

Utjecaj parametara navarivanja na svojstva izratka pri aditivnoj proizvodnji MIG/MAG tehnologijom

Blažona, Marko

Master's thesis / Diplomski rad

2023

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University North / Sveučilište Sjever**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:122:874528>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-07**



Repository / Repozitorij:

[University North Digital Repository](#)





**Sveučilište
Sjever**

Diplomski rad br. 090/STR/2023

**Utjecaj parametara navarivanja na svojstva izratka pri
aditivnoj proizvodnji MIG/MAG tehnologijom**

Marko Blažona, 2779/336

Varaždin, 2023. godine



**Sveučilište
Sjever**

Odjel za Strojtarstvo

Diplomski rad br. 090/STR/2023

**Utjecaj parametara navarivanja na svojstva izratka pri
aditivnoj proizvodnji MIG/MAG tehnologijom**

Student

Marko Blažona, 2779/336

Mentor

doc. dr. sc. Matija Bušić, dipl. ing. stroj.

Varaždin, 2023. godine

PREDGOVOR

Zahvaljujem mentoru doc. dr. sc. Matiji Bušiću koji je detaljno isplanirao vremenske rokove te postupno pratio čitav proces nastajanja diplomskog rada. Svojim savjetima uvelike je pridonio svladavanju nejasnoća i problema koji su se pojavili prilikom izrade rada. Zahvaljujem mu što je osigurao sve potrebne korake i materijal potreban za izradu rada te omogućio korištenje sveučilišnih uređaja bez kojih ne bi bilo moguće realizirati ovaj rad. Zahvalio bih svojim roditeljima koji su mi omogućili sve potrebne uvjete kako bih sigurno i bez problema završio studij u predviđenom roku. Zahvalio bih i svim kolegama i profesorima s kojima sam surađivao kroz vrijeme provedeno studirajući.

SAŽETAK

Tema ovog diplomskog rada primjena je aditivne proizvodnje električnim lukom i žicom u svrhu proizvodnje elemenata od nehrđajućeg čelika. Diplomski rad sastoji se od dva dijela, teorijskog i eksperimentalnog dijela. U teorijskom dijelu rada detaljno je objašnjen pojam aditivne proizvodnje, princip rada te karakteristike. Osim toga, detaljno je objašnjena tehnologija aditivne proizvodnje električnim lukom i žicom (WAAM) s naglaskom na izradu komponenti od nehrđajućeg čelika. U eksperimentalnom dijelu rada, WAAM tehnologijom izrađena su dva zida. Iz navarenih elemenata izrađeni su uzorci na kojima su provedena ispitivanja mehaničkih svojstava te analiza makrostrukture. Opisana je korištena oprema za navarivanje, uzorkovanje i ispitivanje svojstava te korišteni materijali. Detaljno je prikazan čitav eksperiment te primijenjeni parametri. Na kraju rada prikazana je analiza dobivenih rezultata te dan zaključak.

Ključne riječi: Aditivna proizvodnja, WAAM, zavarivanje, nehrđajući čelik

SUMMARY

The topic of this thesis is the application of Wire and Arc Additive Manufacturing (WAAM) for the purpose of producing stainless steel elements. The master thesis consists of two parts, a theoretical and an experimental part. In the theoretical part of the paper, the concept of additive manufacturing, the working principle and characteristics are explained in detail. In addition, wire and arc additive manufacturing (WAAM) technology is explained in detail with an emphasis on the fabrication of stainless steel components. In the experimental part of the work, two walls were made using WAAM technology. Samples were made from the welded elements, on which tests of mechanical properties and macrostructure were carried out. The equipment used for welding, sampling and testing properties and the materials used are described. The entire experiment and applied parameters are presented in detail. At the end of the paper, an analysis of the obtained results is presented, and a conclusion is given.

Keywords: Additive manufacturing, WAAM, welding, stainless steel

Prijava diplomskog rada

Definiranje teme diplomskog rada i povjerenstva

ODJEL	Odjel za strojarstvo		
STUDIJ	diplomski sveučilišni studij Strojarsvo		<input type="checkbox"/>
PRISTUPNIK	Marko Blažona	JMBAG	0336030724
DATUM	30.08.2023.	KOLEGIJ	Suvremene proizvodne tehnologije
NASLOV RADA	Utjecaj parametara navarivanja na svojstva izratka pri aditivnoj proizvodnji MIG/MAG tehnologijom		
NASLOV RADA NA ENGL. JEZIKU	Influence of overlay welding parameters on the workpiece properties in additive manufacturing using MIG/MAG technology		
MENTOR	dr. sc. Matija Bušić	ZVANJE	docent
ČLANOVI POVJERENSTVA	1. doc. dr. sc. Tomislav Veliki, predsjednik povjerenstva 2. doc. dr. sc. Matija Bušić, mentor, član povjerenstva 3. doc. dr. sc. Jasna Leder Horina, član povjerenstva 4. doc. dr. sc. Tanja Tomić, zamjenski član 5.		

Zadatak diplomskog rada

BRJ 090/STR/2023

OPIS

U teoretskom dijelu diplomskog rada na osnovi podataka iz literature potrebno je opisati postupak aditivne proizvodnje pomoću MIG/MAG tehnologije navarivanja. Definirati aditivnu proizvodnju metalnih izradaka i usporediti različite tehnologije aditivne proizvodnje. Posebno detaljno opisati aditivnu proizvodnju električnim lukom i žicom (engl. Wire Arc Additive Manufacturing). Navesti primjere proizvoda koji se mogu izrađivati ovom tehnologijom te usporediti takvu izradu sa konvencionalnim proizvodnim tehnologijama.

U eksperimentalnom dijelu rada potrebno je automatiziranim MIG postupkom, pomoću žice za zavarivanje austenitnih nehrđajućih čelika, izraditi dva izratka uz primjenu različitih parametara procesa. Iz izrađenih objekata izraditi uzorke za ispitivanje geometrije poprečnog presjeka i ispitivanja udarnog rada loma Charpy-evim batom. Provesti navedena ispitivanja i analizirati dobivene rezultate. Prema rezultatima ispitivanja preporučiti prikladne parametre i donijeti vlastiti zaključak o provedenom eksperimentu. U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

ZADATAK URUČEN

30.08.2023

POTPIS MENTORA

M. Bušić

POPIS KORIŠTENIH KRATICA

2D	2 dimensional Dvodimenzionalno
3D	3 dimensional Trodimenzionalno
ABS	akrilonitril/butadien/stiren
Al	aluminij
AM	Additive Manufacturing Aditivna proizvodnja
AMF	Additive Manufacturing File Datoteka aditivne proizvodnje
Ar	argon
ASTM	American Society for Testing and Materials Američko društvo za ispitivanja i materijale
BCC	Body Centered Cubic Lattice Prostorno centrirana kubična rešetka
BTF	Buy to fly Omjer količine početnog materijala i količine materijala konačnog proizvoda
C	ugljik
CAD	Computer Aided Design Konstruiranje pomoću računala
CAM	Computer Aided Manufacturing Proizvodnja pomoću računala
CNC	Computer Numerical Control Računalno numeričko upravljanje
CO₂	ugljičkov dioksid
Co	kobalt
Cr	krom
Cu	bakar
FCC	Face Centered Cubic Lattice Plošno centrirana kubična rešetka
HCP	Hexagonal Close Paked Lattice Heksagonalna gusto slagana rešetka
ISO	International Organization for Standardization Međunarodna organizacija za normizaciju
MAG	Metal Active Gas Elektrolučno zavarivanje taljivom žicom u zaštiti aktivnog plina

MIG	Metal Inert Gas Elektrolučno zavarivanje taljivom žicom u zaštiti inertnog plina
Mn	mangan
Mo	molibden
N	dušik
Ni	nikal
P	fosfor
PVC	poli(vinil-klorid)
RM	Rapid Manufacturing Brza proizvodnja
RP	Rapid Prototyping Brza proizvodnja prototipova
RT	Rapid Tooling Brza proizvodnja kalupa i alata
S	sumpor
Si	silicij
STL	Standard Tessellation Language Triangulizacijska datoteka
Ti	titan
TIG	Tungsten Inert Gas Elektrolučno zavarivanje netaljivom elektrodom
WAAM	Wire Arc Additive Manufacturing Aditivna proizvodnja električnim lukom i žicom

SADRŽAJ

1.UVOD.....	1
2.ADITIVNA PROIZVODNJA	3
2.1.Faze aditivne proizvodnje	5
2.2.Aditivna proizvodnja metalnih materijala.....	7
3.ADITIVNA PROIZVODNJA ELEKTRIČNIM LUKOM I ŽICOM (WAAM)	9
3.1.Karakteristike WAAM postupka	10
3.2.Problematika postupka.....	12
3.3.Najčešće korišteni materijali u svrhu WAAM-a.....	13
3.3.1.Aluminij i legure na bazi aluminija.....	13
3.3.2.Titan i legure na bazi titana.....	15
3.3.3.Legure na bazi nikla.....	16
3.3.4.Čelik.....	16
3.3.5.Legure na bazi magnezija	17
3.4.Primjena WAAM-a	17
4.NEHRĐAJUĆI ČELICI	22
4.1.Feritni nehrđajući čelici	22
4.2.Austenitni nehrđajući čelici	23
4.3.Austenitno-feritni (duplex) nehrđajući čelici.....	24
4.4.Martenzitni nehrđajući čelici	25
4.5.Precipitacijski očvrnuti nehrđajući čelici	25
5.EKSPERIMENTALNI DIO	26
5.1.MIG/MAG postupak zavarivanja.....	26
5.2.Korištena oprema	30
5.2.1.Izvor struje za navarivanje <i>TransSteel 3000 Pulse</i>	31
5.2.2.Uređaj za precizno vođenje pištolja <i>Promotech Rail Bull</i>	33
5.2.3.Termometar <i>SKF TKTL 20 ThermoLaser</i>	34
5.2.4.Uređaj za brušenje i poliranje <i>Metkon Forcipol IV Grinder & Polisher</i>	36

5.2.5.Stereomikroskop <i>Olympus SZX10</i>	37
5.2.6.Charpyjev bat <i>Pendulum impact charpy tester</i>	38
5.3.Korišteni materijal	39
5.4.Postupak WAAM navarivanja	41
5.5.Priprema i izrada ispitnih uzoraka	53
5.6.Analiza makrostrukture.....	59
5.7.Ispitivanje udarnog rada loma.....	65
5.8.Analiza rezultata	68
6.ZAKLJUČAK.....	71
7.LITERATURA	73

1. UVOD

Posljednjih nekoliko desetljeća, aditivna proizvodnja (AM) sve više privlači pažnju u proizvodnoj industriji. Suvremeni tržišni zahtjevi postavljaju visoke standarde za različite grane industrije. Klasični postupci proizvodnje nisu u mogućnosti potpuno zadovoljiti suvremene zahtjeve tržišta koji uključuju povećanje kvalitete proizvoda, fleksibilnost u razvoju i proizvodnji, personaliziranu proizvodnju, izradu komponenti složene geometrije, smanjenje vremena izrade, smanjenje troškova te minimiziranje gubitka materijala. Prema navedenim činjenicama postaje jasno da je razvoj novih proizvodnih tehnologija neophodan. Jedan od rezultata tog razvoja predstavlja aditivna proizvodnja koja će biti detaljno objašnjena u ovom diplomskom radu, uključujući njene faze i svrhu. Aditivna proizvodnja predstavlja tehnologiju koja omogućuje ekonomičnu proizvodnju komponenti smanjenjem otpada materijala i skraćivanjem vremena proizvodnje. Glavnu karakteristiku aditivnih postupaka proizvodnje predstavlja dodavanje čestica materijala, obično sloj po sloj, u svrhu stvaranja komponenti blizu konačne dimenzije (engl. *near net shape*) ili potpuno gotovih komponenti (engl. *net shape*). Razvojem aditivne proizvodnje, proizvodna industrija doživjela je značajnu transformaciju, posebno u području izrade prototipova i proizvoda složene geometrije. Mogućnost izrade prototipova izravno iz virtualnog CAD modela u vrlo kratkom vremenskom razdoblju značajno je smanjila broj međukoraka u procesu razvoja novih proizvoda. To je omogućilo bržu i efikasniju iteraciju u dizajnu i razvoju, što je rezultiralo ubrzanjem inovacija i smanjenjem vremena do lansiranja novih proizvoda na tržište. Aditivna proizvodnja danas obuhvaća mnoge različite tehnike, od kojih su najčešće korištene stereolitografija i 3D ispis. Ove tehnike aditivne proizvodnje prvobitno su osmišljene za proizvodnju elemenata od polimernih materijala. Međutim, kako bi se zadovoljili složeni zahtjevi iz zrakoplovne, automobilske, industrije strojarских alata i drugih industrija, istraživanje i razvoj aditivne proizvodnje prošireni su na proizvodnju metalnih elemenata složene geometrije. Ova proširenja omogućuju stvaranje komponenti s visokom preciznošću i kvalitetom. Postupcima aditivne proizvodnje moguće je ekonomično proizvesti komponente od gotovo svih metala. Jedna od značajnih prednosti aditivne proizvodnje metalnih komponenti, u usporedbi s alternativnim proizvodnim procesima, jest omjer složenosti geometrije i obujma proizvodnje. Aditivna proizvodnja omogućuje izradu komponenti složenih geometrija koje je teško ili nemoguće proizvesti tradicionalnim metodama. Ova činjenica otvara nove mogućnosti u proizvodnji visokokvalitetnih i prilagođenih metalnih komponenti koje zadovoljavaju različite zahtjeve industrije. Odnosno, aditivna proizvodnja idealna je za proizvodnju složenih metalnih dijelova u manjim serijama. No, aditivna proizvodnja donosi i druge prednosti u odnosu na tradicionalne metode proizvodnje. Prva prednost aditivne proizvodnje jest mogućnost potpune automatizacije

procesa, od dizajna komponente pa sve do njene proizvodnje. Ova prednost značajno skraćuje vrijeme proizvodnje te smanjuje potrebu za ljudskim intervencijama. Druga je prednost ekonomična proizvodnja komponenti od skupocjenih materijala, što je izrazito važno u zrakoplovnoj i svemirskoj industriji. Primjer predstavljaju titan i legure nikla koje često imaju izuzetno nizak omjer kupovine sirovine i otpada (eng. *Buy to Fly ratio - BTF*).

Aditivna proizvodnja omogućava slobodu dizajna te na taj način omogućava smanjenje mase komponenti. Jedna od suvremenih i sve popularnijih metoda aditivne proizvodnje jest WAAM (eng. *Wire and Arc Additive Manufacturing*). Ovaj postupak aditivne proizvodnje koristi se električnim lukom kao izvorom energije te kombinacijom robota koji omogućuje automatsko kretanje zavarivačkog pištolja, manipulatora i električnog izvora energije poput MIG, TIG i plazma tehnologija. Izvršena su brojna istraživanja te je objavljen značajan broj znanstvenih radova koji detaljno opisuju sam postupak i obrađuju problematiku WAAM-a. Stoga, iako trenutno nije široko prihvaćen u industriji, perspektive koje pruža ukazuju da će uskoro u određenim sektorima industrije zamijeniti tradicionalne metode proizvodnje [1, 2, 3].

2. ADITIVNA PROIZVODNJA

Tijekom povijesti, postupci aditivne proizvodnje prošli su značajne promjene. Na samom početku, uglavnom su se koristili za brzu izradu prototipova (engl. *Rapid prototyping* - *RP*). Iako je pojam "brzo" relativan, jer je brzina ovisila o veličini proizvodnog elementa, ipak je za proizvodnju trebalo mnogo manje vremena u usporedbi s klasičnim postupcima. RP tehnologija razvijena je s ciljem ostvarivanja inženjerskih zamisli te omogućavanja analize oblika, materijala i funkcionalnosti budućeg proizvoda putem prototipova. U isto vrijeme, razvijala se i brza proizvodnja alata i kalupa (eng. *Rapid Tooling* - *RT*). Izrada složenih alata, poput kalupa za injekcijsko prešanje polimera, obično je bila sporiji dio razvojnog procesa. RT tehnologija omogućila je brzu izradu alata i kalupa, što je u konačnici dovelo do odgovora na određene zahtjeve tržišta. Važno je napomenuti da je namjena RT postupaka bila brza proizvodnja alata i kalupa, a ne gotovih proizvoda [4, 5].

Tehnologije brze izrade alata i kalupa označavaju drugi korak napretka u domeni RP iz razloga što omogućuju analizu cijelog proizvodnog procesa, a ne samog proizvoda. Integracija RP i RT predstavlja temelj brze proizvodnje (eng. *Rapid Manufacturing* - *RM*), koja omogućava proizvodnju bez potrebe za dodatnim alatima koristeći tehnologije poput CAD-a, CAM-a i CNC-a. ASTM F42, 2009. godine usvojio je izraz aditivna proizvodnja (eng. *Additive Manufacturing* - *AM*). Pojam aditivna proizvodnja definiran je kao proces povezivanja materijala pri izradi komponenti izravno iz 3D računalnih modela, najčešće sloj po sloj [4, 6, 7]. Slika 1. prikazuje faze nastanka elementa primjenom aditivne proizvodnje.



Slika 1. Faze nastanka elementa primjenom procesa aditivne proizvodnje [7]

Iako je većina komponenti izrađenih postupcima aditivne proizvodnje složenih 3D geometrijskih oblika, u osnovi se radi o postupcima 2½D gdje se 2D slojevi slažu jedan na drugi u svrhu postizanja treće dimenzije proizvoda. Točnost duž "z" osi ovisi o debljini slojeva, odnosno deblji su slojevi manje precizni. Danas, aditivna proizvodnja obuhvaća izradu pojedinačnih dijelova i komponenti neke veće cjeline, ali je također moguće izraditi i kompletan sklop. Dostupnost materijala korištenih u proizvodnji postupcima AM posljednjih nekoliko godina polako se povećava i danas uključuje razne polimere, keramiku, metale pa čak i beton. Odnosno, moguće je upotrijebiti gotovo svaki materijal koji se može rastaliti i ponovno stvrdnuti [4, 6, 8].

Aditivni postupci proizvodnje također mogu biti rješenje za trenutne trendove unikatne prilagodbe zahtjevima kupaca. Zbog želje kupaca za personaliziranim proizvodima dolazi do smanjenja proizvodnih serija. Primjena aditivnih tehnologija proizvodnje omogućava ekonomičniji pristup kad je riječ o izradi takvih proizvoda. Budući da AM postupci ne zahtijevaju izradu alata i kalupa, nema potrebe za masovnom proizvodnjom koja bi amortizirala trošak njihove izrade [4, 9]. Slika 2. prikazuje proces aditivne proizvodnje metalnog elementa, odnosno nanošenje metala sloj po sloj.



Slika 2. Proces aditivne proizvodnje metalne komponente [10]

S tehnološkog stajališta, aditivna proizvodnja ima mnogobrojne prednosti, a jednu od ključnih prednosti predstavlja sposobnost izravnog stvaranja dijelova iz digitalnog 3D modela koji se generira putem CAD sustava. Ovaj način rada omogućuje izradu dijelova s vrlo složenom geometrijom uz mogućnost brze promjene dizajna. Osim toga, za razliku od klasičnih postupaka

proizvodnje koji uključuju odstranjivanje materijala, aditivna proizvodnja ima minimalan gubitak materijala iz razloga što se proizvod stvara nanošenjem čestica materijala sloj po sloj. Unatoč prednostima, postoje i neka ograničenja kao što su nemogućnost kombiniranja materijala, izrada velikih dijelova, sporija brzina proizvodnje, potreba za kvalificiranom radnom snagom i potreba za naknadnom obradom površine. Tehnološke karakteristike povezane su s ekonomskim aspektima koji su jednako važni te uravnotežuju konkurentnost svakog procesa. Na primjer, brzina i jednostavnost proizvodnje, smanjeni troškovi montaže i redizajna, personalizacija proizvoda koja dodaje vrijednost; sve to pozitivno utječe na ekonomsku sliku procesa. Međutim, postoje određeni izazovi, poput potrebe za obučenom radnom snagom i visokim troškovima nabave materijala i energije. Također, problem je volumen proizvodnje. Povećanje volumena proizvodnje ne smanjuje proizvodne troškove pojedinačnog dijela jer princip ekonomije razmjera ne vrijedi u ovom kontekstu, odnosno proizvodna cijena ostaje ista bez obzira na veličinu serije. Stoga, masovna proizvodnja standardiziranih dijelova i dalje će pripadati konvencionalnim tehnologijama proizvodnje [4, 8].

2.1. Faze aditivne proizvodnje

Svaki element prilikom izrade nekim od postupaka aditivne proizvodnje, prolazi sedam faza [11, 12]:

1. Izrada CAD modela
2. Pretvaranje CAD modela u STL datoteku
3. Prebacivanje STL datoteke na uređaj za aditivnu proizvodnju
4. Podešavanje parametara
5. Izrada komponente
6. Vađenje komponente iz uređaja za aditivnu proizvodnju
7. Naknadna obrada

Faze izrade komponente procesom aditivne proizvodnje prikazane su na slici 3.



Slika 3. Faze izrade elementa procesom aditivne proizvodnje [6, 7]

Kao što je prethodno spomenuto, prvi korak u svim postupcima aditivne proizvodnje jest stvaranje 3D geometrijskog modela pomoću CAD/CAM programa. Nakon konstrukcije željenog modela, moguće je spremanje istog u različitim formatima. 1987. godine, tvrtka 3D Systems predstavila je STL datoteku (eng. *Standard Tessellation Language*) koja prikazuje objekt kao mrežu povezanih trokuta [5, 11, 13].

Godine 2009., STL formatu dodana je boja, rezultirajući AMF datotekom (eng. *Additive Manufacturing File*) koja, zajedno sa STL formatom, postaje standard i osnova za rezanje, odnosno dijeljenje komponente na slojeve. Obje datoteke sadrže cjelokupnu geometriju modela te služe kao temelj za rezanje modela na slojeve po visini. Konture svakog sloja koriste se za generiranje putanje alata. Nakon podešavanja parametara stroja, kao što su debljina sloja, snaga i brzina, započinje izgradnja modela. Model se stvara nanošenjem čestica materijala sloj po sloj. Prvi sloj materijala nanosi se na temeljnu ploču, a zatim svaki sljedeći sloj s određenom visinom. Proces se nastavlja sve dok se ne nanese svaki potreban sloj. Nakon izgradnje modela, slijedi završna obrada koja može uključivati čišćenje viška materijala, uklanjanje potpornih struktura i bojanje. Ova faza može se provoditi paralelno s izgradnjom modela, ali češći je slučaj zasebne završne obrade [4, 6, 14].

