visinom zida gubi se turbulentno strujanje koje nastaje zbog sudaranja zaštitnog plina s podlogom za zavarivanje. Takvo strujanje je poželjno jer učinkovitije štiti rastaljeni metal od atmosferskih plinova. Uz to, činjenica je da je AC MIG postupak stabilan u uskom rasponu parametara. Svi ti čimbenici utjecali su na nestabilnost i prekid uspostave električnog luka.

Prosječna visina jednog prolaza iznosila je 2,6 mm, a širina zida je 8 mm.

Izgled zida nakon zavarivanja prikazan je na slici (Slika 25.).



Slika 25. Uzorak B nakon zavarivanja

#### 4.3.3. Izrada uzorka C

Plan je bio treći uzorak (uzorak C) izraditi AC MIG postupkom uz aktivno hlađenje, ali da udaljenost razine vode od zadnjeg prolaza (*LEWD*) iznosi približno 20 mm. Pretpostavka je bila da će većom udaljenošću električnog luka od vode smanjiti nestabilnosti te da će se moći postići kontinuirana izrada zida. Međutim, kao i kod uzorka B, već nakon prvih nekoliko prolaza došlo je do prekida električnog luka. Zbog toga je odlučeno da će ostatak zida biti izrađen DC Pulse postupkom, pri čemu će se analizirati visina zida napravljena DC Pulse postupkom.

Parametri zavarivanja za DC Pulse postupak prikazani su u tablici (Tablica 5.). Izrada uzorka C izvodila se kontinuiranim navarivanjem zavara bez prekida između prolaza.

Nastavkom zavarivanja DC Pulse postupkom, udaljenost zadnjeg prolaza od razine vode (*LEWD*) iznosila je 10 mm s odstupanjem  $\pm 2$  mm. Na 20 mm visine zida nalazila se točka u kojoj je mjerena temperatura za analizu toplinskog ciklusa. Toplinski ciklus uzorka C prikazan je na slici (Slika 43.) i iz njega možemo očitati da je najniža temperatura iznosila 220 °C, što je približno jednako temperaturi međuprolaza.

Prosječna visina jednog prolaza iznosila je 1,9 mm, a širina zida iznosila je 6,9 mm.

Uzorak C nakon zavarivanja prikazan je na slici (Slika 26.).





Slika 26. Uzorak C nakon zavarivanja

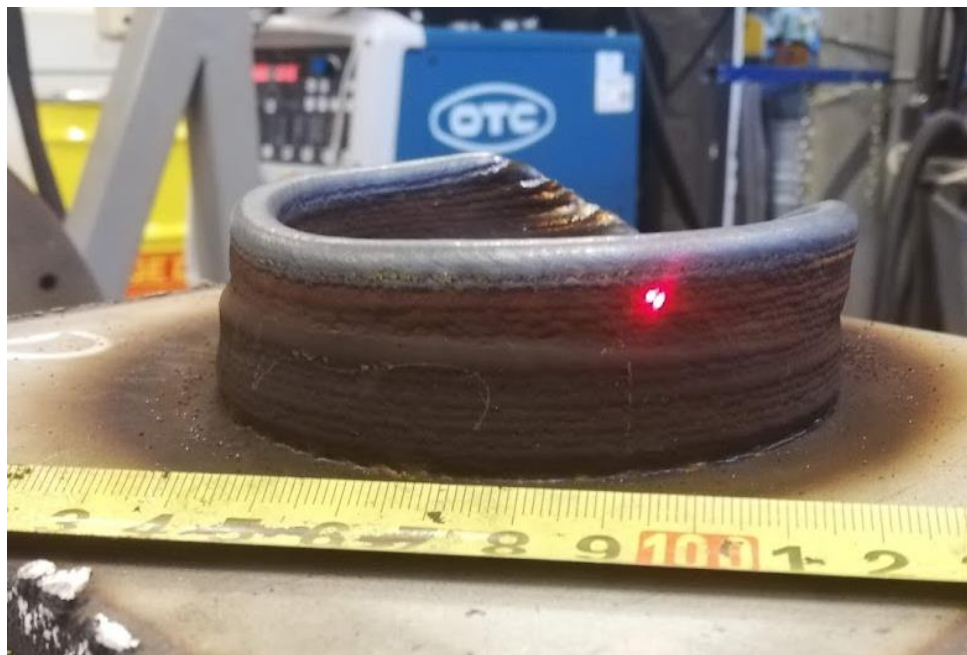
#### 4.3.4. Izrada uzorka D

Četvrti uzorak (uzorak D) izrađen je DC Pulse postupkom bez aktivnog hlađenja. Hlađenje se provodilo konvekcijom sa zrakom i zračenjem, što se naziva normalano hlađenje. S obzirom na to da se je ovaj uzorak izrađivao bez aktivnog hlađenja, nakon svakog prolaza bilo je potrebno zaustaviti zavarivanje i čekati da se međuprolazna temperatura spusti ispod 200 °C. Na visini od 22 mm nalazila se točka u kojoj je mjerena promjena temperature za nekoliko toplinskih ciklusa.

Parametri zavarivanja za izradu zida prikazani su u tablici (Tablica 5.).

Zbog izrade zida u dva navrata, došlo je do horizontalnog pomaka generirane putanje gibanja pištolja za zavarivanje, što se vidi na slici kao "stepenica".

Prosječna visina jednog prolaza iznosila je 1,9 mm, a širina zida iznosila je 7 mm. Izgled zida nakon zavarivanja prikazan je na slici (Slika 27.).



Slika 27. Uzorak D nakon zavarivanja

U tablici (Tablica 6.) dani su skupni podaci o izrađenim uzorcima.

Energija luka računa se prema formuli (6), pri čemu su uzete prosječne vrijednosti struje i napona za svaki uzorak.

$$E = \frac{U \times I}{v_z} \times \frac{60}{1000} \quad (6)$$

Gdje je:

$E$  – energija luka, kJ/cm

$U$  – napon zavarivanja, V

$I$  – jakost struje zavarivanja, A

$v_z$  – brzina zavarivanja, cm/min.

Izračunata energija luka za svaki uzorak dan je u tablici (Tablica 6.). Važno je napomenuti da za izračun nije uzet u obzir koeficijent  $k$ , koji označava stupanj iskorištenja postupka zavarivanja. Koeficijent nije poznat za AC MIG postupak te zbog toga nije korišten.

**Tablica 6. Skupni podaci o izrađenim uzorcima**

UZORAK	A	B	C	D
Postupak zavarivanja	AC MIG	AC MIG	DC PULSE	DC PULSE
Aktivno hlađenje	NE	DA	DA	NE
LEWD, mm	-	10 ± 2	10 ± 2	-
Temperatura međuprolaza	maks. 200 °C	≈ 220 °C	≈ 220 °C	maks. 200 °C
Prosječna struja zavarivanja, A	73	74	51	69
Prosječni napon, V	27	26	22	22
Brzina zavarivanja, cm/min	20	20	20	20
Energija luka, kJ/cm	5,91	5,77	3,37	4,55
Visina prolaza, mm	2,5	2,6	1,9	1,8
Širina zida, mm	8,7	8	6,9	7

Iz dobivenih podataka o geometrijskim značajkama zida (visina i širina prolaza) može se zaključiti da je visina prolaza i širina zida veća kod AC MIG postupka. Razlog tome je veći depozit materijala AC MIG postupka u odnosu na DC Pulse. Primjenom aktivnog hlađenja ubrzalo se skrućivanje taline pa je time postignuta visina prolaza za 0,1 mm viša u odnosu na isti postupak bez aktivnog hlađenja.

#### 4.4. Priprema uzoraka za ispitivanje

Priprema uzoraka za ispitivanje sastojala se od sljedećih koraka:

1. hlađenje, čišćenje četkom, odmaščivanje
2. rezanje tračnom pilom
3. brušenje
4. poliranje
5. nagrivanje
6. glodanje.

Na slici (Slika 28.) prikazani su uzorci nakon čišćenja i odmaščivanja. Vizualnim pregledom utvrđeno je da uzorci izrađeni DC Pulse postupkom imaju manje površinskih nepravilnosti i valovitosti u odnosu na uzorke izrađene AC MIG-om.

Uzorak A



Uzorak B



Uzorak C

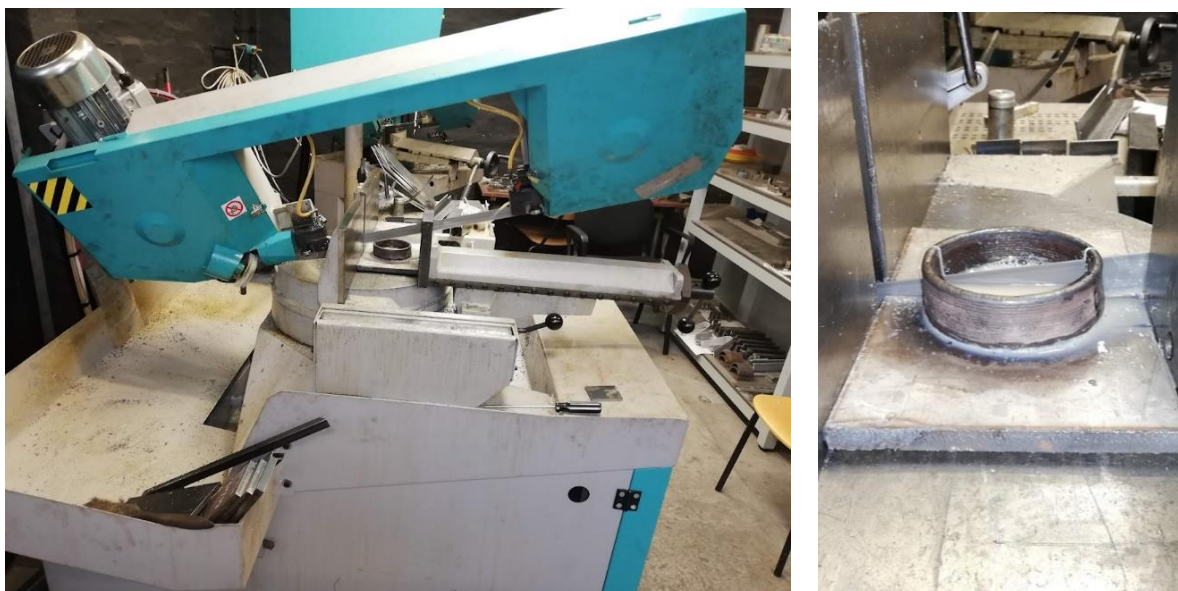


Uzorak D



Slika 28. Uzorci nakon čišćenja i odmaščivanja

Nakon izrade uzoraka, provedeno je hlađenje i čišćenje. Čišćenje se provodilo četkanjem i odmašćivanjem alkoholom. Potom su uzorci rezani tračnom pilom (Slika 29.). Uzorci su tračnom pilom podijeljeni na četiri dijela (Slika 29.).



