

Utjecaj unosa energije na mikrostrukturu dupleks čelika pri aditivnoj proizvodnji električnim lukom i žicom

Kušević, Matija

Master's thesis / Diplomski rad

2021

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:389427>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-10**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Matija Kušević

Zagreb, 2021.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Izv. prof. dr. sc. Ivica Garašić, dipl. ing.

Student:

Matija Kušević

Zagreb, 2021.

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

Zahvaljujem se mentoru izv. prof. dr. sc. Ivicu Garašiću na savjetima i pomoći tijekom izrade ovog rada. Posebno hvala asistentu Ivanu Juriću, mag. ing. mech., na svim korisnim savjetima, kritikama, primjedbama i pruženoj pomoći tijekom izrade rada.

Također zahvaljujem djelatnicima Laboratorija za zavarivanje, Laboratorija za toplinsku obradu, Laboratorija za alatne strojeve te Laboratorija za materijalografiju na pomoći pri izradi eksperimentalnog dijela rada.

Veliku zahvalnost htio bih izraziti svojim roditeljima na podršci tijekom studija te svojim prijateljima i djevojci.

Matija Kušević



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



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

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

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **MATIJA KUŠEVIĆ** Mat. br.: 0035200458

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Utjecaj unosa energije na mikrostrukturu dupleks čelika pri aditivnoj proizvodnji električnim lukom i žicom**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Influence of the energy input on microstructure of the duplex steel during wire and arc additive manufacturing**

Opis zadatka:

U teorijskom dijelu rada opisati aditivnu proizvodnju električnim lukom i žicom te navesti najčešće postupke zavarivanja koji se primjenjuju pri izradi dijelova ovom tehnologijom. Analizirati problematiku upotrebe dupleks čelika za aditivnu proizvodnju električnim lukom i žicom uzimajući u obzir utjecaj unešene energije na mikrostrukturu zida. Opisati smjernice ISO TR 18491 za mjerenje unešene energije pri zavarivanju. U eksperimentalnom dijelu odrediti optimalno područje parametara za izradu zida od dupleks čelika postupkom aditivne proizvodnje električnim lukom i žicom. Tijekom zavarivanja snimiti dinamičku karakteristiku te odrediti unos energije metodama definiranim u ISO TR 18491. Na izrađenim uzorcima identificirati prisutne mikrostrukturne faze. Analizom rezultata ocijeniti prikladnost tehnologije aditivne proizvodnje električnim lukom i žicom za dupleks čelik te definirati preporuke za mjerenje unešene energije u proizvodnim uvjetima.

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

Zadatak zadan:
4. ožujka 2021.

Rok predaje rada:
6. svibnja 2021.

Predviđeni datum obrane:
10. svibnja do 14. svibnja 2021.

Zadatak zadao:

prof. dr. sc. Ivica Garašić

Predsjednica Povjerenstva:

prof. dr. sc. Biserka Runje

SADRŽAJ

| | |
|--|------|
| SADRŽAJ | I |
| POPIS SLIKA | III |
| POPIS TABLICA..... | VI |
| POPIS OZNAKA | VII |
| SAŽETAK..... | VIII |
| SUMMARY | IX |
| 1. UVOD..... | 1 |
| 2. ADITIVNA PROIZVODNJA | 1 |
| 2.1. Aditivna proizvodnja električnim lukom i žicom – WAAM..... | 3 |
| 2.2. Najčešći WAAM postupci | 5 |
| 2.3. Materijali kod WAAM-a..... | 6 |
| 2.4. Prednosti i nedostaci | 8 |
| 2.5. Zaostala naprezanja..... | 8 |
| 2.6. Defekti..... | 9 |
| 2.7. Primjena WAAM-a..... | 11 |
| 3. DUPLEKS NEHRĐAJUĆI ČELIK | 13 |
| 3.1. Mikrostruktura dupleks nehrđajućeg čelika..... | 13 |
| 3.1.1. Krom | 14 |
| 3.1.2. Molibden..... | 14 |
| 3.1.3. Nikal..... | 14 |
| 3.1.4. Dušik | 15 |
| 3.1.5. Mangan | 15 |
| 3.1.6. Bakar | 15 |
| 3.1.7. Volfram | 15 |
| 3.1.8. Silicij..... | 16 |
| 3.1.9. Ugljik, sumpor i fosfor..... | 16 |
| 3.2. Režim toplinske obrade..... | 16 |
| 3.2.1. Precipitacija kromovih nitrida (Cr_2N)..... | 18 |

| | | |
|--------|---|----|
| 3.2.2. | Precipitacija chi faze (χ)..... | 18 |
| 3.2.3. | Precipitacija sigma faze (σ)..... | 19 |
| 3.2.4. | Formacija alfa prim faze (α')..... | 19 |
| 3.3. | Mehanička svojstva..... | 20 |
| 3.4. | Zavarljivost dupleks čelika | 21 |
| 3.4.1. | Gubitak dušika i prenizak unos energije | 22 |
| 3.4.2. | Formiranje intermetalnih faza..... | 23 |
| 3.4.3. | Pucanje prilikom solidifikacije | 23 |
| 3.5. | Korozijska otpornost..... | 23 |
| 3.5.1. | Napetosna korozija..... | 23 |
| 3.5.2. | Rupičasta korozija..... | 24 |
| 3.6. | Primjena dupleks čelika | 24 |
| 4. | EKSPERIMENT..... | 26 |
| 4.1. | Izrada uzoraka | 26 |
| 4.2. | Unos energije i dinamička karakteristika..... | 29 |
| 4.3. | Ispitivanje parametara teksture površine..... | 33 |
| 4.4. | Strojna i toplinska obrada | 36 |
| 4.5. | Kemijski sastav | 38 |
| 4.6. | Makrostruktura..... | 41 |
| 4.7. | Mikrostruktura | 42 |
| 5. | ANALIZA REZULTATA | 49 |
| 5.1. | Analiza unosa energije i dinamičke karakteristike | 50 |
| 5.2. | Analiza parametara teksture površine | 52 |
| 5.3. | Analiza kemijskog sastava | 54 |
| 5.4. | Analiza makrostrukture..... | 57 |
| 5.5. | Analiza mikrostrukture | 58 |
| 6. | ZAKLJUČAK..... | 61 |
| | LITERATURA..... | 63 |

POPIS SLIKA

| | |
|---|----|
| Slika 1. CAD model proizvoda izrađenog aditivnom proizvodnjom [2] | 1 |
| Slika 2. Područja primjene aditivne proizvodnje u 2012. godini [3] | 2 |
| Slika 3. Faze AM postupka [6]..... | 3 |
| Slika 4. Prikaz proizvoda izrađenih taloženjem sloj po sloj – Baker, 1926. god [7] | 4 |
| Slika 5. WAAM postupak aditivne proizvodnje [9] | 4 |
| Slika 6. Zid izrađen pomoću WAAM tehnologije [8]..... | 5 |
| Slika 7. Shema hladnog valjanja [11]..... | 9 |
| Slika 8. WAAM defekti: a) bočno urušavanje; b) neprotaljena žica [11]..... | 10 |
| Slika 9. Deformacija uslijed velikog unosa topline [11] | 10 |
| Slika 10. WAAMPeller - brodski propeler izrađen WAAM tehnologijom [12]..... | 11 |
| Slika 11. Dio krila zrakoplova [13]..... | 11 |
| Slika 12. MX3D - most dobiven WAAM tehnologijom [14] | 12 |
| Slika 13. Umjetnička skulptura leptira [15] | 12 |
| Slika 14. Mikrostruktura dupleks čelika [18]..... | 14 |
| Slika 15. Pseudobinarni dijagram stanja Cr-Ni-Fe uz 70 % Fe [17]..... | 17 |
| Slika 16. Shematski prikaz tipičnih precipitacija u dupleks čelicima [17] | 18 |
| Slika 17. Model nastanka i rasta sigma faze [17]..... | 19 |
| Slika 18. Utjecaj hladne deformacije na mehanička svojstva dupleks čelika 1.4462 [17] | 21 |
| Slika 19. Primjeri rupičaste korozije TIG zavarenog spoja [21]..... | 22 |
| Slika 20. Usporedba otpornosti čelika prema napetosnoj koroziji [17]..... | 24 |
| Slika 21. Mobilna cisterna napravljena od dupleks čelika [20] | 25 |
| Slika 22. Apate most u Stockholmu [20] | 25 |
| Slika 23. Robotska stanica Almega OTC AX V6 | 26 |
| Slika 24. Welbee P500L Daihen Varstroj | 27 |
| Slika 25. Krajnji izgled uzorka..... | 28 |
| Slika 26. Osciloskop priključen na računalo | 30 |
| Slika 27. Dinamička karakteristika, prolaz 16, zid 50 °C | 31 |

| | |
|--|----|
| Slika 28. Dinamička karakteristika, prolaz 17, zid 150 °C | 32 |
| Slika 29. Dinamička karakteristika, prolaz 18, zid 250 °C | 32 |
| Slika 30. 3D površina zida s međuprolaznom temperaturom 50 °C | 34 |
| Slika 31. Parametri teksture površine zida s međuprolaznom temperaturom 50 °C | 34 |
| Slika 32. 3D površina zida s međuprolaznom temperaturom 150 °C | 34 |
| Slika 33. Parametri teksture površine zida s međuprolaznom temperaturom 150 °C | 35 |
| Slika 34. 3D površina zida s međuprolaznom temperaturom 250 °C | 35 |
| Slika 35. Parametri teksture površine zida s međuprolaznom temperaturom 250 °C | 35 |
| Slika 36. Komorna peć | 36 |
| Slika 37. Vakuumska peć | 37 |
| Slika 38. Proces glodanja uzoraka..... | 37 |
| Slika 39. Prikaz makrostrukture za zidove s međuprolaznom temperaturom: lijevo – 50 °C, sredina – 150 °C, desno – 250 °C..... | 42 |
| Slika 40. Orijentacija komadića za analizu | 42 |
| Slika 41. Kalup 13 nakon nagrivanja | 43 |
| Slika 42. Graf prirasta visine zidova | 49 |
| Slika 43. Unos energije za svaki od zidova..... | 50 |
| Slika 44. Usporedba vrijednosti struje i napona za ZID 50 °C | 51 |
| Slika 45. Usporedba vrijednosti struje i napona za ZID 150 °C | 51 |
| Slika 46. Usporedba vrijednosti struje i napona za ZID 250 °C | 52 |
| Slika 47. Dijagram vrijednosti parametra S_{sk} | 52 |
| Slika 48. Dijagram vrijednosti parametra S_{ku} | 53 |
| Slika 49. Dijagram vrijednosti parametra S_z | 53 |
| Slika 50. Dijagram vrijednosti parametra S_q | 54 |
| Slika 51. Udio kroma | 55 |
| Slika 52. Udio molibdena..... | 55 |
| Slika 53. Udio nikla..... | 56 |
| Slika 54. Udio kemijskih elemenata uzoraka bez toplinske obrade..... | 56 |
| Slika 55. Prikaz računanja BTF omjera | 57 |

| | |
|--|----|
| Slika 56. Računanje udjela austenita i ferita pomoću ImageJ programa | 58 |
| Slika 57. Usporedba udjela ferita između N, T i B1 pogleda..... | 60 |
| Slika 58. Usporedba udjela ferita između B1 i B2 pogleda | 60 |

POPIS TABLICA

| | |
|---|----|
| Tablica 1. Mehanička svojstva nehrđajućih dupleks čelika [17] | 20 |
| Tablica 2. Izmjerene visine zidova..... | 28 |
| Tablica 3. Unos energije izračunat pomoću dinamičke karakteristike..... | 30 |
| Tablica 4. Kemijski sastav na površini uzorka..... | 39 |
| Tablica 5. Kemijski sastav na 0,5 mm debljine uzorka..... | 40 |
| Tablica 6. Kemijski sastav na 3 mm debljine uzorka..... | 41 |
| Tablica 7. Kemijski sastav žice za zavarivanje | 41 |
| Tablica 8. Rezultati uzoraka mikrostrukture | 44 |
| Tablica 9. Broj zrna potreban za procjenu veličine zrna..... | 58 |
| Tablica 10. Udio austenita i ferita po uzorcima | 59 |

POPIS OZNAKA

| Oznaka | Jedinica | Opis |
|-------------------|-------------------|------------------------------------|
| E | kJ/mm | Energija |
| I | A | Jakost struje zavarivanja |
| KV | J | Udarni rad loma |
| R _m | N/mm ² | Vlačna čvrstoća |
| R _{p0,2} | N/mm ² | Konvencionalna granica razvlačenja |
| U | V | Napon zavarivanja |
| v | mm/s | Brzina zavarivanja |

SAŽETAK

U teorijskom dijelu rada opisana je aditivna proizvodnja električnim lukom i žicom, njene prednosti, mane kao i primjena. Također su opisana svojstva dupleks čelika i prikazan je pregled njegovih mikrostrukturnih faza.

U eksperimentalnom dijelu izradila su se tri zida s različitim međuprolaznim temperaturama te se promatrao njihov utjecaj. Uzorci su podvrgnuti različitim parametrima toplinske obrade kako bi se promatrao utjecaj različitih peći, temperatura i vremena držanja na mikrostrukturu dupleks čelika. Temeljem dobivenih rezultata utvrđen je utjecaj na mikrostrukturu.

Ključne riječi: WAAM, dupleks, unos energije

SUMMARY

The theoretical part of the paper describes wire and arc additive manufacturing, its advantages, disadvantages, and applications. The properties of the duplex steel are also described with an overview of its microstructural phases.

In the experimental part, three walls were built with different interpass temperatures and their influence was observed. The wall samples were subjected to different heat treatment parameters to observe the influence of different furnaces, temperatures, and holding times on the duplex steel microstructure. Based on the obtained results, the influence on microstructure was determined.

Key words: WAAM, duplex, heat input

1. UVOD

Aditivna proizvodnja (engl. *Additive Manufacturing, AM*) je proces u kojem se 3D objekti proizvode taloženjem materijala sloj po sloj te se time razlikuje od konvencionalnih postupaka strojne obrade gdje se materijal odvaja, a ne dodaje. Mogu se koristiti razni materijali poput plastike, čelika, aluminija, titana.

Unazad nekoliko godina, aditivna proizvodnja električnim lukom i žicom (engl. *Wire Arc Additive Manufacturing, WAAM*) je privukla pažnju mnogih sektora industrijske proizvodnje zbog mogućnosti izrade velikih metalnih dijelova s velikom stopom taloženja materijala, niskim troškovima opreme, visokom iskoristivošću materijala te ekološkom osviještenošću.

Dupleks čelici su vrsta nehrđajućih čelika kod kojih se mikrostruktura sastoji od austenita i ferita čiji su volumni udjeli podjednaki. Zbog svoje austenitno-feritne mikrostrukture dupleks čelici imaju veću mehaničku snagu i bolju korozijsku postojanost od standardnih austenitnih nehrđajućih čelika. Danas dupleks čelici najveću primjenu nalaze u naftnoj industriji i srodnim industrijama koje se bave kemijskim tvarima i fluidima te prehrambenoj industriji, a primjenu sve više nalaze u brodogradnji, građevini, automobilskoj i zrakoplovnoj industriji.

2. ADITIVNA PROIZVODNJA

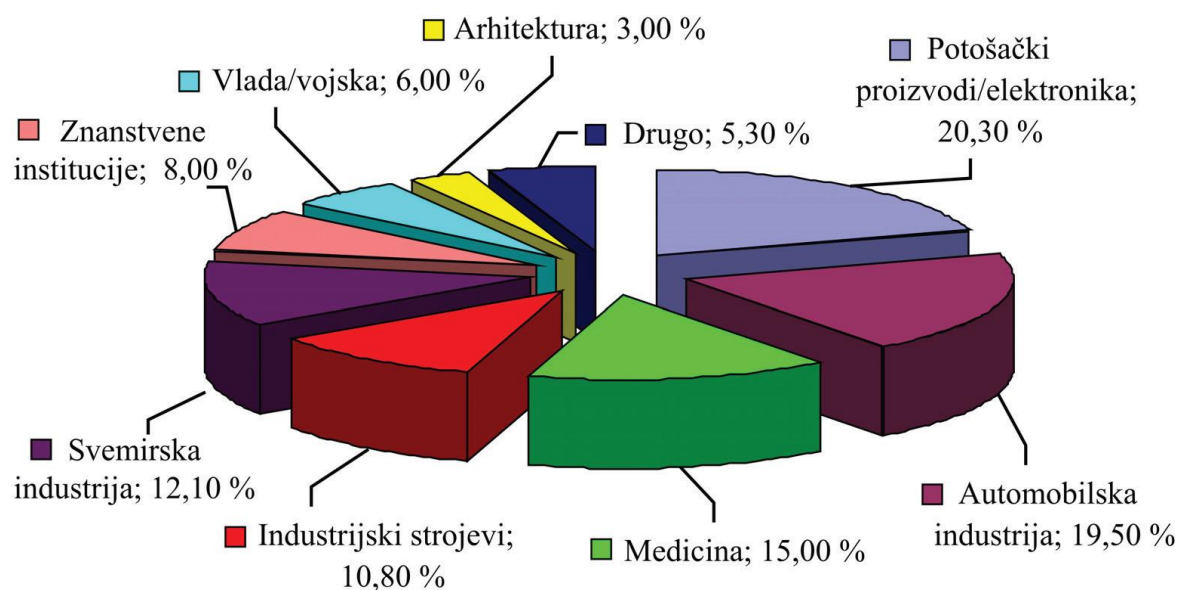
Brza izrada prototipova počinje se razvijati 1980-ih godina i ona je omogućila izradu pojedinog dijela odnosno prototipa u kraćem vremenskom razdoblju. Osim brže izrade i smanjenog troška, brza izrada prototipova omogućila je izradu skoro svih mogućih oblika koje je bilo jako teško dobiti strojnom obradom. Prema normi ASTM F42 koja je donesena 2009. rabi se izraz aditivna proizvodnja [1]. Slika 1 prikazuje proizvod dobiven aditivnom proizvodnjom.



Slika 1. CAD model proizvoda izrađenog aditivnom proizvodnjom [2]

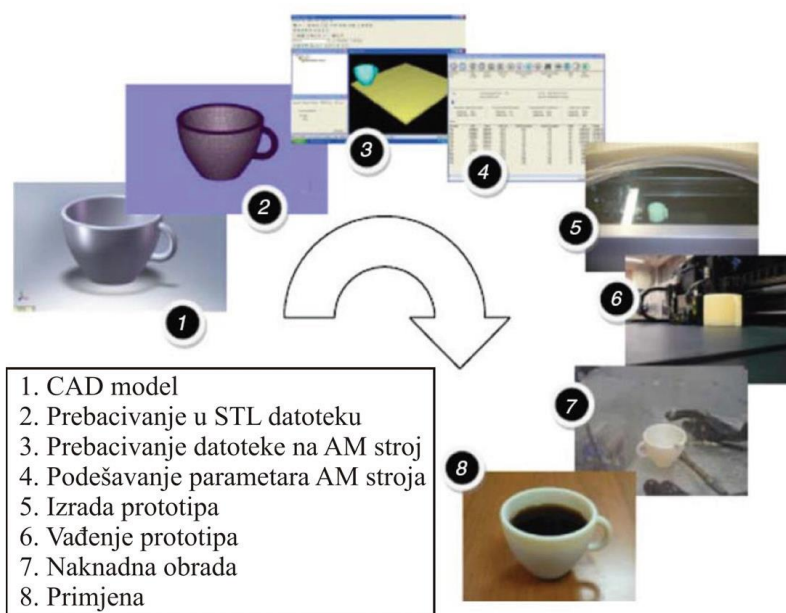
Na slici se može vidjeti osnovni princip izrade proizvoda aditivnom proizvodnjom prilikom kojeg se materijal polaže sloj po sloj [2].

Područje primjene aditivne proizvodnje (Slika 2) je vrlo raznoliko, od proizvoda široke potrošnje, specifičnih industrija poput automobilističke ili zrakoplovne pa sve do unikatnih dijelova za medicinske svrhe rađenih prema dimenzijama pacijenta [3].



Slika 2. Područja primjene aditivne proizvodnje u 2012. godini [3]

Prvi korak svih AM postupaka je izrada trodimenzionalnog geometrijskog modela u nekom CAD programu. Takav model sprema se u različitim formatima, no već od 1987. godine tvrtka 3D Systems uvodi STL datoteku (engl. *Standard Tessellation Language*), koja predmet prikazuje kao mrežu povezanih trokuta. STL datoteka nema boje, pa je 2009. godine uvedena AMF datoteka (engl. *Additive Manufacturing File*) koja uz STL postaje standard za AM postupke i čini osnovu za rezanje u slojeve na čemu se temelje AM postupci. AMF datoteka može dati opis materijala i boje pojedinog volumena i boju svakog trokuta u mreži [4] [5]. Slika 3 prikazuje faze prilikom aditivne proizvodnje proizvoda.



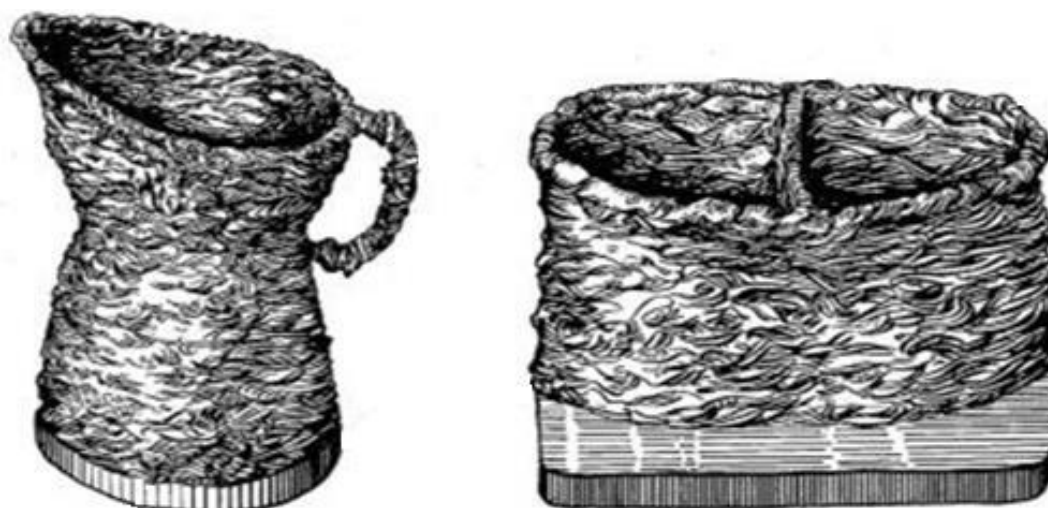
Slika 3. Faze AM postupka [6]

U svim postupcima aditivne proizvodnje faze izrade su iste i sastoje se od [6]:

- izrada CAD modela
- pretvaranje CAD modela u STL datoteku
- prebacivanje STL datoteke na AM stroj
- podešavanje parametara AM stroja
- izrada tvorevine
- vađenje tvorevine
- naknadna obrada, ako je potrebna
- primjena.

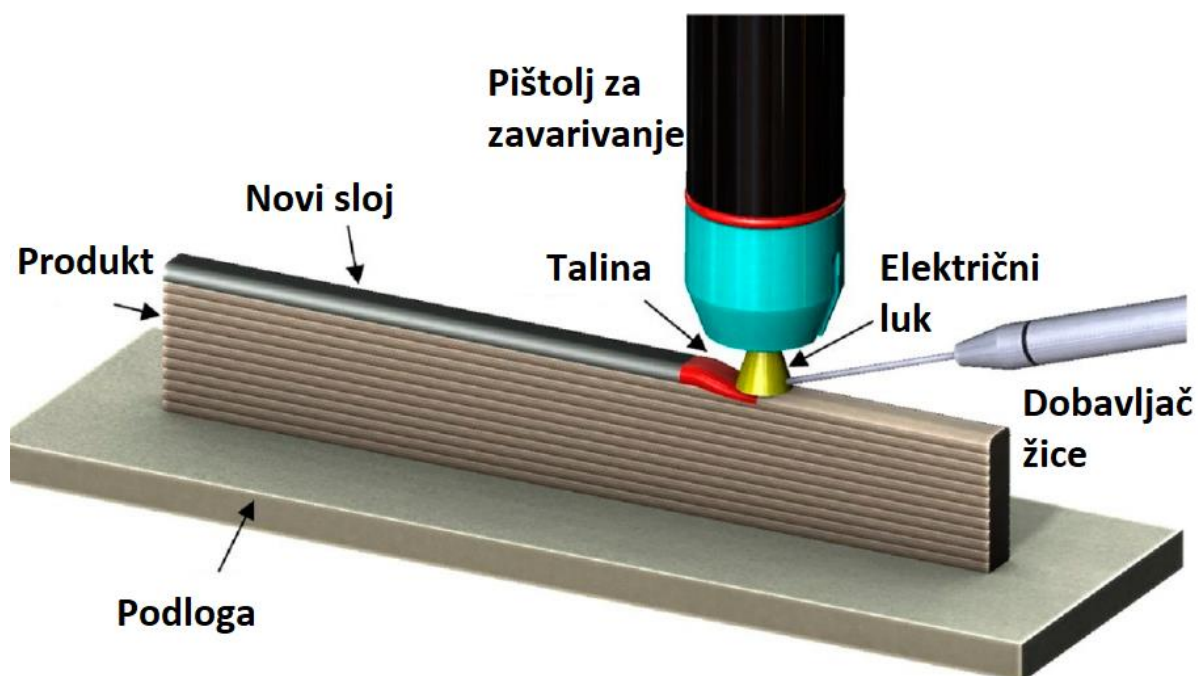
2.1. Aditivna proizvodnja električnim lukom i žicom – WAAM

Aditivnu proizvodnju električnim lukom i žicom, skraćeno WAAM prvi je patentirao Baker 1926. godine. On je koristio elektrolučno zavarivanje za izradu 3D modela taloženjem taline materijala i nanošenjem sloja na sloj (Slika 4) [7].



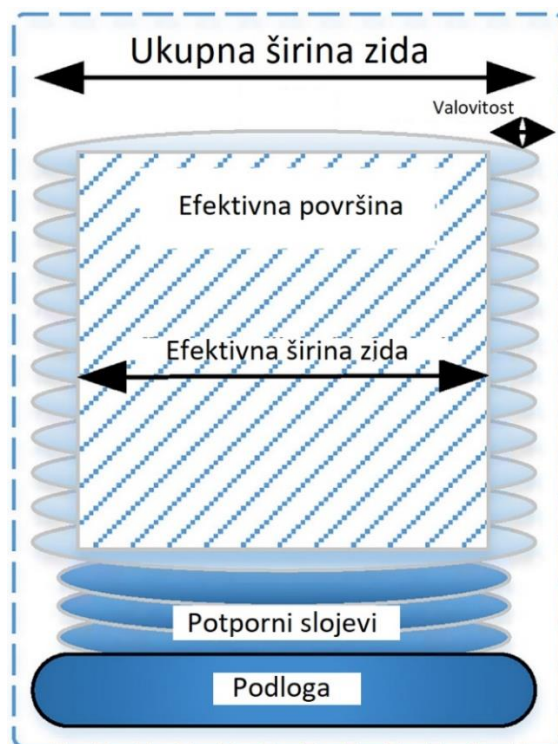
Slika 4. Prikaz proizvoda izrađenih taloženjem sloj po sloj – Baker, 1926. god [7]

WAAM postupak je relativno nova tehnologija u svijetu zavarivanja te još nije dovoljno razvijena za veću komercijalnu uporabu. Ovaj postupak kombinira elektrolučno zavarivanje i sustav dobave žice te omogućuje slobodu u dizajnu komponente, potencijalno nizak BTF (buy-to-fly) omjer od 1,2 i mogućnost izrade proizvoda svih veličina [8]. Omjer BTF je omjer između mase sirovca i gotovog proizvoda te je poželjno da on bude što bliže jedinici. Slika 5 prikazuje proces dobivanja proizvoda aditivnom proizvodnjom, tj. WAAM postupkom.