2.2. Aditivna proizvodnja metalnih materijala

Postupci AM klasificiraju se prema materijalima koji se koriste za izradu komponenti, uključujući metale, polimere i keramiku, koji mogu biti u obliku kapljevine, praha, žice i folije. Među polimernim materijalima koji se često koriste su ABS, poliamid, PVC, poliuretani, epoksidne smole i drugi [4, 7].

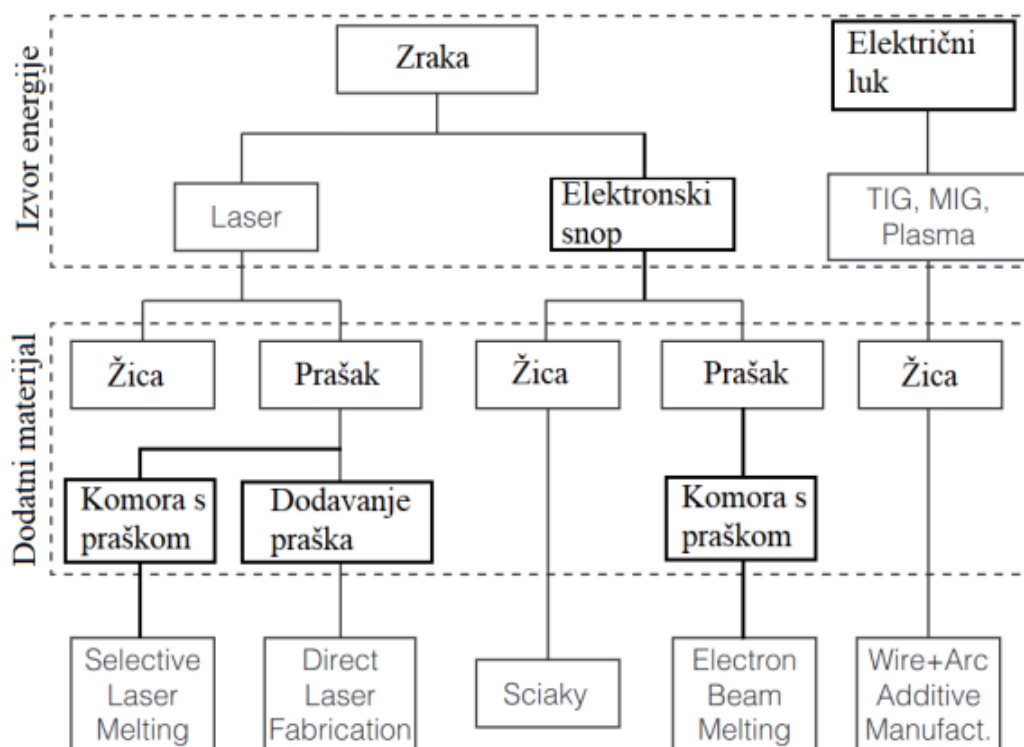
Najčešće primjenjivane metode izrade polimernih elemenata su [4]:

- Stereolitografija
- Selektivno lasersko srašćivanje
- 3D ispis.

Postupci AM metalnih komponenti ovisno o izvoru energije za navarivanje dijele se na [4, 15]:

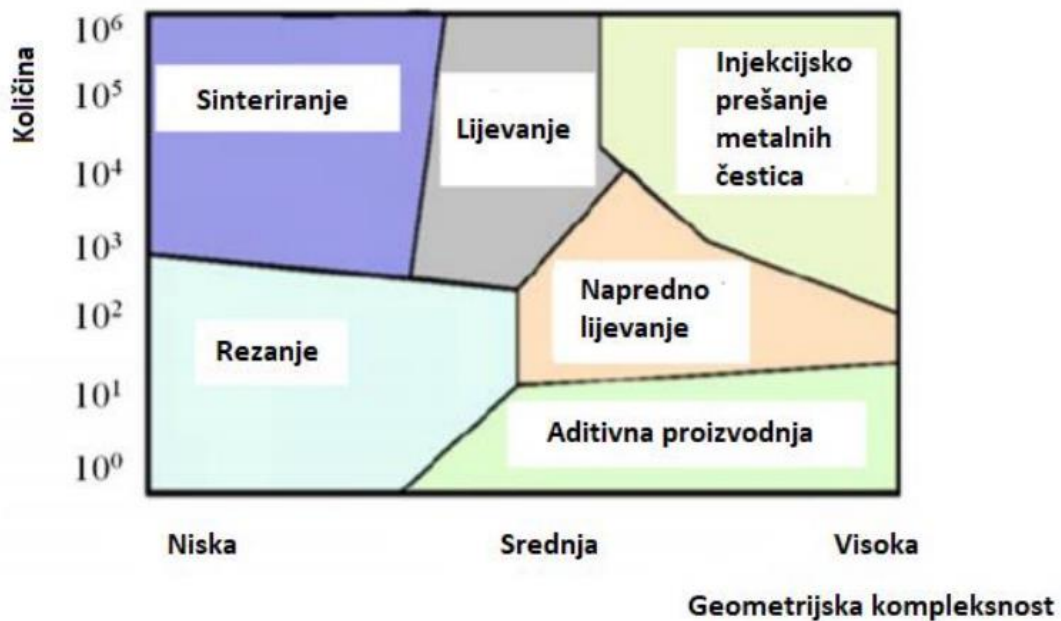
- AM laserom
- AM elektronskim snopom
- AM električnim lukom

Slika 4. prikazuje podjelu postupaka AM metalnih komponenti ovisno o izvoru energije te obliku dodatnog materijala.



Slika 4. Podjela postupaka aditivne proizvodnje primjenom metala [16]

Glavna značajka lasera leži u njihovoj velikoj preciznosti, ali niska energetska učinkovitost; 2-5 % ograničava njihovu upotrebu. Elektronske zrake, s druge strane, nude bolju energetska učinkovitost; 15-20 %, ali radna okolina mora biti u vakuumu, pa je prikladnija za rad u svemirskim postajama i sličnim uvjetima. U usporedbi s laserom i elektronskim snopom, energetska učinkovitost električnog luka može doseći 90 %. Dodamo li tome da je cijena standardne opreme za zavarivanje mnogo manja od preostale dvije opcije napajanja, može se zaključiti da je osim široke primjene i ekonomski isplativija [4, 15]. Slika 5. prikazuje karakteristike proizvodnje metalnih elemenata primjenom procesa aditivne proizvodnje u usporedbi s konvencionalnim postupcima.



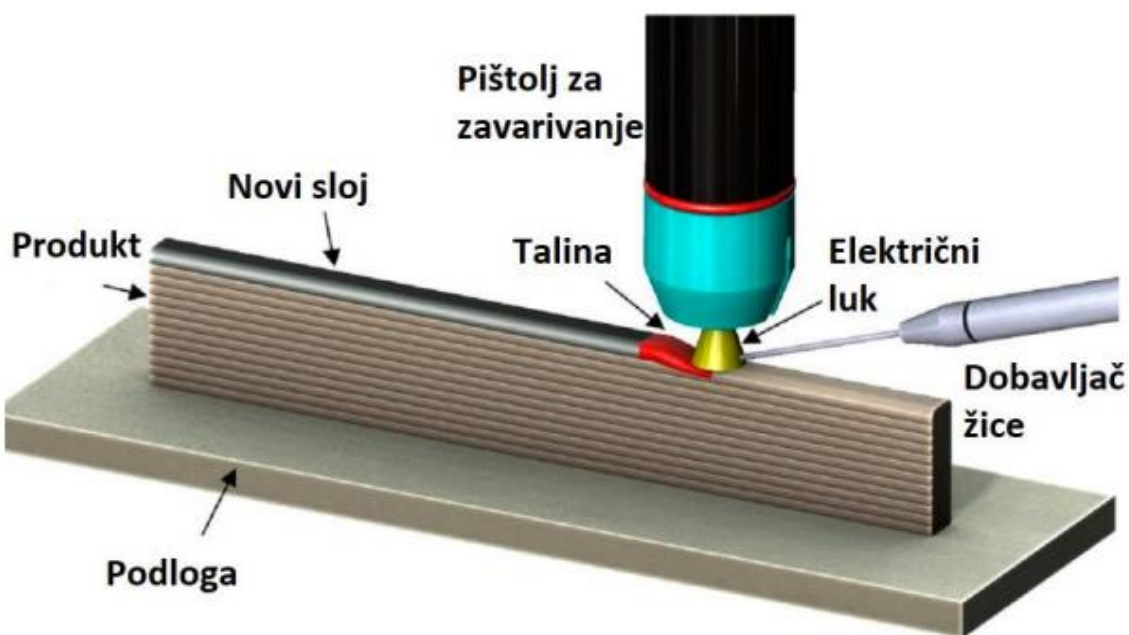
Slika 5. Karakteristike proizvodnje metalnih komponenti [4, 15]

Postupci proizvodnje primjenom praškastih dodatnih materijala najbolje su razvijeni iz razloga što se mogu proizvoditi precizniji dijelovi. Tipične debljine slojeva dobivenih pomoću prahova iznose između 20-100 μm , dok konačne komponente posjeduju dimenzijsku točnost do $\pm 0,05 \text{ mm}$ te površinsku hrapavost od 9-16 μm . S druge strane, materijali na bazi praha imaju i određena ograničenja. To jest, brzina taloženja je izuzetno niska, obično oko 10 g/min. U procesima koji koriste žicu kao dodatni materijal, iskorištenje materijala je značajno veće, odnosno postoji mogućnost postizanja 100 %-tnog iskorištenja nanesenog dodatnog materijala [4, 17, 18]. Takav je proces ekonomičniji i ekološki prihvatljiviji iz razloga što ne izlaže radnike opasnim uvjetima koji stvaraju prašinu. Još jedna prednost žice u usporedbi s prahom jest veća brzina taloženja. Može se zaključiti da izbor između praha i žice ovisi o zahtjevima koje postavlja kupac, odnosno tržište te je važno napomenuti kako je cijena metalne žice znatno niža, što čini proizvodnju na bazi žice konkurentnijom [4, 15].

3. ADITIVNA PROIZVODNJA ELEKTRIČNIM LUKOM I ŽICOM (WAAM)

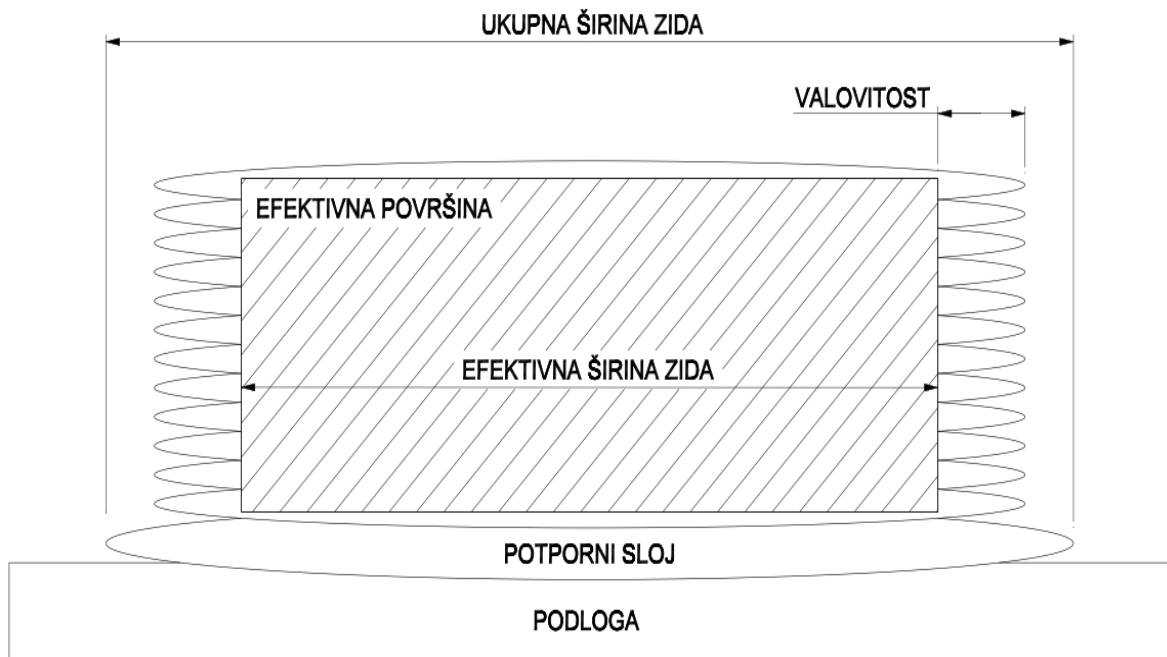
Većina procesa aditivne proizvodnje, za izradu komponenti koristi polimerne materijale ili metale u prahu. Ovaj oblik dodatnog materijala često rezultira proizvodom punim nedostataka kao što su poroznost, šupljine i loša mehanička svojstva pa iz tog razloga nije u potpunosti funkcionalan. Razvoj aditivne proizvodnje električnim lukom i žicom (eng. *Wire and Arc Additive Manufacturing - WAAM*) nudi rješenja za većinu problema s kojima se susreću drugi procesi aditivne proizvodnje [4, 19, 20].

WAAM postupak jedan je od najnovijih aditivnih proizvodnih metoda. Proces omogućava izradu metalnih komponenti primjenom slojevite nadogradnje, koristeći električni luk kao izvor energije. Taljenje dodatnog materijala u obliku žice uzrokuje njegovo nanosno taloženje na ciljano osnovnu površinu. U svrhu provođenja ovog postupka potrebna je uobičajena zavarivačka oprema te znatna količina dodatnog materijala u obliku žice. Slika 6. prikazuje WAAM postupak aditivne proizvodnje metalnog zida.



Slika 6. WAAM postupak proizvodnje metalnog zida [7]

Taljenjem žice dodatnog materijala nastaju kapljice koje se zadržavaju na površini na koju se nanose te kroz međusobno povezivanje tvore pojedinačne slojeve. Dodavanjem slojeva jedan na drugi, proizvod se postupno diže u visinu, no na vanjskoj površini ostaje valovitost zbog nakupljanja kapljica. Taj dio izratka sadrži višak materijala koji zahtjeva naknadnu obradu u svrhu postizanja glatke i ravne površine. Slikom 7. prikazan je presjek zida dobivenog WAAM procesom.



Slika 7. Presjek zida dobivenog WAAM tehnologijom proizvodnje [21]

3.1. Karakteristike WAAM postupka

WAAM tehnologija ističe se svojom jedinstvenošću u odnosu na ostale aditivne postupke proizvodnje, s nizom prednosti i izazova koji je prate. U svrhu unaprjeđenja postupka, nužno je ukloniti sve nedostatke. Jedna od ključnih prednosti WAAM tehnologije leži u mogućnosti korištenja već postojeće zavarivačke opreme. Standardna oprema za zavarivanje i zaštitni plinovi prošireni su robotom ili CNC strojem koji omogućuju preciznu manipulaciju pištoljem, čime se postiže siguran radni proces [2, 66]. Takva karakteristika pruža znatnu ekonomsku prednost u usporedbi s drugim postupcima aditivne proizvodnje. Zahvaljujući ovom postupku, otvara se mogućnost proizvodnje složenih komponenti od aluminijskih, čelika te čak i od najskupljih materijala poput titana, nikla i njihovih legura. Jedna od ključnih prednosti WAAM postupka jest smanjenje gubitka materijala koji se obično javlja tokom proizvodnje i naknadne obrade. Kao što je prethodno spomenuto, nakon završetka proizvodnje komponenti WAAM tehnologijom, postoji mogućnost ostatka određenih površinskih valovitosti na bočnim stranama elementa koje je potrebno ukloniti naknadnom strojnom obradom [1, 9, 12].

Volumen materijala koji se uklanja s površine izratka predstavlja gubitak materijala koji je u usporedbi s drugim konvencionalnim postupcima aditivne proizvodnje izuzetno nizak. Primjenom WAAM postupka umjesto drugih metoda proizvodnje moguće je smanjiti gubitak materijala s visokih 90 % na samo 10 %. Na taj se način BTFO omjer; omjer koji prikazuje odnos između mase

sirovca na početku proizvodnje i mase konačnog elementa, značajno snižava, čime se postiže veća ekonomska isplativost. U zrakoplovnoj se industriji često suočavaju s problemom obrade i niskom iskoristivošću skupocijenih materijala kao što je titan, za koji se procjenjuje da će u idućih 20-ak godina biti potrebno čak 20 milijuna tona sirovog materijala. Upravo zbog niskog BTF omjera, industrije koje zahtjevaju proizvodnju u milijunima tona imat će značajne koristi od WAAM postupka. Visoki depoziti materijala postaju ključni kod proizvodnje dijelova većih dimenzija u relativnom kratkom vremenskom razdoblju. Zahvaljujući brzinama koje se kreću u rasponu od 1 kg/h do 4 kg/h za aluminij, titan i čelik, moguće je proizvesti iznimno velike komponente u jednom danu. Također, postoji mogućnost ostvarivanja još većih brzina; do čak 10 kg/h, no to može rezultirati povećanjem BTF omjera, što bi u konačnici dovelo do poskupljenja konačnog proizvoda [4, 22].

Održavanjem stope taloženja u standardnim vrijednostima; 1 kg/h za aluminij i titan te 3 kg/h za čelike, postiže se BTF omjer manji od 1,5. Povećanjem brzina taloženja moguće je izrađivati mnogo veće dijelove. Ovom karakteristikom veličina izratka ograničena je samo dosegom manipulatora, čime WAAM postupak postaje prikladniji za proizvodnju srednjih do velikih komponenti. Mnogobrojna istraživanja potvrdila su da elementi proizvedeni WAAM tehnologijom posjeduju jednaka ili čak bolja mehanička svojstva u usporedbi s odljevcima i kovanim komponentama iz istog materijala. Čvrstoća i duktilnost dosežu jednake vrijednosti, a vrijednosti otpornosti na umor znatno su poboljšane [4, 18, 23].

Unatoč brojnim prednostima, WAAM tehnologija nosi i neke nedostatke koji zahtjevaju rješavanje ili poboljšavanje. Prije svega, WAAM je pogodniji za proizvodnju većih elemenata s jednostavnijom geometrijom nego za izradu manjih, preciznijih i složenijih komponenti, što jasno određuje njegovo područje primjene. Također, iako pokazuje poboljšana mehanička svojstva, veliki izazov predstavlja anizotropnost tih svojstava. Anizotropija se odnosi na različitost vrijednosti svojstava u različitim smjerovima proizvedene komponente. Primjer toga je veća čvrstoća, ali manja duktilnost u horizontalnom smjeru, odnosno smjeru nanošenja slojeva. Kao što je već spomenuto, velika količina taloženja materijala koja omogućuje izradu elemenata većih dimenzija donosi značajne prednosti, ali i probleme. Naime, povećani unos topline rezultira zaostalim naprezanjima i deformacijama, što predstavlja priličan izazov. Pored toga, velike količine taloženog materijala dovode do hrapavosti površine, koje u konačnici zahtjevaju naknadnu obradu. Još jedan od izazova predstavlja modeliranje geometrije slojeva koje uključuje niz operacija. Te operacije povezuju varijable koje se odnose na planiranje i generiranje putanje te odabir optimalnih parametara kako bi se postigla što bolja geometrija slojeva. Kvaliteta proizvoda direktno ovisi o preciznosti modeliranja svakog pojedinog sloja, kao i o načinu na koji se ti slojevi

preklapaju. U slučaju da se ovaj korak ne izvede dovoljno kvalitetno, postoji mogućnost pojave problema poput nepotrebnog preklapanja ili nedovoljnog stapanja i povezivanja slojeva [4, 24, 25].

U svrhu razvijanja algoritma koji bi poboljšao kvalitetu WAAM postupka proveden je velik broj istraživanja. Još jedan nedostatak WAAM postupka, zajednički za sve postupke koji uključuju taljenje materijala, jest pojava grešaka kao što su poroznosti, ugorine i nadvišenja. Najkritičnije pogreške predstavljaju poroznosti koje nisu vidljive golim okom. Poroznosti su šupljine koje se pojavljuju u navaru i/ ili na površini te su ispunjene stlačenim plinom. Nastaju tijekom hlađenja rastaljenog materijala kada plinovi izlaze iz metala u obliku mjehurića. U slučaju da je brzina izlučivanja plinova manja od brzine skrućivanja materijala, plinovi ostaju zarobljeni u navaru. Ovisno o broju, veličini, položaju i obliku šupljina, poroznosti mogu značajno utjecati na čvrstoću navara [4, 26, 27].

3.2. Problematika postupka

Komponente dobivene korištenjem WAAM postupka karakterizira velika količina unesene topline, što rezultira zaostalim naprezanjima i deformacijama. Ta zaostala naprezanja negativno utječu na mehanička svojstva gotovih proizvoda, dok deformacije mogu uzrokovati probleme s tolerancijama. Kako bi se izbjegli problemi tijekom WAAM postupka, važno je obratiti pažnju na određene mjere. Prije samog početka provedbe postupka, potrebno je pažljivo optimizirati parametre i način taloženja, uz poseban naglasak na pravilno učvršćivanje temelja. U svrhu sprječavanja deformacije temelja prilikom gradnje zida, preporučuje se taloženje materijala s obje strane temelja. Obostrano taloženje materijala eliminira deformacije i znatno smanjuje zaostala naprezanja. Takav način izvedbe naziva se "*back to back*" gradnja [4, 21].