**Slika 29. Rezanje uzorka tračnom pilom**



**Slika 30. Uzorak nakon rezanja**

Nakon rezanja uzoraka, turpijom su skinuti oštri rubovi te su uzorci oprani pod mlazom vode. Iz uzoraka A, B, C i D uzet je dio izrađenog zida za makroanalizu i ispitivanje tvrdoće.

Uzorci za makroanalizu i ispitivanje tvrdoće brusili su se brusnim papirom različite granulacije. Korišteni brusni papirom imali su redom sljedeće oznake: P80, P150, P240, P280, P320. Poslije brušenja, uzorci su polirani na uređaju DAP-V, pri brzini od 150 okr/min pomoću dijamantne paste i tkanine određene hrapavosti. Pored toga, uzorci su hlađeni tekućinom kako ne bi došlo do strukturnih promjena.

Nagrizanje se provodilo na Katedri za zaštitu materijala. Uzorci su nagrizeni u oksalnoj kiselini pri iznosu struje od 3 A i naponu od 5 V u trajanju od 35 sekundi. Nakon toga, uzorci su slikani za makroanalizu.

Uzorci koji su korišteni za radiografsko ispitivanje prvo su rezani tračnom pilom. Iz svakog uzorka uzeta su 2 dijela koja su zatim u Laboratoriju za alatne strojeve glodani kako bi se uklonile površinske nepravilnosti i valovitost, odnosno kako bi radiografska snimka bila jasnija. Uzorak B nakon glodanja prikazan je na slici (Slika 31.).



**Slika 31. Uzorak B nakon glodanja**

## 4.5. Analiza procesa

Analiza procesa uključuje:

- procjenu stabilnosti procesa
- analizu dinamičke karakteristike
- analizu toplinskog ciklusa.

Snimanje podataka za analizu provedeno je tijekom izrade uzoraka.

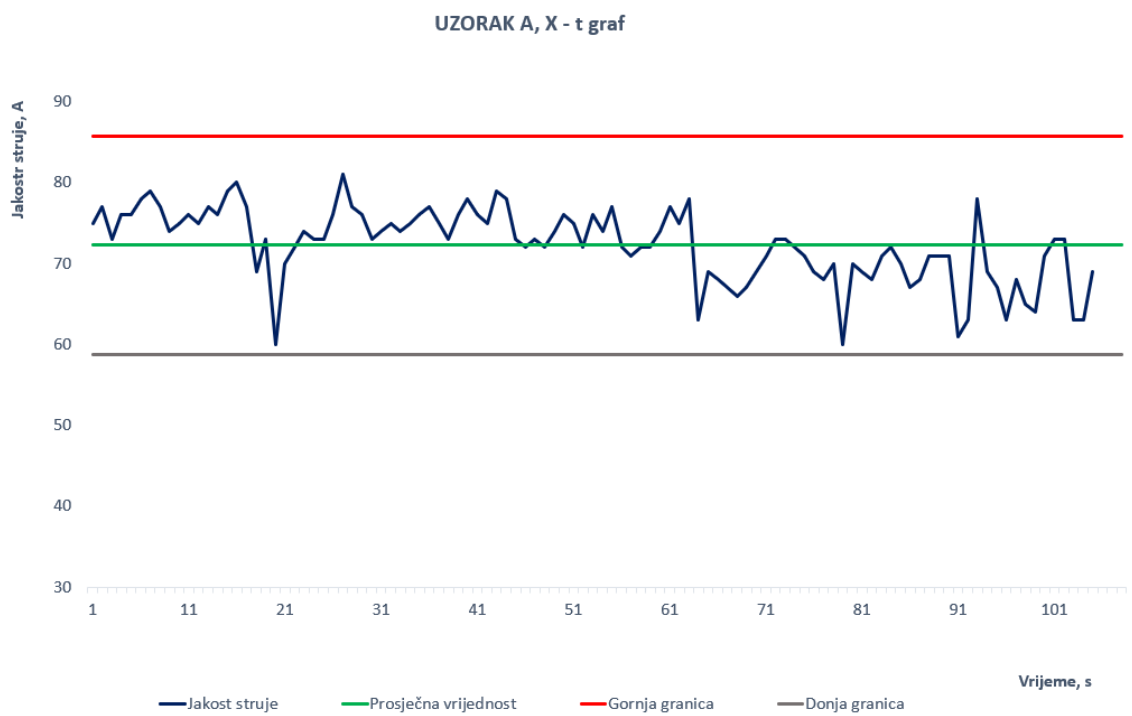
### 4.5.1. Procjena stabilnosti procesa

Procjena stabilnosti procesa provedena je snimanjem parametara zavarivanja, točnije napona i jakosti struje. Napon i jakost struje očitani su sa zaslona izvora struje za zavarivanje koji prikazuje stvarne vrijednosti tih parametara u vremenu. Zadane vrijednosti parametara, postavljene na izvoru struje prije zavarivanja, razlikuju se od zabilježenih vrijednosti tijekom zavarivanja. Odstupanja između zadanih i stvarnih vrijednosti parametara posljedica su neravnomjerne udaljenosti slobodnog kraja žice, nejednolike brzine dodavanja žice i drugih faktora. Iz dobivenih podataka napravljen je grafički prikaz individualnih vrijednosti mjerenja u vremenu ( $x = f(t)$ ) za svaki uzorak, koje su povezane u krivulju. Na grafu su također prikazane centralna linija, gornja i donja kontrolna granica. Centralna linija označava prosječnu vrijednost struje. Gornja granica postavljena je tri standardne devijacije iznad centralne linije, a donja granica postavljena je tri standardne devijacije ispod centralne linije. Standardna devijacija označava prosječno srednje kvadratno odstupanje numeričkih veličina (u ovom slučaju struje i napona) od njihove aritmetičke sredine. Vrijednost struje i napona izvan kontrolnih granica ukazuju na nestabilnost procesa. Grafovi omogućuju usporedbu stabilnosti AC MIG i DC Pulse postupka te utjecaj aktivnog hlađenja na stabilnost procesa.

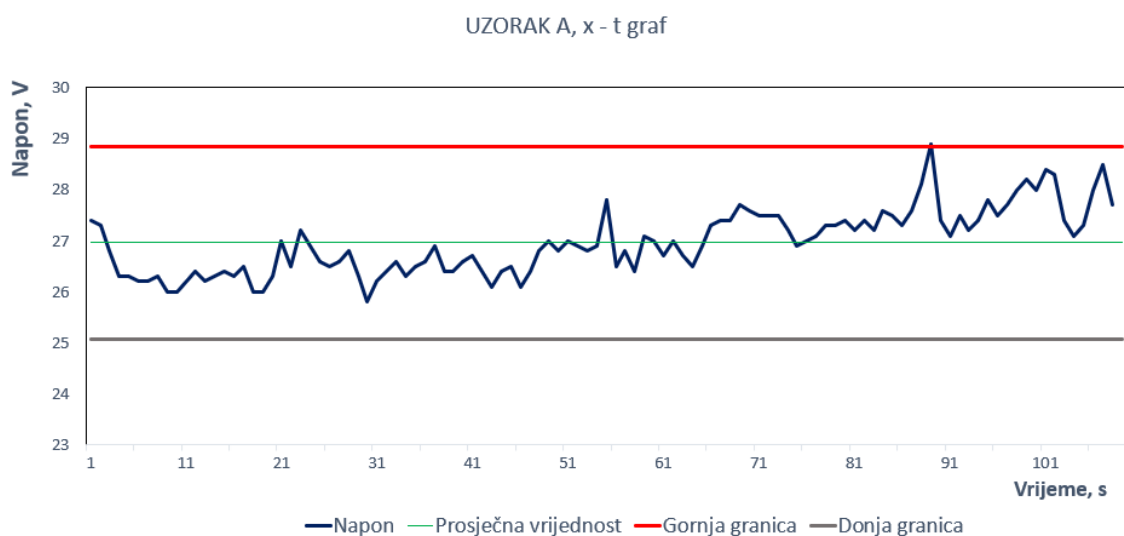
#### 4.5.1.1. Procjena stabilnosti AC MIG postupka bez aktivnog hlađenja

Slika 32. prikazuje individualne vrijednosti jakosti struje u vremenu, a slika (Slika 33.) prikazuje individualne vrijednosti napona u vremenu za uzorak A. Snimanje parametara zavarivanja tijekom navarivanja jednog prolaza uzorka A trajalo je 110 s te je u istom vremenskom intervalu zabilježeno 110 individualnih vrijednosti struje i napona. Standardna devijacija za očitane vrijednosti jakosti struje iznosi 4,5, a standardna devijacija za očitane vrijednosti napona iznosi 0,63. Sve vrijednosti struje nalaze se unutar kontrolnih granica, a

jedna vrijednost napona prelazi gornju kontrolnu granicu. Kod prikaza jakosti struje vidljiv je blagi pad krivulje, dok je kod prikaza napona vidljiv blagi rast krivulje u drugoj polovici vremena. Razlog tome je povećanje slobodnog kraja žice. Proces izrade uzorka A, AC MIG postupkom, bez aktivnog hlađenja može se ocijeniti kao stabilan, usprkos jednoj vrijednosti napona iznad kontrolne granice.



