

Primjena legure Inconel 625 za aditivnu proizvodnju električnim lukom i žicom

Krišto, Mate

Master's thesis / Diplomski rad

2017

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:287581>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-31**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mate Krišto

Zagreb, 2017.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

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

Student:

Mate Krišto

Zagreb, 2017.

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

Zahvaljujem se mentoru izv. prof. dr. sc. Ivici Garašiću, dipl. ing. te Ivanu Juriću, mag. ing. mech., na pomoći i savjetima tijekom izrade diplomskog rada.

Također se zahvaljujem Zdenku Batiniću i tehničkom osoblju Laboratorija za zavarene konstrukcije, jer su mi omogućili izvođenje eksperimentalnog rada.

Mate Krišto



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



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

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje
Datum 12-07-2017 Prilog
Klasa: 002-04/17-6/4
Ur.broj: 15-1703-17-256

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Mate Krišto** Mat. br.: 0035186528

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Primjena legure Inconel625 za aditivnu proizvodnju električnim lukom i žicom**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Application of Inconel 625 for Wire Arc Additive Manufacturing**

Opis zadatka:

Opisati osnovna načela proizvodnje električnim lukom i žicom te posebno analizirati prikladne postupke zavarivanja i dodatnih materijala. Navesti primjenu i opisati zavarljivost legure Inconel 625, odrediti opseg parametara za aditivnu proizvodnju električnim lukom i žicom MAG postupkom, kao i prikladne zaštite plinske mješavine.

U eksperimentalnom dijelu za dodatni materijal Inconel 625 promjera 1,2mm odrediti operativno područje parametara, način prijenosa metala u električnom luku te vrstu zaštitnog plina. Primjenom MAG postupka načiniti uzorke odgovarajućih dimenzija te provesti prikladna nerazorna i razorna ispitivanja. Zaključno definirati operativno područje unosa topline za primjenu legure Inconel 625 sa stanovišta aditivne proizvodnje električnim lukom i žicom.

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

Zadatak zadan:
11. svibnja 2017.

Rok predaje rada:
13. srpnja 2017.

Predviđeni datum obrane:
19., 20. i 21. srpnja 2017.

Zadatak zadao:

Predsjednica Povjerenstva:

Izv. prof. dr. sc. Ivice Garašić

Prof. dr. sc. Biserka Runje

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA.....	V
POPIS KRATICA	VI
POPIS OZNAKA	VIII
SAŽETAK.....	IX
SUMMARY	X
1. UVOD.....	1
2. Aditivna proizvodnja	2
2.1. Povijest AM postupaka	3
2.2. Načelo i faze izrade u aditivnoj proizvodnji	4
2.3. Razvoj, podjela i primjena AM postupka	5
3. WAAM	7
3.1. Povijest razvoja procesa	8
3.2. Prednosti i nedostaci	9
3.3. Problemi WAAM postupka	10
3.3.1. Zaostala naprezanja.....	10
3.3.2. Taloženje.....	11
3.4. Osnovna načela WAAM sustava	11
3.5. Greške kod WAAM postupka.....	12
3.6. Točnost i kvaliteta površine	12
3.7. Materijali kod WAAM postupka	13
4. Postupci zavarivanja kod WAAM-a.....	14
4.1. MIG/MAG postupak zavarivanja.....	14
4.2. Parametri procesa	15
4.2.1. Jakost struje.....	15
4.2.2. Napon.....	16
4.2.3. Brzina zavarivanja.....	16
4.2.4. Slobodni kraj žice	16
4.3. Prijenos metala u električnom luku.....	16
4.3.1. Zavarivanje kratkim spojevima.....	17
4.3.2. Zavarivanje štrcajućim lukom.....	18
4.3.3. Zavarivanje prijelaznim lukom	18
4.3.4. Zavarivanje impulsnim strujama.....	19
4.4. Zaštitni plinovi kod MAG zavarivanja	20
4.4.1. Argon	20
4.4.2. Ugljični dioksid.....	21
4.4.3. Kisik.....	22
4.5. Plinske mješavine.....	22
4.5.1. Dvokomponentne plinske mješavine	22