Strategije kao što je "*back to back*" gradnja značajno djeluju na smanjenje deformacija, no nemaju isti utjecaj na zaostala naprezanja. Jedna od učinkovitijih metoda za uklanjanje zaostalih naprezanja jest optimizacija vremena hlađenja. Ova optimizacija podrazumijeva odabir odgovarajućeg vremenskog intervala tijekom kojeg će prethodna toplina biti korištena za predgrijavanje prije nanošenja sljedećeg sloja. WAAM tehnologija izrađuje komponente sloj po sloj, pa temperatura međusloja predstavlja temperaturu prethodno nanesenog sloja. Međutim, problem s optimizacijom vremena hlađenja leži u mogućem produženju vremena izrade zbog dugog čekanja. Iako povećanje međuprolazne temperature može poboljšati viskoznost rastaljenog

materijala, talog pri visokim temperaturama može izgubiti stabilnost i rezultirati kolapsom finalnog proizvoda [4, 18, 23].

Jedna od najučinkovitijih metoda za ublažavanje zaostalih naprezanja i pukotina jest predgrijavanje podloge prije izrade komponente. Cilj predgrijavanja jest smanjiti temperaturnu razliku između podloge i prvog nanosa materijala, što rezultira smanjenjem brzine hlađenja. U slučaju WAAM postupka, poznato je da prvi slojevi, ako se ne primjeni predgrijavanje podloge, obično imaju manju širinu u usporedbi s kasnije nanijetim slojevima. Razlog tome jest brzo hlađenje uzrokovano velikom površinom podloge i njenom nižom temperaturom u odnosu na prvi sloj. Unatoč važnosti predgrijavanja podloge, postoje i drugi načini za poboljšanje završnog postupka. Istraživanja su pokazala da kontinuirano taloženje materijala može smanjiti deformacije podloge slično kao predgrijavanje prije početka postupka. Međutim, kontinuirana metoda može uzrokovati prekomjerne unose topline u određenim područjima, što rezultira velikim temperaturnim gradijentima i ponovnim taljenjem podloge. Ovi problemi dovode do smanjene dimenzijske točnosti i lošije kvalitete površine. Rezultati istraživanja ukazuju na potrebu za pronalaženjem kompromisa između primjene međuslojnog hlađenja i održavanja odgovarajuće temperature podloge kako bi se smanjile deformacije. Važno je postići ravnotežu između ovih čimbenika kako bi se osigurala optimalna kvaliteta i preciznost izrade [4, 9].

3.3. Najčešće korišteni materijali u svrhu WAAM-a

Svi materijali koji su dostupni u obliku žice dodatnog materijala mogu se koristiti u WAAM postupku proizvodnje. Najčešće korišteni materijali uključuju čelik, aluminij, titan, legure na bazi nikla i legure na bazi magnezija. Pri odabiru materijala za proizvodnju, osim svojstava materijala, bitan faktor je i cijena. U sljedećih nekoliko točkama ukratko su opisane karakteristike i područje primjene najčešće korištenih materijala u WAAM postupku [4, 13, 17].

3.3.1. Aluminij i legure na bazi aluminija

Aluminij i njegove legure primjenjuju se u slučajevima kod kojih se zahtjevaju karakteristike kao što su izvrsna mehanička svojstva uz optimalan omjer čvrstoće i gustoće, visoka toplinska provodljivost, niska specifična masa te odlična otpornost na koroziju. To ga čini iznimno korisnim u raznim industrijama i primjenama [1].

Kako bi se aluminij mogao uspješno primijeniti WAAM postupkom, važno je slijediti osnovne smjernice koje vrijede i kod tradicionalnog navarivanja aluminija [18, 19]:

- odmastiti i očistiti površinu prije prvog prolaza
- koristiti odgovarajuću tehnologiju za zavarivanje aluminija
- izabrati pravilne parametre zavarivanja
- ukoliko ima nečistoća i između prolaza očistiti zavar
- optimalna međuprolazna temperatura.

Parametri zavarivanja imaju značajan utjecaj na izgled i svojstva nanesenih slojeva. Visoka struja može uzrokovati prekomjeren unos topline i taljenje materijala, što rezultira širenjem zida bez uzdizanja u visinu. S druge strane, ako je struja za zavarivanje preniska, slojevi se neće pravilno povezati, što dovodi do neadekvatne strukture [18, 19].

Također, brzina zavarivanja igra važnu ulogu. Niska brzina može uzrokovati prekomjerno taljenje i širenje zavara, slično situaciji kod visoke struje. S druge strane, previsoka brzina može dovesti do lošeg povezivanja slojeva. Iz tog razloga važno je pažljivo odabrati i prilagoditi parametre zavarivanja kako bi se postigao željeni izgled i svojstva nanesenih slojeva u WAAM postupku [5]. Slika 8. prikazuje bicikl Arc Bike II od aluminija izrađen primjenom WAAM tehnologije.



Slika 8. Arc Bike II od aluminija [30]

Primjenom WAAM postupka, talina se ravnomjerno razlijeva, a na rubovima slojeva nema izbočenja. Ovaj je fenomen posebno vidljiv kod zavarivanja aluminija i njegovih legura zbog odlične toplinske vodljivosti aluminija. To uzrokuje da talina nema dovoljno vremena za ponovno taljenje rubova prethodnog sloja, što rezultira njihovim savršenim spajanjem bez izbočenja [1, 18, 19].

Jedan od ključnih problema s aditivnom proizvodnjom aluminija i njegovih legura je pojava poroznosti. Međutim, ovaj problem može biti eliminiran primjenom kvalitetnih žica za navarivanje ili zavarivanje te odabirom odgovarajućeg postupka zavarivanja. Kako bi se izbjegli ovi potencijalni problemi, koriste se određene metode kontrole mikrostrukture. Ključno je osigurati kvalitetnu i pravilno skladištenu žicu te provesti naknadnu toplinsku obradu.

3.3.2. Titan i legure na bazi titana

Istraživanja legura na bazi titana u kontekstu WAAM postupka su učestala zbog njihove teške obradivosti i visokih troškova obrade. Ove legure karakterizira izuzetno visoka čvrstoća, žilavost, dobra otpornost na koroziju i sposobnost podnošenja ekstremnih temperatura bez značajnih gubitaka mehaničkih svojstava. Zbog tih svojstava, legure na bazi titana su vrlo pogodne za primjenu u zrakoplovstvu i biomedicinskim svrhama [17].

Titan legure vrlo su lagane i imaju relativno nisku istežljivost, što ih čini dobro zavarljivima. Kada je riječ o zavarivanju, primjetno je da tijekom procesa kod nekih legure titana dolazi do očvršćivanja. Kod takvih je legura potrebno provesti predgrijavanje prije zavarivanja te toplinsku obradu nakon zavarivanja. U zavaru titan legura moguća je pojava pogrešaka, a najčešće su povezane s apsorpcijom plinova, porastom zrna, poroznošću i hladnim pukotinama. Titan ima odlična svojstva, ali njegova visoka cijena predstavlja problem u uporabi zbog mogućih velikih gubitaka materijala. Zato se WAAM postupak pokazao kao idealan, s obzirom na njegov mali BTF omjer koji omogućuje ekonomičniju uporabu titana i smanjenje gubitaka [4, 28].

3.3.3. Legure na bazi nikla

Glavno obilježje ovih legura jest FCC kristalna struktura, što znači da zadržavaju žilavost i ne prijelaze u krhki prijelom pri snižavanju temperature, što ih čini žilavim materijalom. Legure na bazi nikla često se primjenjuju u kemijskoj, naftnoj, prehrambenoj, zrakoplovnoj i nuklearnoj industriji. Odlikuje ih visoka čvrstoća na povišenim temperaturama, niska toplinska istežljivost, dobra zavarljivost, sjajna otpornost na koroziju te vatrootpornost. Zbog visokih troškova proizvodnje tradicionalnim postupcima te izazovima u strojnoj obradi, WAAM postupak ističe se kao idealan izbor za proizvodnju takvih legura [2, 66].

3.3.4. Čelik

Čelici su široko primijenjene željezne legure u raznim industrijama poput brodogradnje, automobilske, građevinske i plinske industrije. WAAM postupkom mogu se proizvoditi dijelovi od čelika s ukupno niskim troškovima. Posebno su važni nehrđajući čelici koji se koriste u kemijskim postrojenjima i nuklearnoj industriji, gdje je potrebna visoka otpornost na toplinu i koroziju [4, 29]. Slika 9. prikazuje bicikl Arc Bike II od nehrđajućeg čelika izrađen primjenom WAAM tehnologije.



Slika 9. Arc Bike I od nehrđajućeg čelika [30]

3.3.5. Legure na bazi magnezija

U posljednjih nekoliko godina, povećava se uporaba magnezijских legura kao alternativa aluminiju u automobilskoj i biomedicinskoj industriji s ciljem smanjenja težine pojedinih dijelova. Razvoj magnezijevih legura bio je ograničen zbog rizika od zapaljivosti; bliža mu je talištu, ali kako je porastao interes za Mg-Al legurama, dodani su određeni legirni elementi magneziju kako bi se smanjila osjetljivost na paljenje. Također, magnezij ima HCP strukturu što rezultira lošom duktilnošću, ali izvrsnom istežljivošću. Zbog problema oštećenja koji se mogu pojaviti pri kovanju ili istiskivanju, najčešći način proizvodnje magnezijevih legura predstavlja lijevanje. Kao i kod aluminija, magnezij stvara vatrostalni oksidni sloj na površini, no proces uklanjanja tog sloja puno je jednostavniji nego kod aluminija [4, 17, 19].

3.4. Primjena WAAM-a

WAAM postupak za izradu komponenti koristi standardnu zavarivačku opremu, pa je njegov razvoj usko povezan s napretkom u zavarivačkoj industriji. Ključno je razvijati modificirane postupke zavarivanja koji omogućuju proizvodnju kvalitetnijih, preciznijih i pouzdanijih dijelova primjenom ove tehnologije. Jedan od važnih parametara pri procjeni učinkovitosti WAAM postupka je BTF vrijednost, koja označava koliko materijala se na kraju zaista iskoristi, dok se ostatak odbaci kao otpad. S obzirom na to da se WAAM postupkom proizvode masivni dijelovi, količina odbačenog materijala može biti značajna, čak nekoliko kilograma za jedan komad. WAAM tehnologija ima primjenu u različitim industrijama, uključujući zrakoplovstvo, automobilsku industriju, građevinarstvo, brodogradnju i mnoge druge. Ona omogućuje izradu srednjih i velikih dijelova, često bez previše kompleksnosti, koristeći širok spektar materijala i njihovih legura [31, 32, 33]. Slika 10. prikazuje primjer spojnog element za naftne platforme izrađen WAAM tehnologijom.

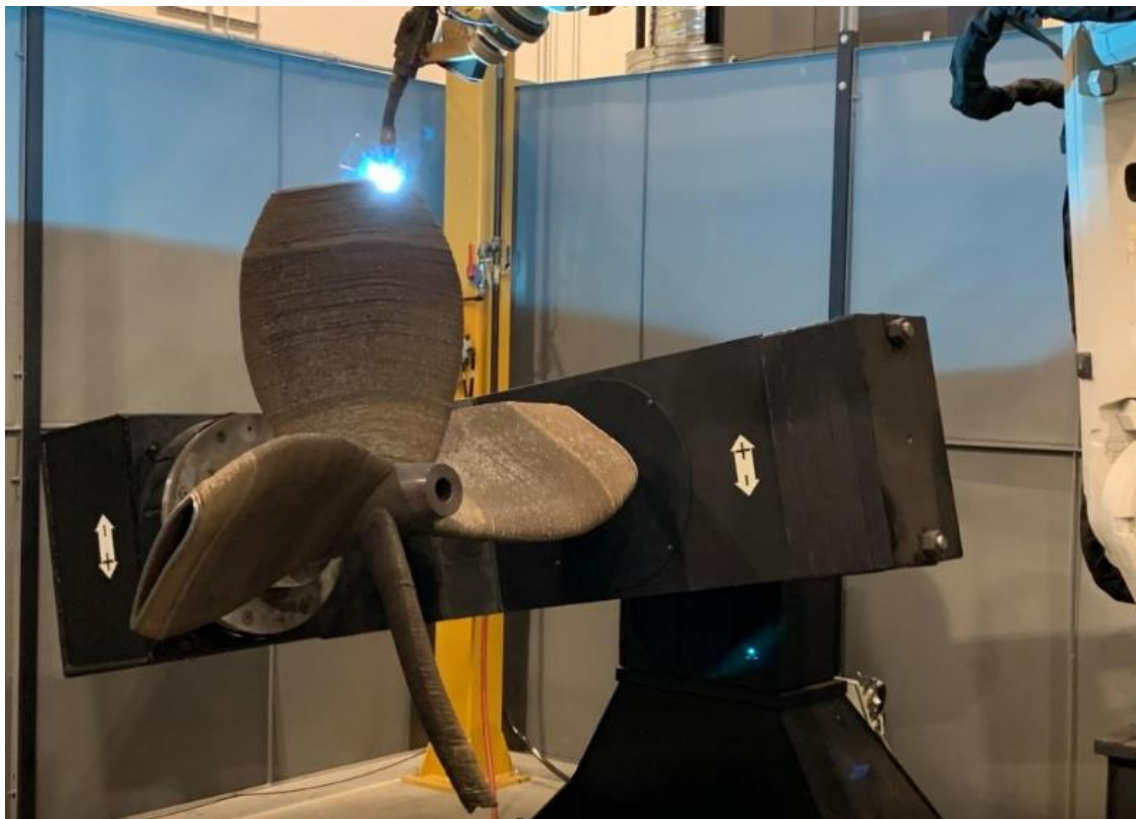


Slika 10. Spojni element za naftne platforme izraden WAAM postupkom [34]

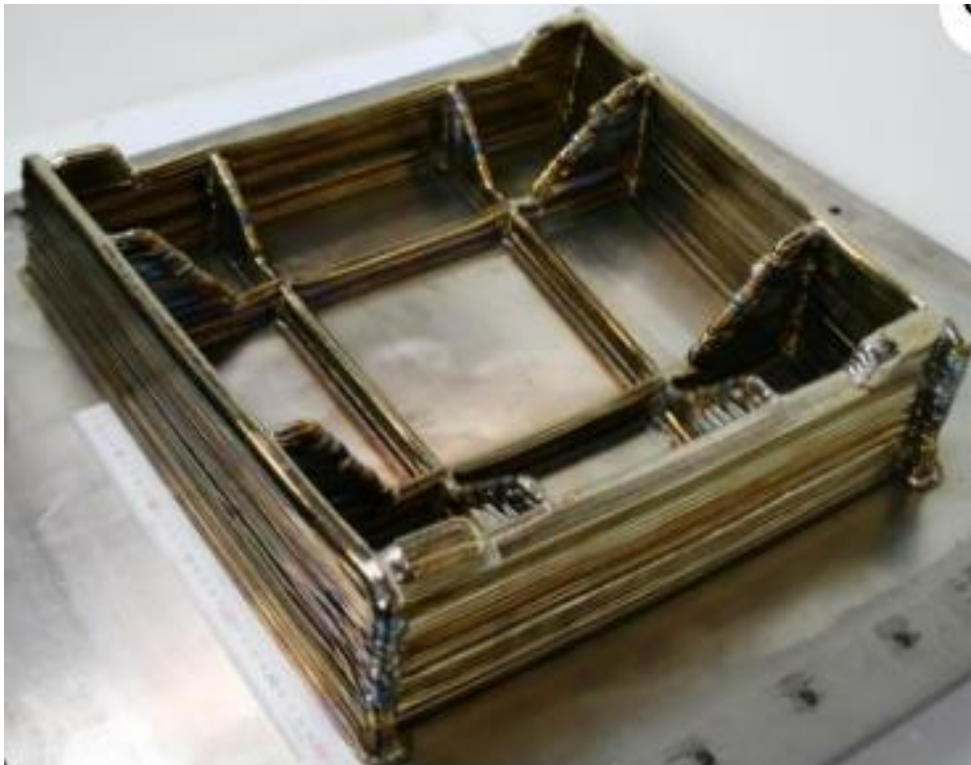
Na sljedećih nekoliko fotografija prikazani su primjeri elemenata izvedenih WAAM tehnologijom proizvodnje.



Slika 11. Zamjenska komponenta stroja izrađena WAAM postupkom [34]



Slika 12. WAAM postupak izrade propelera sa šupljim lopaticama [10]



Slika 13. Nosač kotača aviona izrađen WAAM postupkom [35]



Slika 14. Propeler s tri lopatice izrađen WAAM postupkom [36]



Slika 15. Lopatice vodene turbine izrađene WAAM postupkom [36]



Slika 16. Most izrađen WAAM postupkom [36]

4. NEHRĐAJUĆI ČELICI

Kako bi čelik bio otporan na koroziju, potrebno je zadovoljiti dva osnovna uvjeta. Prvi uvjet jest da čelik sadrži najmanje 12% kroma u čvrstoj otopini, a neki korozijski postojani čelici sadrže i do 30% kroma. Drugi ključni uvjet za korozijsku postojanost je da čelik ima homogenu monofaznu mikrostrukturu, koja sprječava elektrokemijsku koroziju jer nema različitih elektropotencijala. Idealno, korozijski postojani čelici trebali bi imati potpunu feritnu, austenitnu ili martenzitnu mikrostrukturu. Nehrđajući čelici se primjenjuju u raznim granama industrije, kao što su brodogradnja, građevinarstvo, rudarstvo, medicina, strojarstvo i elektrotehnika [37, 38, 39].

Nehrđajući čelici dijele se na [38, 40]:

- Feritne nehrđajuće čelike
- Austenitne nehrđajuće čelike
- Duplex nehrđajuće čelike
- Martenzitne nehrđajuće čelike
- Precipitacijsko očvrsnute nehrđajuće čelike.

4.1. Feritni nehrđajući čelici

Feritne nehrđajuće čelike karakterizira udio kroma od 14,5 % do 27 % te BCC kristalna rešetka u temperaturnom rasponu od sobne temperature do temperature taljenja. Njihov udio ugljika vrlo je nizak i rijetko prelazi 0,06 %, što je znatno ispod propisanog minimuma. U slučajevima kada su izloženi visokim temperaturama; 1000°C ili više u kratkom vremenskom razdoblju, mogu postati krhki i izgubiti otpornost na koroziju, što ih čini nepovoljnim za zavarivanje. Također pokazuju tendenciju postajanja krhkima na niskim temperaturama. Što se temperatura smanjuje ispod sobne temperature, postaju manje rastezljivi i žilavi, te sve više skloni lomljenju [24, 37, 41].

Svojstva feritnih nehrđajućih čelika su [42, 43, 44]:

- relativno su mekani
- magnetični
- slabo zavarljivi zbog sklonosti pogrubljenju zrna pri temperaturama većim od 900°C
- sklone stvaranju krhke sigma faze pri temperaturama od 520°C do 850°C
- slabo deformabilni
- dobro obradivi odvajanjem čestica
- loše postojani u kloridnim otopinama
- nisu oosjetljivi na napetosnu koroziju
- ekonomski prihvatljiviji od ostalih nehrđajućih čelika
- podložni su lomu pri niskim temperaturama.

4.2. Austenitni nehrđajući čelici

Austenitni nehrđajući čelici karakteriziraju se udjelom kroma između 16% i 26% te udjelom nikla manjim od 35%, a njihova kristalna rešetka je FCC. Ovi čelici iznimno su otporni na koroziju te imaju impresivna mehanička svojstva, uključujući odličnu čvrstoću, žilavost, deformabilnost i trajnost. Austenitni nehrđajući čelici su nemagnetični, imaju iznimno stabilnu kristalnu strukturu, odličnu zavarljivost, ne podliježu kaljenju, ali ih je moguće očvrnuti hladnom deformacijom. Nikal se polako difundira, čak i pri visokim temperaturama. Dulje izlaganje visokim temperaturama može rezultirati porastom zrna ili krhkošću. Supstitucijski elementi koji stabiliziraju austenitnu strukturu sprječavaju promjene u kristalnoj rešetki pri hlađenju [6, 37, 42].

Svojstva austenitnih nehrđajućih čelika su [41, 43, 44]:

- nema mogućnosti usitnjavanja zrna
- nemagnetični
- veće napetosti i deformacije tijekom zavarivanja nego kod feritnih čelika
- legiranjem s molibdenom, volframom i vanadijem postiže se dobra otpornost prema puzanju pri temperaturama iznad 600°C
- visoka žilavost
- visoka oksidacijska i korozijska otpornost
- visok odnos čvrstoća/masa
- dobra svojstva pri niskim temperaturama
- postojana austenitna struktura od „solidus“ temperature do ispod sobne temperature
- FCC rešetka koja osigurava visoku deformabilnost
- nisu skloni povećanju zrna u zoni utjecaja topline tijekom zavarivanja.

4.3. Austenitno-feritni (duplex) nehrđajući čelici

Duplex nehrđajući čelici dvofazni su materijali, posjeduju kombinaciju austenitne FCC i feritne BCC rešetke. Ovo je rezultat nedostatka adekvatne količine nikla u njihovom sastavu. Usporedno s austenitnim nehrđajućim čelicima, duplex čelici imaju poboljšanu otpornost na koroziju i veću čvrstoću. Feritni dio duplex strukture ograničava pojavu napetosne korozije koja može nastati u austenitnom dijelu. Omjer feritne i austenitne faze u duplex nehrđajućim čelicima ovisi o njihovom sastavu te omjeru feritotvoraca; Cr i Mo i austenitotvoraca; Ni i N. Omjer feritne i austenitne faze može varirati u rasponu od 70 : 30 do 50 : 50. Odnos između feritne i austenitne faze igra ključnu ulogu u formiranju mehaničkih i fizikalnih svojstava duplex nehrđajućih čelika, posebno u granici razvlačenja i vlačnoj čvrstoći u usporedbi s feritnim i austenitnim nehrđajućim čelicima. U početku, zavarljivost duplex nehrđajućih čelika bila je ograničena zbog stvaranja i zadržavanja feritne faze u zoni utjecaja topline tijekom postupka zavarivanja, što je ometalo njihovu primjenu. Međutim, tehnološki napredak omogućio je poboljšanje zavarljivosti ovih čelika. [37, 43].

Svojstva duplex nehrđajućih čelika su [37]:

- nemagnetični su
- nisu kaljeni
- izvrsna mehanička i fizikalna svojstva
- odlična otpornost na koroziju.