**Slika 32. Grafički prikaz jakosti struje u vremenu za uzorak A**



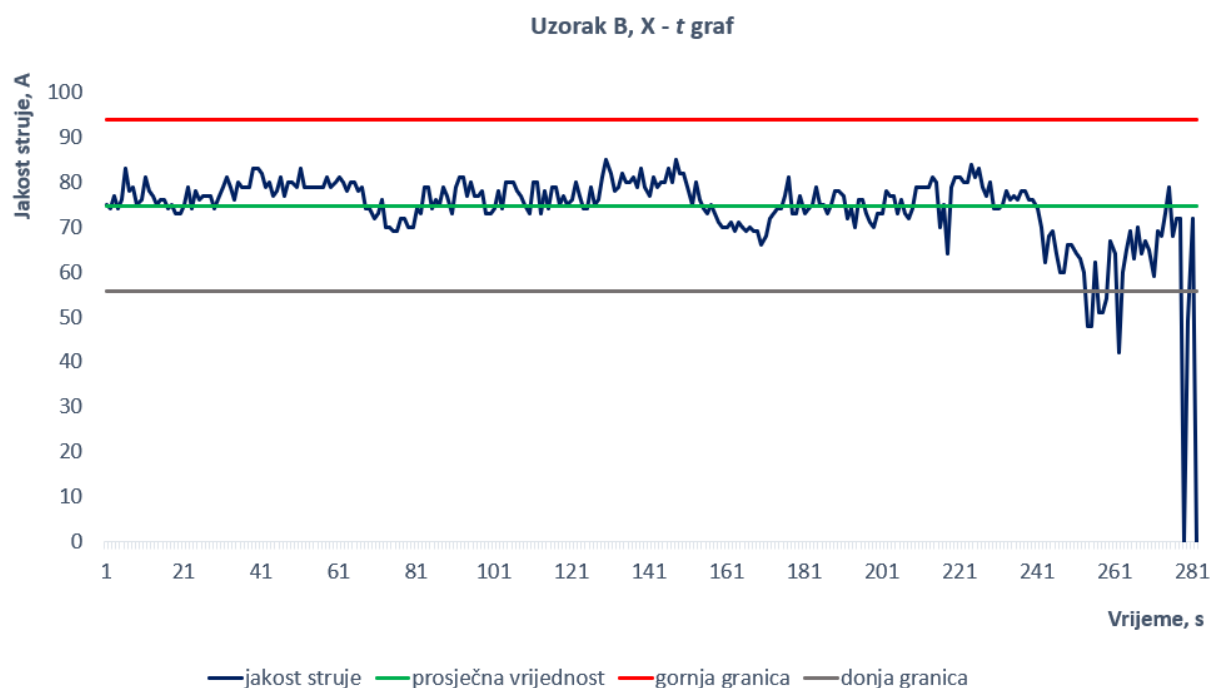
**Slika 33. Grafički prikaz napona u vremenu za uzorak A**



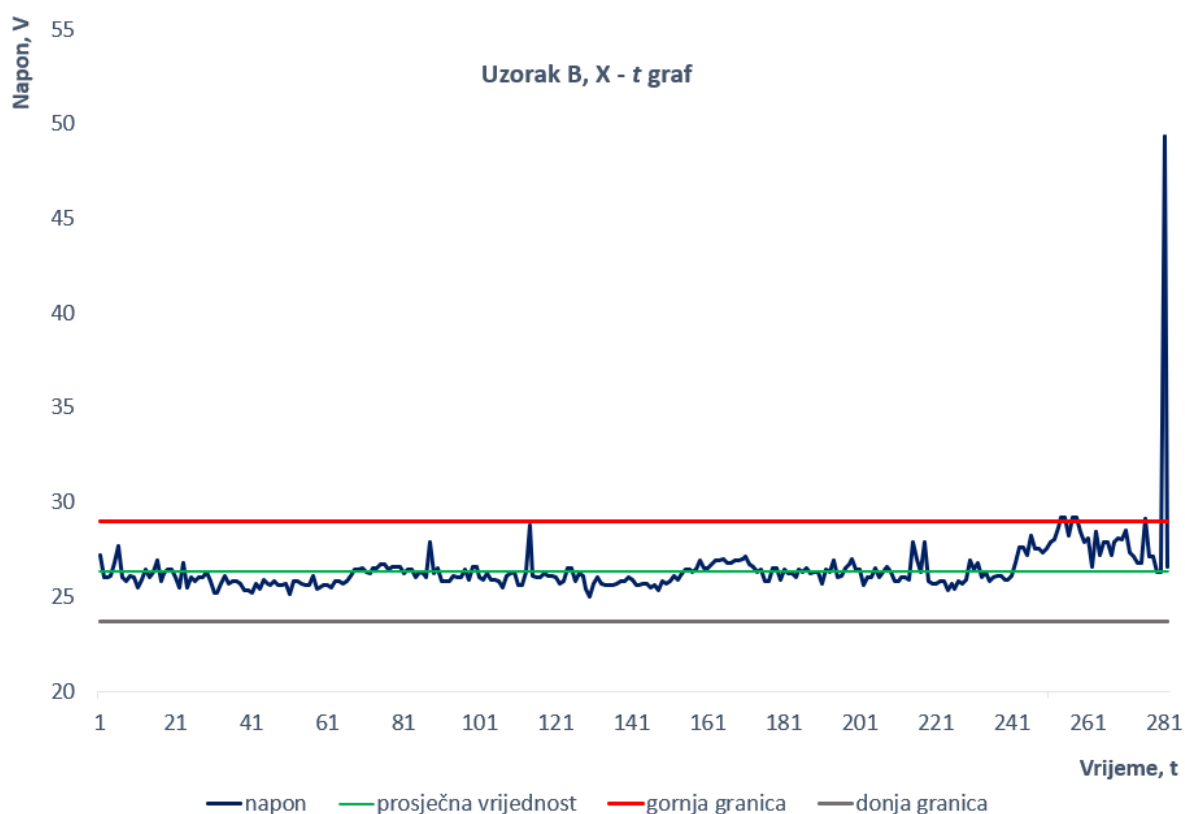
#### 4.5.1.2. Procjena stabilnosti AC MIG postupka s aktivnim hlađenjem

Slika 34. daje grafički prikaz promjene jakosti struje u vremenu, a slika (Slika 35.) prikazuje promjenu napona u vremenu tijekom izrade uzorka B. Vremenski raspon očitavanja struje i napona je 280 sekundi. Prosječna vrijednost struje iznosi 74,8 A, dok je prosječna vrijednost napona 26,3 V. Standardna devijacija za očitane vrijednosti jakosti struje iznosi 6,34, a standardna devijacija za očitane vrijednosti napona iznosi 0,88.

Nakon četiri minute kontinuiranog zavarivanja započelo je značajno odstupanje struje i napona od prosječne vrijednosti. To se manifestiralo kao pucketanje i kratkoročno prekidanje električnog luka, sve do 280-te sekunde kada je došlo do potpunog prekida uspostave električnog luka. Čimbenici koji su uzrokovali prekid električnog luka navedeni su u poglavlju 4.3.2. Iz prikazanih grafova, može se zaključiti da AC MIG postupak s aktivnim hlađenjem nije stabilan jer nekoliko individualnih vrijednosti struje i napona prelazi kontrolne granice što dovodi do prekida procesa.



**Slika 34. Grafički prikaz jakosti struje u vremenu za uzorak B**

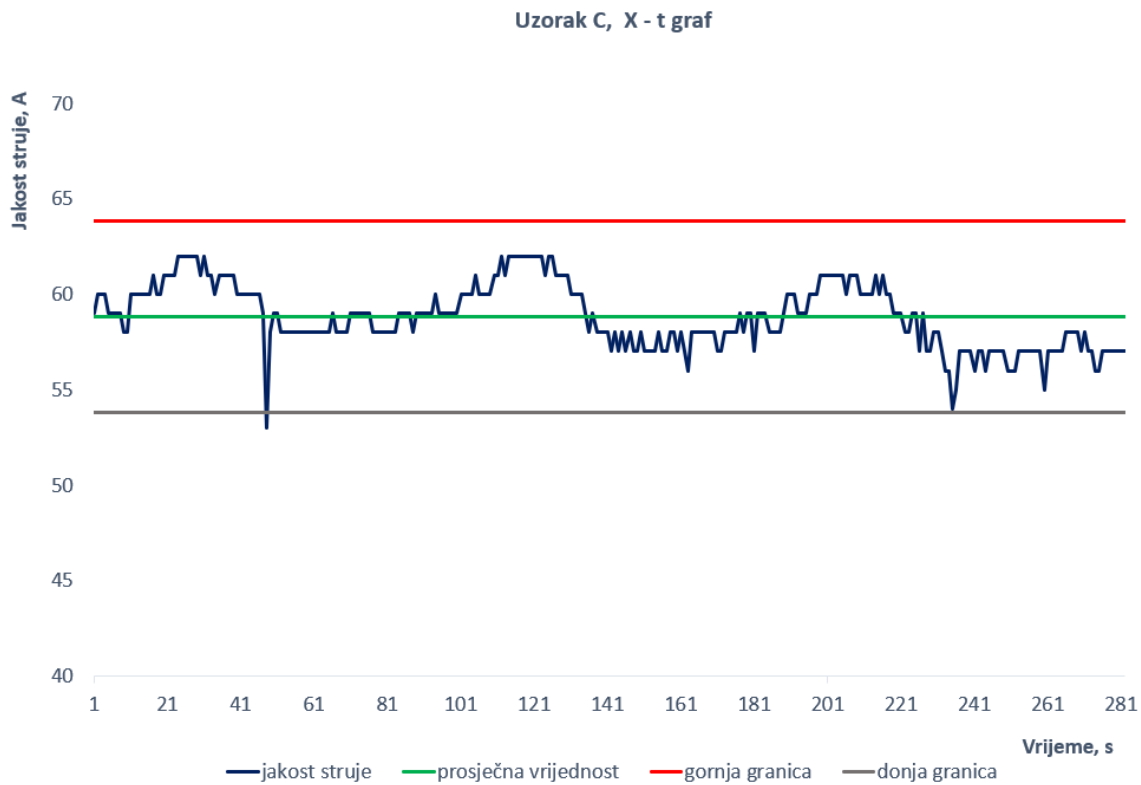


**Slika 35. Grafički prikaz napona u vremenu za uzorak B**

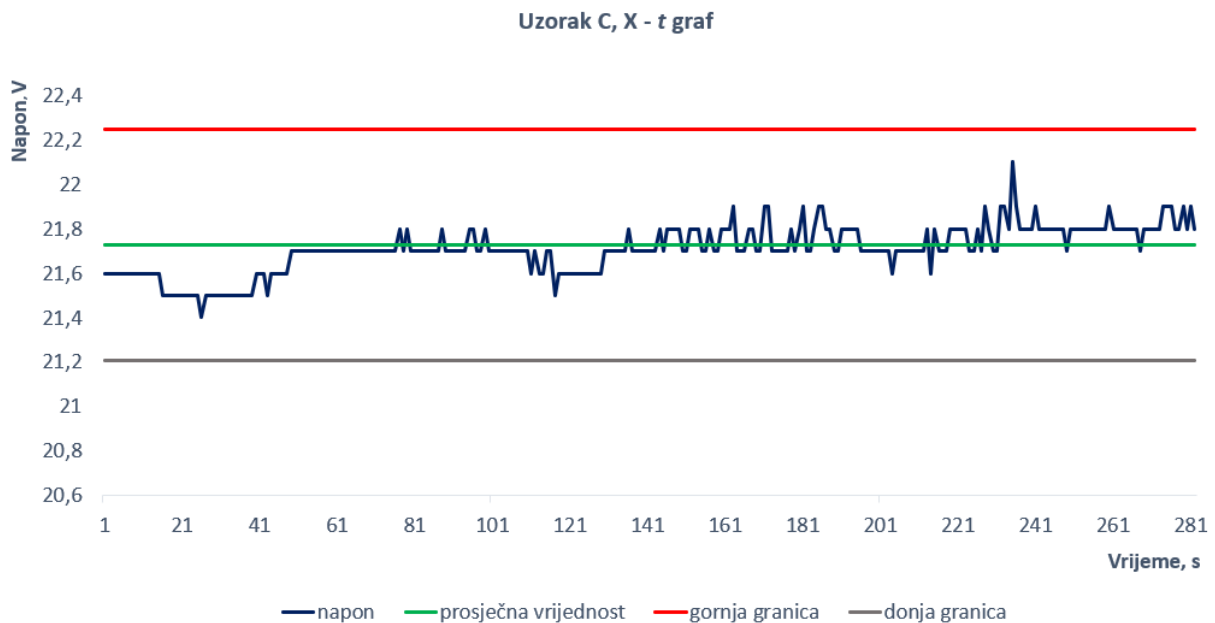
#### 4.5.1.3. Procjena stabilnosti DC Pulse postupka s aktivnim hlađenjem