Slika 5. WAAM postupak aditivne proizvodnje [9]

Kod strojnih obrada titana taj odnos može dosegnuti 20 dok primjenom WAAM tehnologije može doći do smanjenja tog odnosa na dva te se time uštedi velika količina materijala [10]. Slika 6 prikazuje zid dobiven WAAM tehnologijom.



Slika 6. Zid izrađen pomoću WAAM tehnologije [8]

Prilikom izrade zida dolazi do pojave valovitosti kao nuspojave. Valovitost se mora ukloniti dodatnom strojnom obradom kako ne bi narušavala mehanička svojstva. Razlika između ukupne širine i efektivne širine zida je materijal koji se treba ukloniti. Na slici je jasno prikazana visoka učinkovitost, odnosno omjer efektivne i ukupne površine zide. Pomoću površina presjeka moguće je odrediti optimalne parametare zavarivanja [8].

2.2. Najčešći WAAM postupci

Temeljni princip WAAM-a je automatiziranost stoga se koriste tri postupka koja je moguće automatizirati, a to su: MIG/MAG, TIG i zavarivanje plazmom. Najkorišteniji od navedenih postupaka je MIG/MAG postupak gdje dolazi do uspostave električnog luka prilikom dodira žice i osnovnog materijala pod zaštitom plina. Raspon taloženja materijala kod MIG/MAG postupka iznosi od 15 do 160 g/min, ovisno o materijalu i parametrima, čineći ga prikladnim za izradu proizvoda velikih dimenzija u kraćem vremenskom rasponu. TIG postupak i zavarivanje plazmom imaju neke sličnosti te oba postupka koriste netaljivu elektrodu od volframa za uspostavu električnog luka koji se nalazi pod zaštitom inertnog plina. Visoka

preciznost, vrlo mala pojava defekata i visoka stabilnost električnog luka dovela je do velike raširenosti TIG postupka, ali za primjenu u WAAM području potreban je dodatni materijal. Zavarivanje plazmom postupak je visoke energetske gustoće gdje je električni luk prisiljen proći kroz mlaznicu smještenu između katode i anode koja sputava električni luk te rezultira povećanjem njegove stabilnosti. Mijenjajući parametre poput protoka plina, promjera mlaznice i jakosti struje moguće je postići različite režime poput mikroplazme, srednje struje i režima ključanice (engl. *keyhole plasma*). Mikroplazma je okarakterizirana niskim strujama zavarivanja, između 0,1 i 15 A. Ova tehnika kada se primjenjuje na aditivnu proizvodnju predstavlja veliku prednost kod ukupne širine zida omogućujući izradu tankih dijelova uz širinu zidova do dva milimetra. Brzine taloženja su niske, oko 1,0 g/min što omogućuje iznimnu kvalitetu površine. Najčešće korišten režim je režim srednjih struja koje variraju od 15 A do 200 A te je karakteristikama vrlo sličan TIG postupku, ali plazma ima krutiji luk i manje je osjetljiva na varijacije udaljenosti pištolja za zavarivanje. Širina zida varira između 4 mm i 15 mm dok brzine taloženja idu do 30 g/min. Za režim ključanice karakteristična je visoka penetracija što ga čini nepovoljnim za aditivnu proizvodnju zato što rastali prethodno nataložene slojeve [11].

U potrazi za boljim i stabilnijim procesom za kontrolu taloženja rastaljenog materijala s manjim unosom toplinske energije prihvaćena je varijanta MIG/MAG postupka za aditivnu proizvodnju poznatija kao CMT (engl. *Cold Metal Transfer*). To je napredan proces u kojem sustav za kontrolu otkriva kada je vrh elektrode u kontaktu s talinom i pritom aktivira servomotor koji povlači žicu dodatnog materijala kako bi kontrolirao prijenos kapljice. Postoji nekoliko podvarijanti CMT postupka poput CMT impulsnog (CMT-P), CMT naprednog (CMT-ADV), i CMT impulsno naprednog (CMT-PADV) koje su razvijene od strane Fronius-a. Kada je optimiziran, CMT je prikladan za primjenu kod legura titana [11].

2.3. Materijali kod WAAM-a

Općenito bilo koji materijal koji je dostupan u obliku žice za zavarivanje bi se mogao koristiti za WAAM. Najčešće korišteni materijali su čelici, aluminij, titan i legure na bazi nikla. Legure na bazi titana i nikla se sve više proučavaju zbog njihove uporabe u zrakoplovnoj industriji. Od tamo dolazi i želja za sazrijevanjem procesa kako bi se koristio za masovnu proizvodnju zrakoplovnih komponenti radi mogućnosti proizvodnje s niskim BTF omjerom [11].

Legure na bazi titana su sve više zastupljene u WAAM istraživanjima jer smanjuju visoku cijenu povezanu s obradom tog materijala. Titan legure imaju visoku čvrstoću, žilavost, dobra

korozijska svojstva i otporne su na visoke temperature bez značajnog gubitka mehaničkih svojstava čineći ih pogodnima za korištenje u zrakoplovstvu i medicini. Među mnogim procesima aditivne proizvodnje, WAAM omogućuje bolju kontrolu mikrostrukture ove polimorfne legure jer su ti materijali jako osjetljivi na termalnu povijest, odnosno zagrijavanja i hlađenja koja su bila vršena. Ti-6Al-4V je najčešće korištena titan legura i najviše je istražena u WAAM-u [11].

Legure na bazi nikla su najčešće korištene u zrakoplovnoj i nuklearnoj industriji, za prijelazne kanale i plinske turbine. Legure odlikuju visoka čvrstoća na povišenim temperaturama, nisko toplinsko rastezanje i odlična korozijska otpornost. Zbog austenitne matrice pogodne su za uporabu u širokom temperaturnom rasponu. Visok trošak, lijepljenje na vršak oštrice alata te prisutnost abrazivnih karbida čini legure nikla vrlo teškim za strojnu obradu te se pomoću WAAM tehnike eliminira otpad koji nastaje nakon strojne obrade. Dvije legure koje se koriste za WAAM postupak su Inconel 625 i Inconel 718 [11].

Čelici su lako nabavljive željezne legure široko korištene u automobilskoj industriji, brodogradnji, građevini, naftnoj industriji te u kombinaciji s WAAM postupkom mogu se koristiti za izradu dijelova s niskom cijenom. Neki istraživači govore da je nisku cijenu moguće postići samo za velike dijelove s kompleksnom geometrijom [11]. Osim čelika primjenu su našli i nehrđajući čelici u kemijskoj i nuklearnoj industriji gdje su potrebni dijelovi otporni na visoke temperature i koroziju. Neke od legura koje se koriste za WAAM su austenitni nehrđajući čelici SS 304, SS 308LSi, SS 316L te martenzitni nehrđajući čelik 420 [11].

Uporaba aluminijskog kod WAAM postupka je ograničena zbog poroznosti. WAAM proizvodnja dijelova od legura aluminijskog je vrlo zahtjevna zbog dinamike turbulencija prouzročene periodičkim promjenama polariteta što dovodi do pada točnosti proizvedenog dijela. Svojstva aluminijskog vezana za zavarivanje su visoka toplinska provodnost, visok koeficijent toplinske dilatacije, veliko skupljanje uslijed solidifikacije, širok raspon temperatura solidifikacije. Legure aluminijskog koje se koriste za WAAM postupak su 5A06, Al5Si, legura 5183, Al-Mg4.5Mn, Al-5Mg, Al-6Mg, Al-6.3Cu [11].

Legure magnezija počinju se više koristiti kao alternativa aluminiju kako bi se smanjila težina dijelova u automobilskoj i biomedicinskoj industriji. Napredak magnezijevih legura bio je otežan zbog njihove zapaljivosti, ali zbog veće potrebe za njima dodani su rijetki elementi poput cirkonija, cerija, neodimija i drugih koji su suzbili osjetljivost na zapaljivanje. Jedine legure koje su dosad zabilježene u WAAM proizvodnji su AZ31, AZ61 i AZ91D [11].

2.4. Prednosti i nedostaci

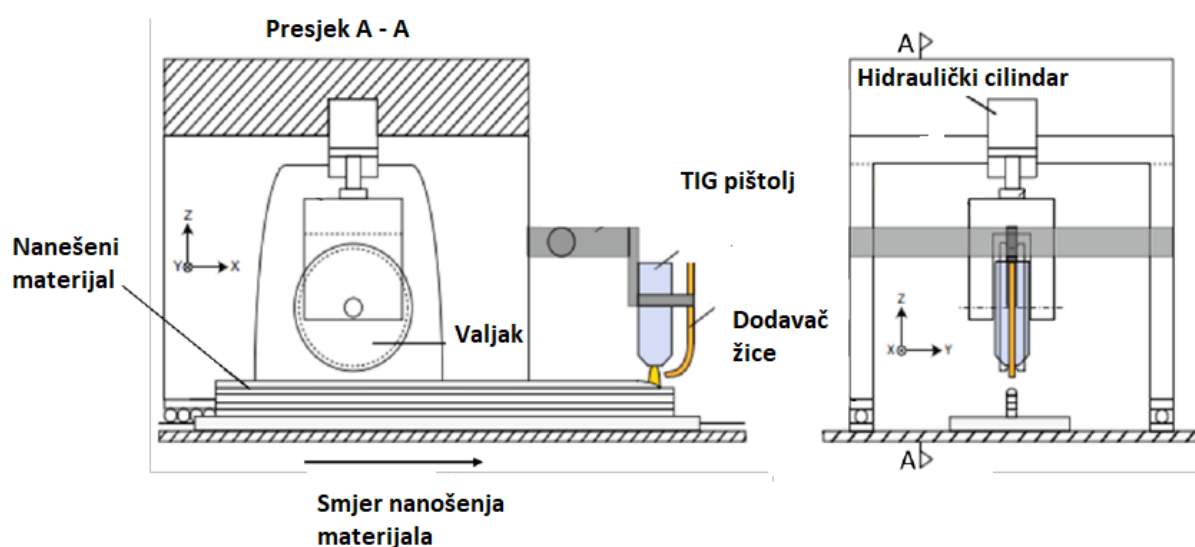
Primjenom WAAM tehnologije ostvaruju se brojne prednosti u odnosu na konvencionalne postupke. Troškovi opreme su smanjeni jer se postojeća oprema za zavarivanje kombinira s robotom ili CNC strojem čime se postiže automatizacija procesa i smanjuje ljudski rad. Zbog korištenja žice za zavarivanje manji su troškovi materijala i veći je izbor materijala, osobito skupljih materijala poput nikla i titana u odnosu na druge tehnologije aditivne proizvodnje. Visoka brzina izrade i velika količina depozita, manje je otpada čime se postiže velika ušteda, moguće je proizvesti izratke kompleksne geometrije te komade raznih veličina gdje je jedino ograničenje veličine osnovna ploča ili komora za stvaranje zaštitne plinske atmosfere [10].

Problemi koji se pojavljuju kod WAAM tehnologije su deformacije, pomaci i zaostala naprežanja. Proizvodi se obično izrađuju tako da se materijal nanosi s jedne strane osnovne ploče te se zbog velikog unosa topline ploča deformira. Deformacija teži tome da osnovnu ploču „povuče“ prema gore, u smjeru okomitom na smjer taloženja što rezultira i deformacijom proizvoda. Jedan od načina rješavanja tog problema je pritezanje ploče, ali se onda javljaju zaostala naprežanja u materijalu. Rješenje oba problema je strategija nazvana *Balanced Building Strategy* ili *Symmetrical Building* koja se zasniva na tome da se odredi najpogodnija ravnina simetrije komada i da se osnovna ploča podudara s tom ravninom. Prilikom izrade se slojevi nanose s obje strane ploče te se tako deformacije i zaostala naprežanja anuliraju. Za dobivanje finalnog proizvoda potrebna je završna obrada što produžuje postupak te ga i poskupljuje te nije pogodno za velikoserijsku proizvodnju [10].

2.5. Zaostala naprežanja

Zaostala naprežanja predstavljaju izazov i predstavljaju iznimnu važnost u WAAM procesu, a nastaju zbog kompleksnog termalnog ponašanja i termo-fizičkih svojstava materijala prilikom taloženja. Zaostala naprežanja definiraju se kao stacionarna naprežanja u dijelu materijala nakon micanja svih vanjskih izvora sile. Zaostala naprežanja su određena karakterističnom duljinom, tip I su makro naprežanja koja variraju oko dimenzija komponente, tip II su intergranularna naprežanja, tip III su naprežanja na atomskoj razini. Iako zaostala naprežanja se mogu smanjiti laserskim šokiranjem, kod WAAM-a ona mogu biti visoka kao i granica tečenja materijala, negativno djelujući na mehanička svojstva i dovodeći do distorzija i smanjenih tolerancija. Ako ta zaostala naprežanja prerastu granicu tečenja materijala, dolazi do plastične deformacije, ali ako prerastu vlačnu čvrstoću tada dolazi do pucanja. Ova naprežanja su rezultat ponavljajućeg grijanja i hlađenja, koja dovode do ponavljajućeg širenja i kontrakcije

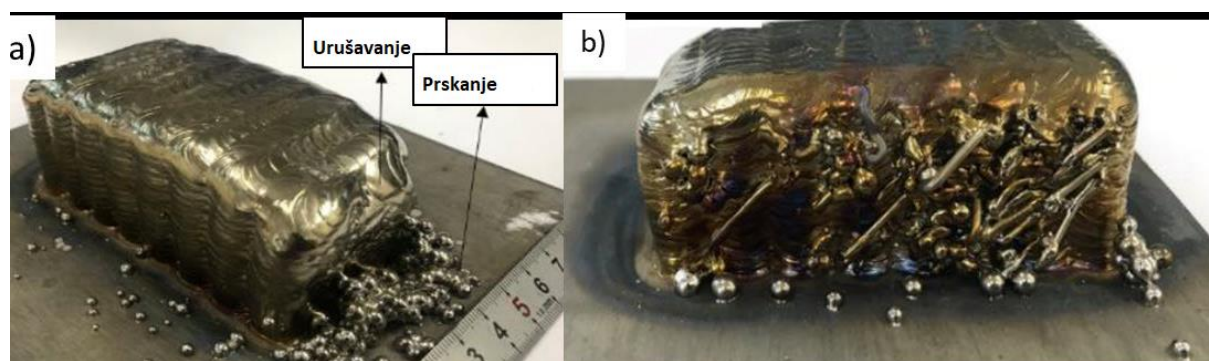
materijala. Nekoliko metoda se koristi kako bi se smanjilo akumuliranje topline, a time i zaostala naprezanja poput predgrijavanja osnovne ploče kako bi temperatura bila homogenija te bi povećalo sposobnost kvašenja prvih nanošenih slojeva, montiranjem osnovne ploče na pet osni sustav kako bi se dijelovi radili s obje strane i time balansirala zaostala naprezanja. Ostale metode koje se koriste su uporaba sekundarnog izvora topline za induciranje predgrijavanja i grijanja nakon završetka za dobivanje ugađenijeg nagiba temperature. Hladno valjanje (Slika 7) se također koristi za kontrolu zaostalih naprezanja kod WAAM dijelova [11].



Slika 7. Shema hladnog valjanja [11]

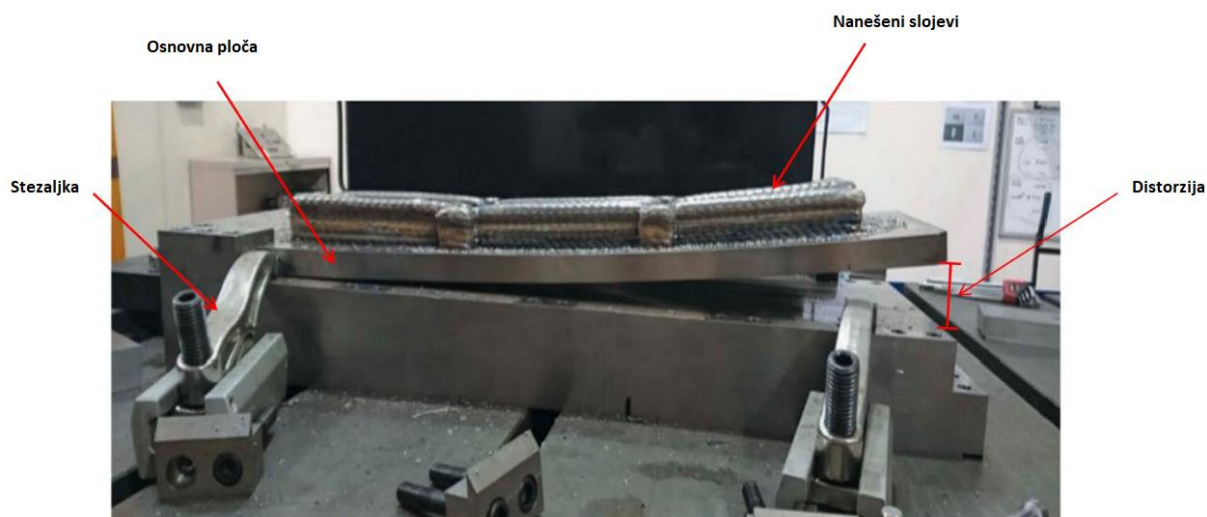
2.6. Defekti

WAAM proces je vrlo sličan zavarivanju stoga se pojavljuju defekti poput toplog pucanja, hladnog pucanja, poroznosti, delaminacije i štrcanja. Defekti kod WAAM procesa mogu nastati zbog loše planirane putanje, prevelike unesene topline, konstantnih zaostalih naprezanja, zagađenosti zaštitnog plina itd. Završni sloj ima direktan utjecaj na osjetljivost vodikovih pukotina. Neki dominantni makro defekti nastaju jednom kada se slojevi počnu raditi. To uključuje bočno urušavanje, uglavnom prouzročeno prevelikom toplinom na početku slojeva (Slika 8a). Dijelovi netaljene žice se mogu pojaviti u završnim dijelovima zbog nekonzistentne duljine žice prilikom početka električnog luka. Ako je duljina žice od pištolja prevelika doći će do odvaljivanja žice bez taljenja (Slika 8b) [11].



Slika 8. WAAM defekti: a) bočno urušavanje; b) neprotaljena žica [11]

U konačnici može doći do velikih deformacija (Slika 9) nakon stezanja kao rezultat prevelikog unosa topline i konstantnog akumuliranja topline te se dobiva savinuti proizvod [11].

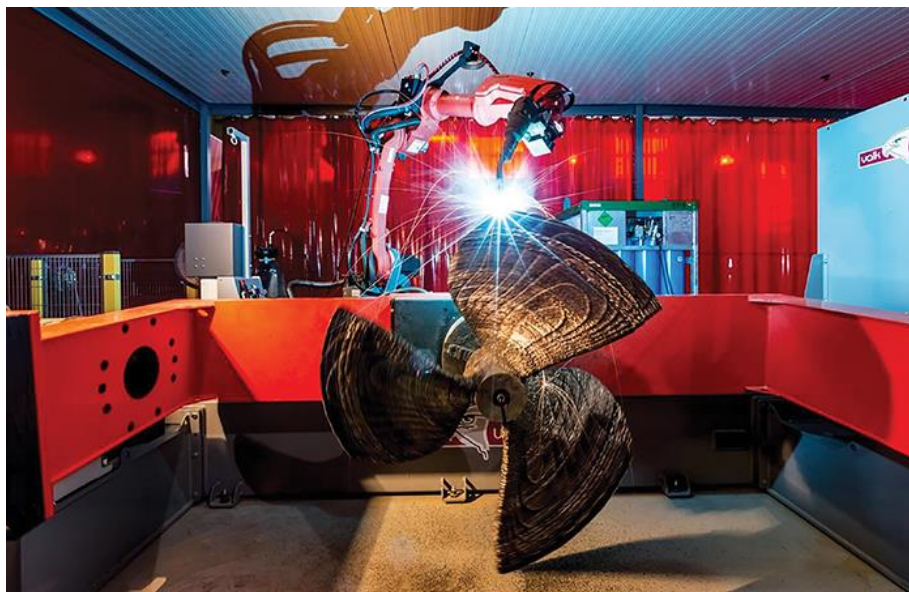


Slika 9. Deformacija uslijed velikog unosa topline [11]

Gore spomenuti defekti mogu se ispraviti boljim izborom parametara i varijantama procesa. Zaostala naprezanja koja dovode do deformacija i gubitka tolerancija, mogu se oslabiti naknadnom toplinskom obradom, pravilno planiranom putanjom ili čak tehnikama hladne deformacije. Prskanje je povezano s odabirom parametara procesa koji će odrediti vrstu prijenosa metala. Poroznost je najčešći uzrok kod legura aluminija. Za aluminijske legure, valjanje i zavarivanje pomoću CMT – impulsnog naprednog procesa može u potpunosti ukloniti pore. Bočno urušavanje i neprotaljena žica mogu se izbjeći uvođenjem senzora kako bi se osigurala potrebna udaljenost između komada i žice te stalna međuprolazna temperatura [11].

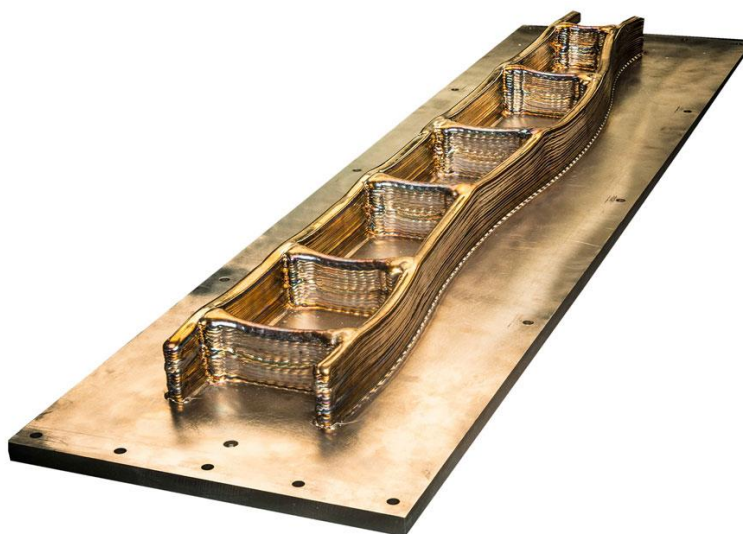
2.7. Primjena WAAM-a

Primjenjujući WAAM tehnologiju mogu se izraditi razni kompleksni oblici koje inače nije moguće postići konvencionalnim postupcima izrade ili su znatno jeftiniji za izradu zbog manjeg gubitka materijala. Jedna od mogućnosti izrade su brodski propeleri (Slika 10) koji umjesto da se lijevaju i zatim strojno obrade nastaju pomoću WAAM-a te se onda strojno obrade uz puno manje otpadnog materijala [12].



Slika 10. WAAMpeller - brodski propeler izrađen WAAM tehnologijom [12]

Slika 11 prikazuje dio krila zrakoplova napravljen od legure titana čime se uvelike uštedilo na cijeni jer nije bilo potrebno odstraniti puno materijala [13].



Slika 11. Dio krila zrakoplova [13]

Osim industrijskih mogućnosti postoje i građevinske te je tako u Nizozemskoj 2015. godine započet projekt izrade mosta (Slika 12) koji će biti postavljen preko rijeke u Amsterdamu [14].



Slika 12. MX3D - most dobiven WAAM tehnologijom [14]

Kako ne bi postojala samo funkcionalna svrha pobrinuo se nizozemski inženjer Joris Laarman. U svojem laboratoriju, osim funkcionalnih proizvoda, Laarman izrađuje i one estetske te je jedan od njegovih eksponata dobiven WAAM tehnologijom u obliku leptira (Slika 13) [15].



Slika 13. Umjetnička skulptura leptira [15]

3. DUPLEKS NEHRĐAJUĆI ČELIK

Prvi dupleks nehrđajući čelik proizveden je u Švedskoj 1930. godine i bio je korišten u papirnoj industriji. Ta vrsta čelika je razvijena radi smanjenja intergranularne korozije, problema koji se javljao kod ranijih verzija visoko ugljičnih austenitnih nehrđajućih čelika. Dupleks odljevci proizvedeni su u Finskoj 1930. te je patent odobren u Francuskoj 1936. godine pod imenom Uranus 50. Tijekom 60ih i 70ih godina prošlog stoljeća dva glavna razloga su ubrzala proces razvoja dupleks legura. Prvi razlog je bio nestašica nikla koja je povećala cijenu austenitnih čelika te je tom povećanju pomogla i visoka potražnja za nehrđajućim čelicima u naftnoj industriji. Drugi razlog je napredak u samoj tehnici proizvodnje čelika uvođenjem vakuuma i decementiranja pomoću argona i kisika. Ranih 80ih godina prošlog stoljeća pojavljuje se druga generacija dupleks čelika s poboljšanim zavarivačkim svojstvima ponajviše zbog legiranja s dušikom. Nakon uvođenja dušika i poboljšanja zavarivačkih svojstava dupleks čelici su postali šire primjenjivi [16].

Podjela dupleks čelika napravljena je prema postojanosti dupleks čelika na rupičastu koroziju, tj. prema vrijednosti djelotvorne sume odnosno PREN (*engl. Pitting Resistance Equivalent Number*) broja što se izračunava prema izrazu [17]:

$$\text{PREN} = \% \text{Cr} + 3,3 (\% \text{Mo} + 0,5\% \text{W}) + 16 \times \% \text{N}$$

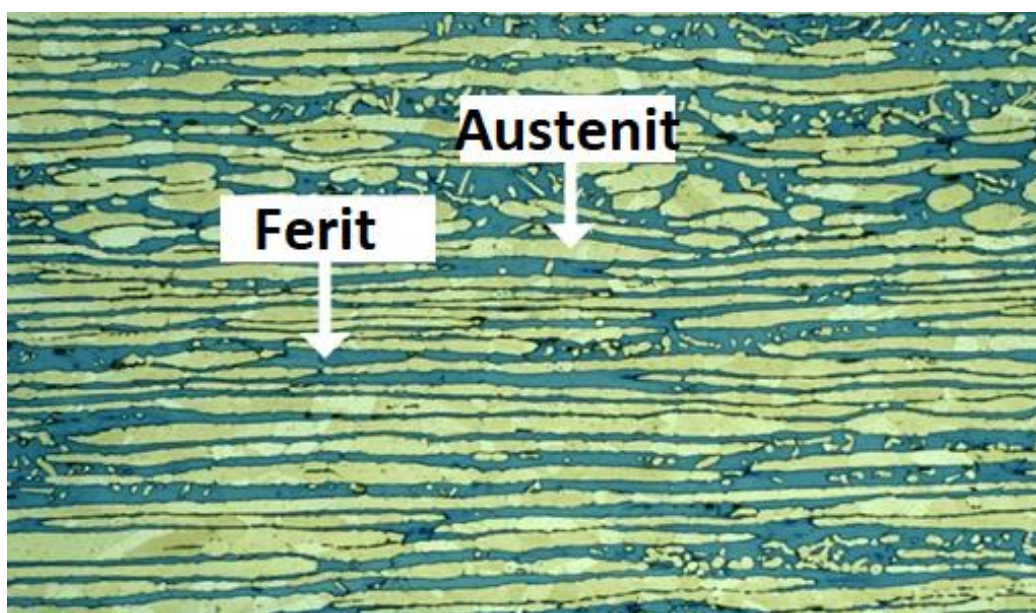
Svi današnji dupleks čelici mogu se podijeliti u pet grupa [17]:

1. Fe-23Cr-4Ni-0,1N ili dupleks čelici bez molibdena
2. Fe-22Cr-5,5Ni-3Mo-0,15N ili dupleks čelici s 22% kroma
3. Fe-25Cr-5Ni-2,5Mo-0,17N-Cu ili dupleks čelici s 25% kroma (PREN <40)
4. Fe-25Cr-7Ni-3,5Mo-0,25N-W-Cu ili super dupleks čelici (PREN = 40 do 45)
5. Fe-32Cr-7Ni-4Mo-0,5N-Cu ili hiper dupleks čelici (PREN >45)

3.1. Mikrostruktura dupleks nehrđajućeg čelika

Mikrostruktura dupleks nehrđajućeg čelika (Slika 14) na sobnoj temperaturi sastoji se od 50% volumnog udjela ferita i 50% udjela austenita te se takva mikrostruktura naziva dupleks struktura i po njoj su čelici dobili ime [17].