4.4. Martenzitni nehrđajući čelici

Izgleda nemoguće da čelik s više od 11 do 12% kroma može biti nehrđajući, a istovremeno postignuti potrebnu toplinsku deformaciju brzim hlađenjem austenita s ciljem stvaranja iskrivljene i tvrda martenzitne kristalne strukture. Ugljik, snažan intersticijski austenitni stabilizator, koristi se kao legirni element s ciljem premještanja feritno-austenitnog područja u slučajevima većih količina kroma. S ciljem postizanja potrebne kombinacije čvrstoće, tvrdoće, rastezljivosti i žilavosti, martenzitni čelici moraju se podvrgnuti toplinskoj obradi, odnosno popuštanju na temperaturama ispod austenitnog područja. Toplinskom obradom ujedno se postiže i najbolja moguća otpornost na koroziju kod nehrđajućih martenzitnih čelika [37].

4.5. Precipitacijski očvršnuti nehrđajući čelici

Austenitne nehrđajuće čelike karakteriziraju niske vrijednosti čvrstoće i nemogućnost toplinske obrade, ali odlična korozijska postojanost i obradivost. S druge strane, martenzitni nehrđajući čelici mogu se toplinski obrađivati u svrhu postizanja više čvrstoće, ali toplinska obrada ograničava njihovu obradivost, osobito zavarljivost. Osim toga posjeduju srednju korozijsku postojanost. Kako bi se prevladala ova ograničenja, razvijeni su precipitacijski očvršnuti nehrđajući čelici. Precizna ravnoteža kemijskog sastava ključna je kako bi se osiguralo nastajanje faza i precipitata potrebnih za postizanje željenih svojstava ovih čelika. Precipitacijski očvršnuti nehrđajući čelici imaju slična ili čak bolja mehanička svojstva u usporedbi s martenzitnim nehrđajućim čelicima te pokazuju korozijsku postojanost sličnu austenitnim nehrđajućim čelicima 1.4301. Toplinske obrade i postupci zavarivanja koji su potrebni za razvoj i očuvanje svojstava ovih nehrđajućih čelika moraju se koristiti kod svih njihovih primjena. Specifična toplinska obrada za postizanje precipitacijskog očvršnuća varira ovisno o vrsti legure [37, 38].

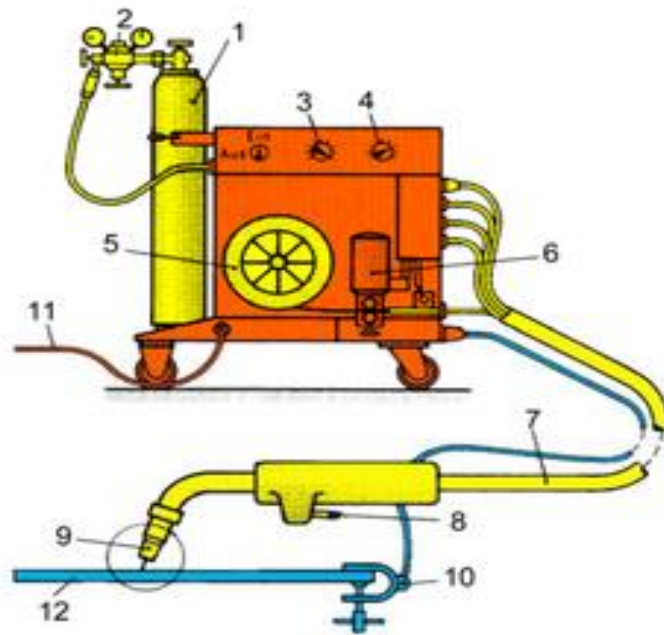
5. EKSPERIMENTALNI DIO

Eksperimentalni dio diplomskog rada proveden je u svrhu proučavanja mogućnosti navarivanja nehrđajućeg čelika WAAM postupkom te određivanja mehaničkih svojstava elemenata navarenih različitim jakostima struje za zavarivanje. Eksperimentalni dio rada proveden je u laboratorijima Sveučilišta Sjever u Varaždinu.

Cilj eksperimentalnog dijela rada bio je odrediti utjecaj jakosti struje zavarivanja na mehanička svojstva i makrostrukturu navarenog spoja. Na temelju toga, WAAM postupkom izrađena su dva zida od nehrđajućeg čelika iz kojih su se izrezali potrebni uzorci za provedena ispitivanja. Najprije je WAAM postupkom izveden proces navarivanja zidova u 13 slojeva. Iz navarenih zidova izrezano je nekoliko uzoraka koji su zatim prošli faze pripreme površine za ispitivanje. Iz pripremljenih uzoraka ispitana su mehaničkih svojstava i makrostruktura navarenih spojeva. Nakon provedenih makrostrukturnih ispitivanja navarenih uzoraka dobiven je uvid u makrostrukturu svakog navarenog sloja te se na temelju njih mogu uočiti geometrijske karakteristike slojeva kao što su primjerice efektivne širine navarenih zidova.

5.1. MIG/MAG postupak zavarivanja

Naziv MIG/MAG dolazi od engleskih izraza Metal Inert Gas (Metal - inertan plin), odnosno Metal Active Gas (Metal - aktivni plin), a predstavlja elektrolučno zavarivanje taljivom elektrodom u zaštitnoj atmosferi inertnog/aktivnog plina. Ovi izrazi u sebi sadrže i opis postupka, dok se kod MIG postupka zavarivanje ostvaruje pod zaštitom inertnog plina, kod MAG postupka u zavarivanju sudjeluje aktivan plin [42, 45, 46]. Slika 17. prikazuje sustav za MIG postupak zavarivanja.



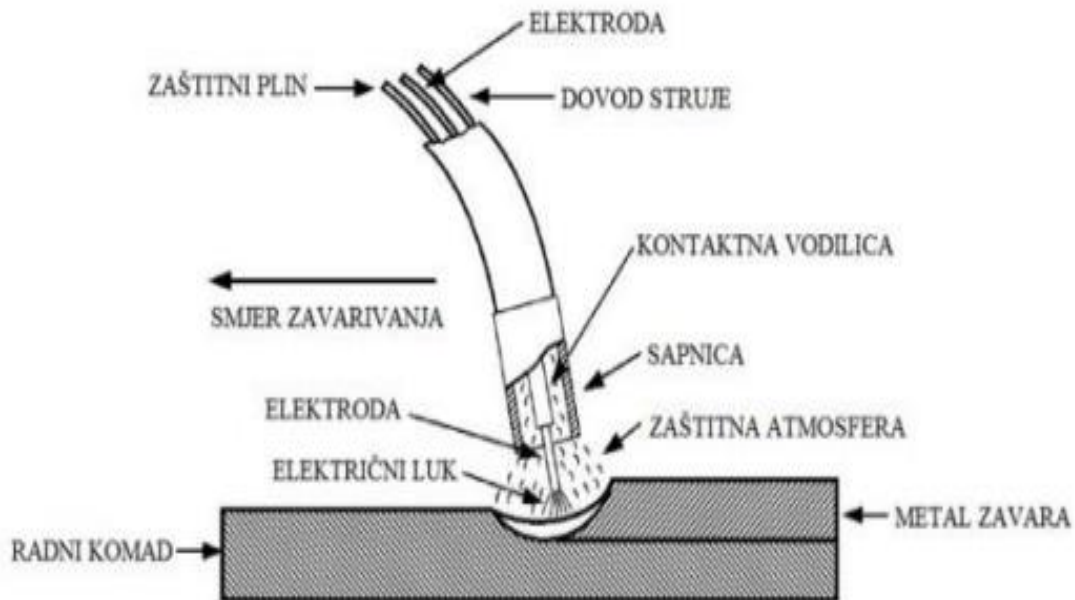
Slika 17. Sustav za MIG postupak zavarivanja [47]

Sustav za MIG postupak zavarivanja sastoji se od [47]:

- | | |
|----|--|
| 1 | Plinske boce (inertan plin) |
| 2 | Redukcijskog ventila |
| 3 | Regulacije brzine dodavanja žice |
| 4 | Podešavanja jakosti struje zavarivanja |
| 5 | Namotaja žice (žica u kolutu) |
| 6 | Pogona žice |
| 7 | Savitljivog crijeva |
| 8 | Pištolja (držač elektrode) |
| 9 | Mlaznice pištolja |
| 10 | Pola kleme (masa) |
| 11 | Mrežnog priključka |
| 12 | Osnovnog materijala |

Kod MIG/MAG postupka zavarivanja metalna elektroda potiskuje se kroz vodilicu pištolja za zavarivanje gdje se tali u električnom luku uz zaštitu plina i prenosi u rastaljeni metal koji se zavaruje. U ovom se postupku električni luk održava između taljive elektrode u obliku žice i osnovnog materijala. Žica dodatnog materijala nalazi se na kolutu s kojeg se pomoću automatskog sustava za dovođenje kontinuirano dovodi na mjesto zavara. Kod MIG zavarivanja koriste se neutralni, odnosno inertni plinovi kao što su argon, helij ili njihove mješavine. Kod MAG zavarivanja koriste se aktivni plinovi, najčešće CO₂ i njegove mješavine s drugim plinovima. Zbog

ovoga, ovaj tip zavarivanja ponekad se naziva i CO₂ zavarivanje. Riječ je o izuzetno brzom metodi zavarivanja koja je primjenjiva na razne vrste metala. Postoji mogućnost zavarivanja u svim položajima te potpuna automatizacija, odnosno robotizacija postupka. Nedostatak MIG/MAG postupka često je povezana s relativno visokim troškom opreme za zavarivanje [42, 46, 48]. Slikom 18. prikazan je postupak MIG zavarivanja s prisutnim elementima i pojavama.



Slika 18. Postupak MIG zavarivanja [49]

Navažniji parametri kod MIG/MAG postupka zavarivanja su [47]:

- jakost struje zavarivanja (I); tijekom zavarivanja kreće se ovisno o promjeru žice za zavarivanje (približne vrijednosti od 80 do 180 A)
- napon zavarivanja (U); tijekom zavarivanja kreće se približno od 16 do 26 V
- brzina zavarivanja; kreće se ovisno o primjenjenoj tehnici zavarivanja, promjeru žice za zavarivanje i parametrima zavarivanja (približno od 2 do 4 mm/s).

Parametri zavarivanja utječu na način prijenosa materijala. Prijenos materijala može se vršiti [20, 22, 37]:

- prijelaznim lukom
- kratkim spojevima
- štrcajućim lukom
- impulsnim zavarivanjem.

Nehrđajući čelici zavaruju se istosmjernom strujom sa što kraćim električnim lukom, pri čemu je žica uvijek povezana s pozitivnim (+) polom. Potrebno je voditi računa o unosu topline, odnosno potrebno je ograničiti ga iz razloga što može utjecati na korozijsku otpornost te izazvati deformacije materijala. Prilikom zavarivanja nehrđajućih čelika, zbog oksidacije, na spoju i okolnom području dolazi do formiranja oksidnog sloja koji dovodi do osiromašenja površine kromom. Nakon zavarivanja, nastali površinski sloj oksida potrebno je mehanički ili kemijski ukloniti kako bi se obnovila korozijska otpornost [22, 37].

Prednosti MIG/MAG postupka zavarivanja [2, 5, 22]:

- upotrebljiv pri zavarivanju većine metala
- širok izbor parametara i načina prijenosa materijala
- mogućnost zavarivanja u svim položajima
- upotreba raznih plinskih mješavina
- mogućnost upotrebe žice punjene praškom
- široki raspon debljina
- visoka proizvodnost i efikasnost
- prikladan za automatizaciju i mogućnost robotizacije postupka
- primjenjiv za lemljenje.

Nedostaci MIG/MAG postupka zavarivanja [6, 12, 22]:

- veći broj grešaka kod neprikladne tehnike rada i parametara zavarivanja; naljepljivanje, poroznost
- problemi pri dobavi žice
- rasprskavanje pri zavarivanju kratkim spojevima; rezultat su gubici i potreba za naknadnom obradom
- složenost opreme i uređaja za zavarivanje; potreba za dovođenjem žice, automatska regulacija
- pri zavarivanju na otvorenom nužna je zaštita od vjetra
- ograničenost zavarivačkog pištolja.

5.2. Korištena oprema

U ovoj stavci rada opisana je sva oprema korištena prilikom provođenja ekperimenta. Oprema za WAAM postupak sastoji se od izvora struje za zavarivanje i robota ili nekog drugog uređaja za manipulaciju pištoljem. U eksperimentu ovog rada korišten je modularni automatski uređaj koji osigurava konstantnu brzinu i linijsko vođenje. Osim uređaja *Promotech Rail Bull* za linijsko vođenje pištolja, prilikom navarivanja zidova korišteni su i *TransSteel 3000 Pulse* izvor struje za zavarivanje, termometar *SKF TKTL 20 ThermoLaser* za ispitivanje temperature navarenih slojeva, boce sa zaštitnim plinom te pištolj za zavarivanje [1, 19, 44]. Slikom 19. prikazan je radni prostor navarivanja s dijelom korištenih uređaja i materijala.



Slika 19. Radni prostor navarivanja s dijelom korištenih uređaja i materijala

Uzorci su iz navarenih zidova izrezani strojnom pilom, a u svrhu pripreme površine za daljnja ispitivanja korišten je uređaj za brušenje i poliranje *Metkon Forcipol IV Grinder & Polisher*, solna kiselina, bakrena pločica, baterija i hvataljka. Makrostruktura pripremljenih uzoraka ispitana je stereomikroskopom *Olympus SZX10*, a mehanička svojstva *Charpyjevim batom Pendulum impact charpy tester*. U ovoj stavci rada detaljno su opisani najvažniji uređaji korišteni u eksperimentu.

5.2.1. Izvor struje za navarivanje *TransSteel 3000 Pulse*

Kao izvor struje za navarivanje u eksperimentu korišten je *TransSteel 3000 Pulse*. *TransSteel 3000 Pulse* predstavlja pulsni MIG/MAG aparat za zavarivanje istosmjernom strujom. Uređaj je pogodan za zavarivanje raznih vrsta materijala te posjeduje sinergijske funkcije za nehrđajući čelik, aluminij, aluminijeve legure, titan, meke čelike, Inconel te za lemljenje bakrenih legura. Parametri se u ovaj izvor struje unose ručno. Slikom 20. prikazan je uređaj *TransSteel 3000 Pulse* korišten u eksperimentu. [1, 19]



Slika 20. Izvor struje za navarivanje *TransSteel 3000 Pulse* [50]

U tablici 1. prikazane su osnovne karakteristike *TransSteel 3000 Pulse* izvora za zavarivanje. Uređaj može provoditi zavarivanje pri maksimalnoj struji od 400 A u trajanju od 5 minuta [1, 19, 24].

Tablica 1. Osnovne karakteristike *TransSteel 3000 Pulse* izvora za zavarivanje [51]

Karakteristike izvora struje <i>TransSteel 3000 Pulse</i>	
Napon napajanja	380 / 400 [V]
Tolerancije napona napajanja	-10 / + 15 [%]
Min. jakost struja zavarivanja	10 [A]
Max. jakost struje zavarivanja	300 [A]
Radni ciklus [10 min/40 °C]	300 A / 40 %
Radni ciklus [10 min/40 °C]	280 A / 60 %
Radni ciklus [10 min/40 °C]	240 A / 100 %
Dužina	747 [mm]
Širina	300 [mm]
Visina	497 [mm]
Masa	34,6 [kg]

S gotovo 170 optimiziranih karakteristika, serija *TransSteel* posjeduje karakteristike koje zahtjeva sektor čeličnih konstrukcija za teške uvjete rada. Velika prednost *TransSteel* uređaja predstavlja raznolikost materijala primjene iz razloga što je samo jedan uređaj dovoljan za širok raspon primjena [51].

5.2.2. Uređaj za precizno vođenje pištolja *Promotech Rail Bull*

Rail Bull uređaj predstavlja uređaj za precizno vođenje pištolja za zavarivanje dizajniran za izradu sučeonih i kutnih zavara sa ili bez oscilacije. *Rail Bull* može raditi u sljedećim položajima zavarivanja:

- PA (ravno)
- PB (vodoravno okomito)
- PC (vodoravno)
- PD (gore horizontalno-okomito)
- PE (gore)
- PF (okomito gore)
- PG (okomito dolje).

Rail Bull kreće se duž krute ili polufleksibilne tračnice na feromagnetskim i neferomagnetskim materijalima zahvaljujući pogonu sa zupčastom letvom i tračnicama pričvršćenim na ravne ili zakrivljene površine pomoću različitih magnetskih ili vakuumskih jedinica [52, 53]. Slikom 21. prikazan je uređaj *Promotech Rail Bull* korišten u eksperimentu.



Slika 21. Uređaj za precizno vođenje pištolja *Promotech Rail Bull* [54]

Primarne karakteristike i prednosti uređaja su [52]:

- kompaktan, lagani dizajn s izdržljivim kućištem od lijevanog aluminijskog aluminija
- prikladno napajanje; 115–230 V, 50–60 Hz ili 42 V, 50–60 Hz
- mehanizam držača pištolja za brzo stezanje za različite vrste MIG/MAG pištolja promjera 16–22 mm; opcija do 35 mm
- precizno podešavanje pištolja pomoću poprečnog klizača
- spreman za rad u okomitom i vodoravnom položaju
- smanjenje gubitka dodatnog materijala; eliminiranje prekomjerno zavarivanje
- automatsko uključivanje/isključivanje luka pokreće zavarivanje i kretanje
- poboljšava radno okruženje; štiti operatera od topline i para

5.2.3. Termometar *SKF TKTL 20 ThermoLaser*

SKF TKTL 20 ThermoLaser predstavlja napredni termometar koji kombinira fleksibilnost infracrvenog termometra s mogućnošću kontaktnog termometra. Ovaj uređaj pruža rješenja za mnogobrojne primjene, uključujući provjeru temperature na površinama koje reflektiraju svjetlost poput aluminijskog aluminija i ležajeva, mjerenje temperature na pokretnim komponentama te provjeru temperature u slučajevima gdje kontakt nije prihvatljiv zbog potencijalne kontaminacije [55]. Slikom 22. prikazan je termometar *SKF TKTL 20 ThermoLaser* korišten u eksperimentu.



Slika 22. Termometar SKF TKTL 20 ThermoLaser [55]

Primarne karakteristike i prednosti uređaja su [55]:

- korisnički odabrana varijabla emisivnosti između 0,1 i 1,0, kada se koristi zajedno sa sondom, točna emisivnost može se definirati što pomaže u osiguravanju točnog mjerenja temperature
- SKF temperaturna sonda TMDT 2-30 (maks. 900 °C) idealna je za mjerenje objekata s visokom temperaturom. Sigurno mjeri temperaturu vrućih, opasnih ili teško dostupnih objekata.
- širok raspon mjerenja pomoću infracrvenog senzora od -60 do 500 °C, sa sondom -64 do 1400 °C
- idealna dopuna drugim tehnikama praćenja stanja, kao što je analiza vibracija
- zaslon s pozadinskim osvjetljenjem, što olakšava očitavanje temperature na slabo osvijetljenim ili tamnim mjestima

5.2.4. Uređaj za brušenje i poliranje *Metkon Forcipol 1V Grinder & Polisher*

Uređaj *Metkon Forcipol 1V Grinder & Polisher* predstavlja uređaj za brušenje i poliranje. Karakterizira ga promjenjiva brzina između 50-600 okretaja u minuti. Pogodan je za ručni i automatski rad. Uređaj je vrlo izdržljiv. Kotači su postavljeni na kuglične ležajeve što omogućuje primjenu visokog pritiska za pripremu čak i velikih uzoraka. Kuglični ležajevi omogućuju tihi rad bez vibracija. Ulaz za vodu i fleksibilni izlazi za vodu s kontrolnim ventilima za mokro mljevenje standardne su značajke. Gumbi za uključivanje/isključivanje motora i uključivanje/isključivanje vode postavljeni su na prednjoj ploči [56]. Slikom 23. prikazan je *Metkon Forcipol 1V Grinder & Polisher* korišten u eksperimentu.



Slika 23. Uređaj za brušenje i poliranje *Metkon Forcipol 1V Grinder & Polisher*

Karakteristike korištenog uređaja su [57]:

- stroj s jednom pločom
- jedan snažan motor visokog momenta; 0,75 KS
- ploča Ø200 do Ø250 mm
- promjenjiva brzina; 50 - 600 okr/min.

5.2.5. Stereomikroskop *Olympus SZX10*

Stereomikroskop *Olympus SZX10* dizajniran je za pružanje prirodnog prikaza uzorka s izvrsnim stereo prikazom i prikazom boja. Uređaj pokriva raspon povećanja od 6,3x do 63x sa svojim objektivom od 1x i nudi povećanje do 123x sa objektivom od 2x. Zahvaljujući ovoj svestranosti širokog raspona omjera zumiranja od 10:1, dobar je izbor za aplikacije u znanosti o životu koje zahtijevaju makro prikaze s malim povećanjem za seciranje i manipulaciju uzorcima, te oštre prikaze s velikim povećanjem za pažljivo promatranje staničnih struktura [58]. Slikom 24. prikazan je stereomikroskop *Olympus SZX10* korišten u eksperimentu.



Slika 24. Stereomikroskop *Olympus SZX10* [53]

SZX10 također može biti opremljen trinokularnom cijevi i *Olympus DP* serijom digitalnih kamera za snimanje slika visoke razlučivosti i istraživačku dokumentaciju. Fotoaparati serije DP nude visoku osjetljivost za širok raspon primjena, uključujući visokoosjetljivo fluorescentno snimanje, a njima se lako može upravljati pomoću softvera *Olympus cellSens*. *OLYMPUS Stream imaging softver* nudi sve alate potrebne za provođenje jednostavnih 2D mjerenja kroz složenu analizu u okruženju jednostavnom za korištenje i podržava mnoštvo operacija uključujući promatranje, generiranje izvješća, stvaranje baze podataka i arhiviranje [58].