Slika 36. prikazuje promjenu jakosti struje u vremenu, a slika (Slika 37.) prikazuje promjenu napona u vremenu tijekom izrade uzorka C. Vrijednosti jakosti struje i napona prikazane su u vremenskom rasponu od 280 sekundi. Prosječna vrijednost struje iznosi 58,83 A, dok je prosječna vrijednost napona 21,73 V. Standardna devijacija za očitane vrijednosti jakosti struje iznosi 1,67, a standardna devijacija za očitane vrijednosti napona iznosi 0,17. Iz dobivenih rezultata vidljivo je da je standardna devijacija kod uzorka C, odnosno DC Pulse postupka, puno niža od standardne devijacija kod uzorka A i B (AC MIG postupak). Niže vrijednosti standardne devijacije znače da prosječna vrijednost (aritmetička sredina) dobro predstavlja rezultate.

Prikazani grafovi potvrđuju stabilnost DC Pulse postupka s aktivnim hlađenjem.



Slika 36. Grafički prikaz jakosti struje u vremenu za uzorak C

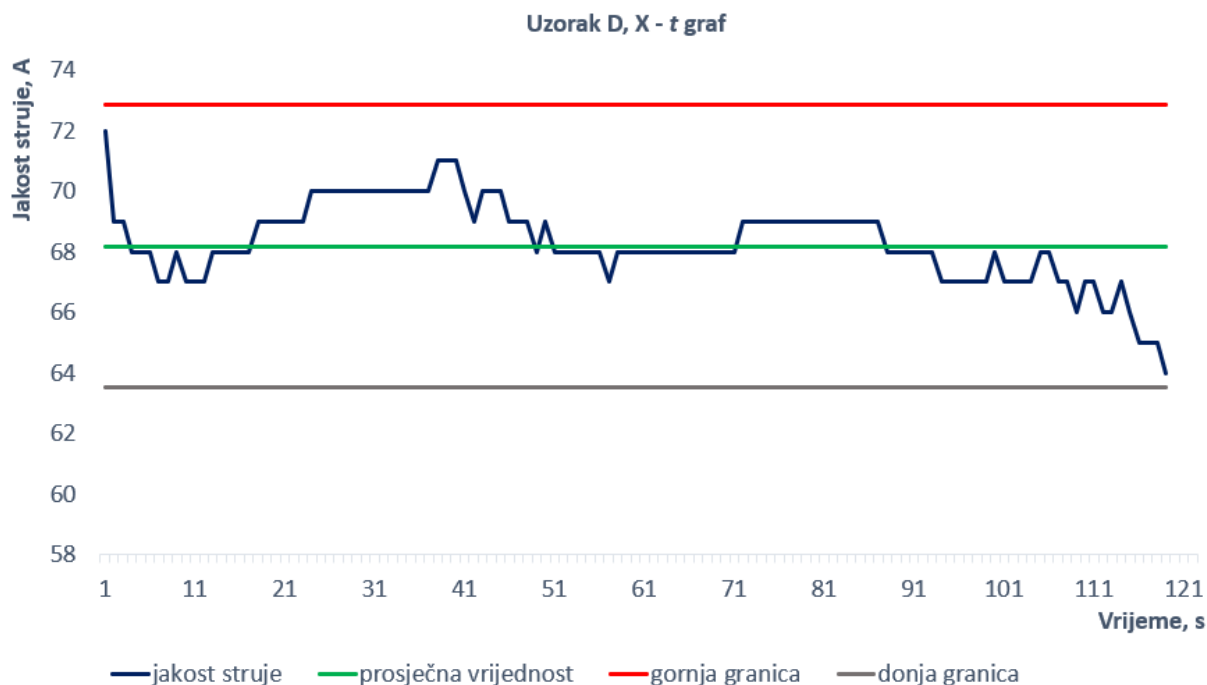


Slika 37. Grafički prikaz napona u vremenu za uzorak C

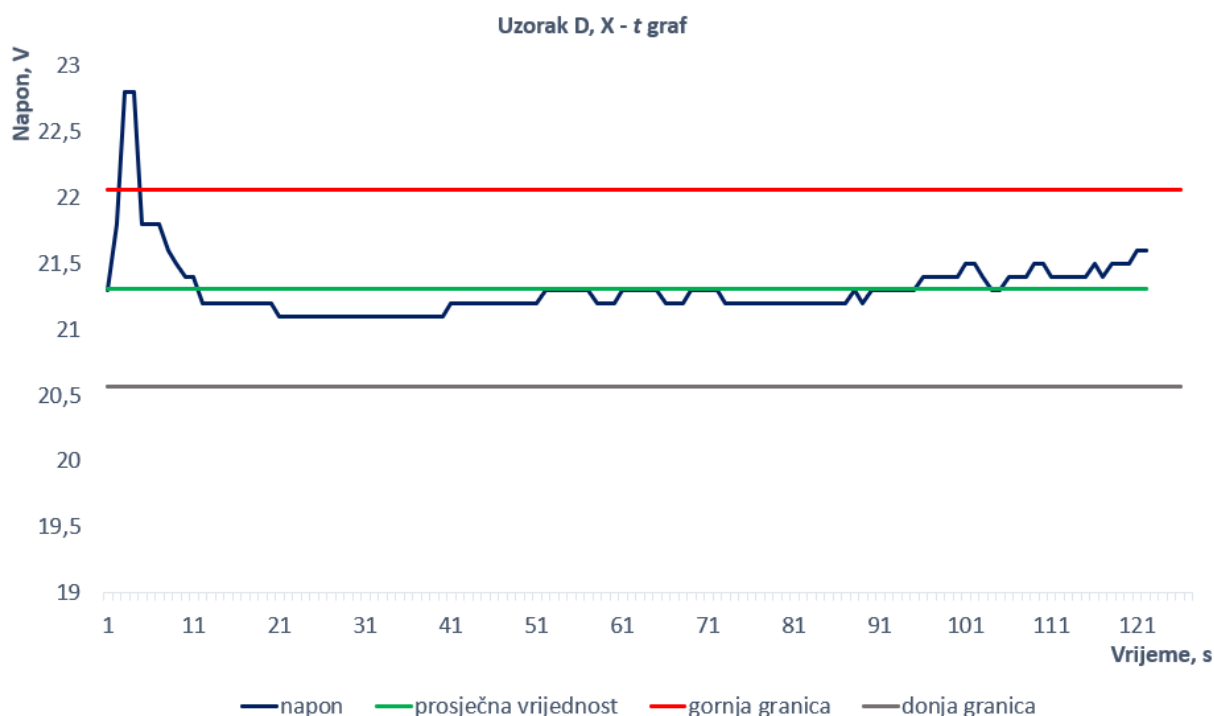
#### 4.5.1.4. Procjena stabilnosti DC Pulse postupka bez aktivnog hlađenja

Na slici (Slika 38.) dan je grafički prikaz jakosti struje u vremenu, a na slici (Slika 39.) prikazana je promjena napona u vremenu za uzorak D. Vremenski raspon očitavanja rezultat iznosi 120 sekundi, koliko je trajalo i nanošenje jednog prolaza DC Pulse postupkom bez aktivnog hlađenja. Prosječna vrijednost struje iznosi 68,17 A, dok je prosječna vrijednost napona 21,3 V. Standardna devijacija za očitane vrijednosti jakosti struje iznosi 1,56, a standardna devijacija za očitane vrijednosti napona iznosi 0,25. Kao i kod uzorka C, niska vrijednost standardne devijacije znači da aritmetička sredina dobro predstavlja očitane rezultate te ukazuje da su odstupanja od aritmetičke sredine vrlo mala. Kod prikaza napona u vremenu, na početku zavarivanja, zabilježena je vrijednost napon iznad gornje kontrolne granice. No, to je uobičajena pojava kod uspostave električnog luka i ne uzima se obzir pri ocjenjivanju stabilnosti procesa.

Iz dobivenih grafičkih prikaza, zaključuje se da je DC Pulse postupak bez aktivnog hlađenja stabilan.