4.5.2. Trokomponentne plinske mješavine	23
5. Inconel 625	25
5.1. Kemijski sastav Inconela 625	25
5.2. Mehanička svojstva Inconela 625	26
6. Upotreba WAAM postupka	27
7. Eksperimentalni dio	28
7.1. Oprema za zavarivanje	28
7.2. Smjese zaštitnih plinova	30
7.3. Parametri zavarivanja	30
7.4. Priprema i izrada ispitnih uzoraka	38
7.4.1. Makroanaliza uzoraka	38
7.4.2. Mikroanaliza uzoraka	40
7.5. Mjerenje tvrdoće	47
7.6. Radiografsko ispitivanje	50
7.7. Statički vlačni pokus	52
7.7.1. Uzorak 1	55
7.7.2. Uzorak 2	56
7.7.3. Uzorak 3	57
7.7.4. Uzorak 4	58
7.8. Ispitivanje udarnog rada loma	59
7.9. Analiza rezultata	62
8. ZAKLJUČAK	68
LITERATURA	69
PRILOZI	71

POPIS SLIKA

Slika 1. Princip aditivnih postupaka proizvodnje prototipova: a – prikaz slaganja slojeva, b – 3D tvorevina [2]	4
Slika 2. Faze AM postupaka [2]	5
Slika 3. Podjela aditivnih postupaka [2]	6
Slika 4. Oprema za WAAM [5]	8
Slika 5. Proizvodi dobiveni postupkom nizanja sloj po sloj [4]	9
Slika 6. Rezanje modela u slojeve: a) originalni model, b) model s konstantnom debljinom slojeva, c) model s varijabilnom debljinom slojeva prilagođenoj veličini modela [7]	13
Slika 7. Shematski prikaz MIG/MAG zavarivanja [9]	15
Slika 8. Prijenos metala kratkim spojem [15]	17
Slika 9. Prijenos metala štrcajućim lukom [16]	18
Slika 10. Prijenos metala prijelaznim lukom [16]	19
Slika 11. Karakteristika impulsne struje [15]	20
Slika 12. Profil geometrije navarenog spoja u zaštiti argona [17]	21
Slika 13. Profil geometrije navarenog spoja u zaštiti ugljičnog dioksida [17]	22
Slika 14. Robotska stanica Almega OTC AX V6	29
Slika 15. Zid 1 (uzorak 1)	37
Slika 16. Zid 2 (uzorak 2)	37
Slika 17. Zid 3 (uzorak 3)	37
Slika 18. Zid 4 (uzorak 4)	38
Slika 19. Pozicije na kojima je analizirana mikrostruktura	41
Slika 20. Pozicije mjerenja tvrdoće	47
Slika 21. Detalj radiografske snimke uzorka 1	51
Slika 22. Detalj radiografske snimke uzorka 2	51
Slika 23. Detalj radiografske snimke uzorka 3	52
Slika 24. Detalj radiografske snimke uzorka 4	52
Slika 25. Uzorak nakon poravnavanja površine i izrezivanja segmenata za daljnju obradu ...	53
Slika 26. Dimenzije ispitnih epruveta: a) prije ispitivanja; b) nakon ispitivanja [25]	53
Slika 27. Primjer ispitne epruvete	54
Slika 28. Kidalica i uzorak postavljen za testiranje	54
Slika 29. Uzorak 1 nakon ispitivanja	55
Slika 30. Dijagram naprezanja za uzorak 1	55
Slika 31. Uzorak 2 nakon ispitivanja	56
Slika 32. Dijagram naprezanja za uzorak 2	56
Slika 33. Uzorak 3 nakon ispitivanja	57
Slika 34. Dijagram naprezanja za uzorak 3	57
Slika 35. Uzorak 4 nakon ispitivanja	58
Slika 36. Dijagram naprezanja za uzorak 4	58
Slika 37. Skica epruveta za ispitivanje žilavosti s označenim ključnim veličinama [26]	59
Slika 38. Primjer ispitnih epruveta	60
Slika 39. Usporedba kretanja jakosti struje	63
Slika 40. Usporedba kretanja vrijednosti napona tijekom zavarivanja	64
Slika 41. Usporedba unosa topline	64
Slika 42. Usporedba tvrdoće	65