5.2.6. Charpyjev bat *Pendulum impact charpy tester*

Charpy, Izod i Ispitivanje udarom vlačnog klatna najpopularnije su metode određivanja čvrstoće materijala na udar. Razumijevanje svojstava apsorpcije energije materijala je kritično. Predviđa razinu plastične deformacije koju će materijal moći podnijeti. Dok obje metode ispitivanja udarnim klatnom; Izod i Charpy mjere slična svojstva, širenje pukotine se razlikuje. Uzrok su varijacije u dizajnu uzorka i konfiguraciji ispitivanja. Slikom 25. prikazan je Charpyjev bat *Pendulum impact charpy tester* korišten u eksperimentu.

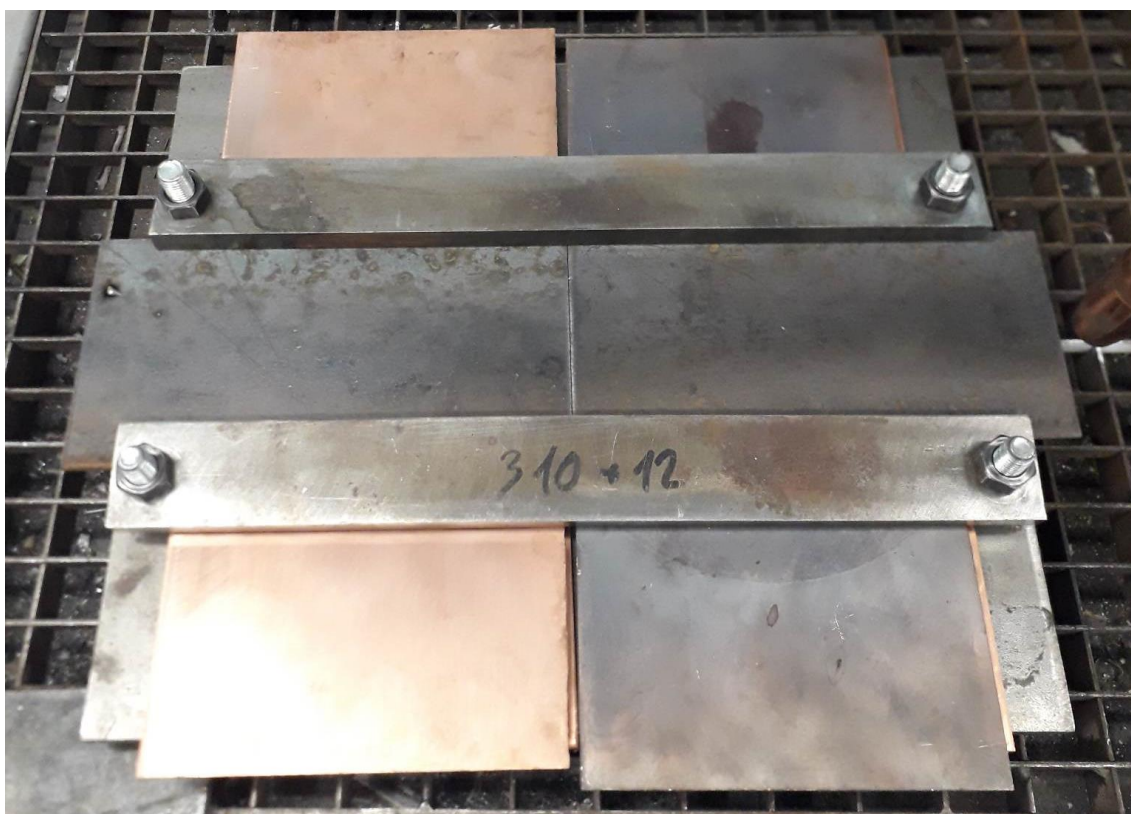


Slika 25. Charpyjev bat *Pendulum impact charpy tester*

Ispitivač je opremljen čekićem s padajućim klatnom, koji je u mogućnosti jednim udarcem razbiti uzorak urezan u sredini, postavljen na dva nosača. Test se provodi na Charpy uzorku u svrhu ispitivanja energije apsorbirane tijekom udarca. Energija se mjeri u Joulima, a dobivena vrijednost označava udarni rad loma materijala [59].

5.3. Korišteni materijal

Kao podloga za navarivanje korištene su pločice od općeg konstrukcijskog čelika S355JR debljine 8 mm, dimenzija 170 x 85 mm, izrezane iz table lima na plazma rezačici. Oznake osnovnog materijala, odnosno materijala pločice su S355JR / EN 10025 – 2, prema DIN – u: 10045. Navedeni čelik spada u grupu nelegiranih konstrukcijskih čelika. Prije postupka navarivanja detaljno je pripremljen, očišćen od nečistoća te pomoću dvije pločice pričvršćen na radnu ploču kako bi se smanjila deformacija [1, 60]. Slikom 26. prikazana je radna podloga s pričvršćenim pločicama osnovnog materijala.



Slika 26. Radna podloga s dijelom korištenog materijala

Postupak navarivanja zidova proveden je punom žicom ER 308 LSi promjera \varnothing 1 mm (prema EN ISO 14343-A oznaka G 19 9 LSi). Kemijski sastav metala navara dobivenog korištenjem žice dodatnog materijala prikazan je u tablici 2., a mehanička svojstva u tablici 3. Kemijski sastav i mehanička svojstva materijala garantira proizvođač.

Tablica 2. Kemijski sastav dodatnog materijala [61]

KEMIJSKI SASTAV NEHRĐAJUĆEG ČELIKA; ER308LSi / EN ISO 14343-A : G 19 9 LSi									
Kemijski element	C	Cr	Ni	Mo	Mn	Si	P	S	Cu
Min. [%]	-	19,5	9	-	1	0,65	-	-	-
Max. [%]	0,03	22	11	0,75	2,5	1	0,03	0,03	0,75

Tablica 3. Mehanička svojstva dodatnog materijala [62]

MEHANIČKA SVOJSTVA NEHRĐAJUĆEG ČELIKA; ER308LSi / EN ISO 14343-A : G 19 9 LSi	
Vlačna čvrstoća [<i>R_m</i>]	593 [MPa]
Granica tečenja [<i>R_{p0,2}</i>]	393 [MPa]
Istezanje [<i>A₄</i>]	42 [%]
Udarni rad loma [<i>KV</i>]	- 40 [°C] 81 [J]

ER 308 LSi je žica s udjelom do 22 % Cr i 11 % Ni koja se koristi za MIG/MAG postupak zavarivanja te ju karakterizira nizak udio ugljika. Navedena žica zbog svojih antikorozijskih svojstava koristi se za zavarivanje u procesnoj industriji te industriji nafte [6, 11, 60].

Osim osnovnog materijala u obliku pločice te dodatnog u obliku žice, kao zaštitni plin prilikom navarivanja korišten je argon sa stupnjem čistoće 4.8, proizvođača Messer. Argon 4.8 je inertan plin idealan za zavarivanje kojeg karakterizira čistoća od 99,998 %. Bez mirisa je i nije zapaljiv. Ovaj plin primjenjuje se za TIG/MIG zavarivanju aluminija, visokolegiranih čelika i čelika na bazi nikla [43, 44]. Slikom 27. prikazan je korišten zaštitni plin.

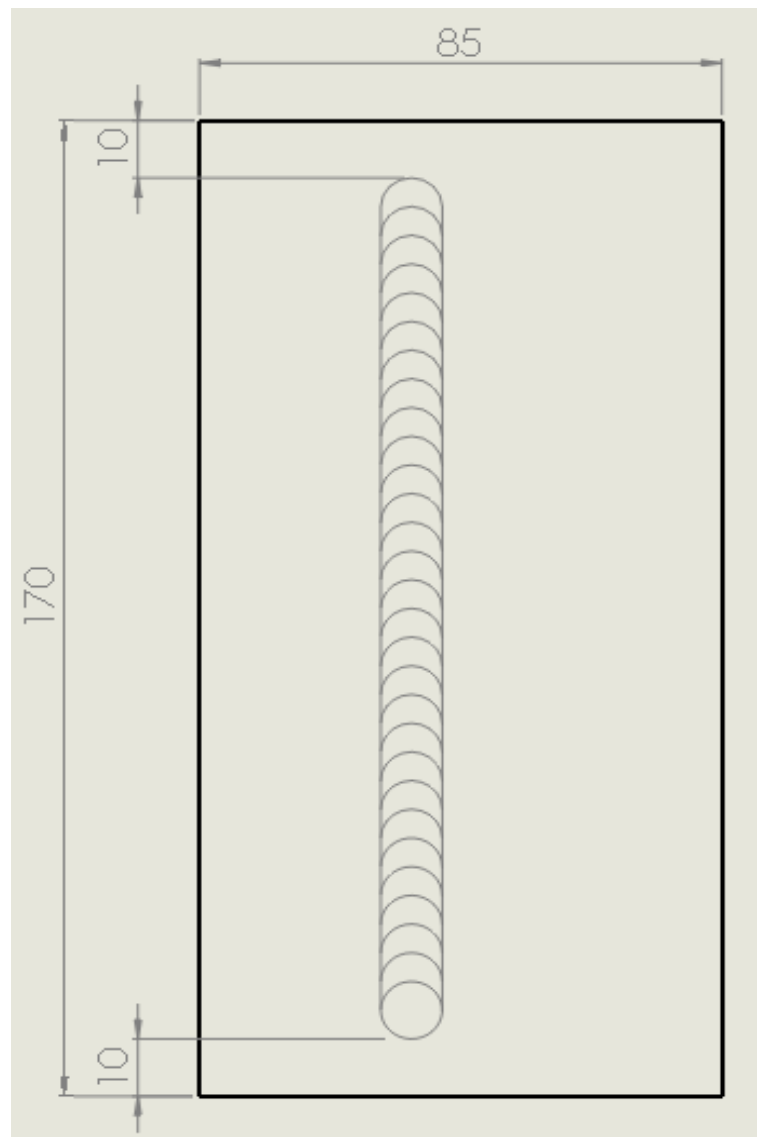


Slika 27. Oznaka na boci zaštitnog plina korištenog u eksperimentu

Zbog veće gustoće, potrebnog manjeg protoka, lakše uspostave električnog luka, većeg ionizacijskog potencijala te niže cijene i veće dostupnosti u odnosu na ostale inertne plinove, Argon se u praksi upotrebljava najčešće [44].

5.4. Postupak WAAM navarivanja

U ovom dijelu diplomskog rada detaljno je opisan postupak navarivanja zidova od nehrđajućeg čelika aditivnom proizvodnjom električnim lukom i žicom. Prvi sloj zidova navaren je na pločice od općeg konstrukcijskog čelika. Slikom 28. prikazane su dimenzije osnovnog materijala u obliku pločice te pozicija navara prvog sloja dodatnog materijala.



Slika 28. Dimenzije pločice osnovnog materijala i pozicija prvog prolaza dodatnog materijala

Kao podloga za navarivanje korištene su pločice od općeg konstrukcijskog čelika S355JR debljine 8 mm, dimenzija 170 x 85 mm. Samo navarivanje izvršeno je MIG postupkom, gdje je prijenos materijala vršen kratkim spojevima. Definiranje parametara izvršeno je unosom potrebnih podataka u sustav pa se tako najprije definirala vrsta dodatnog materijala, zatim promjer dodatnog materijala te na kraju vrsta zaštitnog plina. Slikom 29. prikazan je izvor struje za zavarivanje s definiranim parametrima navarivanja.



Slika 29. Izvor struje za zavarivanje s definiranim parametrima navarivanja

Kao zaštitni plin kod navarivanja oba zida korišten je Argon 4.8, protoka 15 l/min. Navarena su dva zida, različitim jakostima struje. Prije samog postupka navarivanja zidova, u svrhu smanjenja deformacija koje se javljaju uslijed navarivanja, pločice osnovnog materijala bilo je potrebno pričvrstiti za radnu podlogu. Pričvršćivanje pločica za radni stol izvedeno je pomoću stezne naprave. Ispod pojedine pločice osnovnog materijala postavljene su po dvije bakrene ploče u svrhu bržeg odvođenja topline, odnosno bržeg hlađenja navarenih slojeva. Osim pričvršćivanja, prije početka navarivanja s gornjih površina pločica bilo je potrebno očistiti sloj oksida radi lakšeg uspostavljanja električnog luka. Sloj oksida s površine je očišćen ručno, primjenom metalne četke. Slika 30. prikazuje prethodno očišćene pločice osnovnog materijala koje su zajedno s bakrenim pločicama ispod njih pričvršćene za radni stol te oznake jakosti struja primjenjenih za navarivanje pojedinog uzorka zida.



Slika 30. Pločice osnovnog materijala pričvršćene za radni stol s primjenjenim jakostima struja

Nakon što su podešeni svi parametri navarivanja te pločice osnovnog materijala pričvršćene za radni stol, provedeno je pozicioniranje pištolja za navarivanje. Pištolj za navarivanje smješten je u držač uređaja za precizno vođenje pištolja Promotech Rail Bull. Položaj, odnosno nagib pištolja u odnosu na pločice osnovnog materijala iznosi približno 90° . Na slici 31. prikazan je radni prostor pri navarivanju uzoraka.



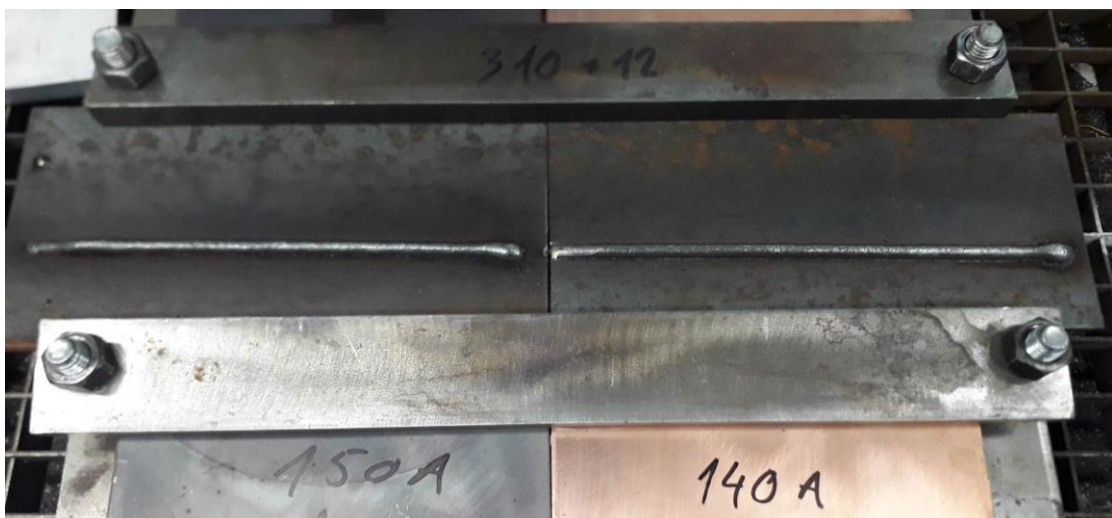
Slika 31. Radni prostor pri navarivanju uzoraka

Kako bi se omogućilo postizanje kratkog spoja između elektrode dodatnog materijala koja je u ovom slučaju žica od nehrđajućeg čelika i radnog komada, radni stol povezan je na izvor električne energije pomoću pol kleme.

Uzorci zidova od nehrđajućeg čelika navareni su jednosmjernim pomicanjem pištolja za navarivanje. Svih 13 prolaza zidova navareno je lijevom tehnikom, odnosno pravocrtnim gibanjem pištolja s desna u lijevo. Najprije je na desnu pločicu osnovnog materijala navaren jedan sloj zida primjenom struje jakosti 140 A, a nakon toga na lijevu pločicu jedan sloj primjenom struje jakosti 150 A. Udaljenost sapnice pištolja od radnog komada iznosila je 15 mm. Nakon svakog prolaza sapnica pištolja podignuta je 3 mm. Prije navarivanja slijedećeg sloja, s površine svakog prethodnog sloja, metalnom četkom uklonjeni su metali oksidi. Brzina zavarivanja bila je konstantna te je za svaki sloj iznosila 36 cm/min. Slika 32. prikazuje prve prolaze s metalnim oksidima na površini, a slika 33. očišćene slojeve spremne za navarivanje slijedećeg prolaza.



Slika 32. Prvi prolazi uzoraka s metalnim oksidima na površini



Slika 33. Očišćeni prvi slojevi spremni za navarivanje slijedećeg prolaza

Prvi prolaz navaren je strujom veće jakosti, odnosno jakosti 160 A s ciljem:

- postizanja veće širine početnog sloja
- osiguranja bolje podloga za daljnje navarivanje
- onemogućavanja prelijevanja gornjih slojeva.

Vidljivo je da je navar jednolične geometrije po cijeloj dužini, osim na početku gdje je došlo do uspostave kratkog spoja između žice i pločice. Tablicom 4. prikazani su parametri navarivanja strujom jakosti 140 A, a tablicom 5. parametri navarivanja strujom jakosti 150 A.

Tablica 4. Parametri navarivanja strujom jakosti 140 A

Parametri navarivanja strujom jakosti 140 A		
Broj prolaza	Prosječan iznos jakosti struje [A]	Prosječan iznos napona [V]
1	119	20
2	119	20
3	121	19
4	118	18,8
5	117	19
6	116	18,9
7	126	18,8
8	124	18,8
9	122	18,8
10	130	18,4
11	132	18,4
12	139	17,9
13	137	18

Tablica 5. Parametri navarivanja strujom jakosti 150 A

Parametri navarivanja strujom jakosti 150 A		
Broj prolaza	Prosječan iznos jakosti struje [A]	Prosječan iznos napona [V]
1	119	20
2	119	20
3	124	19,5
4	121	19,7
5	118	19,8
6	118	19,7
7	129	19,5
8	129	19,5
9	128	19,3
10	145	18,4
11	139	18,7
12	149	18
13	147	18

Na sljedećim slikama prikazani su pojedini prolazi navarivanja uzoraka s površinskim nečistoćama prije čišćenja. Na slici 35. prikazan je četvrti prolaz. Na pločicama osnovnog materijala uočavaju se značajne deformacije uzrokovane višestrukim unosom topline. Kao posljedica deformacije osnovnog materijala dolazi do pojave zračnih džepova između pločica osnovnog materijala te bakrenih pločica podmetnutih ispod njih. Rezultat je znatno slabije odvođenje topline preko bakrenih pločica te je samim time produženo vrijeme hlađenja daljnjih prolaza.



Slika 34. Uzorci zidova s dva navarena sloja



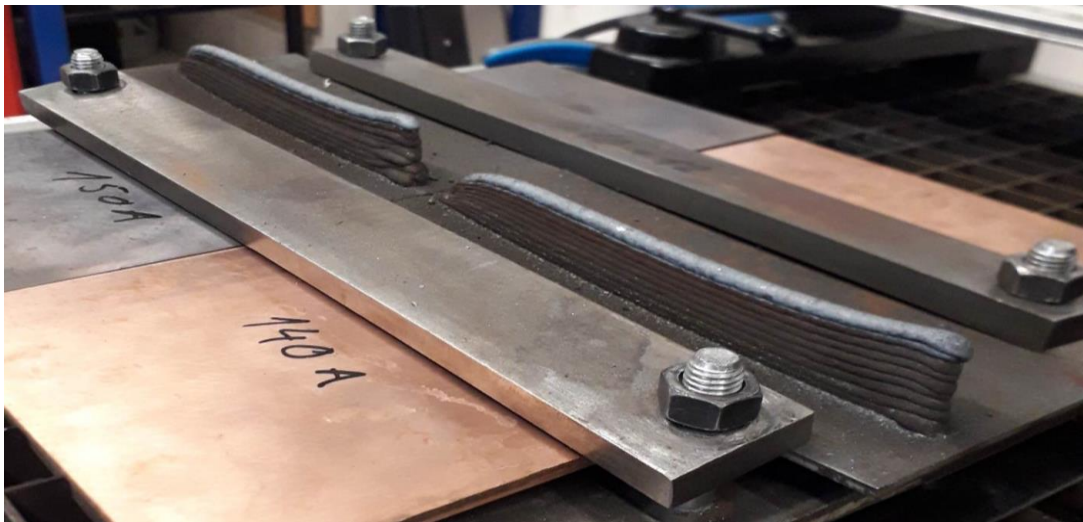
Slika 35. Uzorci zidova s četiri navarena sloja



Slika 36. Uzorci zidova sa šest navarenih slojeva



Slika 37. Uzorci zidova s osam navarenih slojeva



Slika 38. Uzorci zidova s deset navarenih slojeva



Slika 39. Uzorci zidova s 13 navarenih slojeva

Osim površinskih nečistoća, na slikama su vidljive i kapljice dodatnog materijala naljepljene na pločice osnovnog materijala. Kapljice su nastale rasprskavanjem rastaljenog dodatnog materijala prilikom kratkog spoja u procesu navarivanja, prvenstveno nakon prvog prolaza kod kojeg je prskanje bilo najizraženije. Tijekom čitavog procesa navarivanja mjerene su međuprolazne temperature slojeva po visini navarenog zida. Nakon navarivanja svakog prolaza, izmjerena mu je temperatura te je definirano hlađenje ispod temperature od 80 °C prije izrade idućeg sloja. Hlađenje navarenih slojeva nakon svakog prolaza odvijalo se prirodnim putem pomoću okolnog zraka. Međuprolazna temperatura mjerena je kontaktnim termometrom SKF TKTL 20 ThermoLaser [22, 60]. Slika 40. prikazuje mjerenje međuprolazne temperature pojedinih prolaza.



Slika 40. Mjerenje međuprolazne temperature pojedinih prolaza

Ukupna duljina navarenih zidova iznosila je približno 150 mm, visina oko 40 mm, a širina oko 7 mm. Na slikama 41. i 42. prikazani su ohlađeni uzorci zidova od nehrđajućeg čelika proizvedeni WAAM postupkom navarivanja u 13 slojeva.