Dupleks nehrđajući čelici imaju složenu Fe-Cr-Ni-N leguru, a osim kroma i nikla važni legirni elementi za formiranje mikrostrukture su dušik, molibden, volfram, bakar, mangan, silicij, ugljik, sumpor i fosfor. Dušik je izrazito gamageni element koji promiče austenitnu fazu [17].



Slika 14. Mikrostruktura dupleks čelika [18]

3.1.1. Krom

Glavna prednost dodavanja kroma u leguru čelika je poboljšanje lokalizirane otpornosti na koroziju, formiranjem pasivnog kromom bogatog oksidno-hidroksidnog filma. Elektrokemijski se to postiže produživanjem pasivnog raspona i smanjivanjem brzine opće korozije. Dodavanje kroma u leguru ima svoj limit jer se korisno svojstvo kroma negira stvaranjem povećanih precipitata u intermetalnoj fazi, poput sigma faze. Te faze obično dovode do smanjenja duktilnosti, žilavosti i korozijskih svojstava. Krom je alfageni legirni element te on stabilizira ferit. Sadržaj kroma u dupleks čelicima je između 21 % i 33 % [17][19].

3.1.2. Molibden

Molibden ima važan utjecaj na otpornost legure prema rupičastoj koroziji i koroziji u procijepu kada se nalazi u kloridnim medijima. Molibden povećava raspon pasivnog potencijala i smanjuje gustoću korozijske struje u aktivnom rasponu. Molibden je alfageni element te ga dupleks čelik sadrži do 4 %. Povećanjem sadržaja molibdena raste opasnost od izlučivanja neželjenih intermetalnih faza [17][19].

3.1.3. Nikal

Za razliku od kroma i molibdena koji stabiliziraju ferit, nikal stabilizira austenit. Dodavanje nikla u dupleks leguru ponajviše ovisi o količini kroma u njoj. Pri povećim razinama nikla, razina austenita raste uvelike preko 50 %, s posljedicom da krom i molibden obogaćuju preostali ferit. Kao rezultat, transformacija ferita u intermetalnu fazu može se poboljšati kada

je legura podvrgnuta temperaturama u rasponu od 650 °C do 950 °C. Nikal ima direktan utjecaj i na korozijska svojstva jer pomiče potencijal u plemenitom smjeru i smanjuje struju korozije, ali glavna uloga nikla je kontrola podjele faza. Dupleks čelici sadrže između 4 % i 9 % nikla [17][19].

3.1.4. Dušik

Dušik ima višestruki učinak na nehrđajuće čelike poput povećanja otpornosti na rupičastu koroziju, koroziju u procijepu, sadržaja austenita i čvrstoće. Dušik ima afinitet prema austenitu zbog bolje topljivosti u toj fazi. Prilikom dulje izloženosti nehrđajućih čelika u kiselim otopinama radi pasivizacije primijećeno je obogaćivanje površine dušikom što objašnjava kako dušik ima utjecaj na repasivizaciju. Važno svojstvo dušika je mogućnost stabiliziranja dupleks legura protiv precipitacije intermetalnih faza poput sigma i chi faze. Primijećeno je da povišenjem razine dušika smanjuje se rizik od nastanka nitrida. Dušik je jaki gamageni element te u kombinaciji s niklom osigurava dovoljnu količinu austenita u strukturi dupleks čelika, čime se omogućava lakše zavarivanje [17][19].

3.1.5. Mangan

Mangan se koristi kao stabilizator austenita u austenitnim čelicima, ali za dupleks čelike postoje pomiješani rezultati. Trenutno razumijevanje je da mangan ima mali ili uopće nema učinak na ravnotežu dupleks faze. Mangan može povećati raspon temperatura i stopu formiranja štetne sigma faze. Dodatak mangana nehrđajućim čelicima povećava otpornost na abraziju i trošenje te vlačna svojstva bez gubitka duktilnosti. Nadalje, mangan povećava topljivost dušika i time omogućava povećanu količinu dušika bez rizika od otplinjavanja [19].

3.1.6. Bakar

Dodatak bakra u visoko legiranim austenitnim nehrđajućim čelicima smanjuje brzinu korozije u neoksidirajućim okruženjima, kao što je sumporna kiselina. Općenito, dodavanje bakra u dupleks čelike je limitirano do 2 %, zato što visoke razine bakra smanjuju vruću duktilnost i mogu dovesti do kaljenja precipitata. Bakar može olakšati strojnu obradu kod materijala s nižom razinom kisika i sumpora te može doći do kaljenja nakon izlaganja temperaturnom rasponu od 300 °C do 600 °C [17][19].

3.1.7. Volfram

Dodatak volframa u leguru dupleks čelika je do 2 % kako bi se poboljšala otpornost na rupičastu koroziju. Također, volfram poboljšava i otpornost na koroziju u procijepu u grijanim kloridnim

otopinama. Volfram je poznat po tome što potiče formiranje intermetalnih spojeva u rasponu od 700 °C do 1000 °C i potiče sekundarno formiranje austenita u zavaru metala [19].

3.1.8. Silicij

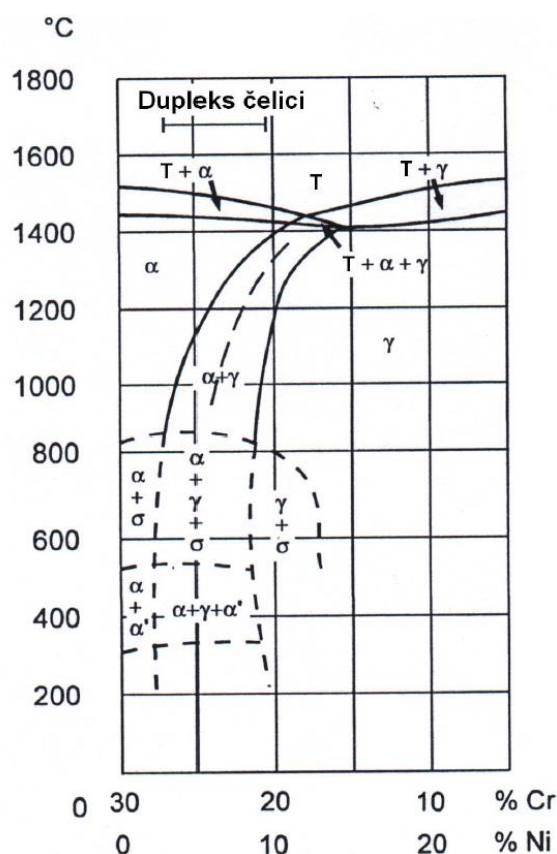
Silicij povećava otpornost na oksidaciju pri višim temperaturama. Dupleks čelici s visokim udjelom silicija (3,5 % – 5,5 %) su napravljeni radi povećane otpornosti na rupičastu koroziju te zbog imunosti na pucanje uslijed napetostne korozije. Za silicij se smatra da povećava formaciju sigma faze te zbog toga se limitira na razinu od 1 % u leguri [19].

3.1.9. Ugljik, sumpor i fosfor

Postotak ugljika u većini kovanih dupleks čelika je limitiran na 0,02 % do 0,03 % primarno kako bi se smanjila precipitacija kromom bogatih karbida koji onda iniciraju rupičastu koroziju. Slično tome, količina sumpora i fosfora je kontrolirana, iako nije eliminirana prisutnost sumpora jer je važan za bolju penetraciju zavara [19].

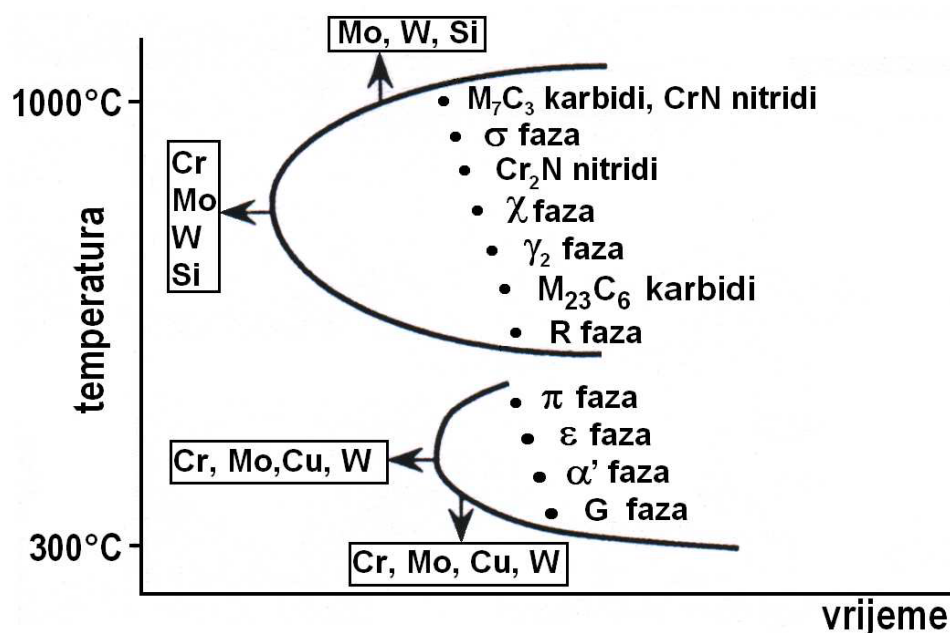
3.2. Režim toplinske obrade

Veliki utjecaj na formiranje balansirane dupleks mikrostrukture imaju kemijski sastav i režim hlađenja nakon primarne kristalizacije. Slika 15 prikazuje da svi dupleks čelici primarno kristaliziraju kao stopostotni ferit. Nastavljanjem hlađenja dolazi do formiranja austenitne faze po granicama, a nakon toga formira se unutar feritnog zrna na definiranim kristalografskim ravninama. Prilikom procesa transformacije ferita u austenit dolazi do pojave difuzije. Legirni elementi za stabilizaciju austenita poput bakra, dušika, nikla i ugljika difundiraju u austenit dok legirni elementi poput kroma, molibdena i volframa koji potiču ferit počinju se otapati u njemu. Brzina ohlađivanja ferita, vrsta, udio i brzina difuzije legirnih elemenata utječu na količinu austenita. Za postizanje optimalne fazne ravnoteže trebaju se postići približno jednaki volumni udjeli austenita i ferita. Kako bi se to postiglo dolazi do optimiranja brzine hlađenja za određeni kemijski sastav unutar temperaturnog intervala između 1050 °C i 1150 °C da se u mikrostrukтури postigne 50 % austenita i ferita. Zadržavanje postignutog faznog omjera na sobnoj temperaturi osigurava se gašenjem u vodi [17].



Slika 15. Pseudobinarni dijagram stanja Cr-Ni-Fe uz 70 % Fe [17]

Pri sporom hlađenju ispod 1000 °C dolazi do nastajanja opasnih mikrostrukturnih faza koje je moguće izbjeći gašenjem. Vrsta i količina precipitiranih faza ovisna je o vremenu i temperaturi, a njihovim izlučivanjem moguća je pojava snižavanja mehaničkih svojstava i korozijske postojanosti. Nepoželjne strukturne tvorevine se prema temperaturi svrstavaju u dva područja koje prikazuje Slika 16. U temperaturnom rasponu od 600 °C do 1300 °C nastaju karbidi, nitridi, sigma faza (σ), Chi faza (χ), Lavesova faza (η), R faza i sekundarni austenit (γ_2). U temperaturnom intervalu između 300 °C i 550 °C dolazi do izlučivanja π faze, bakrom bogate ϵ faze, G faze te α' faze [17].



Slika 16. Shematski prikaz tipičnih precipitacija u dupleks čelicima [17]

U gornjem temperaturnom području najveću opasnost predstavljaju sigma faza, chi faza i kromovi nitridi dok u donjem temperaturnom području najveći značaj ima alfa prim faza koja izaziva krhkost pri 475 °C. Karbidi tipa M_7C_3 i karbidi tipa $M_{23}C_6$ nisu realna opasnost zbog niskog udjela ugljika u sastavu današnjih čelika [17].

3.2.1. Precipitacija kromovih nitrida (Cr_2N)

Moderni dupleks čelici su namjerno legirani s dušikom te neke legure sadrže i do 0,35 % masenog udjela dušika. Može se pojaviti precipitacija male količine heksagonskog nitrida Cr_2N u austenitu u istom temperaturnom rasponu i gotovo istovremeno s $M_{23}C_6$. Precipitacija nitrida kod dupleks čelika je vrlo važna tijekom zavarivanja. Prilikom zavarivanja, feritna mikrostruktura se brzo hladi te dolazi do zasićenosti ferita u dušiku stvarajući borbu između kromovog nitrida i austenitnog precipitata. Takva mikrostruktura rezultira degradacijom mehaničkih svojstava i korozijske otpornosti zavarenih spojeva [20].

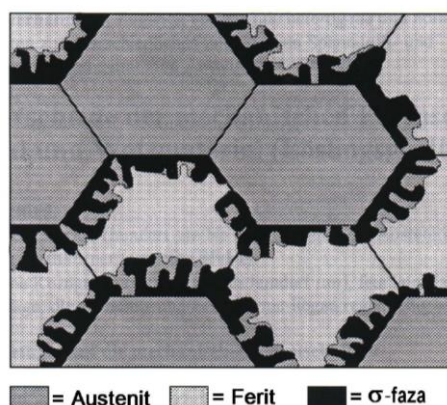
3.2.2. Precipitacija chi faze (χ)

Chi faza se može pojaviti u austenitnim, feritnim i dupleks nehrđajućim čelicima. Njena precipitacija je povezana s negativnim posljedicama na korozijska i mehanička svojstva. Dok je sigma faza prisutna u binarnom Fe-Cr sustavu, chi faza se pojavljuje samo u trostrukom Fe-Cr-Mo te u četverostrukim Fe-Cr-Ni-Mo i Fe-Cr-Ni-Ti sustavima. Uspoređujući ju sa sigma fazom, chi faza je bogatija udjelom molibdena, a siromašnija udjelom kroma. Pojava chi faze je uvjetovana minimalnim masenim udjelom molibdena od 2 %. Chi faza nastaje uglavnom na

granicama zrna austenita i ferita. Stabilna je na nižim temperaturama i u užem temperaturnom rasponu za razliku od sigma faze u koju se pretvara nakon dužeg vremena starenja [20].

3.2.3. Precipitacija sigma faze (σ)

Sigma faza je najproučavaniji intermetalni spoj. Precipitacija sigma faze se javlja kod austenitnih, feritnih i austenitno-feritnih dupleks nehrđajućih čelika. Precipitacija ove intermetalne faze kod dupleks čelika nastaje zadržavanjem na temperaturi između 560 °C i 980 °C te prouzrokuje teške gubitke u žilavosti, istezljivosti i korozivskoj otpornosti. Povećanje udjela kroma i molibdena dovodi do povećanog rasta sigma faze, pri čemu molibden ima četiri do pet puta veći utjecaj od kroma. Sigma faza nastaje eutektoidnom pretvorbom ferita pri čemu dolazi do prekrystalizacije ferita u sigma fazu i austenit. Sigma faza primarno se formira na faznim granicama ferita i austenita i odatle se dalje širi u ferit. Slika 17 prikazuje model nastajanja i rasta sigma faze. Tvrdoća sigma faze je oko 940 HV (68 HRC) dok sama prisutnost sigma faze može povisiti makrotvrdoću dupleks čelika do 450 HV50 [17] [20].



Slika 17. Model nastanka i rasta sigma faze [17]

3.2.4. Formacija alfa prim faze (α')

Krhkost feritne faze u nehrđajućim čelicima, feritnim i dupleks, je prouzročena izloženosti temperaturama oko 475 °C. Glavni uzrok te krhkosti je alfa prim faza koja nastaje spinodalnim raspadanjem u temperaturnom rasponu od 300 °C do 550 °C. Alfa prim faza sadrži krom i željezo, ima BCC kristalnu rešetku, njeni precipitati su mali te ih je teško uočiti elektronskim mikroskopom. Tvrdoća, granica tečenja i vlačna čvrstoća su povišene dok su produljenje i otpornost na udare smanjeni prisustvom alfa prim faze. Općenito vremenski gledano, gubitak žilavosti (krhkost) je sporiji od brzine očvršćavanja. Prisustvo alfa prim faze ima utjecaja i na korozivsku otpornost koja je značajno smanjena u otopini kipuće dušične kiseline. Otpornost na

rupičastu koroziju je također smanjena. Količina alfa prim faze raste s povećanjem sadržaja kroma u leguri [20].

3.3. Mehanička svojstva

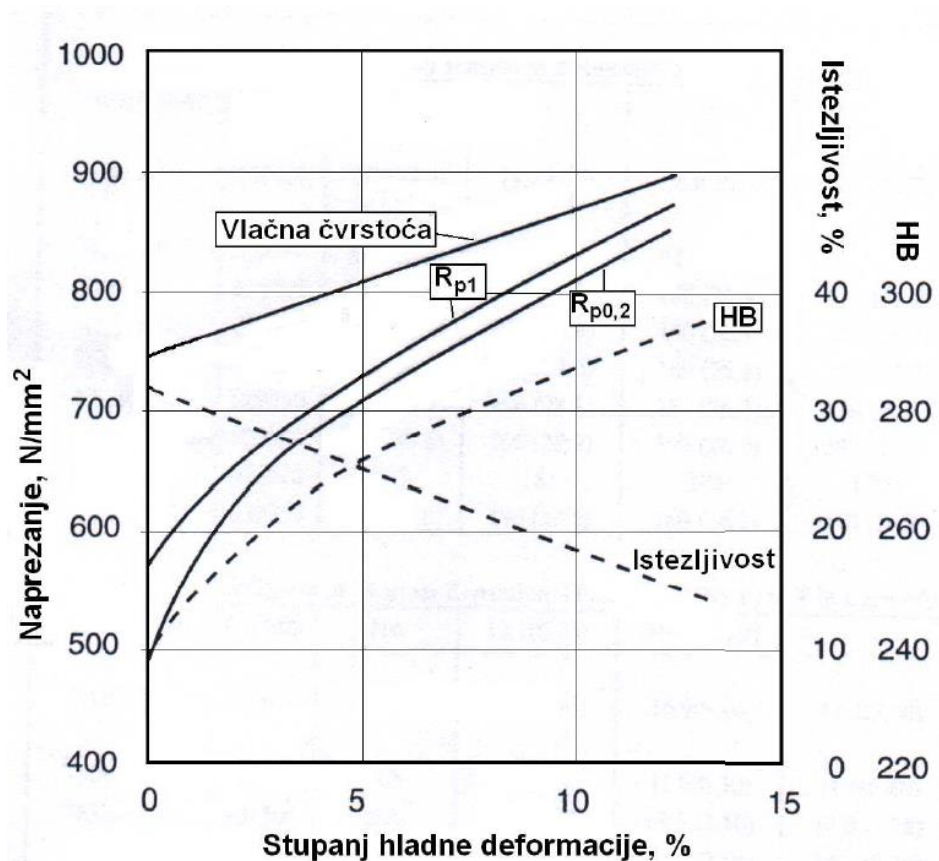
Binarna struktura, odnosno feritno – austenitna struktura dupleks čelika rezultira dobrim mehaničkim svojstvima. Dupleks čelici imaju relativno visoku čvrstoću i zadržavaju dobru duktilnost. Ovi čelici su duktilniji od feritnih nehrđajućih čelika zbog prisustva jake austenitne faze [20].

Iako dupleks čelici imaju visoku čvrstoću, oni zadržavaju dobru istezljivost i žilavost. Prijelaz iz žilavog u krhko područje je vrlo postupan, a dobru žilavost zadržavaju do -40 °C. Tablica 1 prikazuje mehanička svojstva za neke dupleks čelike [17].

Tablica 1. Mehanička svojstva nehrđajućih dupleks čelika [17]

| Oznake materijala | | Rm N/mm ² | Re N/mm ² | A % |
|--------------------|--------|-------------------------|-------------------------|--------|
| X3CrNiMoN27-5-2 | 1.4460 | 620 | 485 | 15,0 |
| X2CrNiN23-4 | 1.4362 | 600 | 400 | 25,0 |
| X2CrNiMoN22-5-3 | 1.4462 | 620 | 450 | 25,0 |
| X2CrNiMoCuN25-6-3 | 1.4507 | 770 | 550 | 25,0 |
| X2CrNiMoCuN25-6-3 | 1.4507 | 760 | 550 | 15,0 |
| X2CrNiMoN25-7-4 | 1.4410 | 795 | 550 | 15,0 |
| X2CrNiMoCuWN25-7-4 | 1.4501 | 750 | 550 | 25,0 |

Mehanička svojstva dupleks čelika vrlo su osjetljiva na hladnu deformaciju i stupanj ugnječenja koji se događa kod nje. Slika 18 prikazuje ovisnost mehaničkih svojstava o iznosu hladne deformacije [17].



Slika 18. Utjecaj hladne deformacije na mehanička svojstva dupleks čelika 1.4462 [17]

Mehanička svojstva dupleks čelika [17]:

- Tvrdća: između 250 HV i 350 HV
- Mikrotvrdća: austenit 300 HV_{0,02}, ferit između 300 HV_{0,002} i 550 HV_{0,002}
- Vlačna čvrstoća, R_m : između 700 N/mm² i 1100 N/mm²
- Konvencionalna granica razvlačenja, $R_{p0,2}$: između 500 N/mm² i 800 N/mm²
- Udarni rad loma, KV: do 170 J

3.4. Zavarljivost dupleks čelika

Zavarljivost je vrlo važno svojstvo svih čelika jer većina spojeva se radi zavarivanjem. Korištenje novih metoda kao i unaprjeđivanje dostupnih metoda zavarivanja uvelike je pridonijelo većem korištenju dupleks čelika. Metode koje se koriste su zavarivanje laserom i hibridne laserske tehnike, MIG/MAG, TIG te zavarivanje trenjem (engl. *Friction Stir Welding - FSW*). Zavarivanje može uvelike utjecati na mehanička svojstva i korozivsku otpornost [21].

Prilikom zavarivanja treba pripaziti na značajke mikrostrukture koje mogu utjecati na svojstvo zavara. Stoga se zavarivanju treba pristupiti tako da bude dovoljna količina ferita i da ne dođe do pojave štetnih faza poput nitrida ili intermetalnih spojeva u samom zavaru i zoni utjecaja topline. Prebrzo hlađenje zavarenog spoja može rezultirati povećanim količinama ferita i nitridnih spojeva u svim dupleks čelicima. Sporo hlađenje ili ponavljano zagrijavanje na temperature od 600 °C do 1000 °C će rezultirati intermetalnim spojevima u visokolegiranim dupleks čelicima. Preporuke koje ciljaju na kontroliranje mikrostrukture mogu se podijeliti u dvije kategorije [21]:

1. Metode kontroliranja brzine hlađenja koje uključuju predgrijavanja i temperaturu međuprolaza

2. Sastav zavarenog metala odabirom razreda čelika, dodatnog materijala i zaštitnog plina

Preporučene temperature međuprolaza kreću se od 100 °C do 250 °C ovisno o debljini čelika i vrsti njegove legure dok unos energije ide od 1 do 3 kJ/mm. Predgrijavanje se uglavnom ne preporučuje osim ako se zavaruje na temperaturama ispod sobne temperature te se onda preporučuje predgrijavanje na temperaturu od 50 °C do 80 °C kako bi se odvlažila površina spoja. U rijetkim slučajevima preporučuje se predgrijavanje do maksimalnih 150 °C kako bi se smanjio rizik od pucanja prilikom zavarivanja debelih materijala [21].

Općenito, moderni dupleks čelici imaju dobru zavarljivost, ali se ipak treba paziti kako bi se zaobišle nepravilnosti u zavaru. Najčešći problemi koji nastaju su preniska ili previsoka unošena toplina ili kada je previše dušika izgubljeno u talini zavara [21].

3.4.1. Gubitak dušika i prenizak unos energije

Najčešći problem je slaba korozijska otpornost zavara nastalih TIG postupkom. Slika 19 prikazuje rupičastu koroziju u zavaru metala. Razlog zbog kojeg se to događa je gubitak dušika i/ili prebrzo hlađenje. Rješenje ovog problema je unos veće energije u kombinaciji sa zaštitnim plinom veće koncentracije dušika kako bi se povećala formacija austenita [21].



Slika 19. Primjeri rupičaste korozije TIG zavarenog spoja [21]

3.4.2. Formiranje intermetalnih faza

Kod superdupleks i hiperdupleks čelika može doći do pojave intermetalnih faza radi presporog hlađenja ili prečestog grijanja u rasponu od 600 °C do 1000 °C. Pojave faza poput sigme i chi rezultiraju sniženjem korozijske otpornosti. Kako bi se otklonio ovaj problem treba pripaziti na unos topline i temperaturu međuprolaza te na raspored zavarivanja kako se ne bi prečesto zagrijavao materijal [21].

3.4.3. Pucanje prilikom solidifikacije

Pucanje prilikom solidifikacije je manji problem prilikom zavarivanja dupleks čelika. Visoka suzdržanost taline u kombinaciji s dubokim i uskim zavarom je klasičan primjer kada može doći do pucanja kod konvencionalnih metoda zavarivanja. Dvije manje poznate situacije kada može doći do toplih pukotina su prilikom plitkih zavara ili kod zavarenih spojeva s visokom koncentracijom ferita. Kod plitkih zavara dolazi do formiranja šava u obliku krila te se to može izbjeći prilagodbom parametara zavarivanja. Do druge situacije dolazi zbog niske energije unesene u materijal i poznato je da otpornost na tople pukotine pada prelaskom iz austenitnih metala zavara do potpuno feritnih. Rješenje ovog problema je u modificiranju postupka, odnosno dodavanju više elemenata koji potiču formiranje austenita kroz zaštitni plin ili dodatni materijal te povećanju unošene energije [21].