Slika 43. Dijagram vlačne čvrstoće i konvencionalne granice razvlačenja	66
Slika 44. Dijagram sile razvlačenja i prekidne sile	66
Slika 45. Usporedba udarnog rada loma	67

POPIS TABLICA

Tablica 1. Greške WAAM procesa [3].....	12
Tablica 2. Materijali kod WAAM-a [8]	13
Tablica 3. Uobičajene dvokomponentne plinske mješavine i njihova svojstva [19]	23
Tablica 4. Uobičajene trokomponentne plinske mješavine i njihova svojstva [19].....	24
Tablica 5. Kemijski sastav Inconela 625 [21]	25
Tablica 6. Mehanička svojstva legure Inconel 625 na sobnoj temperaturi [21]	26
Tablica 7. Karakteristika izvora struje DP 400 [22].....	29
Tablica 8. Zaštitni plinovi [23].....	30
Tablica 9. Parametri zavarivanja zida 1 nakon svakog prolaza	31
Tablica 10. Parametri zavarivanja zida 2 nakon svakog prolaza	32
Tablica 11. Parametri zavarivanja zida 3 nakon svakog prolaza	34
Tablica 12. Parametri zavarivanja zida 4 nakon svakog prolaza	35
Tablica 13. Makrostruktura uzoraka	39
Tablica 14. Mikrostruktura uzorka 1.....	41
Tablica 15. Mikrostruktura uzorka 2.....	43
Tablica 16. Mikrostruktura uzorka 3.....	44
Tablica 17. Mikrostruktura uzorka 4.....	45
Tablica 18. Mjerenje tvrdoće uzorka 1 i uzorka 2.....	48
Tablica 19. Mjerenje tvrdoće uzorka 3 i uzorka 4.....	49
Tablica 20. Podaci o opremi i parametri snimanja i skeniranja	50
Tablica 21. Određene dimenzije epruveta na temelju norme ISO 6892-1:2009	54
Tablica 22. Rezultati ispitivanja za uzorak 1	55
Tablica 23. Rezultati ispitivanja za uzorak 2	56
Tablica 24. Rezultati ispitivanja za uzorak 3	57
Tablica 25. Rezultati ispitivanja za uzorak 4	58
Tablica 26. Određene dimenzije epruveta na temelju norme ISO 148-1:2009	59
Tablica 27. Rezultati ispitivanja za uzorak 1	60
Tablica 28. Rezultati ispitivanja za uzorak 2	61
Tablica 29. Rezultati ispitivanja za uzorak 3	61
Tablica 30. Rezultati ispitivanja za uzorak 4	62

POPIS KRATICA

3D	Tri dimenzije (od eng. Three-dimensional)
AM	Aditivna proizvodnja (od eng. Additive Manufacturing)
Ar	Argon
ASTM	Američko društvo za ispitivanja i materijale (od eng. American Society for Testing and Materials)
BCC	Prostorno centrirana kubična rešetka (od eng. Body Centered Cubic)
BTF	Omjer mase sirovca i gotovog proizvoda (od eng. Buy-to-Fly)
CAD	Konstruiranje pomoću računala (od eng. Computer Aided Design)
CNC	Računalom numerički upravljani strojevi (od eng. Computer Numerical Control)
CO ₂	Ugljični dioksid
Cr	Krom
Cu	Bakar
DC	Istosmjerna struja (od eng. Direct Current)
EPP	Elektrolučno zavarivanje pod zaštitnim praškom
F	Ferit
FCC	Plošno centrirana kubična rešetka
FDM	Taložno očvršćivanje (od eng. Fused Deposition Modeling)
GTAW	Elektrolučno zavarivanje netaljivom elektrodom u zaštiti inertnog plina (od eng. Gas Tungsten Arc Welding)
He	Helij
HRC	Tvrdoća po Rockwellu
HV	Tvrdoća po Vickersu
KV	Ispitni uzorak s V zarezom kod mjerenja udarnog rada loma
LOM	Proizvodnja laminarnih tvorevina (od eng. Laminated Object Manufacturing)
MAG	Elektrolučno zavarivanje taljivom žicom u zaštiti aktivnog plina (od eng. Metal Active Gas)