Slika 41. Ohlađen uzorak zida navaren strujom jakosti 150 A

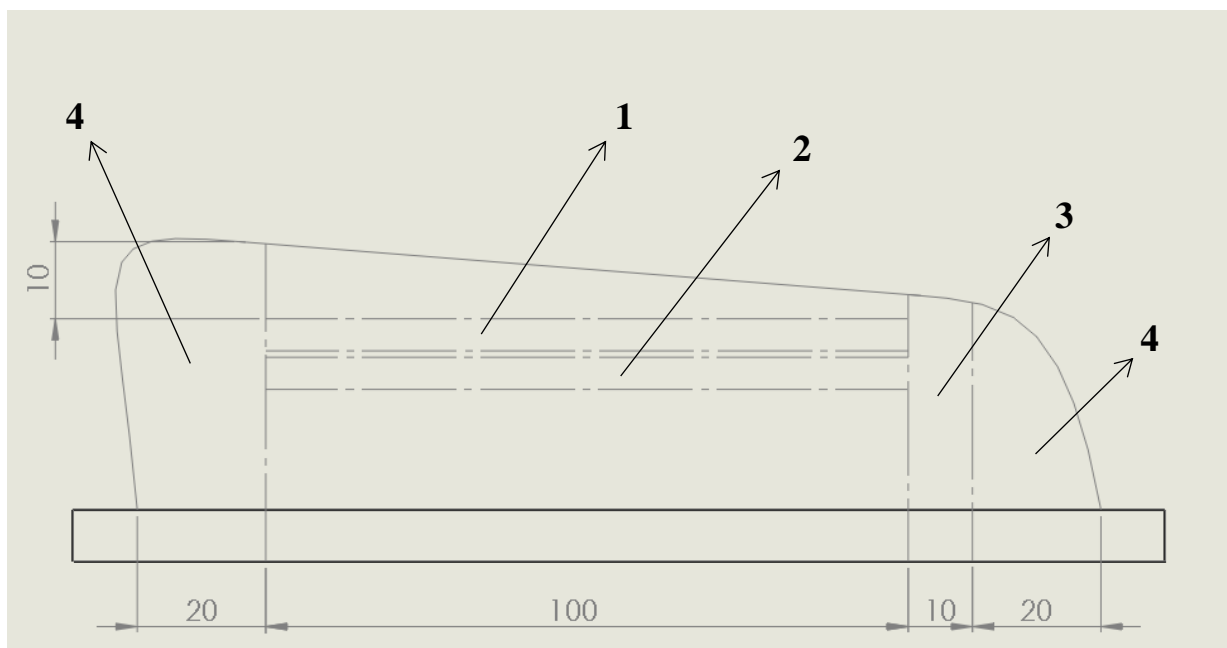


Slika 42. Ohlađen uzorak zida navaren strujom jakosti 140 A

Primjetno je da su krajevi zidova različite visine. Kod oba zida visina varira od najviše na početku do najniže na kraju navara. Visina zida najviša je na početku iz razloga što na tom mjestu dolazi do uspostave električnog luka pa je samim time jakost struje viša u odnosu na definirane jakosti struje. Zbog struje više jakosti dolazi do bržeg taljenja dodatnog materijala u odnosu na središnji dio zida pa je i visina na tom dijelu veća. Na krajevima navara dolazi do prekida električnog luka koji uzrokuje bježanje taline pa primjećujemo nagli pad visine zidova [2].

5.5. Priprema i izrada ispitnih uzoraka

Nakon što su zidovi navareni, u svrhu daljnjih ispitivanja bilo je potrebno izraditi ispitne uzorke. Za analizu makrostrukture po jedan uzorak iz svakog zida, a za ispitivanje udarnog rada loma po dva uzorka. Uzorci za analizu makrostrukture dobiveni su poprečnim izrezivanjem iz bočnog dijela navarenih zidova dok su uzorci za ispitivanje udarnog rada loma dobiveni uzdužnim izrezivanjem iz središnjeg dijela zidova prema skici prikazanoj na slici 43. Slikom 44. prikazan je ispitni uzorak za analizu makrostrukture, a slikom 45. uzorci za ispitivanje udarnog rada loma.



Slika 43. Linije izreza ispitnih uzoraka

Brojevi na slici predstavljaju:

- 1 Uzorak za ispitivanje udarnog rada loma
- 2 Uzorak za ispitivanje udarnog rada loma
- 3 Ispitni uzorak za analizu makrostrukture
- 4 Ostatak materijala; višak



Slika 44. Ispitni uzorak za analizu makrostrukture tijekom faze grubog brušenja



Slika 45. Uzorci za ispitivanje udarnog rada loma izrezani iz zida navarenog strujom jakosti 140 A (lijevo) i zida navarenog strujom jakosti 150 A (desno)

Nakon što su izrezani, uzorci su podvrgnuti mehaničkoj i kemijskoj obradi površine. Slikom 46. prikazan je proces skidanja srha te poravnavanje površine uzoraka za analizu makrostrukture.



Slika 46. Proces poravnavanja površine uzoraka za ispitivanje

Tablica 6. prikazuje korištene brusne papire, redoslijed korištenja, granulaciju brusnih zrna te brzinu kojom je pojedini brusni papir rotirao na uređaju za brušenje.

Tablica 6. Parametri pripreme površine uzoraka za ispitivanje

Parametri pripreme površine uzoraka za ispitivanje			
Broj koraka	Oznaka brusnog papira	Prosječna veličina granula abraziva [μm]	Brzina okretanja brusnog papira [okr/min]
1	P120	125	90
2	P180	82	100
3	P400	35	110
4	P800	21,8	120
5	P1200	15,3	130
6	P2000	10,3	140

Pošto je provedena samo analiza makrostrukture, ne i mikrostrukture, dovoljno je bilo samo fino brušenje ispitnih uzoraka. Brušenje površine uzoraka primjenom ručne sile pritiska trajalo je ukupno pet sati. Najviše vremena utrošeno je na grubo brušenje površine papirom P120 kako bi se uklonila sva okom vidljiva oštećenja. Brušenje svakim slijedećim brusnim papirom trajalo je značajno kraće. Brzina izvođenja procesa brušenja razlikovala se ovisno o primijenjenom brusnom papiru. Tijekom svih faza brušenja, kao rashladno sredstvo u svrhu izbjegavanja transformiranja strukture prilikom zagrijavanja, korištena je voda. Slika 47. prikazuju uzorke za analizu makrostrukture nakon brušenja.

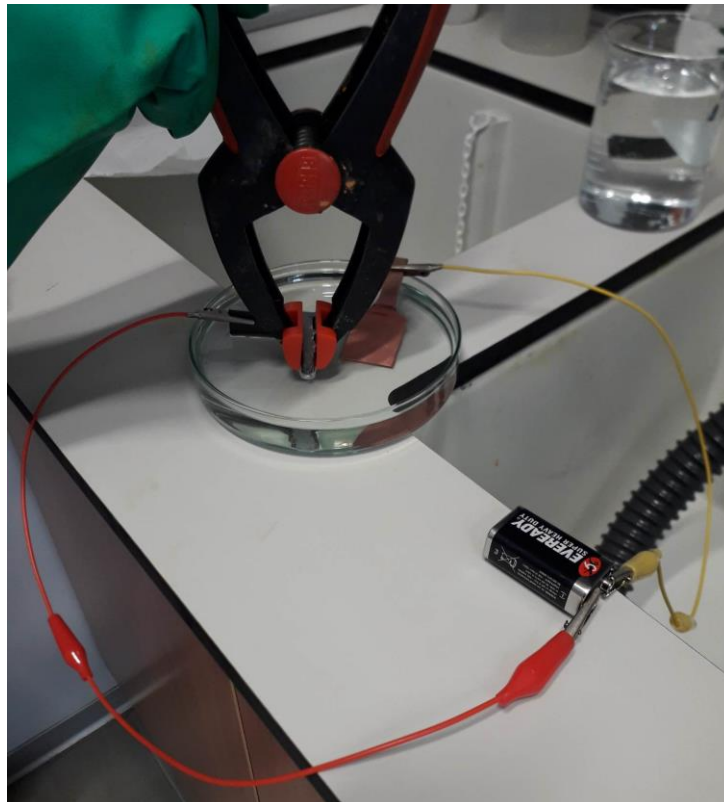


Slika 47. Obradena površina ispitnog uzorka navarenog strujom jakosti 140 A (lijevo) i strujom jakosti 150 A (desno)

Nakon što je proveden postupak mehaničkog brušenja, slijedio je postupak elektrokemijskog nagrivanja, odnosno izazivanja strukture ispitnog uzorka za makrostrukturna ispitivanja. Pribor korišten za elektrokemijsko nagrivanje uzorka:

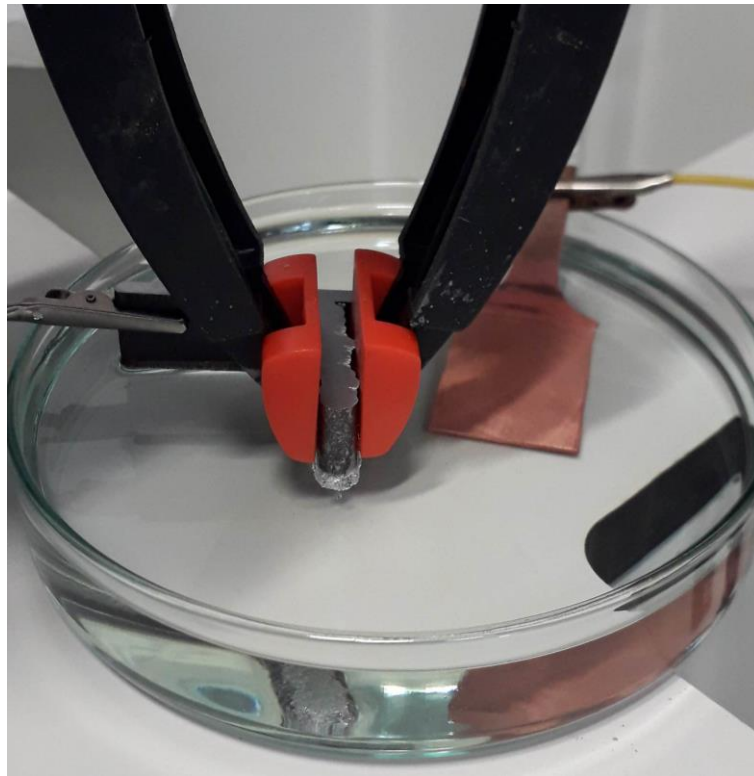
- solna kiselina; HCl 19%
- baterija; 9V
- bakrena pločica
- hvataljka
- voda
- pol kleme.

Slika 48. prikazuje pribor potreban za elektrokemijsko nagrivanje površine.



Slika 48. Pribor korišten prilikom elektrokemijskog nagrivanja površine

Pozitivni, odnosno + pol baterije povezan je s ispitnim uzorkom čija se površina nagriva, dok je – pol povezan s bakrenom pločicom. Slika 49. prikazuje elektrokemijsku reakciju površine uzorka u solnoj kiselini.



Slika 49. Elektrokemijska reakcija površine uzorka u solnoj kiselini

Vrijeme izazivanja strukture površine uzorka iznosilo je otprilike 60 sekundi nakon čega je uzorak umočen u vodu. U kontaktu s vodom došlo je do prekida reakcije te je uzorak lagano obrisao ubrusom. U tom trenutku ispitni uzorci bili su spremni za analizu makrostrukture.

5.6. Analiza makrostrukture

Prvi postupak ispitivanja uzoraka bila je analiza makrostrukture. Nakon što su se površine uzoraka osušile, stereomikroskopom Olympus SZX10 izvršeno je snimanje makrostrukture istih. Stereomikroskop Olympus SZX10 povezan je na računalo, a programom Leica Application Suit omogućena je izrada i obrada slika ispitivanih uzoraka. Slika 50. prikazuje ispitni uzorak smješten na nosaču stereomikroskopa.



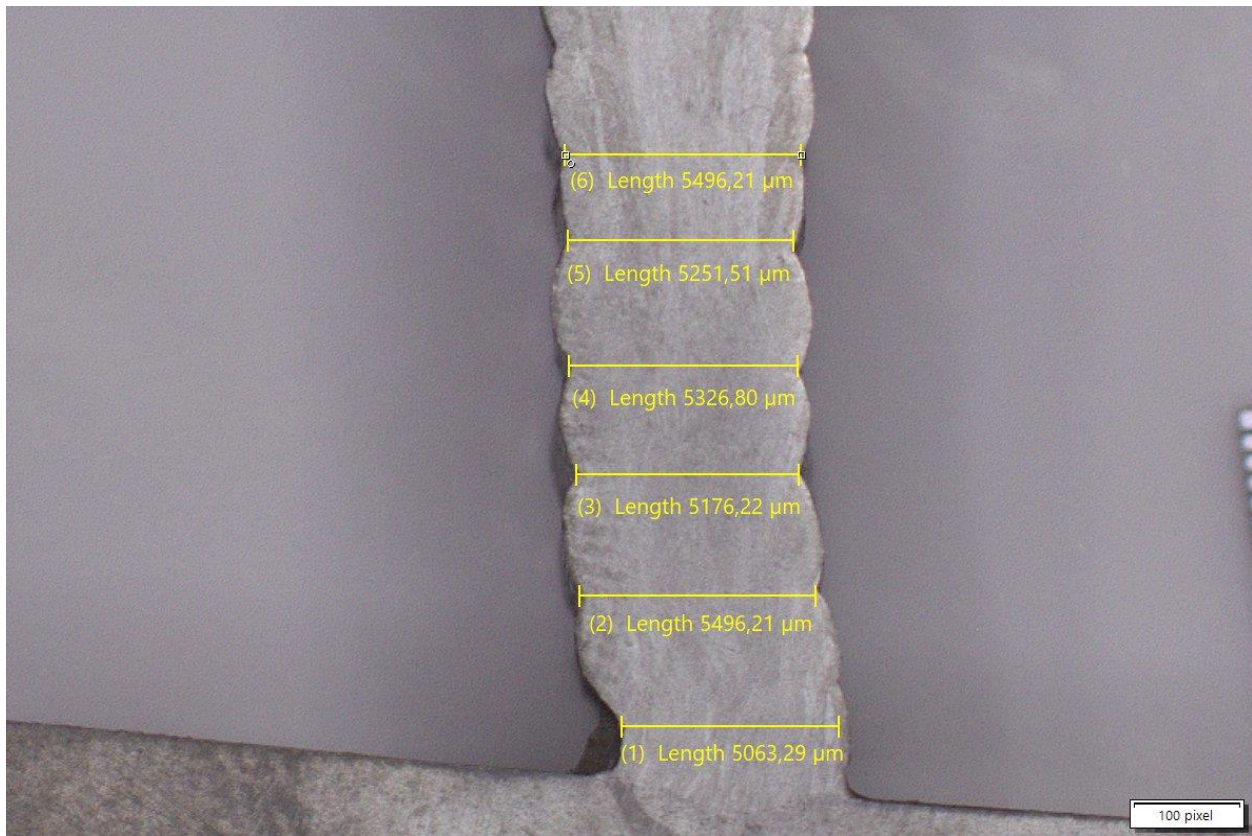
Slika 50. Proces analize makrostrukture ispitog uzorka

Na snimljenim fotografijama nisu uočene veće površinske nepravilnosti. Na bočnim dijelovima površine oba uzorka jasno su vidljivi navareni slojevi, a u središnjem dijelu zbog jednake mikrostrukture i sličnih uvjeta zavarivanja, unošenja i odvođenja topline, oni nisu vidljivi. Na samoj površini vidljiva je penetracija dodatnog u osnovni materijal.

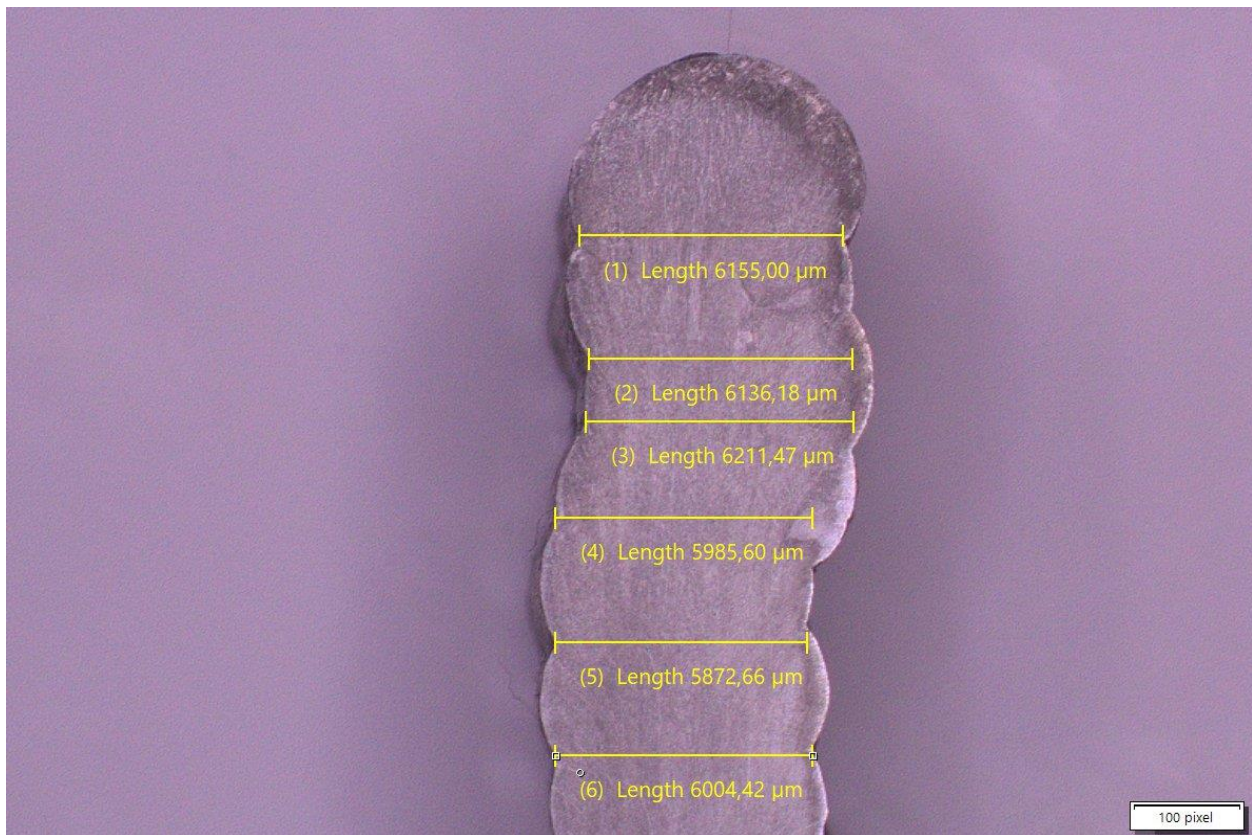
Zbog nesavršenog položaja pištolja za zavarivanje koji u odnosu na osnovni materijal nije bio pod kutem od 90°, oba su zida blago nakošena. Bez obzira na to, svi slojevi su ravnomjerno navareni. Osim same makrostrukture, kod makrostrukturnih ispitivanja površina uzoraka ispitane su efektivne širine zidova. Slike 51., 52., 53. i 54. snimljene su u mjerilu 1:1 te prikazuju makrostrukture površina uzoraka s kotiranim efektivnim širinama navarenih zidova.



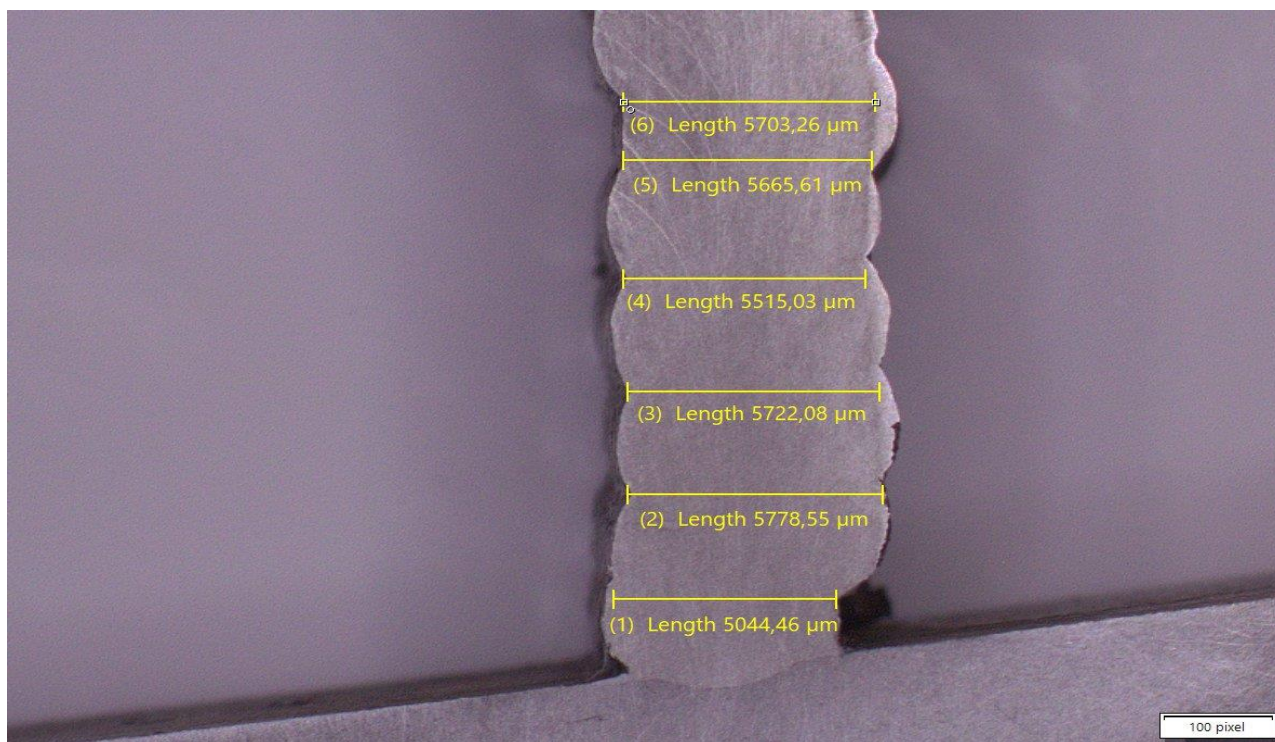
Slika 51. Makrostruktura gornjeg dijela poprečnog presjeka ispitnog uzorka navarenog strujom jakosti 140 A



Slika 52. Makrostruktura donjeg dijela poprečnog presjeka ispitnog uzorka navarenog strujom jakosti 140 A



Slika 53. Makrostruktura gornjeg dijela poprečnog presjeka ispitnog uzorka navarenog strujom jakosti 150 A



Slika 54. Makrostruktura donjeg dijela poprečnog presjeka ispitnog uzorka navarenog strujom jakosti 150 A

Tablicama 7. i 9. prikazane su izmjerene vrijednosti efektivnih širina zidova navarenih strujama jakosti 140 i 150 A, a tablicama 8. i 10. prikupljeni podaci efektivnih širina navarenih zidova. Svi prikupljeni podaci s površine makroizbrusaka na kraju rada bit će grafički prikazani i analizirani.