**Slika 38. Grafički prikaz jakosti struje u vrmenu za uzorak D**

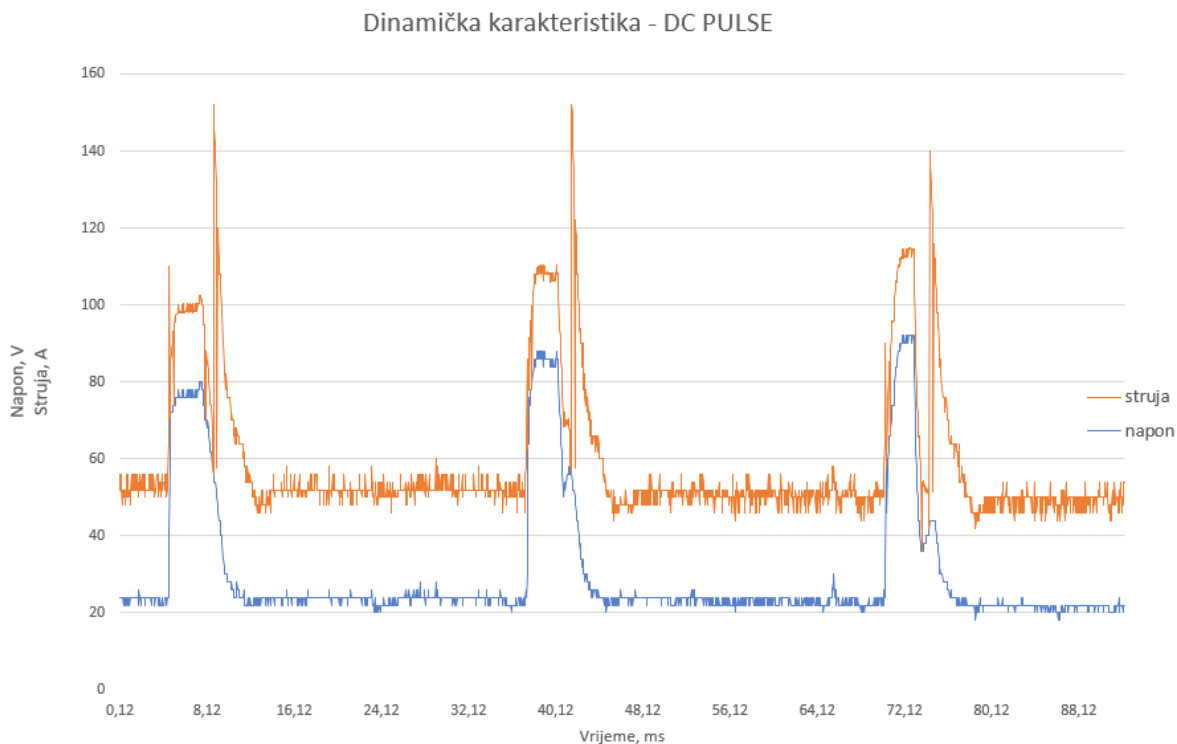


**Slika 39. Grafički prikaz napona u vremenu za uzorak D**

#### 4.5.2. Dinamička karakteristika procesa

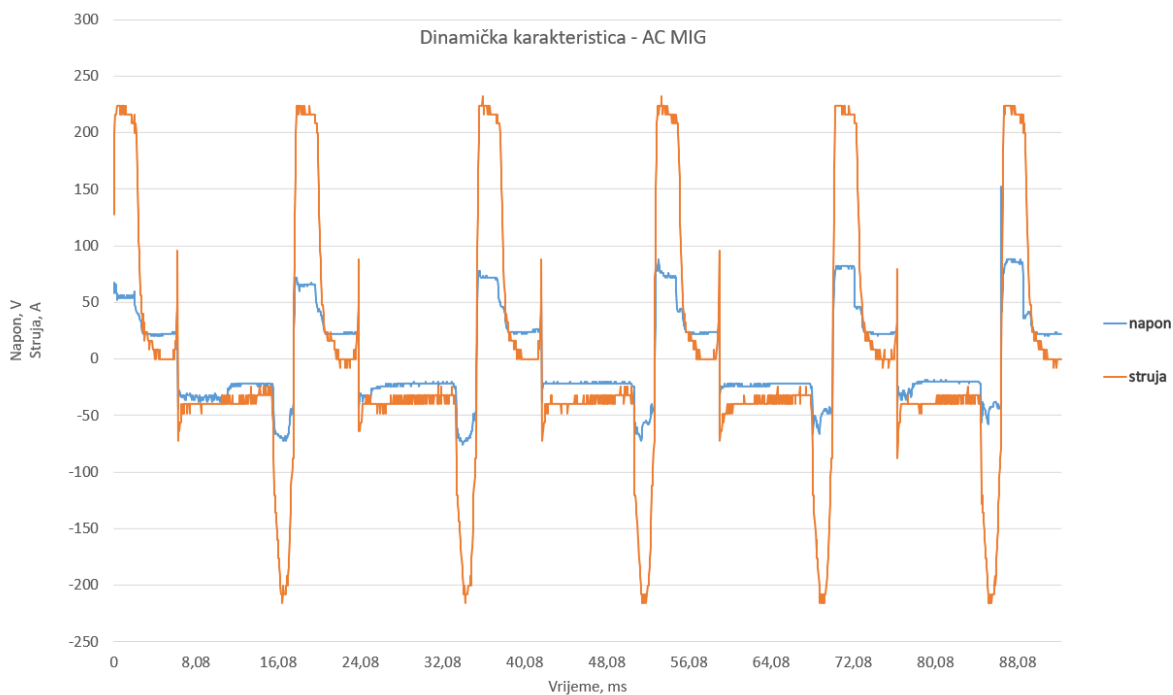
Dinamička karakteristika procesa prikazuje promjenu struje i napona tijekom formiranja i odvajanja kapljice rastaljenog metala. Dinamička karakteristika snimana je pomoću osciloskopa kako bi se detaljnije promotriло ponašanje električnog luka kod AC MIG i DC Pulse postupka za vrijeme izrade uzorka C.

Na slici (Slika 40.) prikazan je oscilogram s vrijednostima jakosti struje i napona tijekom zavarivanja DC Pulse postupkom. Narančastom krivuljom prikazana je ovisnost jakosti struje o vremenu,  $i = f(t)$ . Plavom krivuljom prikazana je ovisnost napona o vremenu  $u = f(t)$ . Vršna jakost struje iznosi približno 150 A, a prosječna vrijednost jakosti struje iznosi 50 – 55 A. Napon poprima najveći iznos od približno 80 V u istom trenutku kada je zabilježen porast jakosti struje. Nakon smanjenja jakosti struje do prosječnog iznosa, smanjuje se ujedno i vrijednost napona na približno 22 V. Vrijeme trajanja jednog ciklusa odvajanja rastaljene kapljice metala iznosi 32,84 ms.



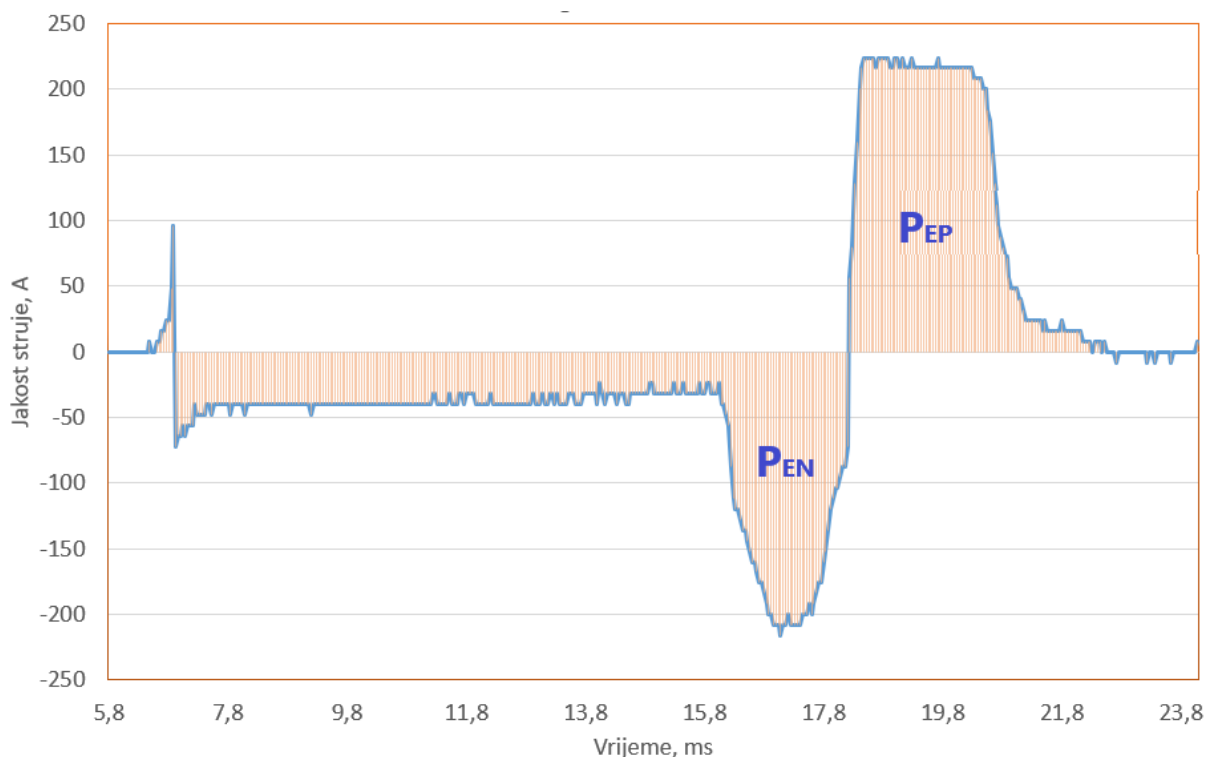
**Slika 40. Dinamička karakteristika DC Pulse postupka zavarivanja**

Slika 41. prikazuje oscilogram s iznosima jakosti struje i napona tijekom zavarivanja AC MIG postupkom. Kao i na prethodnom oscilogramu, narančasta krivulja prikazuje ovisnost jakosti struje o vremenu, a plava krivulja prikazuje ovisnost napona o vremenu. Vršna struja iznosi približno 225 A. Maksimalna vrijednost struje za vrijeme trajanja negativnog polariteta je – 216 A, a pozadinska struja iznosi – 40 A. Promjena napona prati vrijednosti jakosti struje, odnosno pri vršnoj struji, napon postiže najveći iznos od približno 75 V. Za vrijeme trajanja pozadinske struje napon je - 22 V, dok je maksimalan iznos negativnog napona – 76 V. Vrijeme trajanja jednog ciklusa odvajanja rastaljene kapljice metala kod AC MIG postupka iznosi 17,64 ms. Vrijeme trajanja jednog ciklusa DC Pulse postupka gotovo je dvostruko veće u odnosu na AC MIG postupak.



**Slika 41. Dinamička karakteristika AC MIG postupka zavarivanja**

Pomoću prikazane dinamičke karakteristike za AC MIG postupak integrirana je površina ispod krivulje struje za jedan ciklus. Jedan ciklus AC MIG postupka prikazan je na slici (Slika 42.). Iz izračunatih površina određen je parametar *EN ratio* prema formuli (5). Ukupna površina pozitivnog polariteta elektrode ( $P_{EP}$ ) iznosi 569,6 Ams, a ukupna površina negativnog polariteta elektrode ( $P_{EN}$ ) je – 682,6 Ams. Iz navedenih površina dobiva se iznos *EN ratio*-a 54,5 % što znači da je vrijeme trajanja negativnog polariteta veće za približno 20 % od vremena trajanja pozitivnog polariteta.