MIG	Elektrolučno zavarivanje taljivom žicom u zaštiti inertnog plina (od eng. Metal Inert Gas)
Mn	Mangan
Mo	Molibden
N	Dušik
O ₂	Kisik
PREN	Pitting Resistance Equivalent Number
PVC	Poli(vinil-klorid)
REL	Ručno elektrolučno zavarivanje
RP	Brza izrada prototipova (od eng. Rapid Prototyping)
SAD	Sjedinjene Američke Države
Si	Silicij
SLS	Selektivno lasersko srašćivanje (od eng. Selective Laser Sintering)
Ti	Titan
TIG	Elektrolučno zavarivanje netaljivom elektrodom u zaštiti inertnog plina (od eng. Tungsten Inert Gas)
ZUT	Zona utjecaja topline

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
A_5	%	Istezljivost
HB	-	Tvrdoća po Brinellu
HV	-	Tvrdoća po Vickersu
k	-	Stupanj iskorištenja postupka zavarivanja
I	A	Jakost struje zavarivanja
R_m	MPa	Vlačna čvrstoća
$R_{p0,2}$	MPa	Konvencionalna granica razvlačenja
U	V	Napon zavarivanja
V_i	m ³	Volumen početnog sirovca
V_f	m ³	Volumen konačnog proizvoda
v_z	cm/min	Brzina zavarivanja
Q	kJ/cm	Unos topline pri zavarivanju

SAŽETAK

U ovom diplomskom radu obrađen je postupak aditivne proizvodnje električnim lukom i žicom (eng. WAAM – Wire and Arc Additive Manufacturing).

U teorijskom dijelu obrađena je aditivna proizvodnja od povijesnog razvoja preko problematike sve do mogućnosti optimizacije procesa.

U eksperimentalnom dijelu opisana je oprema za zavarivanje i materijal koji je korišten pri izradi zidova. Zavarivanje zidova provedeno je robotom Almega OTC AX V6 s MAG postupkom u Laboratoriju za zavarivanje. Izrađena su 4 zida od legure Inconel 625 jednakim parametrima zavarivanja, ali korištenjem drugačije mješavine zaštitnih plinova za svaki zid. Dobiveni zidovi su izrezani i pripremljeni za nerazorna i razorna ispitivanja . Analizirani su dobiveni podaci te su doneseni zaključci o utjecaju zaštitnih plinova na svojstva zavara.

Ključne riječi: WAAM, Inconel 625, MAG

SUMMARY

This thesis describes process of Wire and Arc Additive Manufacturing (WAAM), by means of a theoretical and experimental part.

In theoretical part an overview is given from historical development and process problems to process optimization.

Likewise in experimental part welding equipment and applied materials for welding walls are described. Walls weldnig was preformed with robot Almega OTC AX V6 with MAG in Laboratory for welding. Four walls were built from Inconel 625 alloy with same welding parameters, but using different mixtures of shielding gases. Furthermore , welded walls were cut and prepared for destructive and nondestructive testing . The data was analyzed and conclusions were made on the effect of different shielding gases had on weld metal properties.

KEY WORDS: WAAM, Inconel 625, MAG

1. UVOD

U novije vrijeme potražnja za materijalima kao što su nehrđajući čelici, titan, aluminij i drugi dramatično se povećala. Proces proizvodnja takvih materijala zahtijeva velike količine energije, te emitiranja velike količine ekološki neprihvatljivih i nepovoljnih nusprodukata. Problem potražnje se pokušao riješiti redukcijom materijala za proizvodnju određenog dijela, ali to nije bilo dovoljno. Zbog toga se u zadnjih 30 godina razvijaju i primjenjuju postupci aditivne proizvodnje. Glavna karakteristika tih postupaka je dodavanje materijala, najčešće sloj po sloj, do izrade komponente blizu konačne dimenzije.

Mnogo je aditivnih postupaka, a nama je zanimljiva aditivna proizvodnja metala koja ima visoku primjenu, zato jer je sposobna odgovoriti raznim zahtjevima tržišta. Aditivna proizvodnja kod koje se primjenjuje zavarivanje za izradu komponenti ima mnogobrojne prednosti kao što su jeftina oprema, jednostavna kontrola procesa i visoka količina depozita. Postupak WAAM je jedan od sve zastupljenijih, ima najveći depozit materijala, proizvodi dijelove navarivanjem sloja na prethodni sloj pomoću robota s izvorom za zavarivanje i dodavačem žice.