Tablica 7. Izmjerene vrijednosti efektivnih širina zida navarenog strujom jakosti 150 A

Izmjerene vrijednosti efektivnih širina zida navarenog strujom jakosti 150 A	
Sloj	Efektivna vrijednost [μm]
1	5044
2	5779
3	5722
4	5515
5	5666
6	5703
7	6004
8	5873
9	5986
10	6211
11	6136
12	6155

Tablica 8. Prikupljeni podaci efektivnih širina zida navarenog strujom jakosti 150 A

Prikupljeni podaci efektivnih širina zida navarenog strujom jakosti 150 A	
Minimalna efektivna širina zida [μm]	5044
Maximalna efektivna širina zida [μm]	6211
Zbroj efektivnih širina zida [μm]	69794
Srednja vrijednost efektivnih širina zida [μm]	5816

Tablica 9. Izmjerene vrijednosti efektivnih širina zida navarenog strujom jakosti 140 A

Izmjerene vrijednosti efektivne širine zida navarenog strujom jakosti 140 A	
Sloj	Efektivna vrijednost [μm]
1	5063
2	5496
3	5176
4	5327
5	5252
6	5496
7	5854
8	5797
9	5779
10	5929
11	5910
12	6061

Tablica 10. Prikupljeni podaci efektivnih širina zida navarenog strujom jakosti 140 A

Prikupljeni podaci efektivne širine zida navarenog strujom jakosti 140 A	
Minimalna efektivna širina zida [μm]	5063
Maximalna efektivna širina zida [μm]	6061
Zbroj efektivnih širina zida [μm]	67140
Srednja vrijednost efektivnih širina zida [μm]	5595

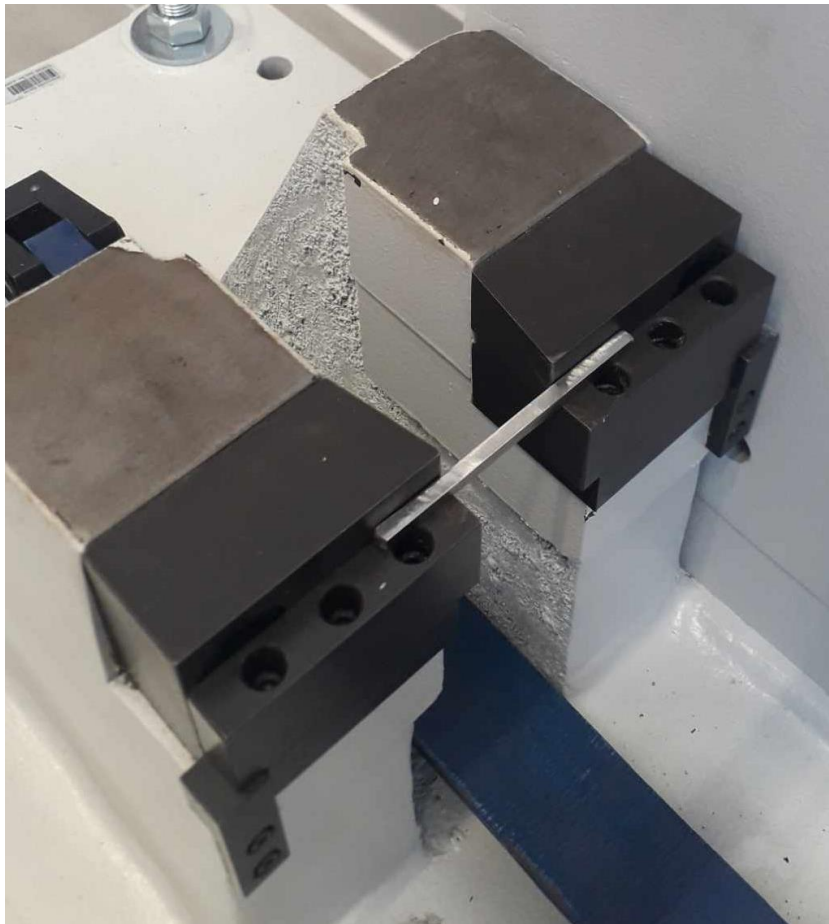
5.7. Ispitivanje udarnog rada loma

Nakon provedene analize makrostrukture, započet je proces ispitivanja udarnog rada loma. Postupak ispitivanja udarnog rada loma proveden je na ispitnim uzorcima, odnosno epruветama specijalno izrađenim u ovu svrhu. Prvi ispitni uzorak izrezan je strojnom pilom 10 mm od najvišeg vrha zida. Odmah ispod njega izrezan je i drugi uzorak. Dimenzije površine poprečnog presjeka uzoraka iznose 5 x 5 mm, dok je dužina uzoraka oko 100 mm. Slika 55. prikazuje dimenzije poprečnog presjeka uzorka izmjerenu digitalnim pomičnim mjerilom.



Slika 55. Dimenzije poprečnog presjeka ispitnog uzorka

Ispitivanje udarnog rada loma provedeno je Charpyjevim batom, na sobnoj temperaturi, maksimalne energije udara 300 J. Ispitivanje je provedeno prema normi ISO 148-1:2009 – Ispitivanje udarnog rada loma Charpyjevim batom – Ispitne metode. Slika 56. prikazuje položaj ispitnih uzoraka u Charpyjevom batu. Slikama 57. i 58. prikazani su ispitni uzorci nakon provedenog ispitivanja udarnog rada loma, a u tablici 11. prikazani su rezultati ispitivanja.



Slika 56. Položaj ispitnih uzoraka u Charpyjevom batu



Slika 57. Uzorci navareni strujom jakosti 140 A nakon provedenog ispitivanja



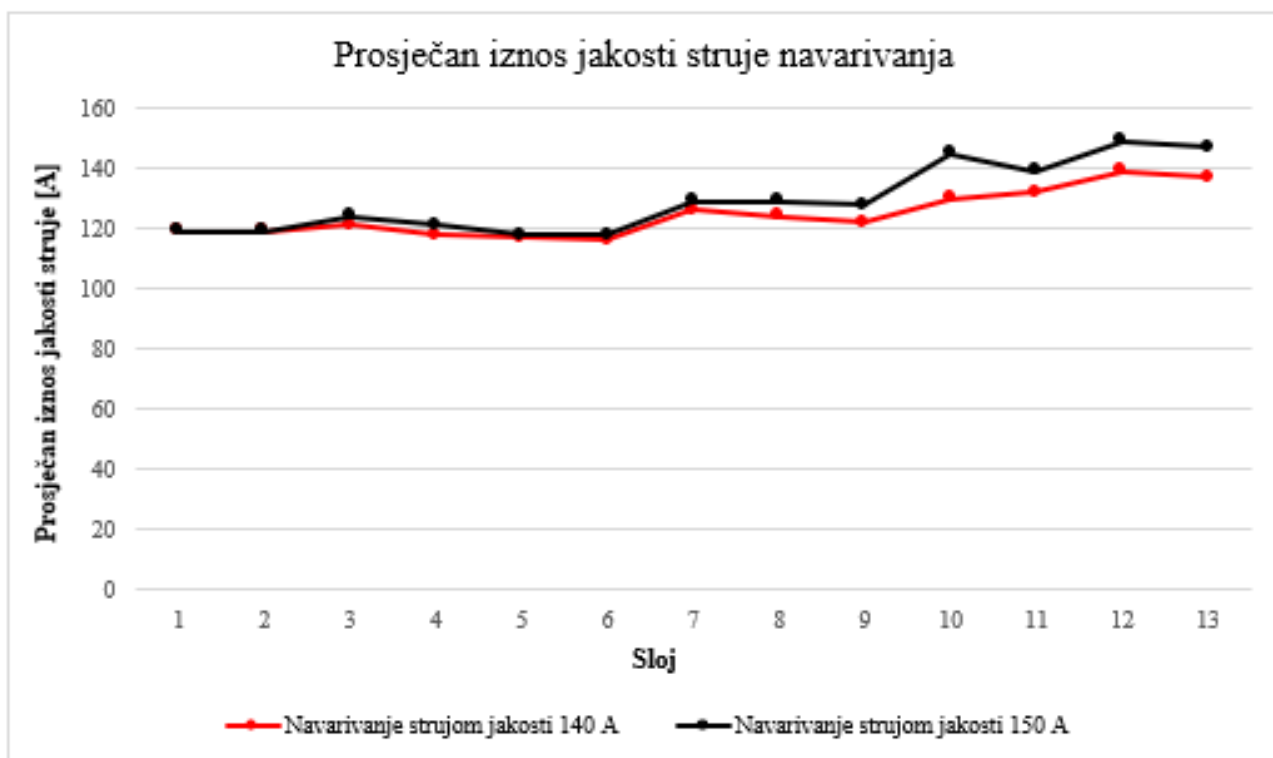
Slika 58. Uzorci navareni strujom jakosti 150 A nakon provedenog ispitivanja

Tablica 11. Rezultati ispitivanja udarnog rada loma

Rezultati ispitivanja udarnog rada loma		
Uzorak	Vrijednost udarnog rada loma uzorka iz zida navarenog strujom jakosti 140 A [J]	Vrijednost udarnog rada loma uzorka iz zida navarenog strujom jakosti 150 A [J]
1	62	53
2	63	38

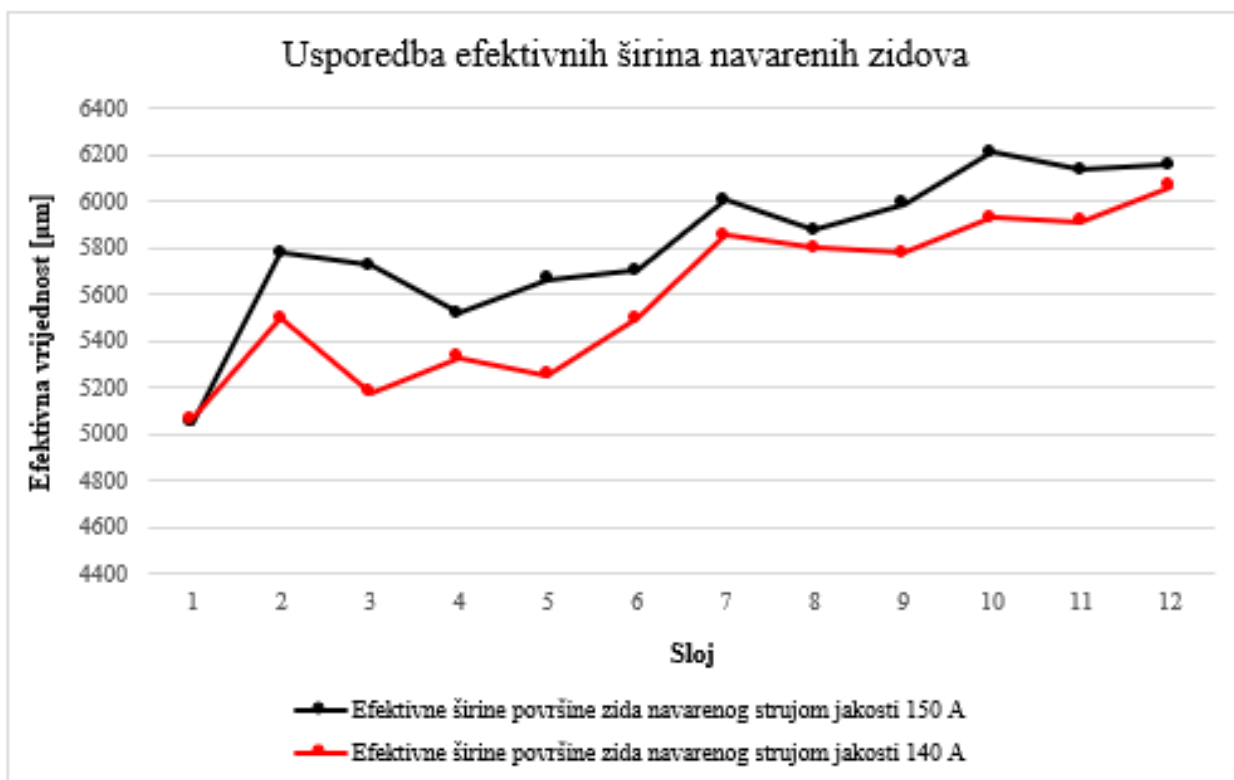
5.8. Analiza rezultata

Na sljedećih nekoliko slika grafički su prikazane usporedbe vrijednosti rezultata dobivenih provedenim ispitivanjima. Na slici 59. prikazan je graf usporedbe kretanja prosječnog iznosa jakosti struje tijekom navarivanja slojeva za oba uzorka.



Slika 59. Graf usporedbe kretanja prosječnog iznosa jakosti struje navarivanja

Prema slici vidljivo je kako jakosti struja variraju oko svojih vrijednosti bez značajnijih odstupanja. Prisutan je blago rastući trend što znači da su struje na početku zavarivanja nešto niže od onih na kraju. Kako je i očekivano, uzorak navarivan strujom jakosti 150 A, odnosno uzorak broj 2 navaren je većim prosječnim jakostima struje. Iako je kod jakosti struje zabilježen blagi porast prosječnih vrijednosti, kod napona dolazi do suprotnog efekta. Odnosno, osim prve i zadnje vrijednosti koje su jednake, prema brojčanim podacima iz tablica 4. i 5. vidljiv je blagi pad prosječnih vrijednosti napona koje su i u ovom slučaju nešto veće pri navarivanju strujom jakosti 150 A. Slika 60. prikazuje graf usporedbe efektivnih širina navarenih zidova.

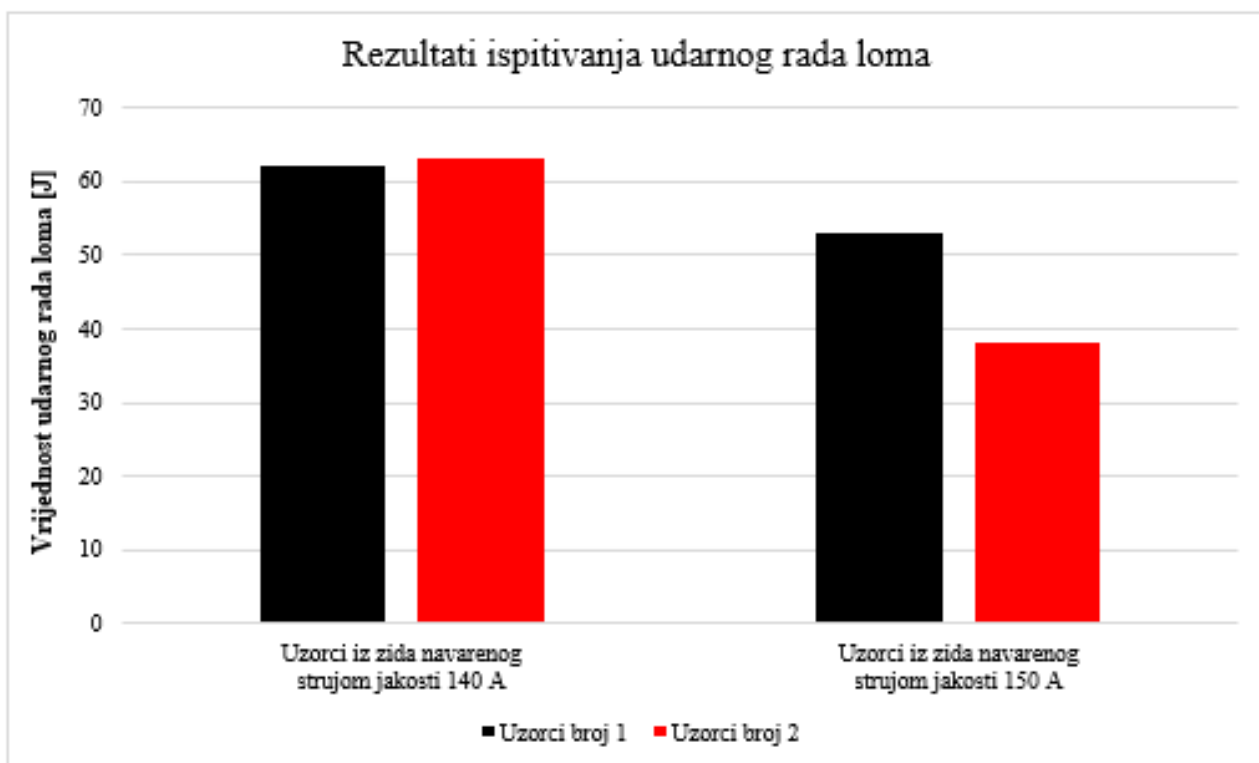


Slika 60. Graf usporedbe efektivnih širina navarenih zidova

Na slici 60. uočeno je kako su vrijednosti efektivnih širina površine zida navarenog strujom jakosti 150 A veće od onih zida navarenog strujom jakosti 140 A. Razlog tome jest veći iznos jakosti primjenjene struje, odnosno veći unos energije. Većim unosom topline došlo je do bržeg taljenja dodatnog metala u obliku žice što je rezultiralo većim razlijevanjem navarenog sloja. Osim efektivnih širina površine zida, analizom makrostrukture ispitnih uzoraka dobiveni su sljedeći rezultati:

- vizualnom kontrolom ispitnih uzoraka uočena je nepredviđena nakošenost zidova uzrokovana nesavršenim položajem pištolja za navarivanje. U svrhu poboljšavanja uspravnosti zida, potrebno je preciznije pozicioniranje pištolja ili čvršći prihvat istog u držač pištolja na uređaju za pravocrtno vođenje pištolja.
- na snimkama makrostrukture prikazanim slikama 51. – 54. vidljivo je kako nema nikakvih uključaka unutar uzoraka. Na rubovima oba zida vidljiva je valovitost dobivena razlijevanjem taline koja je nešto veća kod zida navarenog strujom jakosti 150 A. Valovitost predstavlja višak materijala u kojem se nalazi i zona naljepljivanja te se uklanja naknadnom strojnom obradom.

Slika 61. prikazuje usporedbu rezultata ispitivanja udarnog rada loma provedenog na sobnoj temperaturi.



Slika 61. Graf usporedbe rezultata ispitivanja udarnog rada loma

Grafom usporedbe rezultata udarnog rada loma prikazane su vrijednosti dobivene ispitivanjem četiri uzoraka, dva iz zida navarenog strujom jakosti 140 A te dva iz zida navarenog strujom jakosti 150 A. Na slici 61. vidljivo je kako su vrijednosti udarnog rada loma uzoraka navarenih strujom jakosti 140 A veće od onih zidova navarenih strujom jakosti 150 A, odnosno da je uzorak navaren strujom manje jakosti žilaviji. Vidljivo je kako je razlika u vrijednostima udarnog rada loma između dva uzorka navarena strujom jakosti 140 A minimalna. S druge strane, značajna je razlika u vrijednostima udarnog rada loma između dva uzorka navarena strujom jakosti 150 A. Prema dobivenim rezultatima zaključuje se kako je razlika u vrijednostima udarnog rada loma uzoraka navarenih istom jakosti struje moguća zbog orijentacije ispitnog uzorka pozicioniranog na oslonce Charpyjevog bata. U slučaju da je na horizontalnu površinu oslonaca postavljena površina ispitnog uzorka paralelna s visinom navarenog zida, vrijednost udarnog rada loma bit će veća.

6. ZAKLJUČAK

Postupak aditivne proizvodnje električnim lukom i žicom, poznat kao WAAM, predstavlja inovativnu tehnologiju u aditivnoj proizvodnji koja omogućava izradu metalnih komponenti nanosom materijala sloj po sloj. WAAM tehnologija za proizvodnju elemenata koristi uobičajenu opremu za zavarivanje; izvor energije, dodavač žice, pištolj za zavarivanje, robote i kontrolne jedinice za robotsko upravljanje. Aditivni postupci omogućuju potpunu automatizaciju procesa proizvodnje, od dizajna komponente pa sve do njegove izvedbe. Nadalje, aditivni postupci proizvodnje pružaju ekonomičan način izrade dijelova od skupih materijala poput titana i nikla te omogućuju izradu dijelova vrlo složenih geometrija, koje bi bilo izazovno ili nemoguće proizvesti tradicionalnim metodama. Nehrđajući čelici, zbog svojih izvanrednih antikorozivnih i mehaničkih karakteristika široko su primijenjeni. Korištenje MIG postupka za aditivnu proizvodnju električnim lukom i žicom nije najnoviji koncept unutar zavarivačkih tehnologija, no uz napredak i sniženje troškova robota i CNC strojeva, ovaj pristup ubrzano se razvija u mnogim industrijskim laboratorijima. WAAM tehnologija omogućava izradu dijelova s minimalnim zahtjevima za naknadnom obradom, čime se smanjuju gubici materijala i vrijeme. Ovaj princip donosi značajne financijske uštede pri izradi elemenata od skupljih materijala koji nisu pogodni za konvencionalne metode proizvodnje te ubrzano troše alate za odvajanje čestica. Iako ova tehnologija još uvijek nije široko usvojena, integracija izvora struje i procesa odvajanja čestica unutar strojeva s kontroliranom atmosferom definitivno će joj osigurati mjesto u budućnosti.