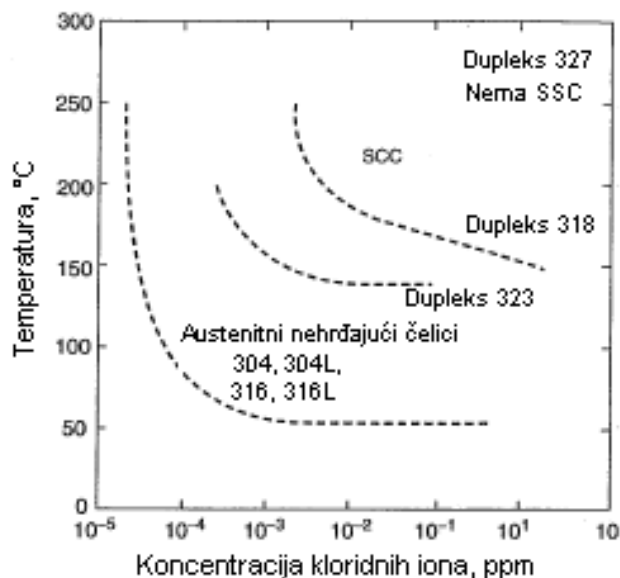
3.5. Korozijska otpornost

Korozijska svojstva dupleks čelika te nehrđajućih čelika su definirana preko mogućnosti pasivizacije i ostanka u pasivnom stanju u radnom okruženju. Postoje osnovne razlike u sastavu legure dupleks i austenitnih čelika koje dovode do značajnih varijacija u ponašanju prema koroziji, osobito u okruženjima gdje prevladava opća korozija. Najvažniji legirni elementi za svojstva lokalizirane korozije dupleks čelika su krom, molibden i dušik, dok nikal pretežito djeluje kao stabilizator austenitne faze. Ovi elementi nisu podjednako zastupljeni između dvije faze jer krom i molibden više obogaćuju ferit dok nikal i dušik obogaćuju austenit. Dušik uglavnom obogaćuje samo austenit. Moderni dupleks čelici imaju veće količine sadržaja dušika te je moguće balansirati otpornost prema koroziji kod obje faze što nije bio slučaj kod prvih legura dupleks čelika [19].

3.5.1. Napetosna korozija

Dupleks nehrđajući čelici su korozijski postojaniji od austenitnih nehrđajućih čelika kada je u pitanju napetosna korozija. Visoki maseni udio kroma i niži udio nikla povećava otpornost

dupleks čelika prema napetostnoj koroziji u kloridnom okruženju. Slika 20 prikazuje usporedbu nehrđajućih čelika i njihovu otpornost prema napetostnoj koroziji. Iz dijagrama se može uočiti da su austenitni čelici puno osjetljiviji na napetosnu koroziju od dupleks čelika [17].



Slika 20. Usporedba otpornosti čelika prema napetostnoj koroziji [17]

3.5.2. Rupičasta korozija

Dupleks čelici imaju jako dobru postojanost prema rupičastoj koroziji zahvaljujući prvenstveno visokom udjelu kroma, volframa, molibdena i dušika. Otpornost na ovaj tip korozije može se odrediti prema kemijskom sastavu, preko vrijednosti djelotvorne sume. Najveći utjecaj na vrijednost djelotvorne sume ima dušik, a nešto manji utjecaj imaju molibden, volfram i krom. Mikrostruktura također ima određeni utjecaj na otpornost prema rupičastoj koroziji. Povišen udio ferita i precipitati nitrida u zrnima ferita mogu negativno utjecati na otpornost prema rupičastoj koroziji [17].

3.6. Primjena dupleks čelika

Moderni dupleks čelici koriste se na dosta različitih mjestima i industrija. U naftnoj industriji se zbog svoje dobre korozijske otpornosti koriste kao materijali za izradu cjevovoda za transport nafte i plina, podvodnih cijevi i glava na offshore postrojenjima, u industriji proizvodnje papira, u desalinizacijskim postrojenjima, u transportu za izradu spremnika kod tankera ili cisterni, za skladišne spremnike, u hidrometalurgiji, u građevini pri izradi mostova, za armaturu, kod bojlera za vruću vodu, itd. Slika 21 prikazuje mobilnu cisternu za prijevoz goriva ili kemikalija napravljenu od dupleks čelika dok Slika 22 prikazuje most u Švedskoj napravljen od dupleks čelika [20].



Slika 21. Mobilna cisterna napravljena od dupleks čelika [20]



Slika 22. Apate most u Stockholmu [20]

4. EKSPERIMENT

U eksperimentalnom dijelu provedena je izrada zidova aditivnim postupkom električnim lukom i žicom te je izvršena analiza utjecaja unosa energije i njen utjecaj na mikrostrukturu dupleks čelika. Većina eksperimenata provedena je u Laboratoriju za zavarivanje Fakulteta strojarstva i brodogradnje, Sveučilišta u Zagrebu.

4.1. Izrada uzoraka

Prije izrade uzoraka provedeno je nekoliko pokusnih prolaza za određivanje optimalnih parametara zavarivanja. Kako bi se vidio utjecaj topline na mikrostrukturu uzoraka dogovoreno je da će svaki od tri uzorka imati drugačiju međuprolaznu temperaturu te su dogovorene temperature iznosile: 50 °C, 150 °C i 250 °C. Eksperiment se provodio na robotskoj stanici Almega OTC AX V6 (Slika 23).



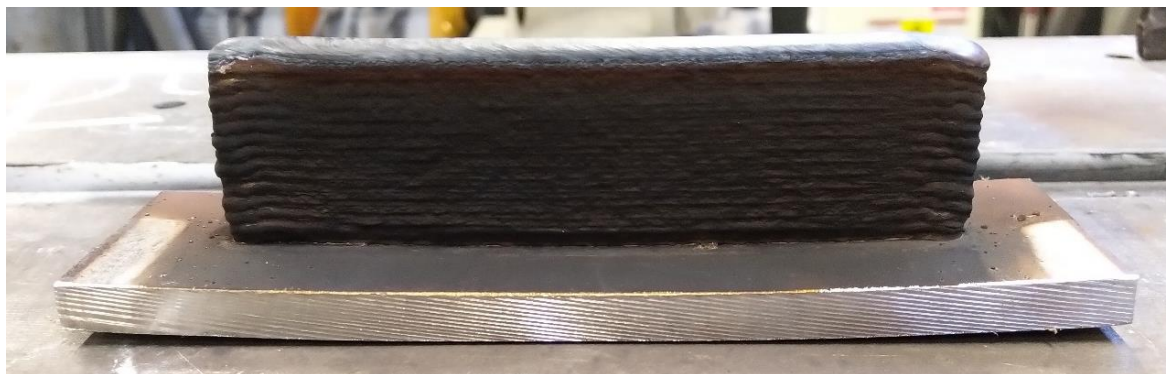
Slika 23. Robotska stanica Almega OTC AX V6

Iako robotska stanica ima svoje uređaje za zavarivanje oni nisu udovoljili zahtjevu za izradu te se koristio uređaj Welbee P500L (Slika 24), proizvođača Daihen Varstroj. Zbog toga što navedeni uređaj za zavarivanje nema mogućnost simbioze s robotskom stanicom prilikom zavarivanja koristio se posebni prekidač za početak i kraj procesa.



Slika 24. Welbee P500L Daihen Varstroj

Dodatni materijal koji se koristio je bila žica od dupleks čelika razreda 2205, a za zaštitni plin korištena je mješavina argona i 2,5 % dušika proizvođača Messer. Prije početka zavarivanja osnovna ploča od nehrđajućeg čelika AISI 304 se očistila i odmastila te pritegnula pomoću stega za stol robotske stanice. Nakon toga pristupilo se izradi programa za putanju robota. Putanja robota programirana je da neparni prolazi idu s desna na lijevo, a parni s lijeva na desno kako bi krajnji izradak bio simetričniji i s manje naprezanja. Za optimalne parametre odabrani su struja od 130 A i napon od 24,2 V uz brzinu zavarivanja od 50 cm/min. Slobodni kraj žice je iznosio 12-13 mm, protok plina bio je 20 l/min te se koristio impulsni način zavarivanja. Ovi parametri odabrani su radi nižeg unosa energija i kako ne bi došlo do prskanja prilikom zavarivanja. Prilikom izrade zida s međuprolaznom temperaturom od 50 °C nije bilo potrebno predgrijavanje osnovnog materijala, a kako bi se ubrzalo hlađenje i postizanje željene međuprolazne temperature koristio se komprimirani zrak. Kod izrade zidova s međuprolaznim temperaturama od 150 °C i 250 °C koristilo se predgrijavanje pomoću plina. Dogovorene dimenzije zida su 140 mm duljine i 40 mm visine. Slika 25 prikazuje krajnji izgled jednog od zidova nakon zadnjeg prolaza.



Slika 25. Krajnji izgled uzorka

Nakon svakog prolaza mjerila se visina zida kako bi vidjelo utječe li i kako temperatura predgrijavanja. Tablica 2 prikazuje visine zidova nakon svakog prolaza te prirast visine.

Tablica 2. Izmjerene visine zidova

| Prolaz | ZID - 50 °C | | ZID - 150 °C | | ZID - 250 °C | |
|--------|-------------|--------------------|--------------|--------------------|--------------|--------------------|
| | Visina, mm | Prirast visine, mm | Visina, mm | Prirast visine, mm | Visina, mm | Prirast visine, mm |
| 1 | 3 | 3 | 1,7 | 1,7 | 2,4 | 2,4 |
| 2 | 4,4 | 1,4 | 4 | 2,3 | 3,6 | 1,2 |
| 3 | 5,7 | 1,3 | 5,6 | 1,6 | 4,7 | 1,1 |
| 4 | 7,1 | 1,4 | 7,1 | 1,5 | 5,9 | 1,2 |
| 5 | 8,5 | 1,4 | 8,4 | 1,3 | 6,9 | 1 |
| 6 | 10 | 1,5 | 9,9 | 1,5 | 8,6 | 1,7 |
| 7 | 11,2 | 1,2 | 11,2 | 1,3 | 9,7 | 1,1 |
| 8 | 12,7 | 1,5 | 12,5 | 1,3 | 11,1 | 1,4 |
| 9 | 14,2 | 1,5 | 13,9 | 1,4 | 12,3 | 1,2 |
| 10 | 15,4 | 1,2 | 15,6 | 1,7 | 13,5 | 1,2 |
| 11 | 16,8 | 1,4 | 16,8 | 1,2 | 14,8 | 1,3 |
| 12 | 18,2 | 1,4 | 18,6 | 1,8 | 16,1 | 1,3 |
| 13 | 19,7 | 1,5 | 19,8 | 1,2 | 17,4 | 1,3 |
| 14 | 20,9 | 1,2 | 21,1 | 1,3 | 19,2 | 1,8 |
| 15 | 22,3 | 1,4 | 22,5 | 1,4 | 20,3 | 1,1 |
| 16 | 23,6 | 1,3 | 24 | 1,5 | 21,7 | 1,4 |
| 17 | 25,2 | 1,6 | 25,3 | 1,3 | 23,1 | 1,4 |
| 18 | 26,4 | 1,2 | 26,9 | 1,6 | 24,4 | 1,3 |
| 19 | 27,7 | 1,3 | 28,5 | 1,6 | 25,7 | 1,3 |
| 20 | 29,2 | 1,5 | 29,7 | 1,2 | 27,1 | 1,4 |
| 21 | 30,6 | 1,4 | 31,2 | 1,5 | 28,4 | 1,3 |
| 22 | 32 | 1,4 | 32,7 | 1,5 | 29,7 | 1,3 |
| 23 | 33,2 | 1,2 | 34,2 | 1,5 | 31,1 | 1,4 |
| 24 | 34,7 | 1,5 | 35,7 | 1,5 | 32,4 | 1,3 |
| 25 | 35,8 | 1,1 | 36,9 | 1,2 | 33,8 | 1,4 |

| | | | | | | |
|------------------------------------|------|------|------|------|------|------|
| 26 | 37,2 | 1,4 | 38,5 | 1,6 | 35,2 | 1,4 |
| 27 | 38,7 | 1,5 | 39,9 | 1,4 | 36,6 | 1,4 |
| 28 | 40 | 1,3 | 41,4 | 1,5 | 37,8 | 1,2 |
| 29 | 41,7 | 1,7 | - | - | 39,1 | 1,3 |
| 30 | 42,9 | 1,2 | - | - | 40,6 | 1,5 |
| 31 | - | - | - | - | 41,9 | 1,3 |
| Prosjek | - | 1,43 | - | 1,48 | - | 1,35 |
| Prosjek bez prvih 5 slojeva | - | 1,38 | - | 1,43 | - | 1,33 |

4.2. Unos energije i dinamička karakteristika

Norma ISO/TR 18491:2015 propisuje tri načina za mjerenje energije električnog luka: preko struje i napona za zavarivanje, preko trenutne energije i preko trenutne snage [22]. U ovome radu koristili smo se načinom mjerenja preko struje i napona zavarivanja. Jednadžba za mjerenje unesene energije glasi [22]:

$$E = \frac{U \times I}{v} \times 10^{-3}, kJ/mm \quad (1)$$

Gdje je:

U – napon električnog luka, V

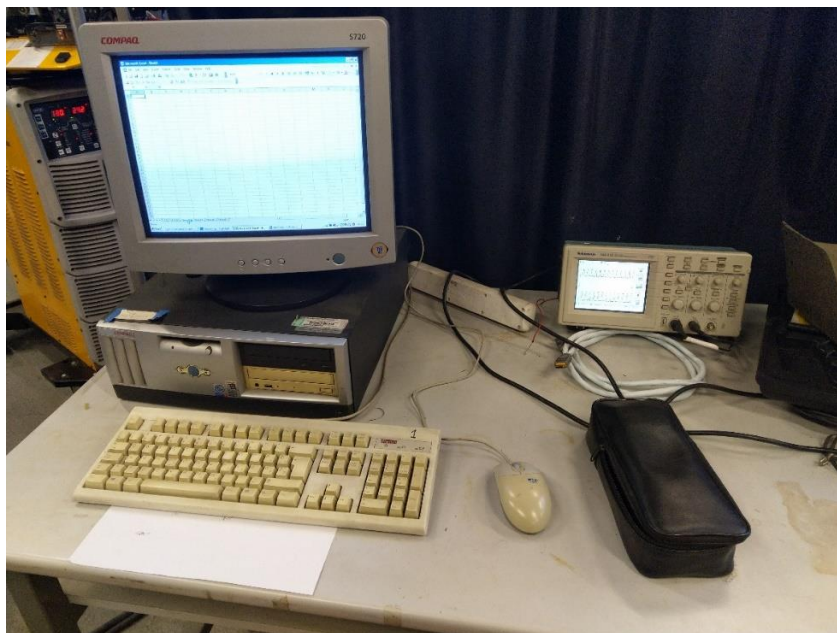
I – struja zavarivanja, A

v – brzina zavarivanja, mm/s

Uz nominalne parametre koje smo koristili u procesu izrade zidova koji su: struja zavarivanja 130 A, napon električnog luka 24,2 V i brzinu zavarivanja od 50 cm/min (8,33 mm/s) prema formuli (1) dobijemo iznos energije električnog luka od 0,378 kJ/mm. U procesu zavarivanja vrijednosti struje i napona nisu fiksne nego variraju, a kako bi se dobile točnije vrijednosti koristila se dinamička karakteristika.

Prema definiciji „Dinamička karakteristika je operativna karakteristika mjerena osciloskopom, pod konstantnim opterećenjem izvora struje za zavarivanje u svrhu detaljnog promatranja ponašanja električnog luka – promjene struje i napona tijekom formiranja i odvajanja rastaljene kapljice metala“ [23]. U ovome eksperimentalnom radu koristio se dvokanalni osciloskop (Slika 26) gdje je jedan kanal bio spojen sa strujnim kliještima te je mjerio struju zavarivanja, a drugi kanal je bio spojen na polikabel uređaja za zavarivanja i mjerio je napon te je sam osciloskop bio spojen na računalo. Pomoću osciloskopa i računala moguće je dobiti zapis od 2500 točaka u vremenu za vrijednosti struje i 2500 točaka za vrijednosti napona u vremenskom intervalu od 0,1 sekunde. Pomoću navedenih vrijednosti za napon i struju mogu se izračunati

stvarni unosi energije koji su se dogodili u procesu zavarivanja. Za svaki zid provedena su četiri mjerenje za nasumične prolaze.



Slika 26. Osciloskop priključen na računalo

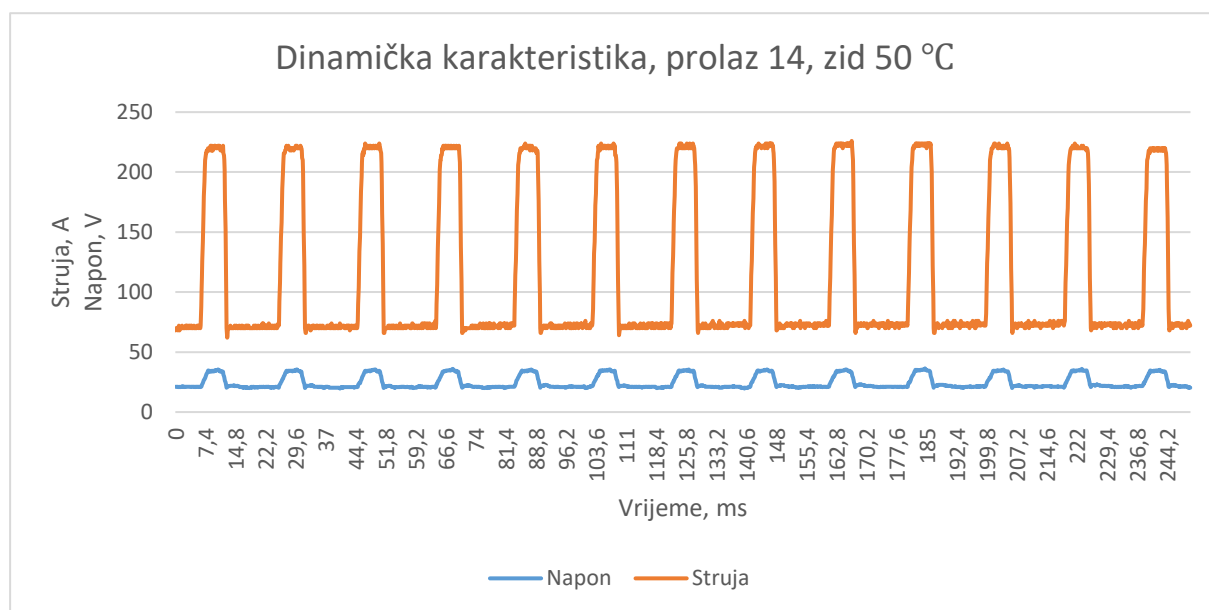
Tablica 3 prikazuje unos energije izračunat pomoću dinamičke karakteristike za četiri nasumična prolaza za svaki od tri zida i vrijednost unosa energije pomoću nominalnih vrijednosti.

Tablica 3. Unos energije izračunat pomoću dinamičke karakteristike

| ZID 50 °C | | | | |
|----------------------|--------|--------|--------|--------|
| Prolaz | 1. | 2. | 3. | 4. |
| Unos energije, kJ/mm | 0,362 | 0,382 | 0,383 | 0,375 |
| Prosjek, kJ/mm | 0,375 | | | |
| Prosječna struja, A | 111,23 | 114,92 | 112,02 | 110,90 |
| Prosječan napon, V | 24,12 | 24,70 | 25,37 | 25,09 |
| ZID 150 °C | | | | |
| Prolaz | 1. | 2. | 3. | 4. |
| Unos energije, kJ/mm | 0,391 | 0,385 | 0,380 | 0,382 |
| Prosjek, kJ/mm | 0,385 | | | |

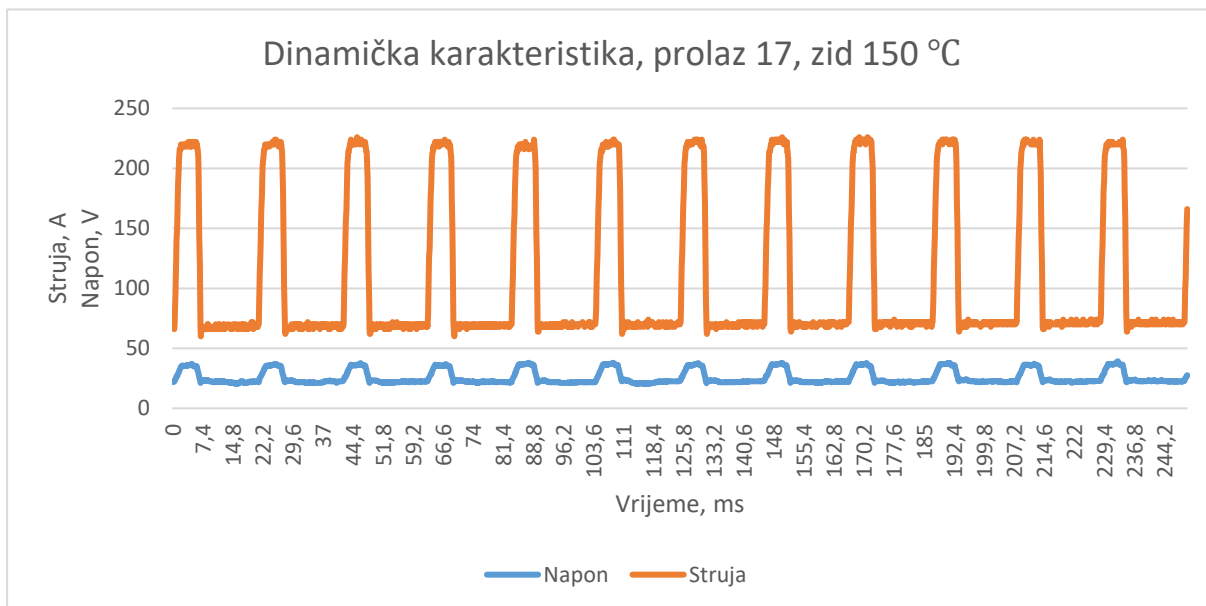
| | | | | |
|-----------------------|--------|--------|--------|--------|
| Prosječna struja, A | 112,99 | 111,57 | 109,96 | 111,25 |
| Prosječan napon, V | 25,75 | 25,64 | 25,56 | 25,47 |
| ZID 250 °C | | | | |
| Prolaz | 1. | 2. | 3. | 4. |
| Unos energije, kJ/mm | 0,379 | 0,371 | 0,385 | 0,383 |
| Prosjek, kJ/mm | 0,380 | | | |
| Prosječna struja, A | 114,30 | 111,21 | 113,15 | 111,00 |
| Prosječan napon, V | 24,56 | 24,53 | 25,26 | 25,58 |
| Nominalne vrijednosti | | | | |
| Unos energije | 0,378 | | | |
| Struja, A | 130 | | | |
| Napon, V | 24,2 | | | |

Slika 27 prikazuje dinamičku karakteristiku snimljenu za 14. prolaz kod zida s međuprolaznom temperaturom od 50 °C.



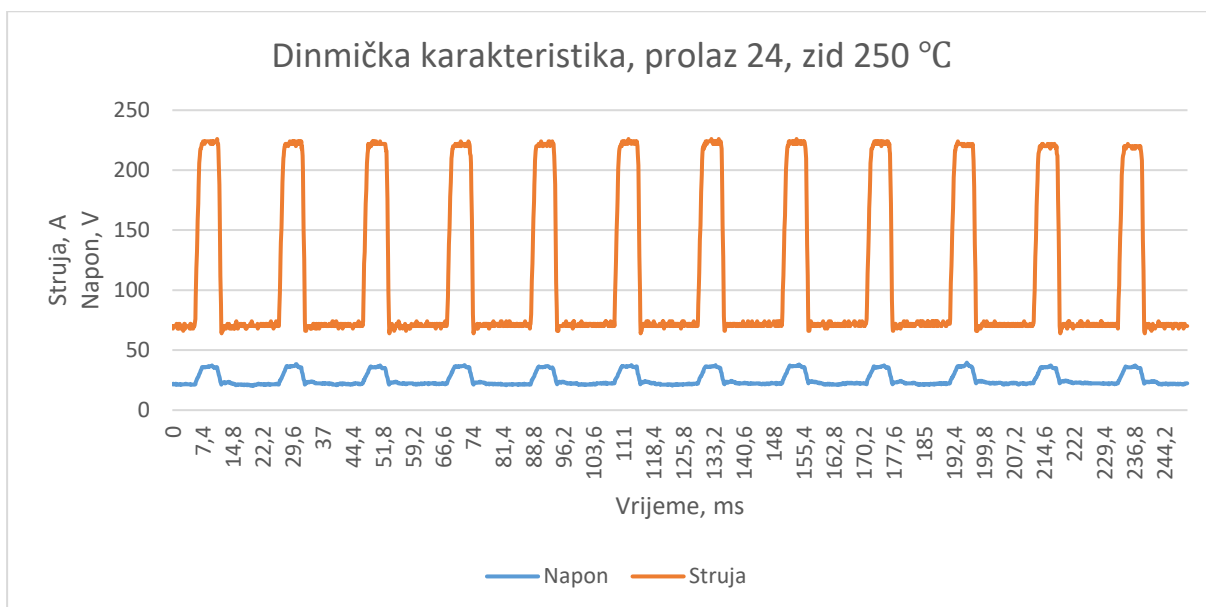
Slika 27. Dinamička karakteristika, prolaz 16, zid 50 °C

Slika 28 prikazuje dinamičku karakteristiku snimljenu za 17. prolaz kod zida s međuprolaznom temperaturom od 150 °C.



Slika 28. Dinamička karakteristika, prolaz 17, zid 150 °C

Slika 29 prikazuje dinamičku karakteristiku snimljenu za 18. prolaz kod zida s međuprolaznom temperaturom od 250 °C.



Slika 29. Dinamička karakteristika, prolaz 18, zid 250 °C

4.3. Ispitivanje parametara teksture površine

Ispitivanje parametara teksture površine vršilo se pomoću DAVID SLS-2 3D skenera. Skener radi pomoću projektora i kamere te kalibracijske podloge. Prvo se namjesti slika pomoću projektora i izoštri te namjesti fokus kamere nakon čega ide kalibracija pomoću kalibracijske podloge. Projektor projicira razne slike pomoću kojih se uređaj kalibrira te pomoću njega 2D sliku pretvara u 3D uzorak.

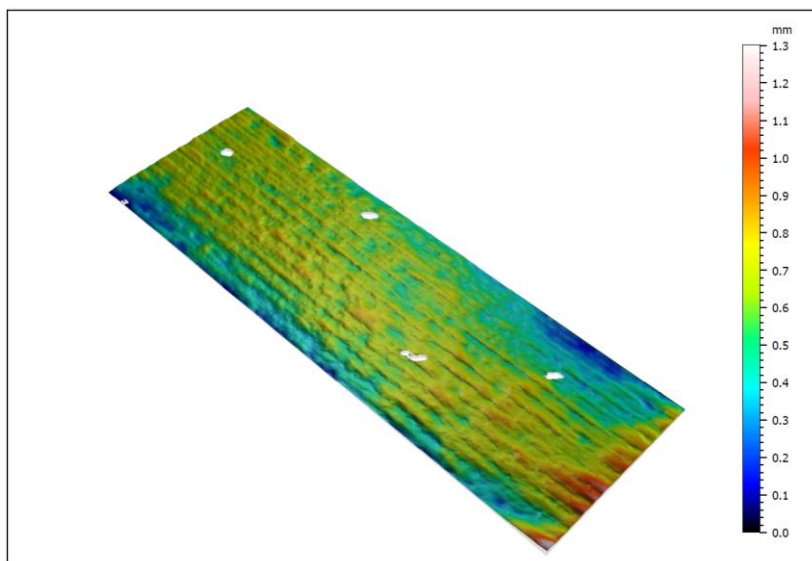
Prije skeniranja uzorak je bio očišćen i pošprican razvijač sprejom kako bi se dobili bolji rezultati. Za potrebe kalibracije i skeniranja soba se zamračila kako bi se postigli optimalni uvjeti. Nakon skeniranja krenulo se u računalnu obradu uzoraka. Prvo su rubovi uzoraka odrezani u programu 3D Builder kako bi se otklonile greške prilikom skeniranja, a nakon toga su uzorci obrađeni u programu MountainsMap gdje su dobiveni sljedeći parametri teksture površine: S_a , S_q , S_{sk} , S_{ku} , S_p , S_v i S_z .