**Slika 42. Omjer površina struje za vrijeme pozitivnog i negativnog polariteta žice**

#### 4.5.3. Analiza toplinskog ciklusa

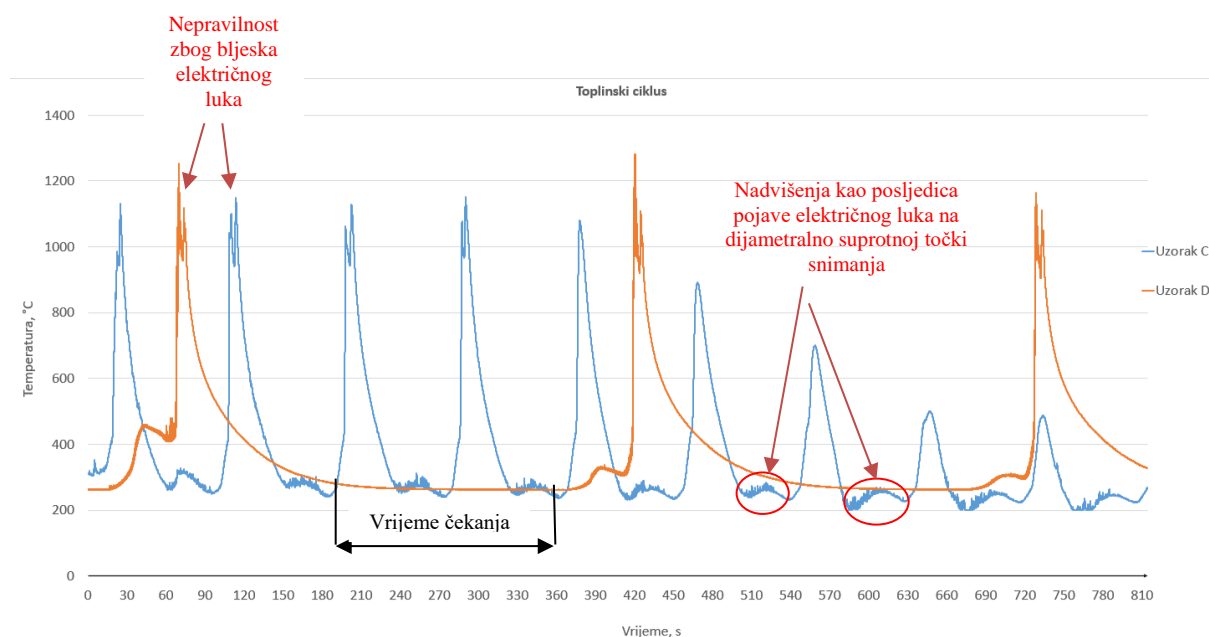
Toplinski ciklus daje grafički prikaz promjene temperature u vremenu. Slika 43. prikazuje toplinski ciklus za uzorak C (plava krivulja), koji je izrađen pomoću tehnike aktivnog hlađenja i uzorak D (narančasta krivulja), za koji nije korištena nikakva tehnika hlađenja (normalno hlađenje). Točka u kojoj je snimana temperatura nalazila se na visini 20 mm od podloge kod uzorka D, što je vidljivo na slici (Slika 27). Kod uzorka C, točka snimanja temperature nalazila se na visini 12 cm od podloge.

Temperatura je mjerena pomoću infracrvenog termometra kojemu je mjerno područje temperature za uzorak C iznosilo od 200 °C do 1500 °C, a za uzorak D od 250 °C do 1500 °C. Važno je napomenuti da je najniža temperatura, odnosno međuprolazna temperatura za uzorak D iznosila manje od 200 °C, što se ne vidi u grafa zbog ograničenja mjernog područja termometra. Temperatura se dodatno kontrolira infracrvenim termometrom Fluke IR koji mjeri raspon temperatura od – 40 °C do 800 °C. Kod izrade uzorak D bilo je potrebno čekati da se međuprolazna temperatura spusti ispod 200 °C, dok je uzorak C izrađen bez zaustavljanja između prolaza. Zbog toga, u istom vremenskom intervalu (810 s), navareno je devet prolaza



na uzorku C, dok je na uzorku D navareno samo tri prolaza. Porastom visine uzorka D, vrijeme čekanje se produljivalo zbog sporijeg odvođenja topline.

Termometar nije zabilježio maksimalnu temperaturu zbog bljeska električnog luka u trenutku kada se nalazi neposredno iznad točke mjerenja. U grafu se taj trenutak manifestira kao nagli pad pa rast temperature. Također, snimanjem je zabilježen trenutak kada se pištolj za zavarivanje, odnosno električni luk nalazi na dijametralno suprotnoj točki snimanja, što je na grafu prikazano kao blago nadvišenje.



**Slika 43. Usporedba toplinskog ciklusa normalnog i aktivnog hlađenja**

Usporedba toplinskog ciklusa potvrđuje da se primjenom tehnike aktivnog hlađenja znatno poboljšava produktivnost procesa. Vrijeme jednog ciklusa za tehniku aktivnog hlađenja tri puta je manje nego vrijeme ciklusa normalnog hlađenja. Pored toga, vrijeme potrebno za hlađenje od temperature 1100 °C do 300 °C kod tehnike aktivnog hlađenja iznosi 33,46 s. Primjenom normalnog hlađenja potrebno je 101,06 s za hlađenje od 1100 °C do 300 °C, što je 33 % dulje nego kod aktivnog hlađenja.

## 4.6. Analiza uzoraka

Nakon pripreme uzoraka, slijedilo je ispitivanje uzoraka. Ispitivanje, odnosno analiza uključuje:

- makroanalizu
- mjerenje tvrdoće
- radiografsko ispitivanje.

### 4.6.1. Makroanaliza

Makroanaliza je provedena s ciljem otkrivanja eventualnih nepravilnosti i pogrešaka u poprečnom presjeku uzoraka. Makroanalizom je utvrđeno da nisu uočene nepravilnosti i pogreške zavarivanja u uzorcima. Pogreške zavarivanja na koje treba voditi računa tijekom izrade uzoraka WAAM postupkom su pore te naljepljivanje. Primjena aktivnog hlađenja sa sobom uvodi vodenu paru zbog isparavanja vode koja se koristi kao rashladno sredstvo, a potom vodena para može pospješiti pojavu pora. Ipak, makroanalizom nije evidentirana pojava pora niti na jednom uzorku.

Na uzorcima se može vidjeti linija staljivanja između slojeva, a naljepljivanje nije uočeno. Također, penetracija dodatnog materijala u osnovni jasno je vidljiva te zadovoljavajuća.

Makroanalizom je utvrđeno da nisu pronađeni uključci, pore ni greške vezivanja, niti kod jednog uzorka. Na slikama (Slika 44., Slika 45., Slika 46., Slika 47.) prikazani su makroizbrusci uzoraka.



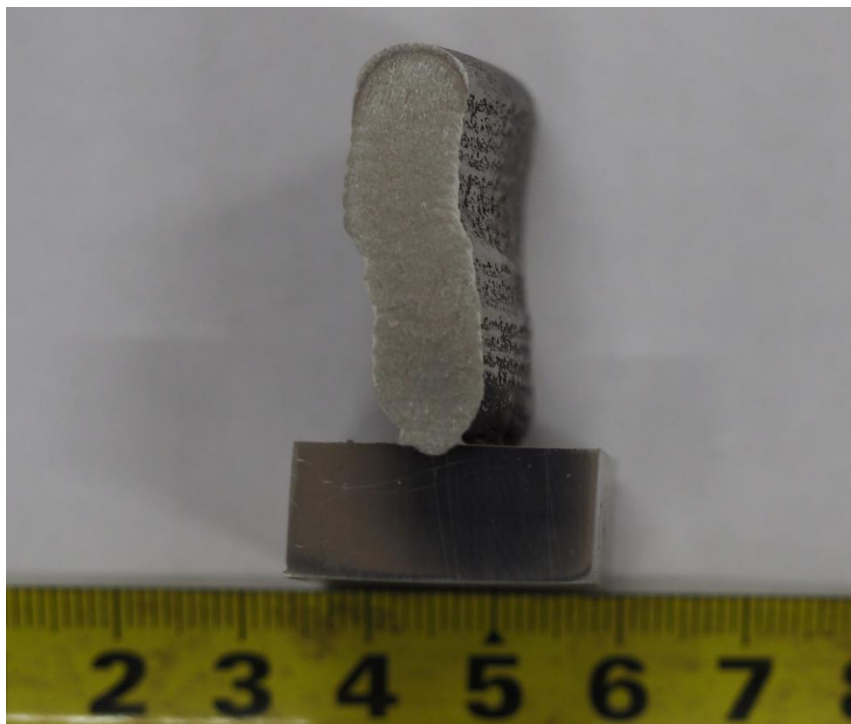
Slika 44. Makroizbrusak uzorka A



**Slika 45. Makroizbrusak uzorka B**



**Slika 46. Makroizbrusak uzorka C**



Slika 47. Makroizbrusak uzorka D

#### 4.6.2. Mjerenje tvrdoće

Mjerenje tvrdoće uzoraka provedeno je Vickers metodom (HV 10) na uređaju Reichter. Tvrdoća je mjerena od vrha uzorka prema podlozi. Razmak između točaka mjerenja iznosio je 2 mm, kako je prikazano na primjeru uzorka A (Slika 48.).

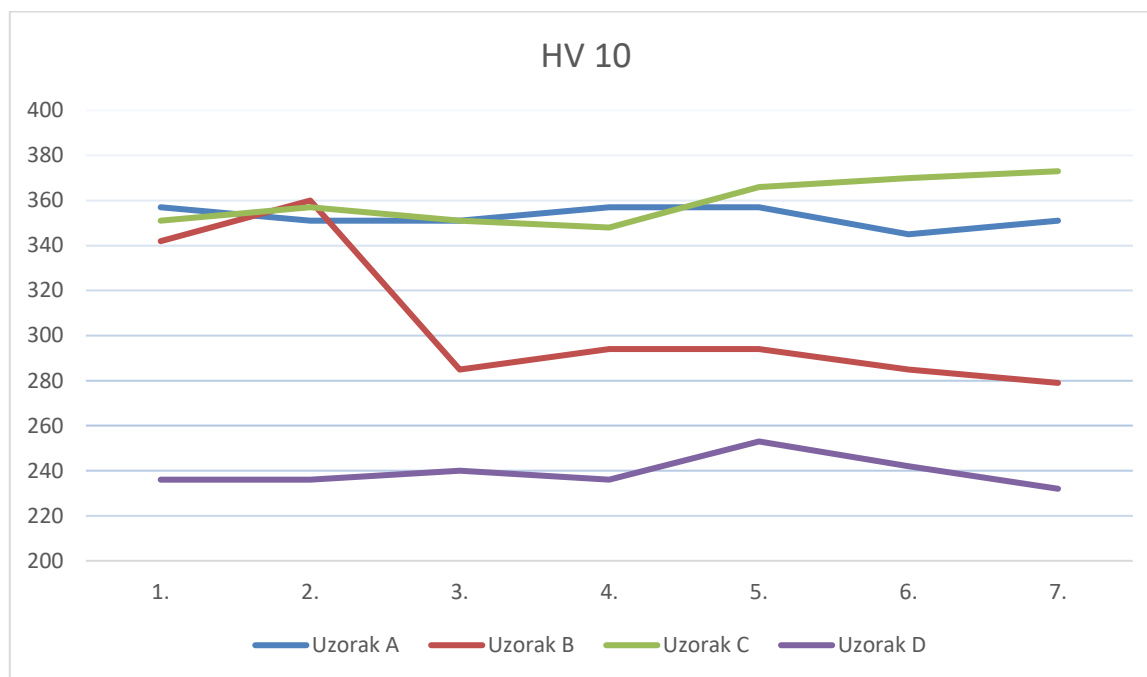


Slika 48. Točke mjerenja tvrdoće na uzorku A

Tablica 7. prikazuje vrijednosti tvrdoće uzoraka A, B, C i D mjerene u 14 točaka po visini uzoraka.