Cilj istraživanja bio je odrediti utjecaj jakosti struje zavarivanja na mehanička svojstva i makrostrukturu navarenog spoja od nehrđajućeg čelika. U tu svrhu, WAAM postupkom izrađena su dva zida od nehrđajućeg čelika nakon čega su na ispitnim uzorcima provedena odgovarajuća ispitivanja; analiza makrostrukture i ispitivanje udarnog rada loma. Za izradu oba zida korišten je MIG postupak navarivanja uz primjenu argona kao zaštitnog plina. Nakon svakog navarenog sloja mjerena je međuprolazna temperatura uzoraka, budući da je temperatura navarenog sloja prije sljedećeg prolaza morala iznositi maksimalno 80 °C. Zid navaren strujom jakosti 140 A postigao je visinu od 41,2 mm i širinu od 6,9 mm, dok je uzorak navaren strujom jakosti 150 A nešto niži i širi, odnosno visine 39,7 mm i širine 7,3 mm. Oba zida duljine su oko 150 mm. Iz navarenih zidova izrezani su i temeljno pripremljeni ispitni uzorci na kojim su provedena prethodno spomenuta ispitivanja.

Na temelju rezultata dobivenih provedenim ispitivanjima, izdvojeni su sljedeći zaključci:

- Analizom makrostrukture uočljiv je prolaz između pločice osnovnog materijala i prvog sloja dodatnog materijala. Uzorak navaren strujom jakosti 140 A odlikuje se

ravnomjernijim slaganjem slojeva, što je posljedica manjeg unosa toplinske energije tijekom procesa navarivanja. S druge strane, valovitost na bočnim stranama uzoraka vidljiva je na oba zida, a veća je na uzorku navarenom strujom jakosti 150 A. To je posljedica jačeg razlijevanja rastaljenog metala uslijed većeg unosa topline. Unutar uzoraka nema nikakvih nedostataka i uključaka.

- Rezultati ispitivanja udarnog rada loma pokazali su veće vrijednosti za ispitne uzorke navarene strujom manje jakosti. Iz rezultata se zaključuje kako je žilavost na udar veća kod uzorka navarenog strujom jakosti 140 A. Vidljivo je kako je razlika u vrijednostima udarnog rada loma između dva uzorka navarena strujom jakosti 140 A minimalna. S druge strane, značajna je razlika u vrijednostima udarnog rada loma između dva uzorka navarena strujom jakosti 150 A. Iz toga se može zaključiti kako je razlika u vrijednostima udarnog rada loma uzoraka navarenih istom jakosti struje moguća zbog orijentacije ispitnog uzorka pozicioniranog na oslonce Charpyjevog bata.

Analizom dobivenih rezultata vidljivo je kako zid navaren strujom jakosti 140 A posjeduje bolja mehanička svojstva, odnosno veće vrijednosti udarnog rada loma u odnosu na zid navaren strujom veće jakosti. S druge strane, zid navaren strujom jakosti 150 A imao bi veću efikasnu, odnosno iskoristivu površinu. Razlog tome predstavlja veća širina zida uzrokovana jačim razlijevanjem metala. Iako postoje manje neželjene geometrijske nepravilnosti; oba zida su blago nakošena, one nisu utjecale na rezultate daljnjih ispitivanja. Dobiveni rezultati potvrdili su očekivanja, odnosno pokazuju kako ispitni uzorci navareni istim dodatnim materijalom i različitim jakostima struje, posjeduju različite prednosti. U slučaju da se zidovi geometrijski poboljšaju; isprave i konkretno primijene, naknadna strojna obrada bila bi minimalna, a samim tim postigao bi se niski BTF omjer što je jedan od ciljeva aditivne proizvodnje električnim lukom i žicom.

7. LITERATURA

- [1] I. Torer: Primjena MAG CBT postupka za aditivnu proizvodnju električnim lukom i žicom, Diplomski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2017.
- [2] D. Ilić: Optimizacija prijenosa metala za aditivnu proizvodnju električnim lukom i žicom, Diplomski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2016.
- [3] B. Očko: Primjena robota za aditivnu proizvodnju električnim lukom i žicom, Završni rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2018.
- [4] M. Crnečki: Primjena WAAM tehnologije za izradu aluminijskih cijevi CMT postupkom, Diplomski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2020.
- [5] L. Kostel: Primjena coldArc postupka zavarivanja za aditivnu proizvodnju električnim lukom i žicom, Diplomski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2019.
- [6] D. Udžbinac: Primjena dupleks čelika za aditivnu proizvodnju električnim lukom i žicom, Diplomski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2017.
- [7] A. Pilipović: Aditivna proizvodnja, Iz svijeta plastike i gume, članak Aditivna proizvodnja, Polimeri 33 (2012) 3-4.
- [8] C. Weller, R. Kleer, F. T. Piller: Economic implications of 3D printing: Market structure model in light of additive manufacturing revisited, Production Economics, Njemačka, 2015.
- [9] A. Kvesić: Aditivna proizvodnja i WAAM postupak, Završni rad, Internacionalni univerzitet Travnik, Travnik, 2019.
- [10] Sue Roberts: Wire-arc additive manufacturing can be used to build very large parts to near-net shape, preuzeto s <https://www.thefabricator.com/additivereport/article/additive/wire-arc-additive-manufacturing-can-be-used-to-build-very-large-parts-to-near-net-shape>, dostupno 19.05.2023.
- [11] M. Karamarko: Analiza mikrostrukture pri aditivnoj proizvodnji dupleks čelika električnim lukom i žicom, Završni rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2018.
- [12] L. Ivanda: Utjecaj omjera brzine žice i brzine zavarivanja na geometrijske značajke pri aditivnoj proizvodnji električnim lukom i žicom, Diplomski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2019.

- [13] M. Kušević: Utjecaj unosa energije na mikrostrukturu dupleks čelika pri aditivnoj proizvodnji električnim lukom i žicom, Diplomski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2021.
- [14] I. Jurić, I. Garašić, Z. Kožuh, J. Eržišnik, D. Udbinac: Primjena dupleks čelika za aditivnu proizvodnju električnim lukom i žicom, Zbornik sa 4. IIW Kongresa zavarivanja Jugoistočne Evrope „Safe Welded Construction by High Quality Welding“, Beograd, 2018., str. 113-119
- [15] D. Ding, Z. Pan, D. Cuiuri, H. Li: Wire-feed additive manufacturing of metal components: technologies, developments and future interests, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, DOI 10.1007/s00170-015-7077-3, London 2015.
- [16] K. Crneković: Utjecaj toplinske obrade kod aditivne proizvodnje električnim lukom i žicom na mehanička svojstva dupleks čelika, Diplomski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2021.
- [17] S. Ljušanin: Utjecaj aditivne proizvodnje električnim lukom i žicom na mikrostrukturu dupleks čelika, Diplomski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2021.
- [18] M. Liber: Optimizacija parametara za aditivnu proizvodnju legure Al-Mg električnim lukom i žicom, Završni rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2018.
- [19] F. Dominković: Primjena MIG postupka za aditivnu proizvodnju električnim lukom i žicom, Diplomski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2016.
- [20] M. Krišto: Primjena legure Inconel 625 za aditivnu proizvodnju električnim lukom i žicom, Diplomski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2017.
- [21] A. Busachi, J. Erkoyuncu, P. Colegrove, F. Martina, J. Ding: Designing a WAAM based manufacturing system for defence applications, Elsevier, 2015.
- [22] I. Halužan: Analiza mikrostrukture i mikrotvrdoće dupleks nehrđajućeg čelika dobivenog aditivnom proizvodnjom električnim lukom i žicom, Diplomski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2022.
- [23] M. Sinković: Mikrostruktura i mehanička svojstva legure Inconel 625 pri aditivnoj proizvodnji električnim lukom i žicom, Diplomski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2017.
- [24] N. Knezović: Aditivna proizvodnja uz pomoć električnog luka i žice kao dodatnog materijala – trenutno stanje i potencijal, časopis Zavarivanje, Mostar, 2018.

- [25] A. Lemezina: Karakterizacija dupleks strukture dobivene aditivnom proizvodnjom električnim lukom i žicom, Diplomski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2021.
- [26] L. Car: Izračun unosa energije analizom dinamičke karakteristike kod MAG postupka zavarivanja, Završni rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2019.
- [27] D. Gjuretek: Tehnologija zavarivanja aluminijskih oklopljenih sabirnica, Diplomski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2016.
- [28] M. Gojić: Tehnike spajanja i razdvajanja materijala, Metalurški fakultet, Sveučilište u Zagrebu, Sisak, 2003.
- [29] M. Huklek: Analiza zavarljivosti legure Inconel 625, Diplomski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2017.
- [30] <https://mx3d.com/arc-bike-i/>, dostupno 19.05.2023.
- [31] I. Betlehem: Plazma zavarivanje nehrđajućih čelika, Završni rad, Sveučilište Sjever, Varaždin, 2020.
- [32] D. Gorupić: Analiza tehnologije zavarivanja austenitnog čelika X2CrNiMo17-12-2, Diplomski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2021.
- [33] M. Radiković: Zavarivanje duplex čelika praškom punjenom žicom, Diplomski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2018.
- [34] Peter Zelinski: The Way Ahead for Wire Arc Additive Manufacturing, preuzeto s <https://www.additivemanufacturing.media/articles/the-way-ahead-for-wire-arc-additive-manufacturing>, dostupno 19.05.2023.
- [35] <https://pwpind.com/product-range/wire-and-arc-additive-manufacturing-programme/>, dostupno 19.05.2023.
- [36] K. Treutler, V. Wesling: The Current State of Research of Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM): A Review, preuzeto s <https://www.mdpi.com/2076-3417/11/18/8619>, dostupno 19.05.2023.
- [37] L. Lovrenčić: Nehrđajući čelik - zavarivanje i naknadne površinske obrade, Završni rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2019.
- [38] D. Hrman: Dodatni materijali za zavarivanje nehrđajućih čelika, Završni rad, Sveučilište Sjever, Varaždin, 2022.

- [39] I. Blažević: Korozijska oštećenja konstrukcija od nehrđajućih čelika, Diplomski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2013.
- [40] S. Kožuh: SPECIJALNI ČELICI -skripta-, Metalurški fakultet, Sisak, 2010.
- [41] V. Zelenika: Utjecaj broja prolaza na udio ferita u mikrostrukturi zavarenog spoja kod visokolegiranog austenitnog čelika, Završni rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2021.
- [42] M. Dujak: Svojstva i primjena nehrđajućih čelika pri izradi dijelova poljoprivredne tehnike, Završni rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2019.
- [43] N. Babić: A-TIG zavarivanje duplex čelika, Diplomski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2016.
- [44] F. Bionda: Automatizirano TIG zavarivanje cijevi iz nehrđajućih čelika, Diplomski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2018.
- [45] H. Bogeljić Šimunić: Uvježbavanje zavarivača pomoću simulatora za zavarivanje za MAG zavarivanje, Završni rad, Sveučilište Sjever, Varaždin, 2022.
- [46] https://www.daibau.rs/clanak/429/varenje_aluminijuma_mig_mag_i_tig, dostupno 19.05.2023.
- [47] <https://tsi.webador.com/tois-mig-mag-postupak-zavarivanja>, dostupno 19.05.2023.
- [48] <http://www.zavarivanje.info>, dostupno 19.05.2023.
- [49] M. Klobučar: Teorijske i praktične osnove MIG/MAG postupka zavarivanja, Završni rad, Sveučilište Sjever, Varaždin, 2016.
- [50] <https://shopweldingsupplies.com/products/fronius-transteeel-3000-c-pulse-mig-welder-49-0400-0019>, dostupno 19.05.2023.
- [51] <https://www.fronius.com/en/welding-technology/products/manual-welding/migmag/transsteel/transsteel-compact/transsteel-3000-c-pulse>, dostupno 19.05.2023.
- [52] <https://www.directindustry.com/prod/promotech/product-57819-1211091.html>, dostupno 19.05.2023.
- [53] <https://analyticalscience.wiley.com/do/10.1002/imaging.921>, dostupno 19.05.2023.

- [54] <https://thermind.com/product/rail-bull-welding-cutting-track-carriage/>, dostupno 19.05.2023.
- [55] <https://www.reliabilitydirectstore.com/TKTL-20-ThermoLaser-p/skf-ktl%2020.htm>, dostupno 19.05.2023.
- [56] [METKON FORCIPOL Folleto.pdf](#), dostupno 19.05.2023.
- [57] <https://www.kemet.co.uk/images/downloads/Forcipol300-1VwithForcimatHeadThinSections>, dostupno 19.05.2023.
- [58] <https://www.olympus-lifescience.com/en/microscopes/stereo/szx10/>, dostupno, 19.05.2023.
- [59] <https://www.matest.com/en/product/h060n-pendulum-impact-charpy-tester>, dostupno 19.05.2023.
- [60] M. Princip: Prednosti MIG/MAG – STT postupka zavarivanja nehrđajućih čelika, Diplomski rad, Diplomski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2010.
- [61] <https://www.norco-inc.com/ASSETS/DOCUMENTS/ITEMS/EN/SOW-ER308LSi-datasheet.pdf>, dostupno 19.05.2023.
- [62] <https://atlanticweldings.com/product/er308lsi-welding-wire/>, dostupno 19.05.2023.
- [63] Materijali i prezentacije iz kolegija Suvremene proizvodne tehnologije, doc. dr. sc. Matija Bušić, dostupno 19.05.2023.

POPIS SLIKA

Slika 1. Faze nastanka elementa primjenom procesa aditivne proizvodnje [7].....	3
Slika 2. Proces aditivne proizvodnje metalne komponente [10]	4
Slika 3. Faze izrade elementa procesom aditivne proizvodnje [6, 7]	6
Slika 4. Podjela postupaka aditivne proizvodnje primjenom metala [16]	7
Slika 5. Karakteristike proizvodnje metalnih komponenti [4, 15].....	8
Slika 6. WAAM postupak proizvodnje metalnog zida [7]	9
Slika 7. Presjek zida dobivenog WAAM tehnologijom proizvodnje [21]	10
Slika 8. Arc Bike II od aluminija [30]	14
Slika 9. Arc Bike I od nehrđajućeg čelika [30]	16
Slika 10. Spojni element za naftne platforme izrađen WAAM postupkom [34].....	18
Slika 11. Zamjenska komponenta stroja izrađena WAAM postupkom [34].....	19
Slika 12. WAAM postupak izrade propelera sa šupljim lopaticama [10]	19
Slika 13. Nosač kotača aviona izrađen WAAM postupkom [35].....	20
Slika 14. Propeler s tri lopatice izrađen WAAM postupkom [36]	20
Slika 15. Lopatice vodene turbine izrađene WAAM postupkom [36]	21
Slika 16. Most izrađen WAAM postupkom [36]	21
Slika 17. Sustav za MIG postupak zavarivanja [47].....	27
Slika 18. Postupak MIG zavarivanja [49].....	28
Slika 19. Radni prostor navarivanja s dijelom korištenih uređaja i materijala.....	30
Slika 20. Izvor struje za navarivanje <i>TransSteel 3000 Pulse</i> [50].....	31
Slika 21. Uređaj za precizno vođenje pištolja <i>Promotech Rail Bull</i> [54].....	33
Slika 22. Termometar <i>SKF TKTL 20 ThermoLaser</i> [55].....	35
Slika 23. Uređaj za brušenje i poliranje <i>Metkon Forcipol IV Grinder & Polisher</i>	36
Slika 24. Stereomikroskop <i>Olympus SZX10</i> [53]	37
Slika 25. Charpyjev bat <i>Pendulum impact charpy tester</i>	38
Slika 26. Radna podloga s dijelom korištenog materijala	39
Slika 27. Oznaka na boci zaštitnog plina korištenog u eksperimentu	41

Slika 28. Dimenzije pločice osnovnog materijala i pozicija prvog prolaza dodatnog materijala..	42
Slika 29. Izvor struje za zavarivanje s definiranim parametrima navarivanja.....	43
Slika 30. Pločice osnovnog materijala pričvršćene za radni stol s primjenjenim jakostima str	44
Slika 31. Radni prostor pri navarivanju uzoraka	45
Slika 32. Prvi prolazi uzoraka s metalnim oksidima na površini	46
Slika 33. Očišćeni prvi slojevi spremni za navarivanje slijedećeg prolaza	46
Slika 34. Uzorci zidova s dva navarena sloja	49
Slika 35. Uzorci zidova s četiri navarena sloja.....	49
Slika 36. Uzorci zidova sa šest navarenih slojeva	49
Slika 37. Uzorci zidova s osam navarenih slojeva	50
Slika 38. Uzorci zidova s deset navarenih slojeva.....	50
Slika 39. Uzorci zidova s 13 navarenih slojeva.....	50
Slika 40. Mjerenje međuprolazne temperature pojedinih prolaza	51
Slika 41. Ohlađen uzorak zida navaren strujom jakosti 150 A	52
Slika 42. Ohlađen uzorak zida navaren strujom jakosti 140 A	52
Slika 43. Linije izreza ispitnih uzoraka	53
Slika 44. Ispitni uzorak za analizu makrostrukture tijekom faze grubog brušenja.....	54
Slika 45. Uzorci za ispitivanje udarnog rada loma izrezani iz zida navarenog strujom jakosti 140 A (lijevo) i zida navarenog strujom jakosti 150 A (desno)	54
Slika 46. Proces poravnavanja površine uzoraka za ispitivanje	55
Slika 47. Obradena površina ispitnog uzorka navarenog strujom jakosti 140 A (lijevo) i strujom jakosti 150 A (desno).....	56
Slika 48. Pribor korišten prilikom elektrokemijskog nagrizanja površine	57
Slika 49. Elektrokemijska reakcija površine uzorka u solnoj kiselini	58
Slika 50. Proces analize makrostrukture ispitnog uzorka.....	59
Slika 51. Makrostruktura gornjeg dijela poprečnog presjeka ispitnog uzorka navarenog strujom jakosti 140 A.....	60
Slika 52. Makrostruktura donjeg dijela poprečnog presjeka ispitnog uzorka navarenog strujom jakosti 140 A	61

Slika 53. Makrostruktura gornjeg dijela poprečnog presjeka ispitnog uzorka navarenog strujom jakosti 150 A.....	61
Slika 54. Makrostruktura donjeg dijela poprečnog presjeka ispitnog uzorka navarenog strujom jakosti 150 A.....	62
Slika 55. Dimenzije poprečnog presjeka ispitnog uzorka	65
Slika 56. Položaj ispitnih uzoraka u Charpyjevom batu.....	66
Slika 57. Uzorci navareni strujom jakosti 140 A nakon provedenog ispitivanja	66
Slika 58. Uzorci navareni strujom jakosti 150 A nakon provedenog ispitivanja	67
Slika 59. Graf usporedbe kretanja prosječnog iznosa jakosti struje navarivanja	68
Slika 60. Graf usporedbe efektivnih širina navarenih zidova.....	69
Slika 61. Graf usporedbe rezultata ispitivanja udarnog rada loma.....	70

POPIS TABLICA

Tablica 1. Osnovne karakteristike <i>TransSteel 3000 Pulse</i> izvora za zavarivanje [51].....	32
Tablica 2. Kemijski sastav dodatnog materijala [61]	40
Tablica 3. Mehanička svojstva dodatnog materijala [62].....	40
Tablica 4. Parametri navarivanja strujom jakosti 140 A	47
Tablica 5. Parametri navarivanja strujom jakosti 150 A	48
Tablica 6. Parametri pripreme površine uzoraka za ispitivanje.....	56
Tablica 7. Izmjerene vrijednosti efektivnih širina zida navarenog strujom jakosti 150 A	63
Tablica 8. Prikupljeni podaci efektivnih širina zida navarenog strujom jakosti 150 A.....	63
Tablica 9. Izmjerene vrijednosti efektivnih širina zida navarenog strujom jakosti 140 A	64
Tablica 10. Prikupljeni podaci efektivnih širina zida navarenog strujom jakosti 140 A.....	64
Tablica 11. Rezultati ispitivanja udarnog rada loma	67

PRILOZI

[1] CD-R



IZJAVA O AUTORSTVU

Završni/diplomski rad isključivo je autorsko djelo studenta koji je isti izradio te student odgovara za istinitost, izvornost i ispravnost teksta rada. U radu se ne smiju koristiti dijelovi tuđih radova (knjiga, članaka, doktorskih disertacija, magistarskih radova, izvora s interneta, i drugih izvora) bez navođenja izvora i autora navedenih radova. Svi dijelovi tuđih radova moraju biti pravilno navedeni i citirani. Dijelovi tuđih radova koji nisu pravilno citirani, smatraju se plagijatom, odnosno nezakonitim prisvajanjem tuđeg znanstvenog ili stručnoga rada. Sukladno navedenom studenti su dužni potpisati izjavu o autorstvu rada.

Ja, Marko Blažona (ime i prezime) pod punom moralnom, materijalnom i kaznenom odgovornošću, izjavljujem da sam isključivi autor/ica završnog/diplomskog (obrisati nepotrebno) rada pod naslovom Učecaj parametara naraviranja na svojstva materijala pri aditivnoj proizvodnji MIG/MAG tehnologijom navedenom radu nisu na nedozvoljeni način (bez pravilnog citiranja) korišteni dijelovi tuđih radova.

Student/ica:

(upisati ime i prezime)

Blažona

(vlastoručni potpis)

Sukladno čl. 83. Zakonu o znanstvenoj djelatnosti i visokom obrazovanju završne/diplomske radove sveučilišta su dužna trajno objaviti na javnoj internetskoj bazi sveučilišne knjižnice u sastavu sveučilišta te kopirati u javnu internetsku bazu završnih/diplomskih radova Nacionalne i sveučilišne knjižnice. Završni radovi istovrsnih umjetničkih studija koji se realiziraju kroz umjetnička ostvarenja objavljuju se na odgovarajući način.

Sukladno čl. 111. Zakona o autorskom pravu i srodnim pravima student se ne može protiviti da se njegov završni rad stvoren na bilo kojem studiju na visokom učilištu učini dostupnim javnosti na odgovarajućoj javnoj mrežnoj bazi sveučilišne knjižnice, knjižnice sastavnice sveučilišta, knjižnice veleučilišta ili visoke škole i/ili na javnoj mrežnoj bazi završnih radova Nacionalne i sveučilišne knjižnice, sukladno zakonu kojim se uređuje znanstvena i umjetnička djelatnost i visoko obrazovanje.