S_a parametar predstavlja prosječnu visinu neravnina, a S_q srednju kvadratnu visinu neravnina, oba parametra se ocjenjuju na cijeloj 3D površini i predstavljaju ukupnu teksturu površine. Oba parametra su neosjetljivi na vrhove, doline i razmake raznih značajki tekstura. Parametri S_a i S_q mogu se koristiti za naznačivanje devijacija u karakteristikama teksture [24].

S_{sk} je koeficijent asimetrije površine, a S_{ku} koeficijent oštine površine. S_{sk} predstavlja stupanj simetrije površinskih nadvišenja. Ako je koeficijent veći od nula prevladavaju vrhovi, a ako je manji onda prevladavaju udubine na promatranoj površini. S_{ku} predstavlja prisutnost iznimno visokih vrhova ako je vrijednost iznad broja tri ili iznimno dubokih udubina ako je vrijednost ispod broja tri [24].

S_p je najveća visina vrha, S_v najveća dubina površine, a S_z maksimalna visina površine. Ova tri parametra procjenjuju apsolutne najviše i najniže točke na površini. Parametar S_z se još može i odrediti oduzimanjem parametra S_v od S_p ($S_z = S_p - S_v$) [24].

Slika 30 prikazuje izgled 3D površine zida s međuprolaznom temperaturom 50 °C te pripadajuću skalu visina, a Slika 31 prikazuje parametre teksture površine pripadajućeg zida.

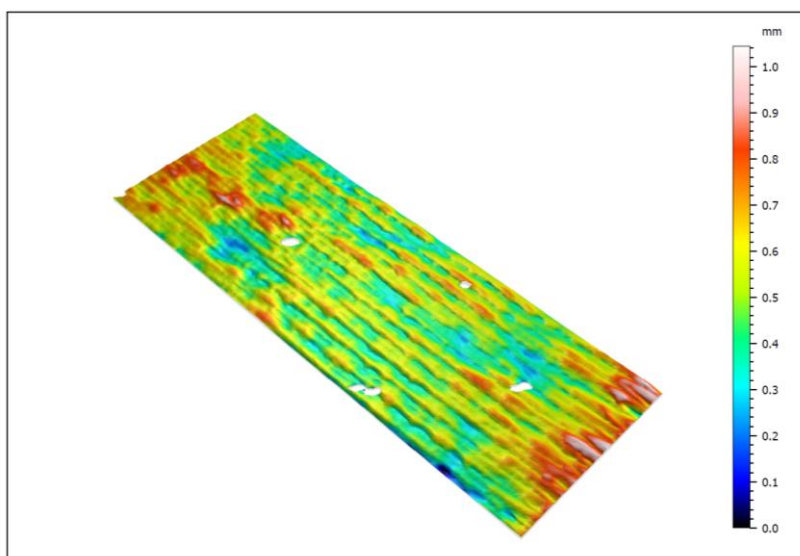


Slika 30. 3D površina zida s međuprolaznom temperaturom 50 °C

| Height parameters | | |
|-------------------|---------|----|
| Sq | 0.1365 | mm |
| Ssk | -0.5057 | |
| Sku | 4.013 | |
| Sp | 0.7044 | mm |
| Sv | 0.5977 | mm |
| Sz | 1.302 | mm |
| Sa | 0.1038 | mm |

Slika 31. Parametri teksture površine zida s međuprolaznom temperaturom 50 °C

Slika 32 prikazuje izgled 3D površine zida s međuprolaznom temperaturom 150 °C te pripadajuću skalu visina, a Slika 33 prikazuje parametre teksture površine pripadajućeg zida.

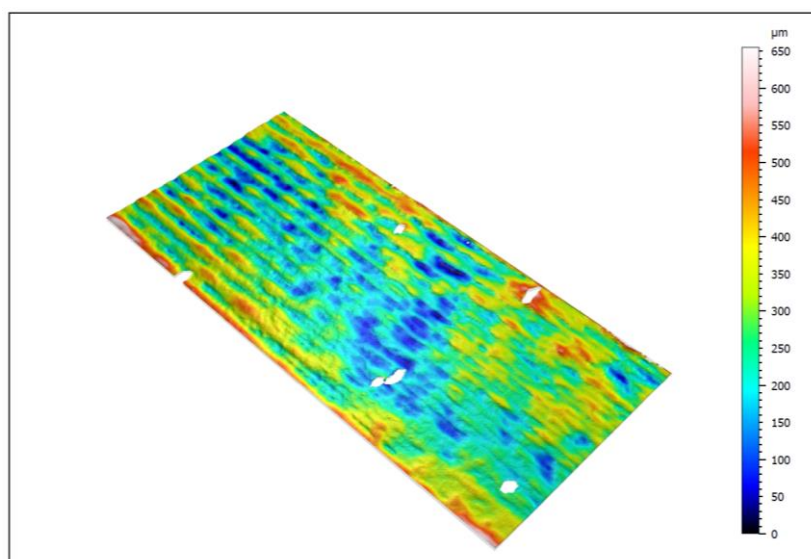


Slika 32. 3D površina zida s međuprolaznom temperaturom 150 °C

| Height parameters | | | |
|-------------------|---------|----|--|
| Sq | 0.1262 | mm | |
| Ssk | 0.4273 | | |
| Sku | 3.367 | | |
| Sp | 0.5082 | mm | |
| Sv | 0.5356 | mm | |
| Sz | 1.044 | mm | |
| Sa | 0.09967 | mm | |

Slika 33. Parametri teksture površine zida s međuprolaznom temperaturom 150 °C

Slika 34 prikazuje izgled 3D površine zida s međuprolaznom temperaturom 250 °C te pripadajuću skalu visina, a Slika 35 prikazuje parametre teksture površine pripadajućeg zida.



Slika 34. 3D površina zida s međuprolaznom temperaturom 250 °C

| Height parameters | | | |
|-------------------|--------|----|--|
| Sq | 95.47 | µm | |
| Ssk | 0.3630 | | |
| Sku | 3.100 | | |
| Sp | 383.9 | µm | |
| Sv | 271.1 | µm | |
| Sz | 655.0 | µm | |
| Sa | 75.98 | µm | |

Slika 35. Parametri teksture površine zida s međuprolaznom temperaturom 250 °C

4.4. Strojna i toplinska obrada

Kako bi se moglo nastaviti s daljnjim ispitivanjima, strojna obrada uzoraka odnosno zidova je bila potrebna. Prema dogovoru je pomoću tračne pile izrezano šest uzoraka približnih dimenzija 40x10x10 mm. Pet uzoraka je zatim poslano na toplinsku obradu kako bi se ispitala razina austenita i ferita prije i poslije toplinske obrade.

Toplinska obrada se izvodila u komornoj (Slika 36) i vakuumskoj peći (Slika 37) tako da su četiri uzorka obrađena u komornoj peći, a jedan u vakuumskoj kako bi se ispitalo imaju li peći utjecaj na mikrostrukturu. Svaki od uzoraka u komornoj peći je imao drugačiji set parametara kako bi se ispitalo utjecaj temperature i vremena držanja na mikrostrukturu. Uzorak iz vakuumske peći grijao se na 1100 °C i držao 15 minuta, dok su četiri uzorka iz komorne peći držani na: 1000 °C i 60 minuta, 1050 °C i 60 minuta te 1100 °C i 15 minuta. Nakon vađenja iz peći uzorci su se naglo gasili u vodi.

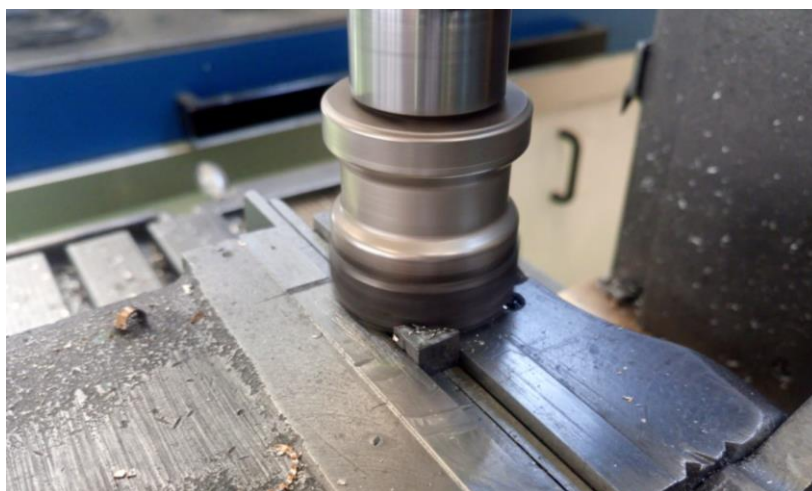


Slika 36. Komorna peć



Slika 37. Vakuumska peć

Nakon toplinske obrade ponovno se pristupilo strojnoj obradi te je svaki od šest uzoraka ponovno rezan na tračnoj pili na četiri komadića jednake duljine za daljnja ispitivanja. Na dva od četiri komadića se vršila strojna obrada glodanja (Slika 38). Na jednom komadiću uklonilo se 0,5 mm materijala dok je na drugom uklonilo 3 mm materijala kako bi se ispitala svojstva na raznim dubinama uzorka nakon toplinske obrade.



Slika 38. Proces glodanja uzoraka

4.5. Kemijski sastav

Ispitivanje kemijskog sastava izvelo se pomoću Olympus XRF uređaja koji pomoću rendgenskih zraka otkriva elemente u predmetu tako da prepozna njihovu karakterističnu energiju koju odašilju. Mjerenje je vršeno na uzorcima koji su prethodno bili strojno obrađeni, odnosno kojima je glodanjem skinuto 0,5 mm i 3 mm materijala te je također mjerena i strana bez strojne obrade, tj. na površini. Radi lakšeg praćenja ispitnih uzoraka uvedena je nomenklatura od dvije znamenke gdje prva znamenka predstavlja broj zida:

- 1 – zid s međuprolaznom temperaturom od 50 °C
- 2 – zid s međuprolaznom temperaturom od 250 °C
- 3 – zid s međuprolaznom temperaturom od 150 °C

Druga znamenka predstavlja parametre toplinske obrade:

- 1 – bez toplinske obrade
- 2 – komorna peć, 1000 °C, 60 min
- 3 – komorna peć, 1050 °C, 15 min
- 4 – vakuumska peć, 1100 °C, 15 min
- 5 – komorna peć, 1100 °C, 15 min
- 6 – komorna peć, 1050 °C, 60 min

Tablica 4 prikazuje vrijednosti pojedinih kemijskih elemenata izmjerenih na površini pojedinog uzorka.

Tablica 4. Kemijski sastav na površini uzorka

| Uzorak | Si, % | P, % | Ti, % | V, % | Cr, % | Mn, % | Fe, % | Co, % | Ni, % | Cu, % | Zn, % | Mo, % | Pb, % |
|---------|-------|-------|-------|------|--------|-------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 11 | 2,31 | - | 0,31 | 0,1 | 23,85 | 3 | 57,82 | - | 8,12 | 0,94 | 0,51 | 2,98 | 0,07 |
| 12 | 1,32 | - | 0,3 | - | 21,98 | 1,98 | 61,72 | - | 8,75 | 0,55 | 0,23 | 3,04 | 0,12 |
| 13 | 1,7 | - | 0,25 | 0,1 | 22,15 | 2,38 | 62,14 | - | 7,63 | 0,21 | 0,33 | 3,02 | 0,09 |
| 14 | 2,75 | 0,006 | 0,33 | - | 24,92 | 2,07 | 58,66 | - | 7,62 | 0,25 | - | 2,93 | 0,45 |
| 15 | 1,05 | - | - | 0,13 | 25 | 1,9 | 57,81 | - | 10,17 | 0,37 | - | 3,2 | 0,37 |
| 16 | 2,2 | - | - | - | 32,16 | 1,22 | 47,22 | 0,47 | 12,06 | 0,3 | - | 4,01 | 0,37 |
| 21 | 3,43 | - | 0,58 | 0,13 | 24,8 | 4,25 | 54,73 | - | 7,12 | 1,19 | 0,62 | 2,95 | 0,2 |
| 22 | 3,8 | - | 0,45 | 0,11 | 23,95 | 3,41 | 56,02 | - | 7,06 | 1,45 | 0,7 | 2,95 | 0,11 |
| 23 | 0,67 | - | 0,23 | 0,09 | 23,01 | 3,28 | 61,18 | - | 7,2 | 0,5 | 0,47 | 3,06 | 0,3 |
| 24 | 4,21 | - | 0,6 | 0,11 | 26,21 | 2,65 | 55,79 | - | 7,17 | 0,19 | 2,89 | 2,89 | 0,18 |
| 25 | 2,85 | 0,007 | 0,54 | - | 22,96 | 2,6 | 58,73 | - | 7,97 | 0,33 | 0,11 | 3,01 | 0,88 |
| 26 | 1,61 | - | 0,15 | - | 27,72 | 1,28 | 52,47 | 0,55 | 12,09 | 0,29 | - | 3,5 | 0,33 |
| 31 | 4,08 | - | 0,7 | 0,1 | 24,26 | 3,84 | 55,1 | - | 7,01 | 1,26 | 0,62 | 2,92 | 0,12 |
| 32 | 3,09 | - | 0,58 | 0,14 | 24,58 | 4,6 | 53,86 | - | 6,59 | 2,29 | 1,08 | 2,96 | 0,23 |
| 33 | 2,07 | - | 0,26 | - | 21,96 | 1,58 | 63,41 | - | 7,14 | 0,39 | - | 2,98 | 0,22 |
| 34 | 4,8 | - | 0,71 | - | 25,44 | 2,17 | 56,33 | - | 7,43 | 0,18 | - | 2,83 | 0,11 |
| 35 | 2,94 | 0,007 | 0,55 | - | 22,43 | 4,09 | 56,99 | - | 7,27 | 1,08 | 0,96 | 2,97 | 0,72 |
| 36 | 1,23 | - | 0,17 | 0,13 | 23,64 | 1,37 | 59,89 | - | 9,63 | 0,21 | 0,13 | 3,15 | 0,44 |
| Prosjek | 2,562 | - | - | - | 24,501 | 2,648 | 57,215 | - | 8,224 | 0,666 | - | 3,075 | 0,295 |

Tablica 5 prikazuje vrijednosti pojedinih kemijskih elemenata izmjenjenih na površini uzorka kojem je glodanjem uklonjeno 0,5 mm debljine.

Tablica 5. Kemijski sastav na 0,5 mm debljine uzorka

| Uzorak | Si, % | P, % | Ti, % | V, % | Cr, % | Mn, % | Fe, % | Ni, % | Cu, % | Mo, % | Pb, % |
|---------|-------|--------|-------|------|--------|-------|--------|-------|-------|-------|-------|
| 11 | 0,38 | 0,01 | - | 0,13 | 23,21 | 1,55 | 62,95 | 8,56 | - | 3,21 | - |
| 12 | 0,51 | 0,008 | - | 0,13 | 22,86 | 1,62 | 62,88 | 8,87 | - | 3,13 | - |
| 13 | 0,43 | 0,006 | - | 0,12 | 22,85 | 1,58 | 63,04 | 8,76 | - | 3,13 | 0,08 |
| 14 | 0,31 | 0,011 | 0,15 | 0,12 | 22,96 | 1,67 | 62,8 | 8,85 | - | 3,13 | - |
| 15 | 0,31 | 0,01 | - | 0,13 | 22,93 | 1,51 | 63,16 | 8,76 | - | 3,2 | - |
| 16 | 0,36 | 0,006 | - | 0,09 | 22,55 | 1,72 | 63,12 | 8,79 | 0,17 | 3,2 | - |
| 21 | 0,56 | 0,009 | 0,19 | - | 23,11 | 1,52 | 62,87 | 8,62 | - | 3,13 | - |
| 22 | 0,45 | 0,006 | - | - | 23,1 | 1,67 | 63,13 | 8,5 | - | 3,09 | 0,05 |
| 23 | 0,35 | 0,012 | - | 0,1 | 22,61 | 1,69 | 63,18 | 9,7 | 0,18 | 3,12 | 0,06 |
| 24 | 0,29 | 0,013 | - | - | 23,23 | 1,62 | 62,87 | 8,8 | - | 3,18 | - |
| 25 | 0,43 | 0,008 | - | 0,1 | 22,89 | 1,53 | 63,11 | 8,63 | 0,19 | 3,12 | - |
| 26 | 0,36 | 0,01 | - | 0,1 | 22,89 | 1,57 | 63,45 | 8,46 | - | 3,16 | - |
| 31 | 0,37 | - | - | - | 22,75 | 1,65 | 63,42 | 8,45 | 0,16 | 3,19 | - |
| 32 | 0,29 | 0,008 | - | 0,12 | 22,78 | 1,6 | 63,29 | 8,74 | - | 3,19 | - |
| 33 | 0,38 | 0,012 | - | 0,12 | 22,8 | 1,59 | 63,15 | 8,81 | - | 3,14 | - |
| 34 | 0,4 | 0,012 | - | - | 22,58 | 1,57 | 63,26 | 8,98 | - | 3,15 | 0,04 |
| 35 | 0,35 | 0,013 | - | 0,09 | 22,93 | 1,45 | 63,08 | 8,85 | 0,15 | 3,06 | 0,038 |
| 36 | 0,42 | 0,009 | - | - | 22,77 | 1,56 | 63,31 | 8,79 | - | 3,14 | - |
| Prosjek | 0,386 | 0,0096 | - | - | 22,878 | 1,593 | 63,115 | 8,773 | - | 3,148 | - |

Tablica 6 prikazuje vrijednosti pojedinih kemijskih elemenata izmjenjenih na površini uzorka kojem je glodanjem uklonjeno 3 mm debljine.

Tablica 6. Kemijski sastav na 3 mm debljine uzorka

| Uzorak | Si, % | P, % | V, % | Cr, % | Mn, % | Fe, % | Co, % | Ni, % | Cu, % | Mo, % | Pb, % |
|---------|-------|-------|------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 11 | 0,38 | 0,011 | 0,11 | 22,95 | 1,52 | 63,21 | - | 8,67 | - | 3,14 | - |
| 12 | 0,37 | 0,011 | 0,16 | 22,97 | 1,72 | 62,77 | - | 8,78 | - | 3,22 | - |
| 13 | 0,31 | 0,01 | - | 22,88 | 1,55 | 63,27 | - | 8,65 | 0,14 | 3,18 | - |
| 14 | 0,31 | 0,006 | 0,12 | 22,84 | 1,56 | 63,25 | - | 8,73 | - | 3,18 | - |
| 15 | 0,41 | 0,011 | 0,11 | 22,94 | 1,56 | 63,18 | - | 8,63 | - | 3,15 | - |
| 16 | 0,47 | 0,015 | 0,14 | 23,19 | 1,63 | 62,64 | - | 8,62 | 0,16 | 3,15 | - |
| 21 | 0,44 | 0,012 | 0,09 | 22,87 | 1,55 | 62,69 | 0,51 | 8,7 | - | 3,1 | 0,031 |
| 22 | 0,34 | 0,007 | - | 22,98 | 1,46 | 63,51 | - | 8,51 | - | 3,19 | - |
| 23 | 0,35 | 0,012 | 0,16 | 22,99 | 1,54 | 63,25 | - | 8,58 | - | 3,09 | 0,03 |
| 24 | 0,39 | 0,01 | - | 23,07 | 1,62 | 63,05 | - | 8,66 | - | 3,19 | - |
| 25 | 0,38 | 0,01 | 0,08 | 22,75 | 1,5 | 63,33 | - | 8,61 | 0,19 | 3,16 | - |
| 26 | 0,41 | 0,012 | - | 22,88 | 1,68 | 63,26 | - | 8,55 | - | 3,21 | - |
| 31 | 0,38 | 0,01 | 0,1 | 23,04 | 1,47 | 62,99 | - | 8,67 | 0,16 | 3,17 | - |
| 32 | 0,42 | 0,015 | 0,14 | 22,8 | 1,6 | 62,91 | - | 8,98 | - | 3,14 | - |
| 33 | 0,38 | 0,008 | - | 23,04 | 1,53 | 63,14 | - | 8,71 | - | 3,2 | - |
| 34 | 0,33 | 0,008 | - | 23,06 | 1,54 | 63,17 | - | 8,7 | - | 3,19 | - |
| 35 | 0,38 | 0,017 | 0,11 | 22,66 | 1,55 | 63,12 | - | 8,98 | - | 3,18 | - |
| 36 | 0,36 | 0,01 | 0,09 | 22,83 | 1,49 | 62,94 | - | 8,84 | - | 3,09 | 0,34 |
| Prosjek | 0,378 | 0,011 | - | 22,93 | 1,559 | 63,093 | - | 8,698 | - | 3,163 | - |

Tablica 7 prikazuje kemijski sastav dodatnog materijala, odnosno žice za zavarivanje.

Tablica 7. Kemijski sastav žice za zavarivanje

| Si, % | Ti, % | Cr, % | Mn, % | Fe, % | Ni, % | Mo, % |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 0,28 | 0,13 | 22,69 | 1,36 | 63,31 | 9,08 | 3,15 |

4.6. Makrostruktura

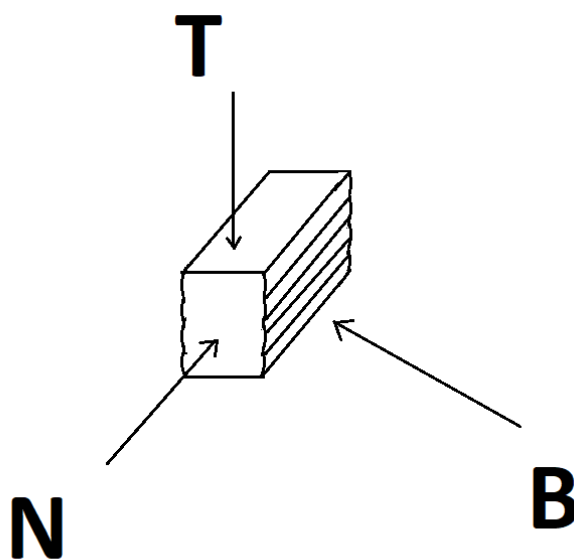
Prethodno izrezani uzorci za analizu makrostrukture podvrgnuti su ručnom brušenju. Za potrebe brušenja koristili su se brusni papiri granulacije P60, P80, P120, P180, P280 i P320 kako bi se otklonili tragovi rezanja tračnom pilom. Nakon brušenja pristupilo se elektrokemijskom nagrivanju uzoraka. Nagrivanje se vršilo u deset postotnoj oksalnoj otopini 60 s uz napon od 10 V. Slika 39 prikazuje rezultate makrostrukture za zidove izrađene različitim međuprolaznim temperaturama.



Slika 39. Prikaz makrostrukture za zidove s međuprolaznom temperaturom: lijevo – 50 °C, sredina – 150 °C, desno – 250 °C

4.7. Mikrostruktura

Za potrebe analize mikrostrukture korištena su četiri komadića od svakog prethodno odrezanog uzorka. Svaki od komadića analizirao se iz drugog pogleda (Slika 40) odnosno gledao se iz nacрта (N), tlocrta (T) te dva bokocrta gdje je bio odstranjen materijal za 0,5 mm (B1) odnosno 3 mm (B2).



Slika 40. Orijentacija komadića za analizu

Prije oblaganja polimernom smjesom na uzorke se pomoću vrućeg lijepila zalijepila žica za elektrokemijsko nagrivanje jer polimerna smjesa nije vodljiva. Nakon što su komadići obloženi polimernom smjesom pristupilo se brušenju s brusnim papirima granulacije P120, P320, P500, P1000, P2400, P4000 uz brzinu brušenja od 300 min^{-1} i ručnu silu pritiska te se koristilo hlađenje vodom. Poslije brušenja nastupilo je poliranje uzoraka u dva dijela. U oba dijela vrijeme poliranja iznosilo je dvije minute, uz silu od 30 N i brzinu brušenja od 150 min^{-1} . U prvom dijelu korištena je dijamantna pasta od $3 \mu\text{m}$, a u drugom dijelu dijamantna pasta od $1 \mu\text{m}$ te se također koristio i lubrikant. Parametri nagrivanja su isti kao i kod makrostrukture. Slika 41 prikazuje jedan od kalupa nakon cijelog postupka izrade.

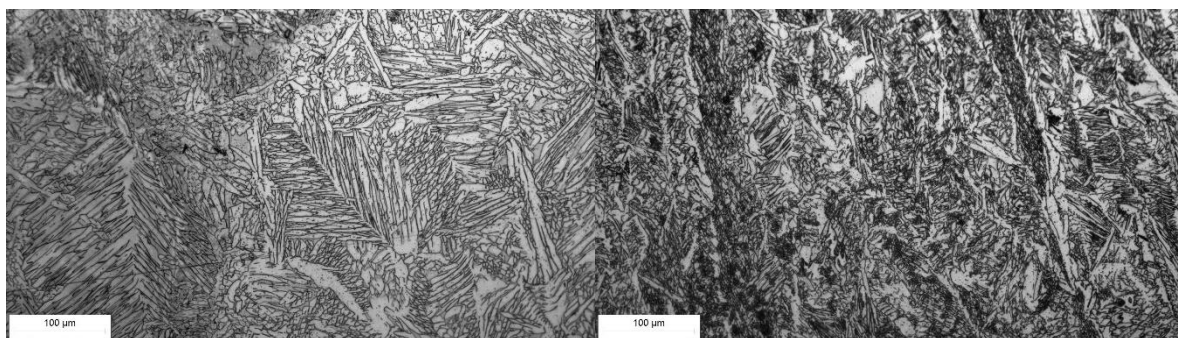
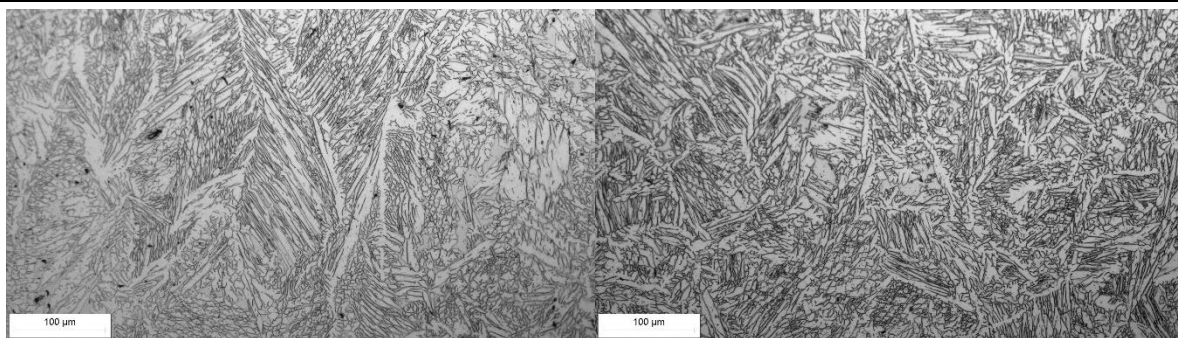


Slika 41. Kalup 13 nakon nagrivanja

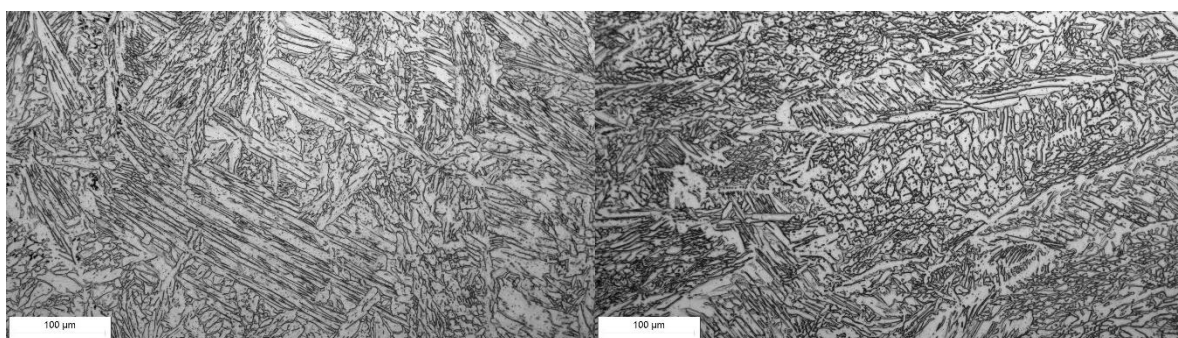
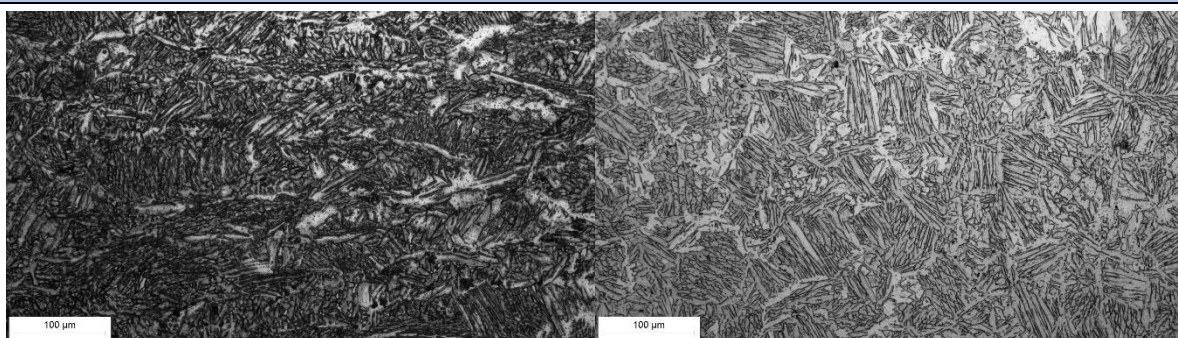
Uzorci su promatrani svjetlosnim mikroskopom Olympus GX51 pri povećanjima od 50, 100 i 200 puta. Kod uzorka 23 se dogodila greška da niti jedan komadić nije bio nagriven te kod uzorka 24 jedan komadić nije nagriven. Tablica 8 prikazuje rezultate uzoraka za analizu mikrostrukture snimljenih svjetlosnim mikroskopom pri povećanju od 200 puta.