**Tablica 7. Vrijednosti tvrdoće HV 10 uzoraka**

Tvrdoća HV10				
Točka mjerjenja	Uzorak A	Uzorak B	Uzorak C	Uzorak D
1.	357	342	351	236
2.	351	360	357	236
3.	351	285	351	240
4.	357	294	348	236
5.	357	294	366	253
6.	345	285	370	242
7.	351	279	373	232
8.	342	285	373	235
9.	330	285	376	236
10.	342	283	370	236
11.	351	281	366	235
12.	354	264	339	235
13.	354	264	330	236
14.	352	245	339	240
Srednja vrijednost	350	289	358	237



**Slika 49. Grafički prikaz tvrdoće uzoraka**

Na slici (Slika 49.) je dan grafički prikaz tvrdoće uzoraka za prvih sedam očitanih vrijednosti zbog toga što se one nalaze na efektivnoj površini zida te najbolje pokazuju utjecaj aktivnog hlađenja na tvrdoću. Utjecaj aktivnog hlađenja vidljiv je na vrijednostima tvrdoće uzorka B, gdje je tvrdoća znatno veća pri vrhu uzorka, koji nije hlađen vodom, odnosno nije toplinski obrađen. Ostali uzorci imaju jednoliku tvrdoću duž poprečnog presjeka. Vrijednost tvrdoće znatno je veća kod uzoraka A i C (oko 350), dok je najniža tvrdoća izmjerena kod uzorka D (oko 240). Tijekom izrade uzorka A primijenjeno je pasivno hlađenje, a kod uzoraka B i C korištena je tehnika aktivnog hlađenja. Za uzorak D nije primijenjena nikakva tehnika hlađenja, odnosno normalno je hlađen pa se može zaključiti da je snižena tvrdoća posljedica je sporijeg hlađenja u odnosu na ostale uzorke.

Vickers metodom nije utvrđen utjecaj AC MIG i DC Pulse postupka na vrijednosti tvrdoće.

### 4.6.3. Radiografsko ispitivanje

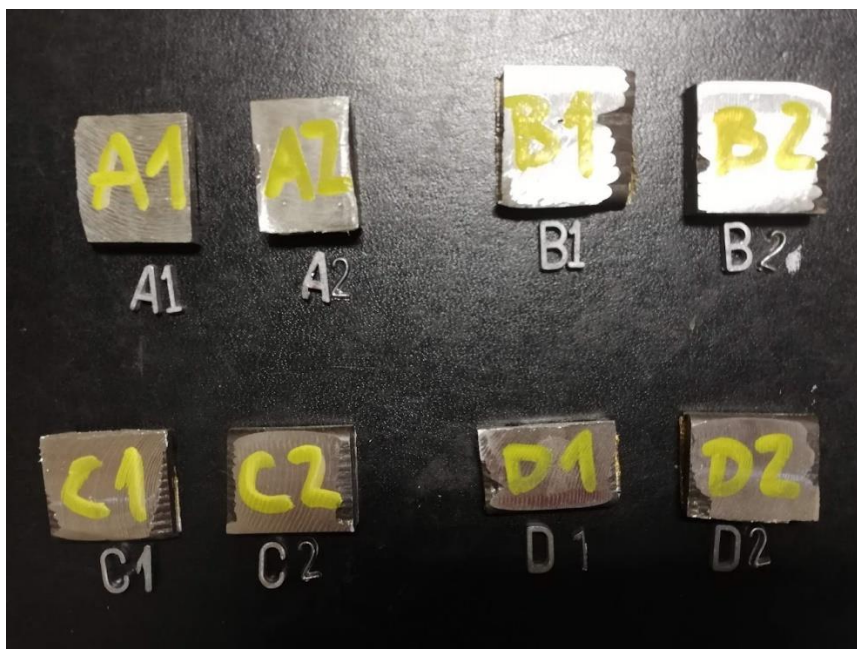
Radiografsko ispitivanje provedeno je s ciljem otkrivanja pora ili uključaka u metalu zavora. Za svaki uzorak uzeta su po dva komada zida za ispitivanje. Slika 51. prikazuje uzorke postavljene na slikovnu ploču. Na slici (Slika 50.) je prikazana oprema za radiografsko ispitivanje. U tablici (Tablica 8.) navedeni su parametri snimanja i oprema korištena za radiografsko ispitivanje.

**Tablica 8. Parametri snimanja i oprema korištena za radiografsko ispitivanje**

<b>Parametri snimanja</b>	
<b>Napon</b>	155 kV
<b>Struja</b>	4 mA
<b>Film – fokus udaljenost</b>	1000 mm
<b>Vrijeme ekspozicije</b>	2 minute 30 sekundi
<b>Parametri skeniranja</b>	
<b>Napon lasera</b>	15 V
<b>Napon fotomultiplikatora</b>	5,25 V
<b>Rezolucija skeniranja</b>	50 $\mu\text{m}$
<b>Korištena oprema</b>	
<b>RTG uređaj</b>	Balteau 300 D
<b>Skener</b>	VMI 5100
<b>Slikovna ploča</b>	Kodak industrex flex Blue