Tablica 8. Rezultati uzoraka mikrostrukture

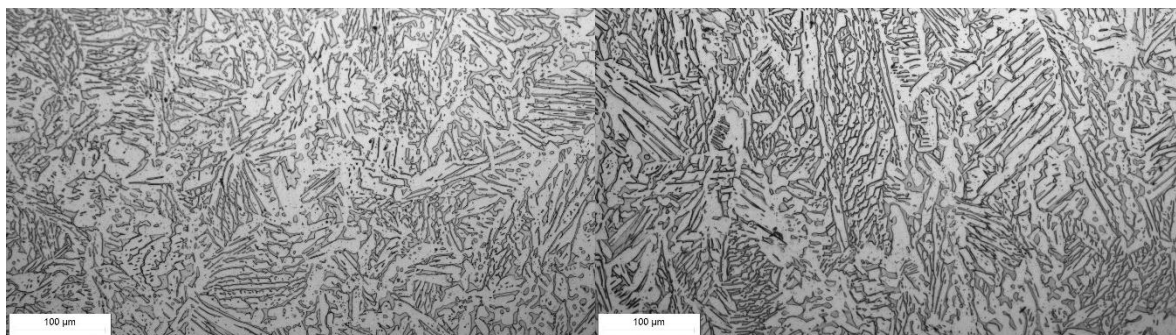
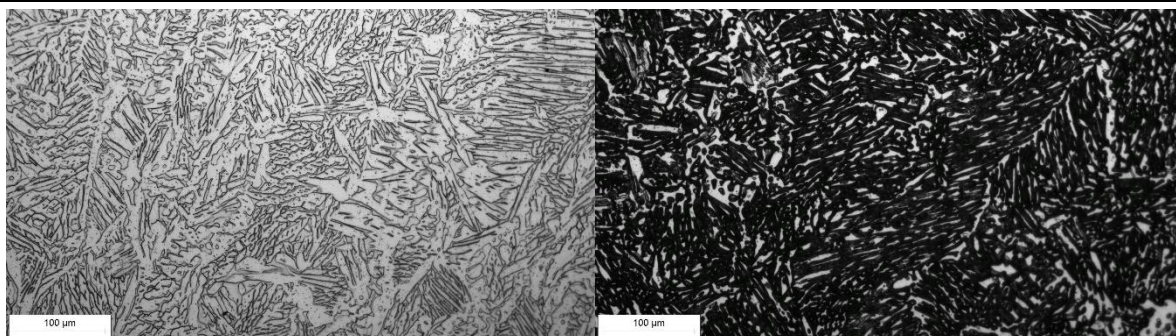
Uzorak 11: gore lijevo – N, gore desno – T, dolje lijevo – B1, dolje desno – B2



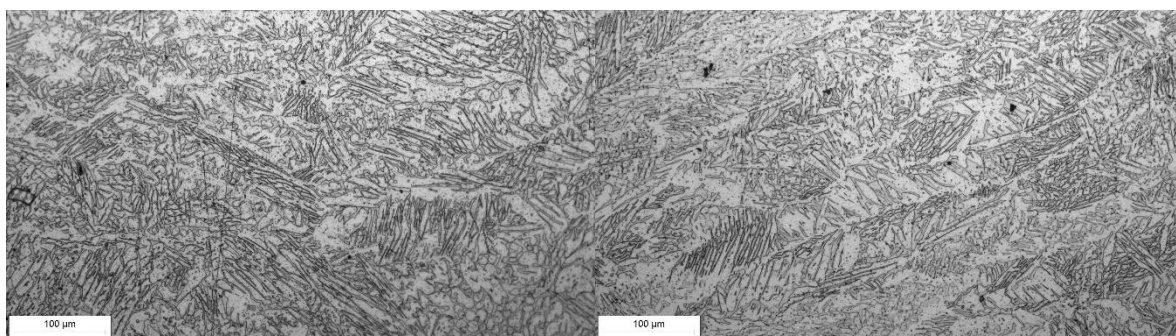
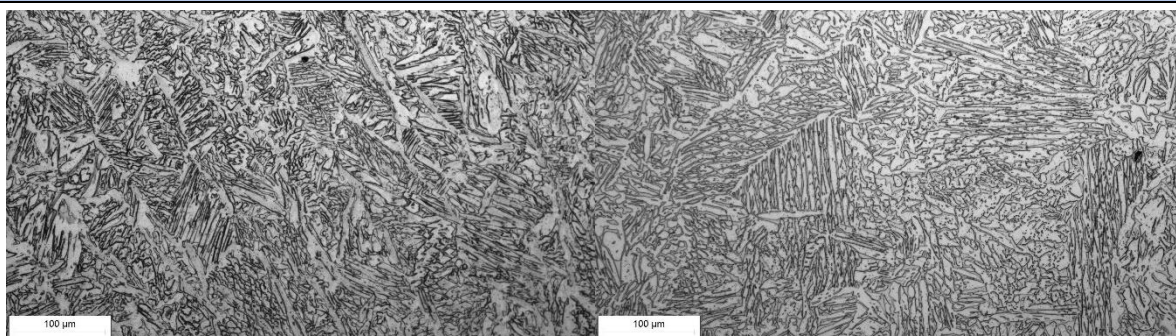
Uzorak 13: gore lijevo – N, gore desno – T, dolje lijevo – B1, dolje desno – B2



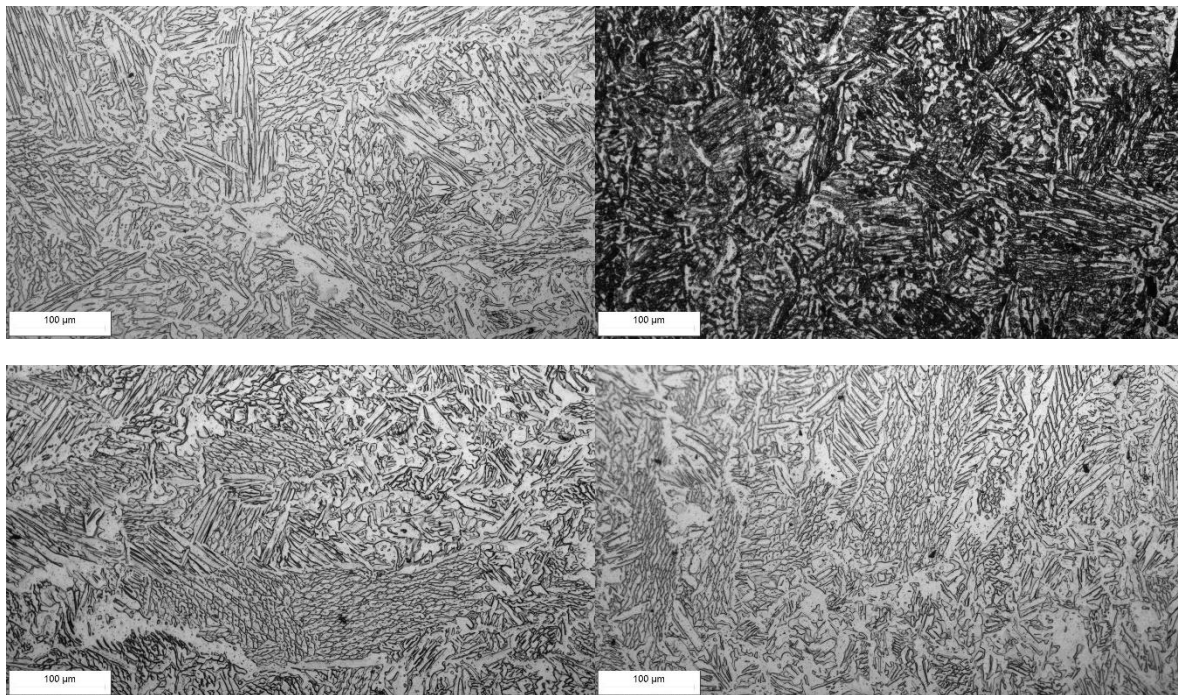
Uzorak 14: gore lijevo – N, gore desno – T, dolje lijevo – B1, dolje desno – B2



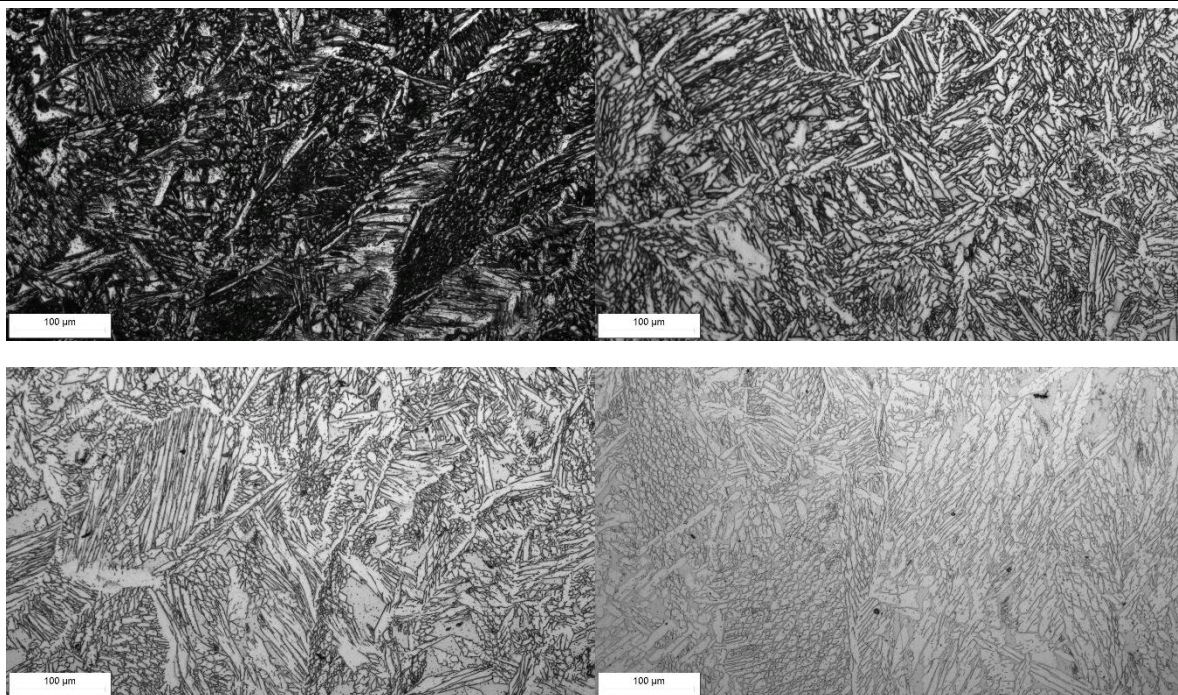
Uzorak 15: gore lijevo – N, gore desno – T, dolje lijevo – B1, dolje desno – B2



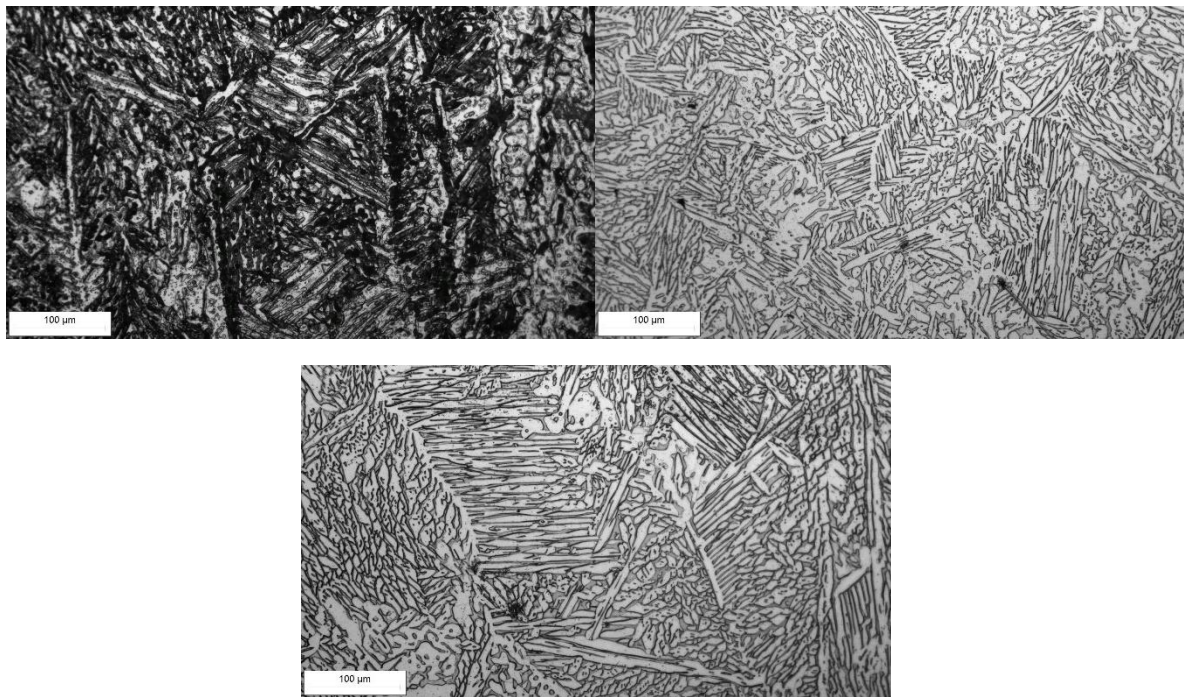
Uzorak 16: gore lijevo – N, gore desno – T, dolje lijevo – B1, dolje desno – B2



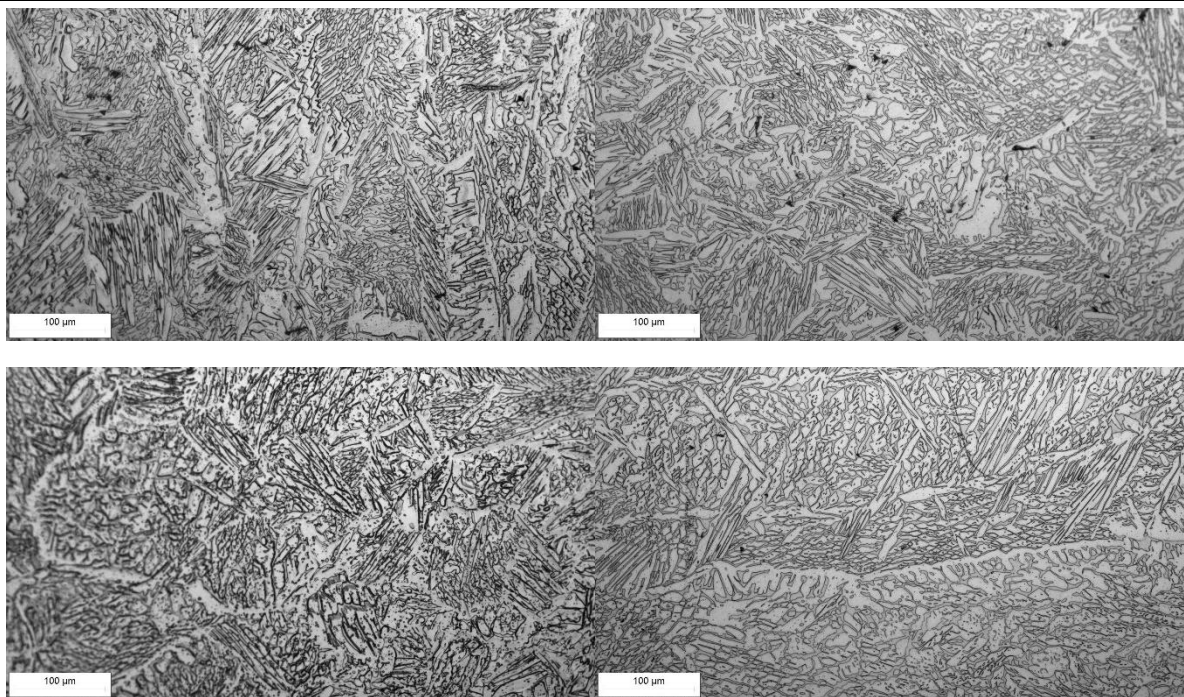
Uzorak 21: gore lijevo – N, gore desno – T, dolje lijevo – B1, dolje desno – B2



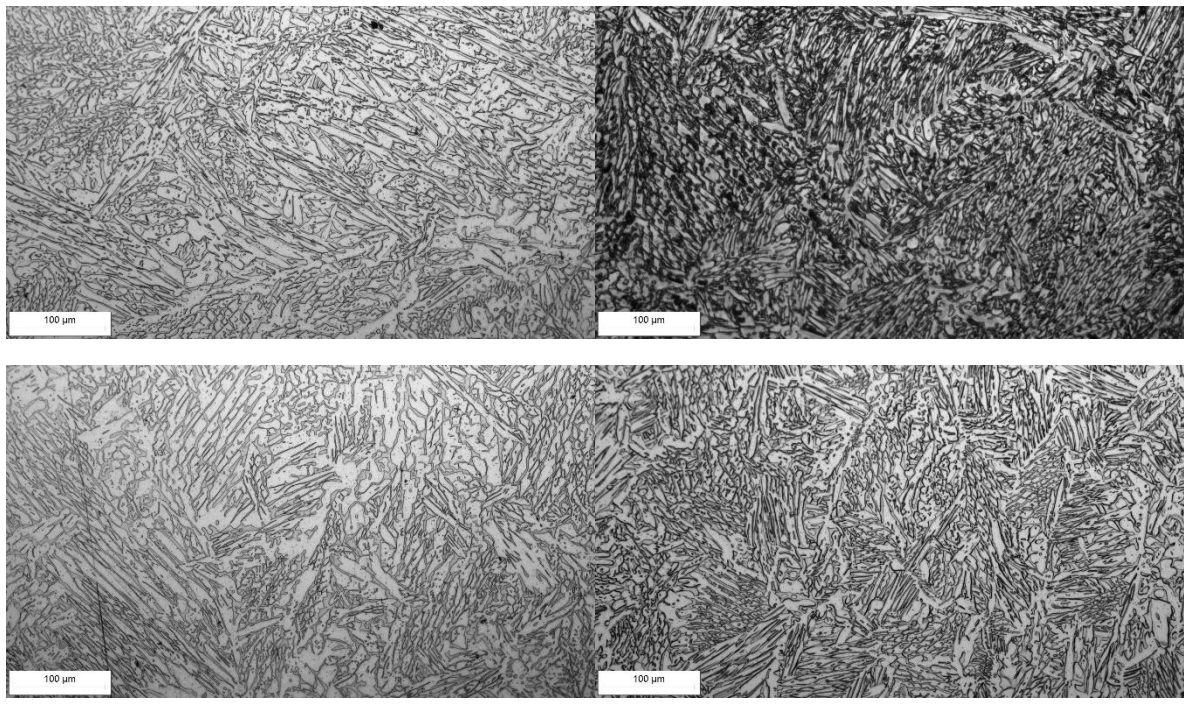
Uzorak 24: gore lijevo – N, gore desno – T, dolje – B1



Uzorak 25: gore lijevo – N, gore desno – T, dolje lijevo – B1, dolje desno – B2

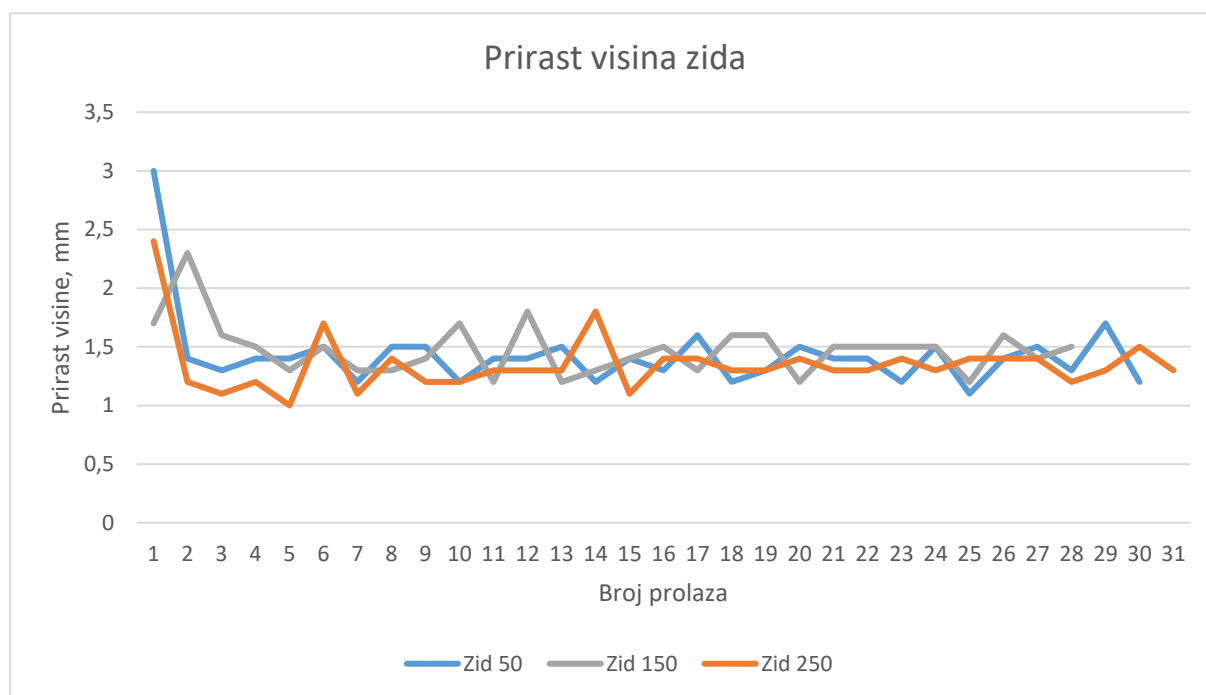


Uzorak 26: gore lijevo – N, gore desno – T, dolje lijevo – B1, dolje desno – B2



5. ANALIZA REZULTATA

Mjerenje visine vršilo se samo na sredini zida. Izračunata su dva prosjeka za prirast visine zidova, jedan koji je uključivao sve prolaze i drugi koji je u izračunu izbacio prvih par prolaza gdje dolazi do miješanja s osnovnim materijalom i dok se proces ne ustabili. Iz navedenih podataka može se vidjeti kako zid s međuprolaznom temperaturom od 150 °C imao najveći prirast i do željene visine je došao u manje prolaza od preostala dva zida. Slika 42 prikazuje graf s vrijednostima prirasta visine zidova.

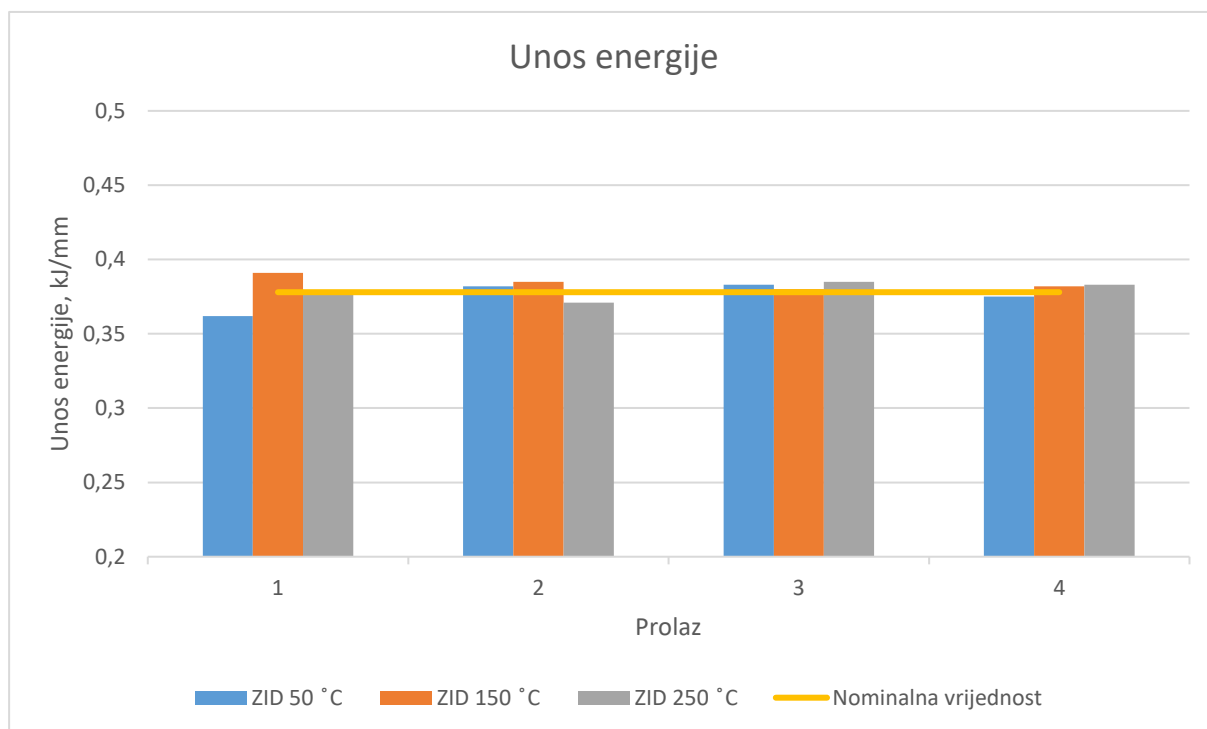


Slika 42. Graf prirasta visine zidova

Iako je zid s međuprolaznom temperaturom od 150 °C imao statistički najveću vrijednost prirasta visine što se podudara s preporučenim intervalom od 150 °C do 250 °C, iz grafa se može vidjeti da u usporedbi s preostala dva zida to nije značajna razlika. Zid s međuprolaznom temperaturom od 250 °C ima najmanju vrijednost prirasta vrlo vjerojatno zbog visoke temperature sloja na koji se zavaruje te hlađenje traje dulje i talina se više razlijeva dok zid s međuprolaznom temperaturom od 50 °C ima dosta visoku vrijednost prirasta jer je podloga hladnija te se talina ne razlijeva.