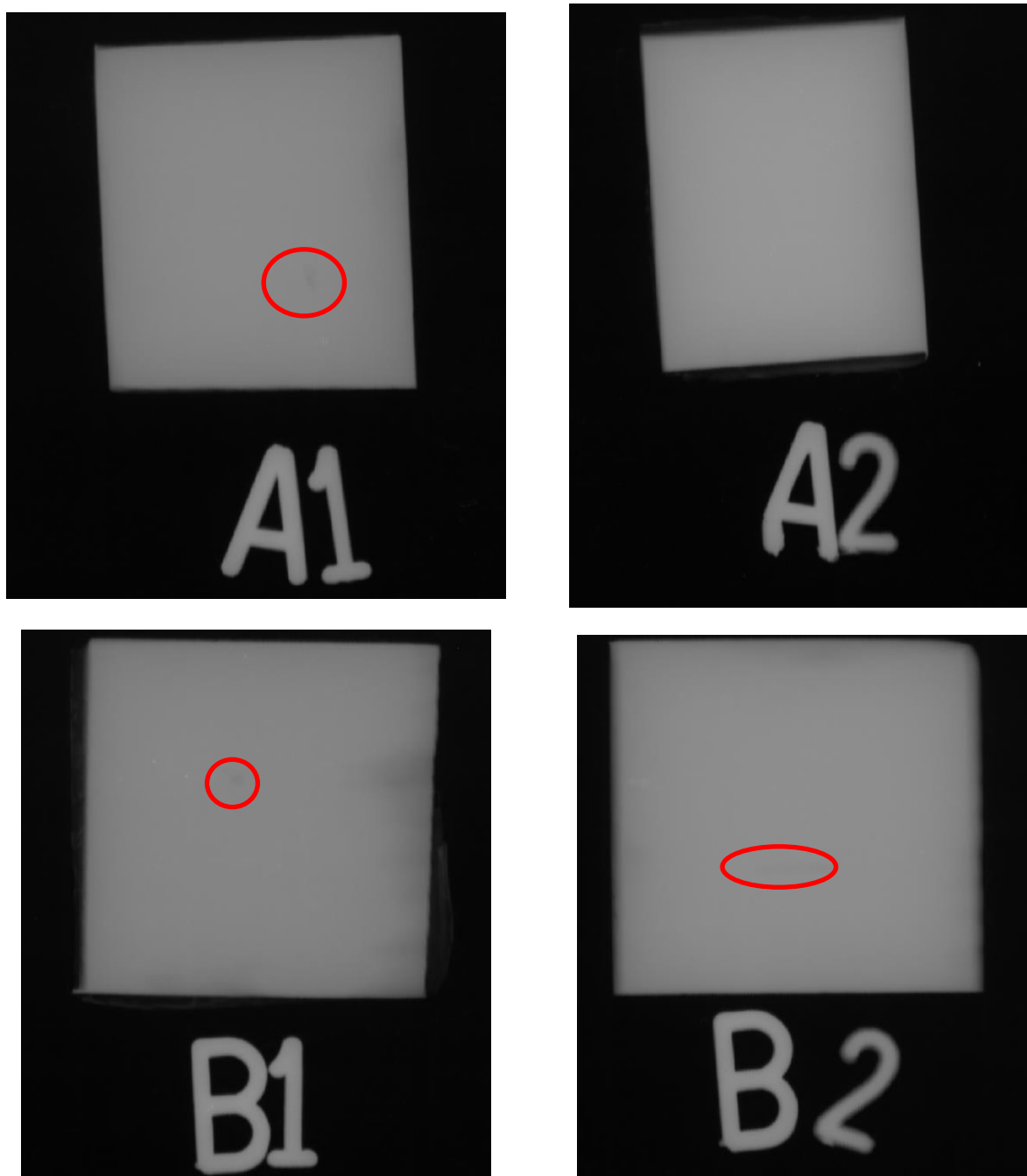


Slika 50. Oprema za radiografsko ispitivanje

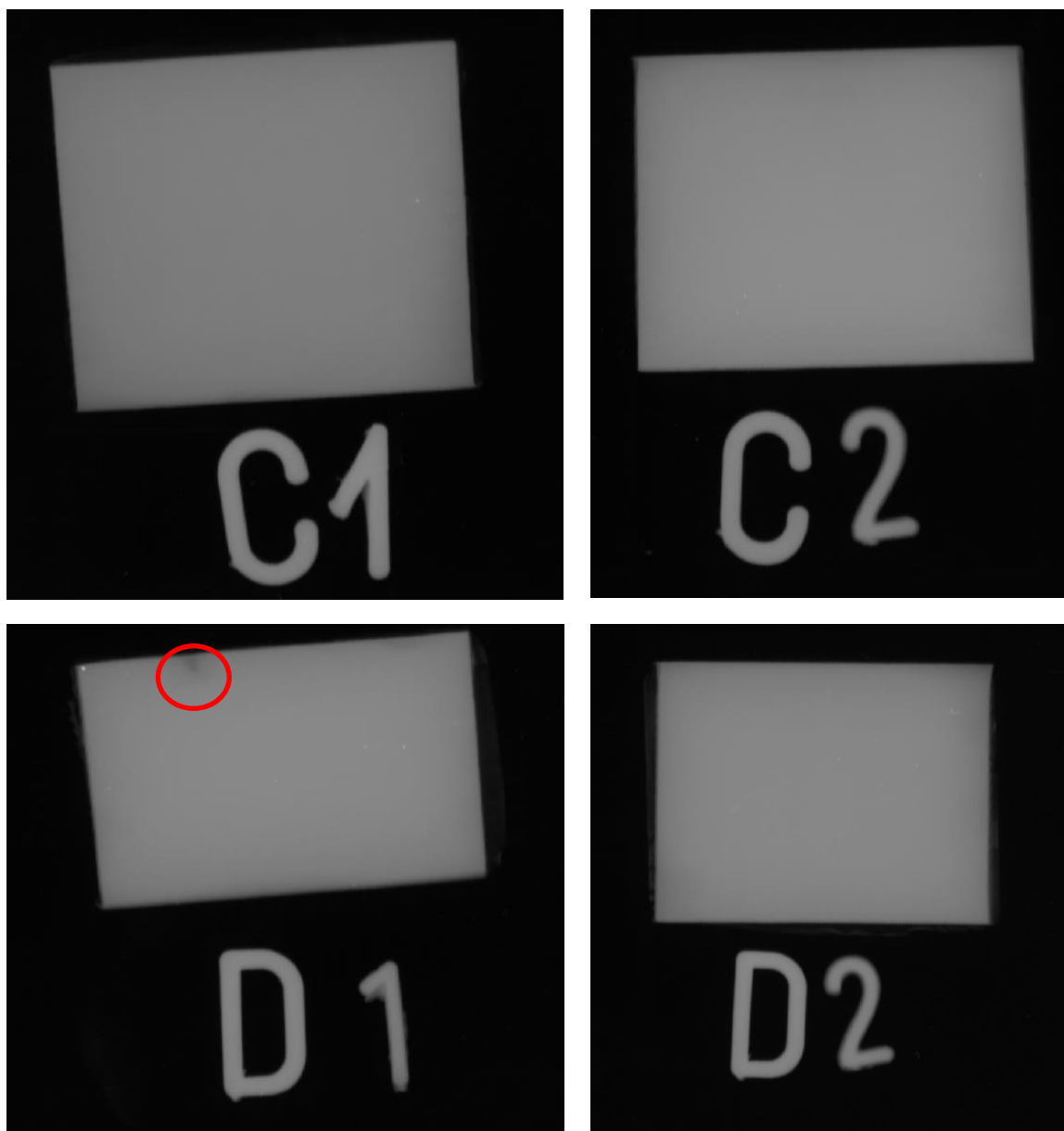


Slika 51. Uzorci za radiografsko ispitivanje postavljeni na slikovnu ploču





Slika 52. Radiografske snimke uzoraka A i B



**Slika 53. Radiografska snimka uzoraka C i D**

Na radiografskim snimkama (Slika 52., Slika 53.) uočene su i označene nepravilnosti. No, obilježene nepravilnosti su površinske što dokazuje slika (Slika 54.). Radiografskim ispitivanjem nisu pronađene pore ni uključci, niti kod jednog uzorka.



Uzorak A1



Uzorak B1



Uzorak B2



Uzorak D1

**Slika 54. Površinske nepravilnosti na uzorcima za radiografsko ispitivanje**

## 5. ZAKLJUČAK

Aditivna proizvodnja električnim lukom i žicom relativno je nova proizvodna tehnologija koja ima brojne prednosti u odnosu na standardne proizvodne tehnologije, poput brze i jednostavne izrade komponenti velikih dimenzija, ušteda u materijalu itd. No, ograničenja WAAM-a i dalje sputavaju ulazak u širu primjenu u industriji. Ipak, brojna istraživanja provode se s ciljem eliminacije i smanjenja tih ograničenja.

Rezultati praktičnog dijela rada mogu se podijeliti na rezultate dobivene analizom procesa te rezultate dobivene analizom uzoraka. Analizom procesa utvrđeno je:

- Stabilnost AC MIG postupka, bez aktivnog hlađenja, pri izradi uzoraka od dupleks čelika WAAM tehnologijom je zadovoljavajuća. Međutim, stabilnost AC MIG postupka s primjenom tehnike aktivnog hlađenja, pri izradi uzoraka od dupleks čelika WAAM tehnologijom nije zadovoljavajuća. Nestabilnost AC MIG procesa očitovala se prekidanjem električnog luka i velikim odstupanjem jakosti struje i napona od njihovih prosječnih vrijednosti. Aktivno hlađenje utjecalo je na stabilnost procesa zbog isparavanja vodene pare, ali i na mogućnost kontinuiranog navarivanja slojeva što se je pokazalo neostvarivo uz zadani materijal, odabrani zaštitni plin te korišteni izvor struje za zavarivanje.
- Stabilnost DC Pulse postupka, s i bez primjene tehnike aktivnog hlađenja, pri izradi uzoraka od dupleks čelika WAAM tehnologijom je zadovoljavajuća. Primjenom tehnike aktivnog hlađenja ostvareno je kontinuirano navarivanje slojeva bez prekida.
- Usporedba toplinskog ciklusa tehnike aktivnog i normalnog hlađenja potvrđuje da se primjenom tehnike aktivnog hlađenja znatno poboljšava produktivnost procesa, skraćivanjem vremena trajanja jednog ciklusa navarivanja sloja. Vrijeme trajanja jednog ciklusa navarivanja sloja, za tehniku aktivnog hlađenja, tri puta je manje nego vrijeme ciklusa kod normalnog hlađenja. Pored toga, primjenom tehnike aktivnog hlađenja ubrzava se hlađenje navarenih slojeva. Odnosno, hlađenje od 1100 °C do 300 °C, 33 % je dulje kod normalnog hlađenja nego primjenom tehnike aktivnog hlađenja.

Analizom izrađenih uzoraka utvrđeno je:

- Makroanalizom je utvrđeno da nisu pronađeni uključci, pore ni greške vezivanja, niti kod jednog uzorka.

- Tvrdoća uzorka koji je normalno hlađen znatno je niža nego tvrdoća uzoraka koji su aktivno ili pasivno hlađeni. Snižena tvrdoća posljedica je sporijeg hlađenja.
- Radiografskim ispitivanjem nisu pronađene pore ni uključci, niti kod jednog uzorka.

Zaključak praktičnog dijela rada je da tehnika aktivnog hlađenja doprinosi poboljšanju produktivnosti WAAM tehnologije te pozitivno utječe na mehanička svojstva proizvedenog elementa, povećanjem tvrdoće. Nije utvrđen negativan utjecaj tehnike aktivnog hlađenja na svojstva proizvedenih uzoraka.

## LITERATURA

- [1] Rodrigues T.A., Duarte A., Miranda R.M., Santos T.G., Oliveira J.P., Current Status and Perspectives on Wire and Arc Additive Manufacturing (WAAM), 2019.
- [2] Garašić I., Kralj S., Kožuh Z., Suvremeni postupci MIG/MAG zavarivanja, Zavarivanje (0044-1902) 54 (2011); 61-67
- [3] ASTM F2792-12a: Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies ASTM International, 2012.
- [4] Ding D., Pan Z., Cui D., Li H.: Process Planning Strategy for Wire and Arc Additive Manufacturing, University of Wollongong, 2014.
- [5] Busachi A., Erkoyuncu A. J., Martina F., Ding J.: Designing a WAAM Based Manufacturing System for Defence Applications, Elsevier, 48-53, 2015.
- [6] Nikola Knezović, Angela Topić, Kombinacija aditivne tehnologije i zavarivanja u izradi metalnih proizvoda – WAAM, Fakultet strojarstva, računarstva i elektrotehnike Sveučilište u Mostaru, Mostar
- [7] Ding D., Pan Z., Cui D., Li H.: Wire-feed additive manufacturing of metal components: technologies, developments and future interests, International Journal Advanced Manufacturing Technology, 465-481, 2015.
- [8] Scotti F. M., Teixeira F. R., Da Silva L. J., Artaujo D. B., Reis R. P, Thermal management in WAAM through the CMT Advanced process and an active cooling technique, <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.06.007>, 2020.
- [9] P-A.Colegrove, H.E.Coules, J.Fairman, F.Martina, T.Kashoob, H.Mamash, L.D.Cozzolino, Microstructure and residual stress improvement in wire and arc additively manufactured parts through high-pressure rolling, Journal of Materials Processing Technology 213 (2013) 1782–1791
- [10] Da Silva, L.J., Souza, D.M., de Araújo, D.B. et al. Concept and validation of an active cooling technique to mitigate heat accumulation in WAAM. Int J Adv Manuf Technol 107, 2513–2523 (2020). <https://doi.org/10.1007/s00170-020-05201-4>
- [11] Joseph A., Webb C., Haramia M., Yapp D., Variable Polarity (AC) Arc Weld Brazing of Galvanized Sheet, Proc. of 56th IIW International Conference, Bucharest, Romania, 6–11 July, 2003; IIW Doc. XII-1779-03.

- [12] Zhao, Y., & Chung, H. (2017). Numerical simulation of droplet transfer behavior in variable polarity gas metal arc welding. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 111, 1129–1141.
- [13] By L. O. Vilarinho, A. S. Nascimento, D. B. Fernandes, And C. A. M. Mota, Methodology for Parameter Calculation of VP-GMAW, *Welding Journal*, 2009.
- [14] [http://www.daihen-usa.com/wp-content/uploads/documents/DW-300\\_131014\\_04po.pdf](http://www.daihen-usa.com/wp-content/uploads/documents/DW-300_131014_04po.pdf), dostupno 12.5.2022.
- [15] Jurica, M., Utjecaj zaštitnoga plina i načina prijenosa metala na svojstva zavarenoga spoja čelika X80, Doktorski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, 2015
- [16] Web stranica <https://www.otc-daihen.de/index.php?id=3047>, pristupljeno 12.6.2022
- [17] Špehar J., MIG zavarivanje aluminijskih legura primjenom dvostrukog pulsa, diplomski rad, Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2021.
- [18] Z.Wang, J.Wei, L.Wang, Optimization of current parameters during variable polarity GMAW of magnesium alloy, World Scientific Publishing Company DOI: 10.1142/S0217984918504298, 2018.
- [19] Juraga I., Šimunović V., Stojanović I., Zavarivanje Cr-Ni čelika, korozivna postojanost, rukovanje, 4. seminar (Pula): Čelici otporni na koroziju (nehrđajući čelici), Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2007.
- [20] Web stranica: <https://www.daihen-usa.com/product/wb-w400/>, pristupljeno: 10. lipnja 2022.
- [21] Web stranica: [https://www.ezg.hr/download/EZ\\_katalog\\_2018\\_hrv.pdf](https://www.ezg.hr/download/EZ_katalog_2018_hrv.pdf), pristupljeno: 10. lipnja 2022.
- [22] Udbinac D., Primjena duplex čelika za aditivnu proizvodnju električnim lukom i žicom, diplomski rad, Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje; 2017.