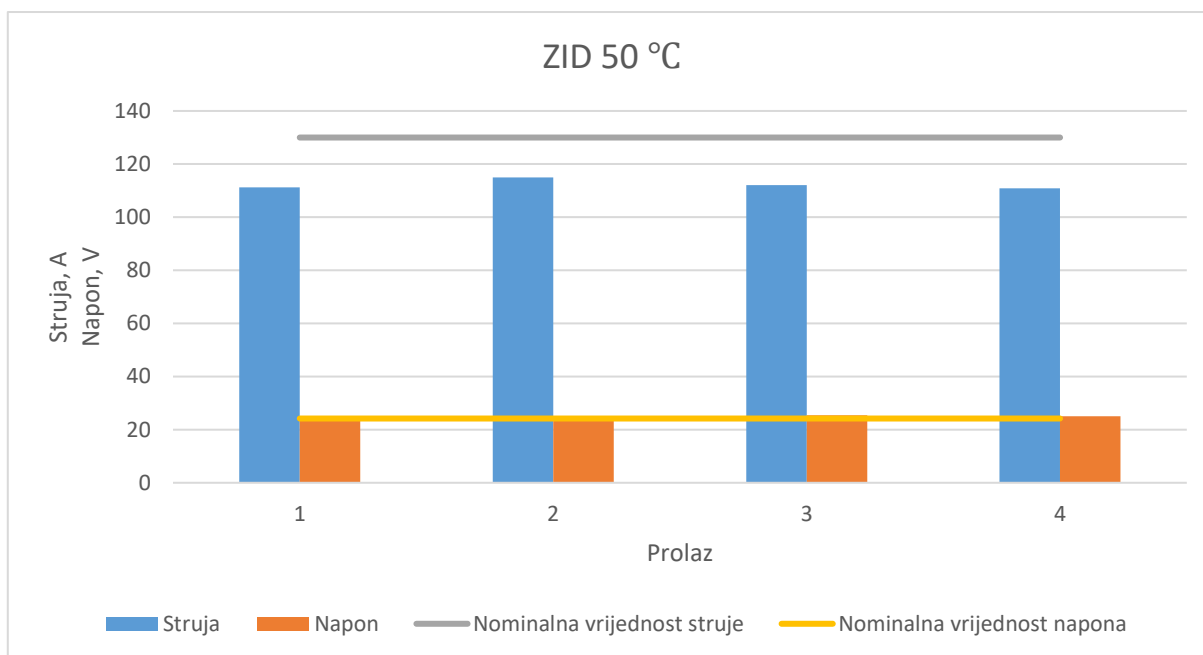
5.1. Analiza unosa energije i dinamičke karakteristike

Grafovi dinamičke karakteristike prikazani u poglavlju 4.2 prikazuju karakterističan izgled krivulje struje i napona impulsnog luka te se onda može reći kako je doista korišten taj način prijenosa metala prilikom aditivnog zavarivanja. Unosi energije (Slika 43) svakog od prolaza vrlo su blizu unosu energije dobivenog pomoću nominalnih vrijednosti što govori o stabilnosti procesa.



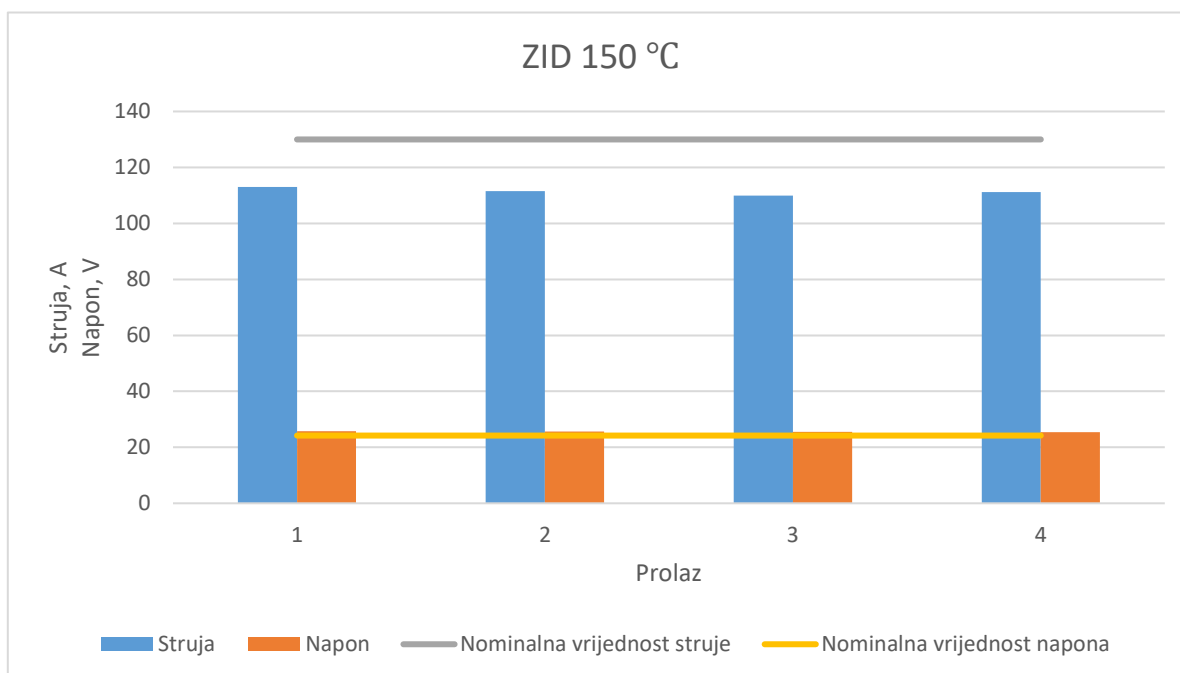
Slika 43. Unos energije za svaki od zidova

Prilikom zavarivanja stvarne vrijednosti struje i napona su odstupale od vrijednosti zadanih u uređaju. Slika 44 prikazuje vrijednosti prosječne struje i napona u usporedbi s nominalnim vrijednostima za zid s međuprolaznom temperaturom od 50 °C.

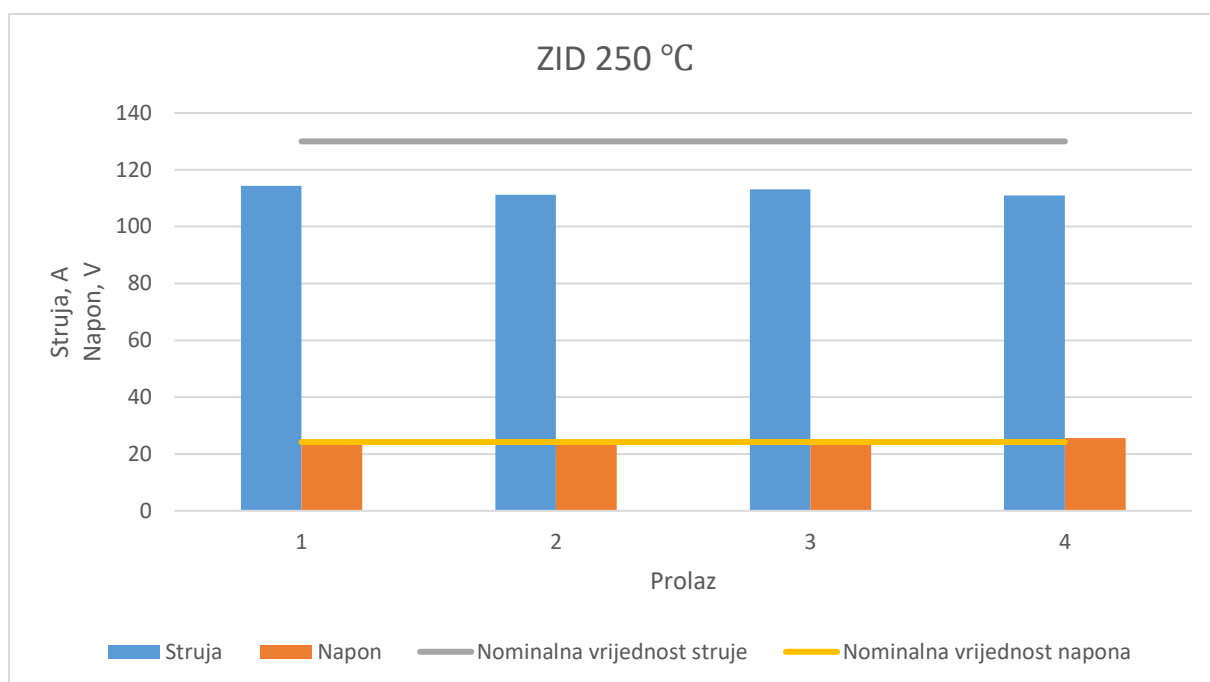


Slika 44. Usporedba vrijednosti struje i napona za ZID 50 °C

Vrijednosti napona imaju manja odstupanja od nominalne vrijednosti te maksimalno odstupanje iznosi 4,8 % dok vrijednosti struje imaju veća odstupanja, skoro i do 20 A, što je 14,8 %. Kod zida s međuprolaznom temperaturom od 150 °C (Slika 45) odstupanje napona ide do 6,4 %, a struje do 15,4 % dok kod zida s međuprolaznom temperaturom od 250 °C (Slika 46) odstupanje napona ide do 5,7 %, a struje do 14,6 %.



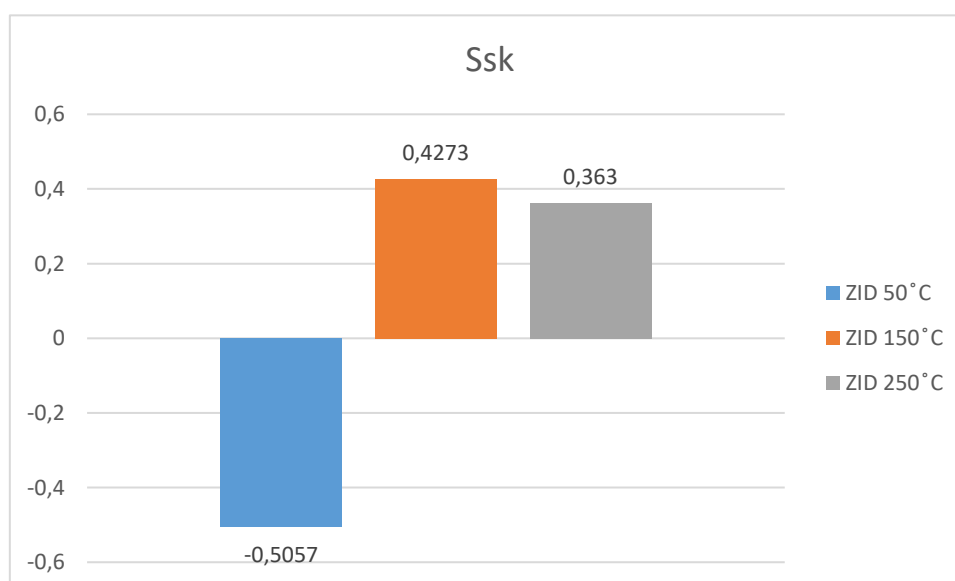
Slika 45. Usporedba vrijednosti struje i napona za ZID 150 °C



Slika 46. Usporedba vrijednosti struje i napona za ZID 250 °C

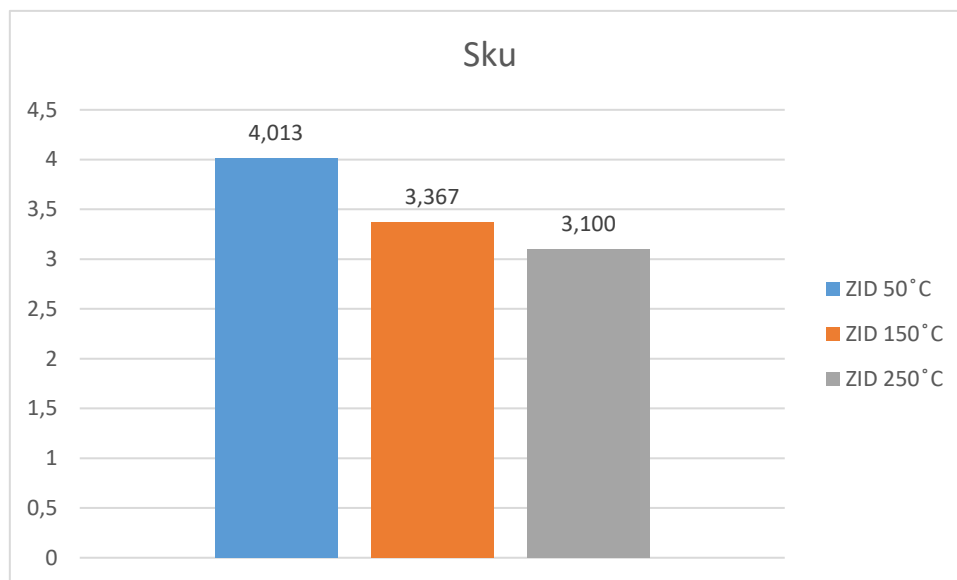
5.2. Analiza parametara teksture površine

Analizom parametara dobivenih skeniranjem uzoraka može se vidjeti kako zid s međuprolaznom temperaturom od 50 °C ima negativnu vrijednost parametra S_{sk} što znači da po površini tog uzorka prevladavaju udubine. Zidovi s međuprolaznim temperaturama od 150 °C i 250 °C imaju pozitivne vrijednosti što znači da na površini prevladavaju vrhovi. Slika 47 prikazuje dijagram vrijednosti parametra S_{sk} za sve zidove.



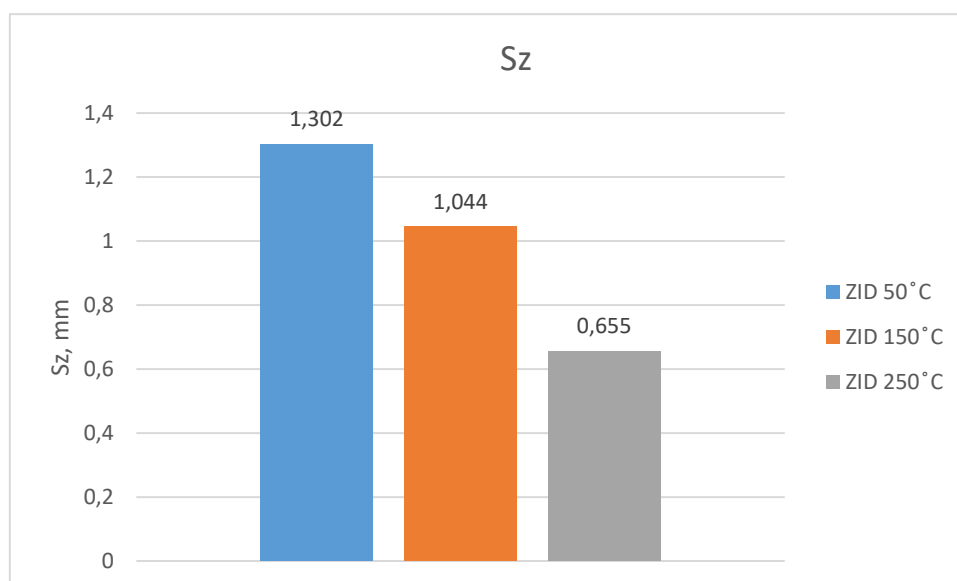
Slika 47. Dijagram vrijednosti parametra S_{sk}

Vrijednosti parametra S_{ku} za sve zidove su iznad vrijednosti 3 što ukazuje daje na površini izraženost iznimno visokih vrhova ili dubokih dolina iako zid s međuprolaznom temperaturom od 250 °C ima vrijednost blizu 3 što ukazuje na normalnu distribuciju vrhova i dolina. Slika 48 prikazuje dijagram vrijednosti parametra S_{ku} za sve zidove.



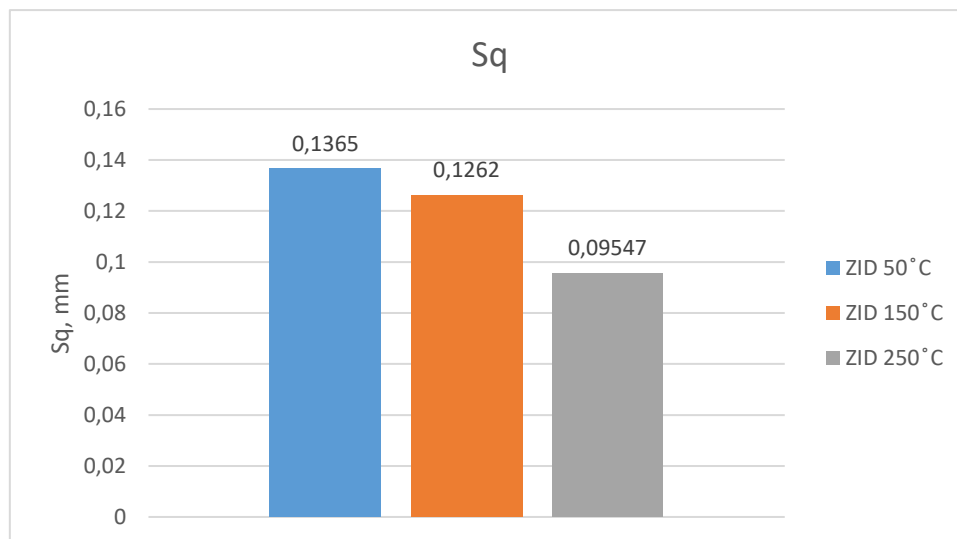
Slika 48. Dijagram vrijednosti parametra S_{ku}

Parametar S_z ukazuje na maksimalnu visinu promatrane površine. Iz rezultata se može vidjeti kako zid s međuprolaznom temperaturom od 50 °C ima najveću vrijednost parametra S_z dok zid s međuprolaznom temperaturom od 250 °C ima najmanju vrijednost parametra. Slika 49 prikazuje dijagram vrijednosti parametra S_z za sve zidove.



Slika 49. Dijagram vrijednosti parametra S_z

Parametar S_q predstavlja srednju kvadratnu visinu neravnina te se koristi za strojno neobrađene površine za razliku od parametra S_a koji se koristi za strojno obrađene površine. Iz rezultata je vidljivo kako zid s međuprolaznom temperaturom od 50 °C ima najveće vrijednosti dok zid s međuprolaznom temperaturom od 250 °C ima najmanje vrijednosti. Slika 50 prikazuje dijagram vrijednosti parametra S_q za sve zidove.



Slika 50. Dijagram vrijednosti parametra S_q

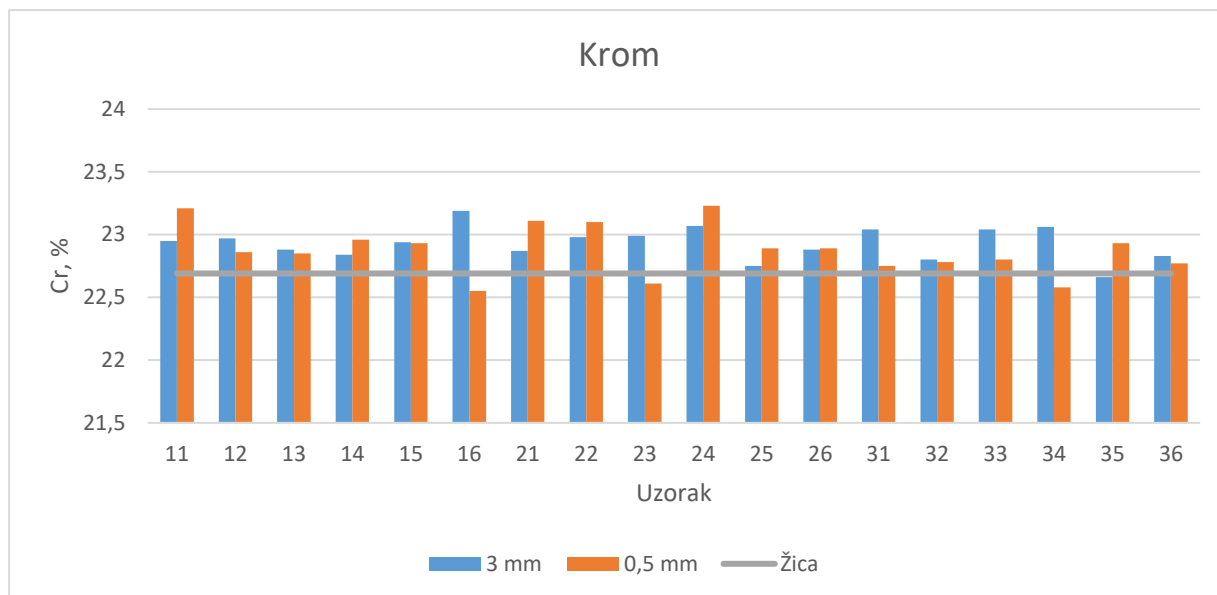
Analizom svih parametara može se ustanoviti kako zid s međuprolaznom temperaturom od 250 °C ima najbolje vrijednosti te najbolju teksturu površine. Najmanja vrijednost maksimalne visine i srednjeg kvadratnog odstupanja te vrijednost parametra S_{ku} blizu 3 govori kako je tekstura površine ovog zida poprilično ravna. Uzrok ovih vrijednosti mogla bi biti međuprolazna temperatura od 250 °C gdje je došlo do ljepšeg razlijevanja taline.

5.3. Analiza kemijskog sastava

Analiza rezultata ispitivanja rezultata kemijskog sastava nije dala poveznicu između peći te između temperature i vremena držanja. Rezultati mjerenja na samoj površini uzorka dali su šarolik raspon vrijednosti kemijskih elemenata. Jedan od razloga tome je onečišćena površina uzorka na kojoj ima raznih nečistoća nastalih zagrijavanjem u pećima. Uklanjanjem 0,5 mm materijala dolazi se do značajno drugačijih vrijednosti nego na površini i te vrijednosti su također stabilne gdje nema velikih odstupanja. Daljnjim uklanjanjem 3 mm materijala rezultati postaju još stabilniji uz još manja odstupanja.

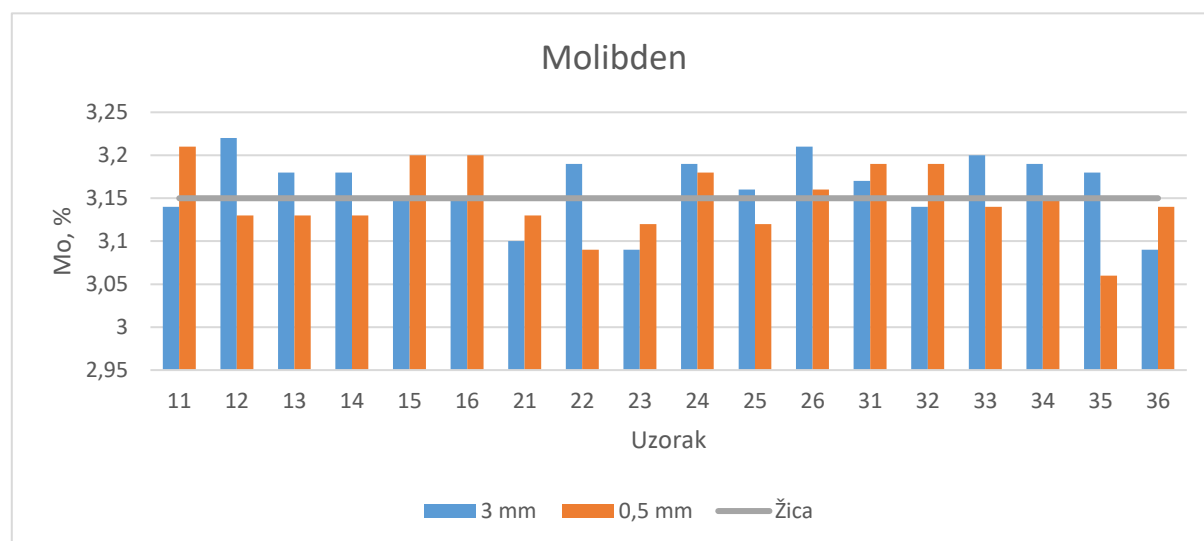
Udjeli kemijskih elemenata zadovoljavaju vrijednosti propisane za dupleks čelike, tako je udio silicija ispod 1 %, krom se nalazi između 21 % i 23 %, mangan je ispod 2 % te je molibden između 2,5 % i 3,5 %. Iako je većina mjerenja unutar granica par mjerenja prekoračuje granicu.

Razlog tome može biti mjerena netočnost uređaja pogotovo kada se vršilo samo jedno mjerenje. Također uređaj nema mogućnost mjerenja dušika odnosno njegovog spektra. Dva bitna kemijska elementa za korozivsku postojanost dupleks čelika su krom i molibden. Slika 51 prikazuje udio kroma kod uzoraka gdje je uklonjeno 0,5 mm materijala i 3 mm te udio kroma kod žice za zavarivanje.



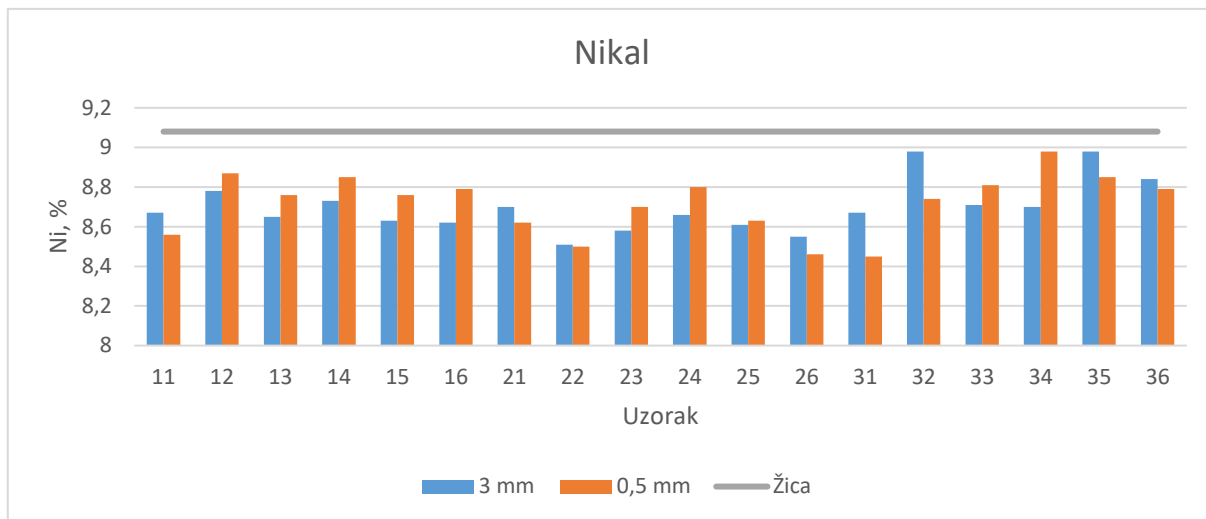
Slika 51. Udio kroma

Na dijagramu se vidi kako je udio kroma kod uzoraka veći nego kod žice za zavarivanje. Povećani udio kroma je možda nastao nakon toplinske obrade naglim hlađenjem u vodi. Slika 52 prikazuje udio molibdena kod uzoraka gdje je uklonjeno 0,5 mm materijala i 3 mm te udio molibdena kod žice za zavarivanje.



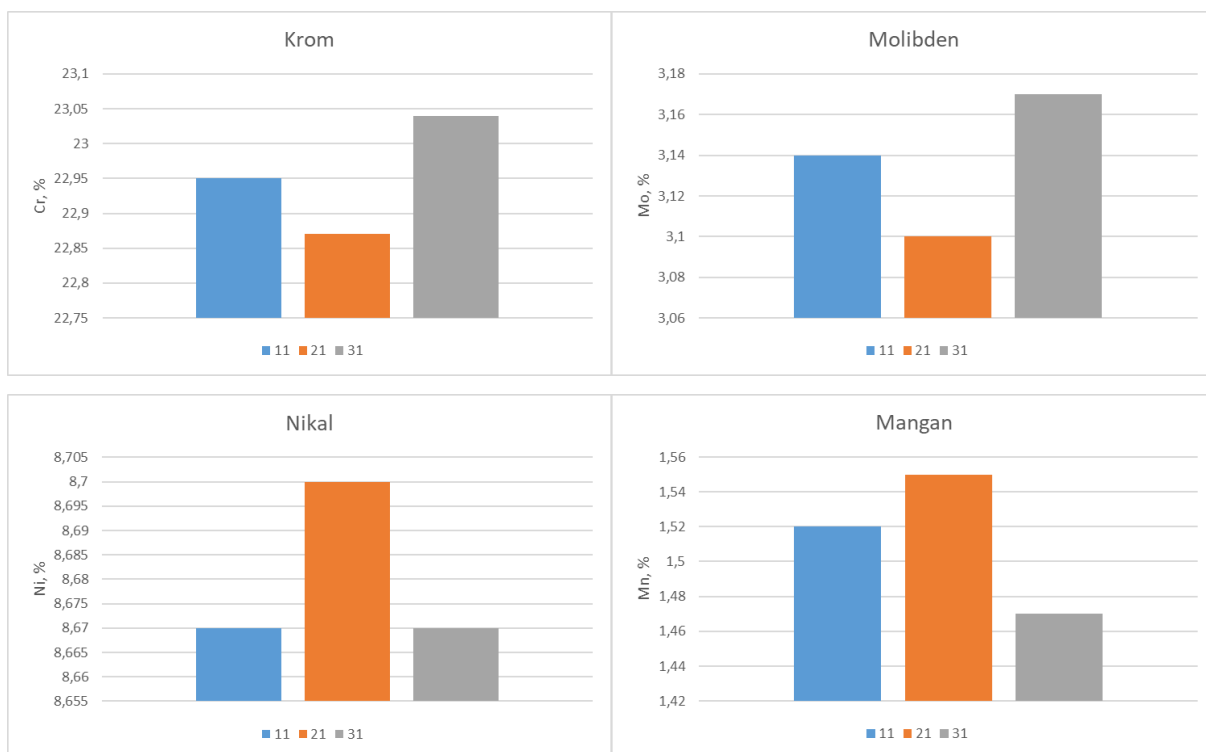
Slika 52. Udio molibdena

Na dijagramu se može vidjeti kako nije došlo do promjene udjela molibdena nakon toplinske obrade te da vrijednosti variraju oko vrijednosti izmjerene kod žice za zavarivanje. Slika 53 prikazuje udio molibdena kod uzoraka gdje je uklonjeno 0,5 mm materijala i 3 mm te udio nikla kod žice za zavarivanje.



Slika 53. Udio nikla

Iz dijagram se može vidjeti kako je dio nikla ispario prilikom izrade zidova i tijekom toplinske obrade u pećima. Slika 54 prikazuje udio pojedinih kemijskih elemenata kod uzoraka bez toplinske obrade.



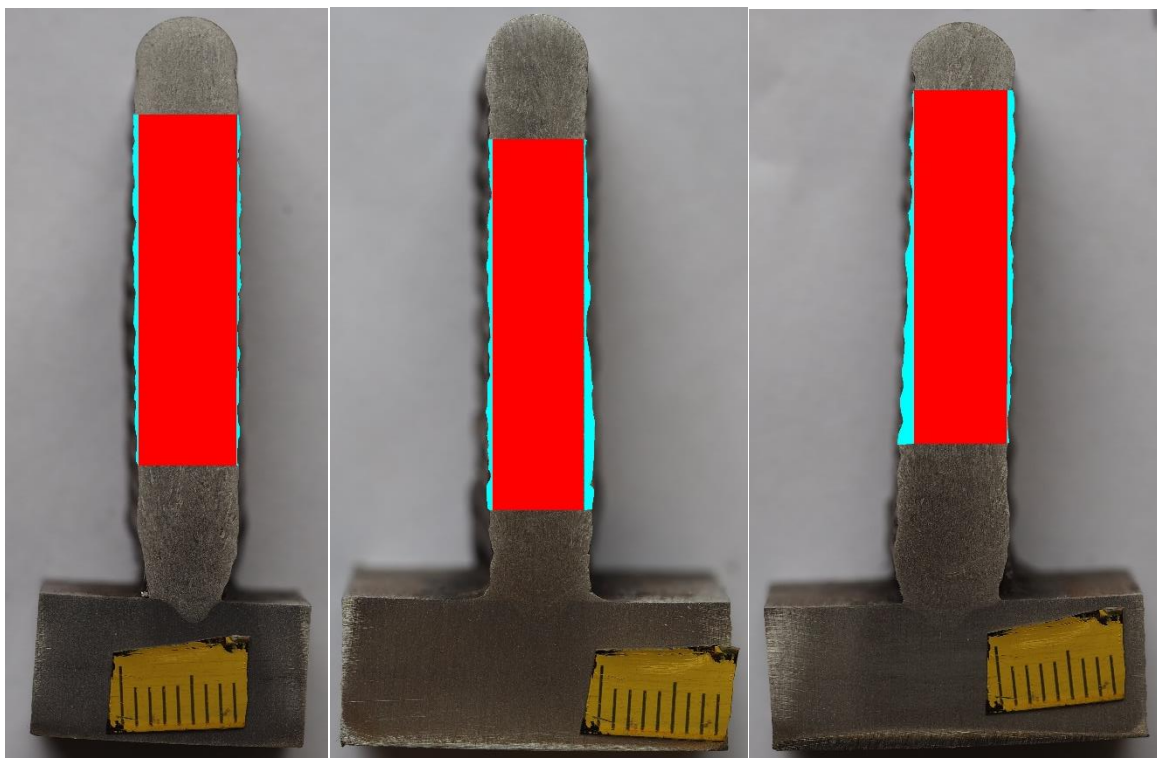
Slika 54. Udio kemijskih elemenata uzoraka bez toplinske obrade

Iz navedenih dijagram može se vidjeti kako uzorci s međuprolaznom temperaturom od 250 °C imaju najmanji udio kroma i molibdena dok uzorci s međuprolaznom temperaturom od 150 °C imaju najveći udio. Kod nikla i mangan dolazi do obrnute situacije gdje uzorci s međuprolaznom temperaturom od 250 °C imaju najveći udio dok uzorci s međuprolaznom temperaturom od 150 °C imaju najmanji udio.

5.4. Analiza makrostrukture

Makrostrukturnom analizom nisu pronađene nikakve greške poput uključaka ili poroznosti u strukturi zidova te se vidi da je struktura homogena. Penetracija u osnovni materijal je malena i jasno vidljiva. Razlika između zidova je skoro nepostojeća osim možda u nakrivljenosti do čega dolazi zbog postupka izrade.

Slike makrostrukture poslužile su i za izračun buy-to-fly omjera. Za mjerenje površine koristio se program ImageJ pomoću kojeg se ucrtao pravokutnik visine 25 mm unutar granica zida te su se onda izmjerile površine koje bi se trebale odstraniti strojnom obradom. Slika 55 prikazuje način računanja BTF omjera, gdje je crveni pravokutnik koristan materijal, a plava površina je površina koja će se strojno odstraniti.



Slika 55. Prikaz računanja BTF omjera

Na slici, lijevi zid je izrađen s međuprolaznom temperaturom od 50 °C te pomoću izračuna došlo se do BTF omjera od 1,07. Srednji zid je izrađen s međuprolaznom temperaturom od

150 °C te računski BTF omjer iznosi 1,1 dok je desni zid izrađen s međuprolaznom temperaturom od 250 °C i njegov BTF omjer iznosi 1,13 te je on ponešto lošiji zbog nakrivljenosti zida.

5.5. Analiza mikrostrukture

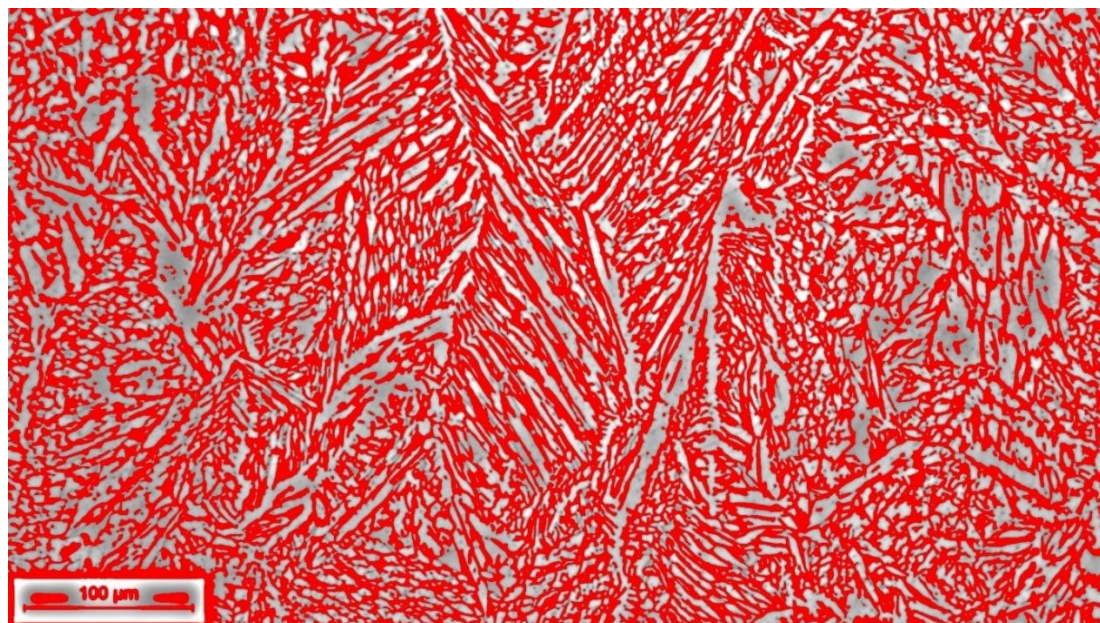
Promatrajući slike dobivene pomoću svjetlosnog mikroskopa može se vidjeti kako postoji trend orijentacije zrna. Kod pogleda T orijentacija zrna je uglavnom okomita dok je kod pogleda B1 i B2 pretežito vodoravna orijentacija. Pogled N ima nepravilne oblike zrna, tj. nisu duguljasti što nam ukazuje da se gleda u profil odsječenog zrna. Na temelju ovih opažanja možemo reći da orijentacija zrna prati smjer zavarivanja. Može se primijetiti kako oblik zrna nakon toplinske obrade nisu jako plosnata kao bez nje već su se malo raširila. Pomoću ImageJ programa probalo se procijeniti veličinu zrna iz B1 pogleda tako što se uzela uvijek ista površina i izmjerio broj zrna unutar površine. Tablica 9 prikazuje broj zrna unutar određene površine za svaki uzorak pomoću kojih se procijenila veličina zrna.

Tablica 9. Broj zrna potreban za procjenu veličine zrna

| Uzorak | 11 | 13 | 14 | 15 | 16 | 21 | 24 | 25 | 26 |
|-----------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| Broj zrna | 51 | 47 | 29 | 38 | 56 | 66 | 32 | 44 | 29 |

Iz rezultata se može primijetiti kako je najveći broj zrna kod uzoraka bez toplinske obrade što znači da je veličina zrna veća nego kod uzoraka koji su podvrgnuti toplinskoj obradi.

Pomoću slika mikrostrukture i ImageJ programa izračunao se udio austenita i ferita. Slika 56 prikazuje kako izgleda računanje udjela austenita i ferita.



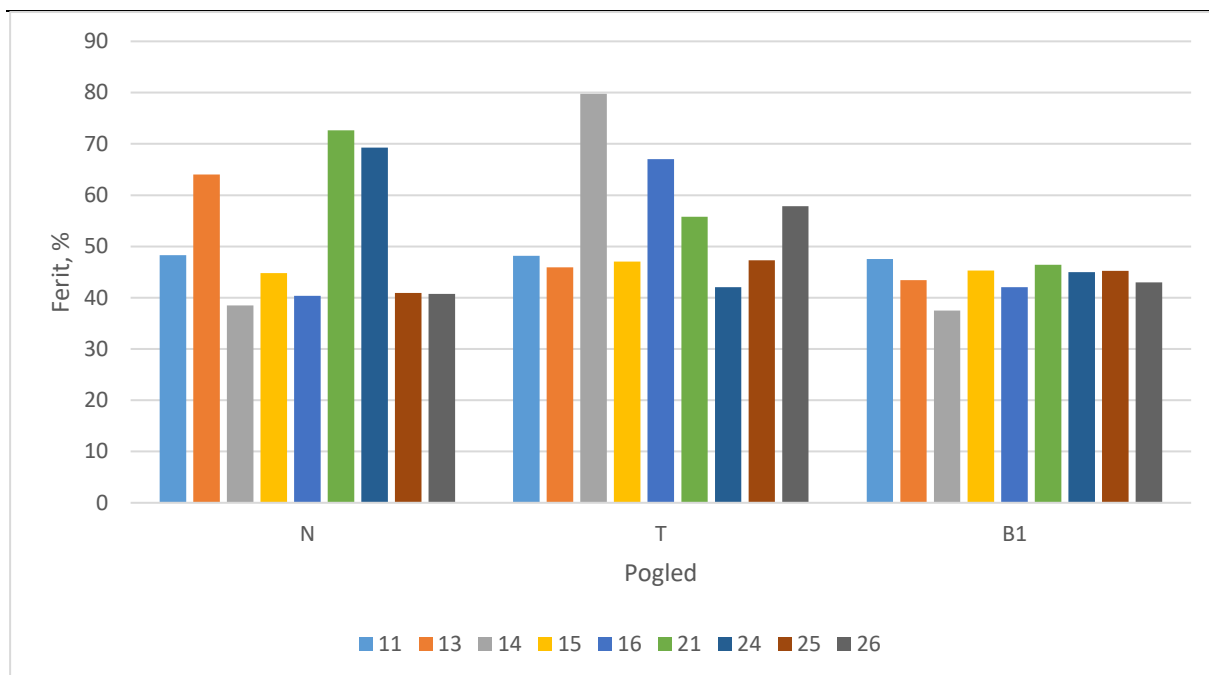
Slika 56. Računanje udjela austenita i ferita pomoću ImageJ programa

Princip rada je da pomoću programa odredimo granicu između svjetlije i tamnije boje te tamnu boju obojimo u crveno i onda izračunamo postotak crvene boje na slici. Crveno obojeno je ferit, a svjetlije je austenit. Tablica 10 prikazuje računski dobiven udio između austenita i ferita za svaki uzorak i svaki pogled.

Tablica 10. Udio austenita i ferita po uzorcima

| Uzorak | 11 | | | | 13 | | | | 14 | | | |
|-------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Pogled | N | T | B1 | B2 | N | T | B1 | B2 | N | T | B1 | B2 |
| Austenit, % | 51,7 | 51,8 | 52,43 | 43,08 | 36 | 54,05 | 56,6 | 50,89 | 61,5 | 20,22 | 62,51 | 60,93 |
| Ferit, % | 48,3 | 48,2 | 47,57 | 56,92 | 64 | 45,95 | 43,4 | 49,11 | 38,5 | 79,78 | 37,49 | 39,07 |
| Uzorak | 15 | | | | 16 | | | | 21 | | | |
| Pogled | N | T | B1 | B2 | N | T | B1 | B2 | N | T | B1 | B2 |
| Austenit, % | 55,23 | 52,93 | 54,68 | 57,19 | 59,62 | 32,99 | 57,96 | 59,68 | 27,36 | 44,22 | 53,58 | 56,44 |
| Ferit, % | 44,77 | 47,07 | 45,32 | 42,81 | 40,38 | 67,01 | 42,04 | 40,32 | 72,64 | 55,78 | 46,42 | 43,56 |
| Uzorak | 24 | | | | 25 | | | | 26 | | | |
| Pogled | N | T | B1 | B2 | N | T | B1 | B2 | N | T | B1 | B2 |
| Austenit, % | 30,73 | 57,96 | 55,03 | - | 59,07 | 52,71 | 54,77 | 55,79 | 59,24 | 42,15 | 57,01 | 54,29 |
| Ferit, % | 69,27 | 42,04 | 44,97 | - | 40,93 | 47,29 | 45,23 | 44,21 | 40,76 | 57,85 | 42,99 | 45,71 |

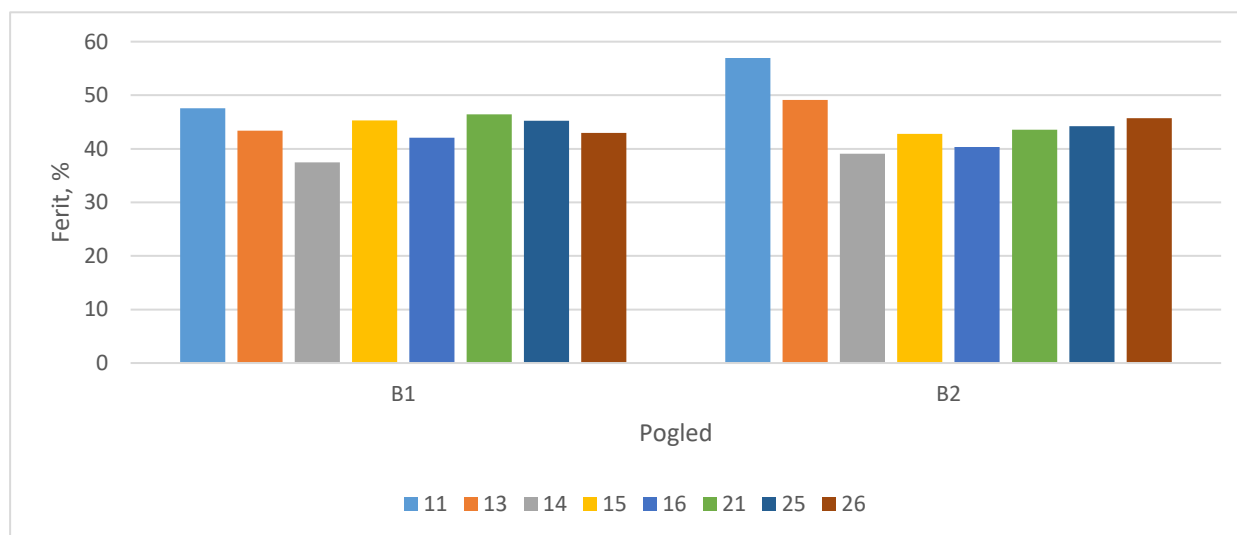
Promatrajući rezultate može se reći kako se većina uzoraka nalazi u intervalu od 40 % do 60 % osim par uzoraka koji su vjerojatno loši zbog lošeg nagrizanja te program onda ne može dobro napraviti podjelu. Zid s međuprolaznom temperaturom od 50 °C (uzorak 11) ima udio vrlo blizu 50 % dok zid s međuprolaznom temperaturom od 250 °C (uzorak 21) se već udaljava od toga jer se pri većim temperaturama stvaraju štetne faze pa to ima utjecaj na udio ferita i austenita. Slika 57 prikazuje dijagram usporedbe udjela ferita u mikrostrukturi za sve uzorke između N, T i B1 pogleda.



Slika 57. Usporedba udjela ferita između N, T i B1 pogleda

Iz dijagrama je moguće primijetiti kako uzorci iz komorne peći imaju stabilnije rezultate ako su na temperaturi od 1100 °C (uzorci 15 i 25) bili držani 15 min.

Slika 58 prikazuje dijagram usporedbe udjela ferita u mikrostrukтури za uzorke između B1 i B2 pogleda.



Slika 58. Usporedba udjela ferita između B1 i B2 pogleda

Iz dijagrama je moguće primijetiti kako uzorak koji nije išao na toplinsku obradu, a imao je nižu međuprolaznu temperaturu od 50 °C ima veće odstupanje u udjelu ferita nakon uklanjanja 3 mm materijala. Ostali uzorci nemaju značajnija odstupanja u udjelu ferita nakon uklanjanja 0,5 mm i 3 mm materijala.

6. ZAKLJUČAK

Aditivna proizvodnja električnim lukom i žicom je relativno nova tehnologija u području zavarivanja i zadnjih godina se podosta istražuje. Prednosti aditivne proizvodnje poput automatiziranosti, kompleksne strukture i smanjene potrebe za strojnom obradom još uvijek nisu dovoljne za veću komercijalnu upotrebu.

Dupleks čelici imaju izuzetno dobra mehanička svojstva i otpornost na koroziju čime nadmašuju nehrđajuće čelike, ali im je zbog toga i cijena viša. Zbog svojih svojstava imaju široku primjenu, ali se najviše koriste u naftnoj industriji i u industrijama gdje se radi s fluidima upravo zbog dobre korozijske otpornosti.

Cilj rada bio je utvrditi utjecaj unosa energije na mikrostrukturu dupleks čelika. Za potrebe eksperimenta napravljena su tri zida sa različitim međuprolaznim temperaturama. Iz svakog zida izrezano je šest uzoraka od kojih su neki obrađeni toplinski u dvije različite peći s različitim parametrima.

Na temelju provedenih istraživanja moguće je zaključiti sljedeće:

- Međuprolazna temperatura nema značajan utjecaj na prirast visine zidova. Međuprolazna temperatura od 150 °C koja je ujedno i preporučena u literaturi je imala najpovoljnije rezultate prirasta visine zidova.
- Teksture površina zidova gledane golim okom se nisu razlikovale, ali prilikom skeniranja uočene su razlike. Uzorak koji je bio rađen međuprolaznom temperaturom od 250 °C imao je najbolje rezultate, zbog više temperature talina se sporije hladila i razlila što je učinilo površinu uglađenijom.
- Analizom kemijskog sastava utvrđeno je kako međuprolazna temperatura i toplinska obrada imaju utjecaj na neke kemijske elemente poput nikla kod kojeg je došlo do djelomičnog isparavanja. Također površina samog uzorka ima velike varijacije u kemijskom sastavu stoga je dovoljno uklanjanje materijala od 0,5 mm kako bi se došlo do stabilnog kemijskog sastava.
- Međuprolazna temperatura nema utjecaja na makrostrukturu zidova.
- Međuprolazna temperatura od 50 °C nema utjecaja na udio austenita i ferita dok temperatura od 250 °C i toplinska obrada imaju. Utjecaj je moguće vidjeti na odnosu austenita i ferita koji je udaljniji od idealnog odnosa od 50 % austenita i 50 % ferita.

Za daljnje istraživanje bilo bi dobro provesti postupak nagrivanja uzoraka drugim reagensom koji bi istaknuo štetne faze kod dupleks mikrostrukture, osobito kod međuprolazne temperature od 250 °C jer je ona blizu temperature nastajanja štetnih faza.

LITERATURA

- [1] Pilipović A. Utjecaj parametara izrade na svojstva polimernog prototipa, Doktorski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2012.
- [2] Sigler D., Additive Manufacturing for Electric Motors - Sustainable Skies, <http://sustainable skies.org/additive-manufacturing-for-electric-motors/> [dostupno 19.3.2021.]
- [3] Wohlers T. T., Wohlers Report 2012: Additive Manufacturing and 3D Printing State of the Industry Annual, Fort Collins, 2012
- [4] Noorani R., Rapid Prototyping: Principles and Applications, Wiley, 2005
- [5] K. Lee, Principles of CAD/CAM/CAE Systems. USA: Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc., 1999.
- [6] I. Gibson, D. W. Rosen, and B. Stucker, Additive manufacturing technologies: Rapid prototyping to direct digital manufacturing. Springer US, 2010.
- [7] Williams S.W., Martina F., Addison A.C., Ding J., Pardal G., Colegrove P.: Wire + Arc Additive Manufacturing, Materials Science and Technology, 2016.
- [8] Busachi A., Erkoyuncu A. J., Martina F., Ding J.: Designing a WAAM Based Manufacturing System for Defence Applications, Elsevier, 2015.
- [9] McAndrew A. R., Alvarez Rosales M., Colegrove P. A., Honnige, J. R., Ho A., Fayolle R., Eyitayo K., Stan I., Sukrongpang P., Crochemore A., Pinter Z., Interpass rolling of Ti-6Al-4V wire + arc additively manufactured features for microstructural refinement, Additive Manufacturing, vol. 21, 340–349, 2018
- [10] Knezović N., Aditivna proizvodnja uz pomoć električnog luka i žice kao dodatnog materijala (WAAM)- trenutno stanje i potencijal, Zavarivanje, vol. 61., 3–4, 73–78, 2018.
- [11] Rodrigues T. A., Duarte V., Miranda R. M., Santos T. G., Oliveira J. P., Current Status and Perspectives on Wire and Arc Additive Manufacturing (WAAM), Materials, 2019.
- [12] Nathan S., Dutch ship-builder unveils the world's first 3D printed marine propeller, The Engineer, <https://www.theengineer.co.uk/worlds-first-3d-printed-marine-propeller/> [dostupno 7.4.2021.].
- [13] Applications and business drivers, <https://waammat.com/about/business-drivers>

-
- [dostupno 7.4.2021.].
- [14] MX3D Bridge, <https://mx3d.com/projects/mx3d-bridge/> [dostupno 7.4.2021.].
- [15] Laarman J., Butterfly Screen, <https://www.jorislaarman.com/work/butterfly-screen/> [dostupno 7.4.2021.].
- [16] Alvarez-Armas I., Duplex Stainless Steels: Brief History and Some Recent Alloys, *Recent Patents Mech. Eng.*, vol. 1, 1, 51–57, 2008.
- [17] DUPLEKS NEHRĐAJUĆI ČELICI,
https://www.fsb.unizg.hr/usb_frontend/files/1357631301-0-ssnc_9i10_pred_tekst.pdf
[dostupno 8.4.2021.].
- [18] Duplex stainless steel, <https://www.imoa.info/molybdenum-uses/molybdenum-grade-stainless-steels/duplex-stainless-steel.php> [dostupno 9.4.2021.].
- [19] Gunn R. N., *Duplex Stainless Steels: Microstructure, Properties and Applications*, Elsevier, 1997.
- [20] Alvarez.Armas I., Degallaix-Moreuil S., *Duplex Stainless Steels*, Wiley, 2009.
- [21] Karlsson L., Welding duplex stainless steels - A review of current recommendations, *Welding World*, vol. 56, 5–6, 65–76, 2012.
- [22] ISO/TR 18491:2015 - Welding and allied processes — Guidelines for measurement of welding energies, ISO, 2015.
- [23] Garašić I., Kožuh Z., *Priručnik iz kolegija strojevi i oprema za zavarivanje*, FSB Zagreb, 2016.
- [24] 3D S Parameters - Height (Amplitude) Parameters, Michigan Metrology, https://www.michmet.com/3d_s_height_parameters.htm [dostupno 19.4.2021.]