Razvoj legure Inconel 625 započeo je 1950-ih kako bi se zadovoljili zahtjevi parnih postrojenja za visoko čvrstim materijalima. Legura Inconel 625 se u suvremeno vrijeme ponajviše koristi zbog visoke čvrstoće, obradivosti te otpornosti na koroziju. Visoka čvrstoća legure posljedica je kombinacije legirnih elemenata molibdena i niobija s nikal-krom matricom. Takva kombinacija legirnih elemenata zaslužna je i za korozijsku postojanost.

2. Aditivna proizvodnja

ASTM definira aditivnu proizvodnju kao "Proces povezivanja materijala pri izradi objekata izravno iz 3D računalnih modela, najčešće sloj na sloj, što je suprotno postupcima obrade odvajanjem čestica [1].

Brza proizvodnja prototipova (Rapid Prototyping, RP) počela se razvijati 1980-ih godina i tada se upotrebljavala samo za izradu prototipova. Usporedno se razvijala i brza proizvodnja kalupa/alata (Rapid Tooling, RT), koja je zajedno s RP činila brzu proizvodnju (Rapid Manufacturing, RM). To su postupci kojima se mogu izraditi dijelovi relativno komplicirane geometrije na temelju računalnog 3D modela tvorevine u relativno kratkom vremenu. No svojstva tvorevina (mehanička svojstva, dimenzijska stabilnost, izgled površine, postojanost na atmosferilije itd.) još se dosta razlikuju od tvorevina načinjenih nekim klasičnim postupcima prerade polimera [2].

Visoki zahtjevi tržišta koji se orijentiraju na izradu komplicirane tvorevine u što kraćem vremenu postavili su pred aditivne postupke nove ciljeve u pogledu svojstava materijala, strojeva i računalne podrške. Postoje različiti načini proizvodnje aditivnim postupcima, ali svi izrađuju tvorevine dodavanjem materijala sloj po sloj. Glavna je prednost aditivnih postupaka to što izrađuju tvorevinu u jednom koraku, izravno iz modela. Aditivni postupci ne zahtijevaju planiranje toka procesa, izradu kalupa, specifičnu opremu za rad s materijalima, transport između radnih mjesta itd. Međutim, glavni je nedostatak ograničenje samo na određene materijale. No kako se sami aditivni postupci sve više nastoje poboljšati, današnji se prototipovi mogu upotrijebiti kao funkcionalne gotove tvorevine [2].

AM postupci mogu se podijeliti prema četiri glavna čimbenika [2]:

- vrsti materijala za potrebnu tvorevinu
- izvoru energije
- postupku oblikovanja sloja
- obliku gotove tvorevine.

Ti čimbenici utječu na kvalitetu završne površine, dimenzijsku preciznost, mehanička svojstva, vrijeme i cijenu proizvodnje.

U aditivnim postupcima razlikuju se tri koraka [2]:

- rezanje modela u slojeve
- slaganje
- kombiniranje slojeva.

AM može skratiti vrijeme i sniziti trošak potreban da se napravi nova tvorevina od početnoga koncepta do proizvodnje. Aditivni postupci mogu pomoći u prepoznavanju osnovnih pogrešaka na tvorevinama koje su u kasnijim fazama njihove proizvodnje skupe za ispravljanje. Međutim, AM dijelovi nisu jeftini. Katkad je teško odlučiti koliko tvorevina treba načiniti da se dobije maksimalna korist od njih. AM postupci izrade tvorevina mogu se općenito podijeliti na postupke koji upotrebljavaju materijal u čvrstom stanju (npr. žica, papir, folija, laminat), kapljevinu i prah [2].

2.1. Povijest AM postupaka

Prva industrijska upotreba AM postupaka zabilježena je 1987. godine. Radi se o postupku stereolitografije proizvođača 3D Systems u kojem se tanak sloj kapljevito polimera očvršćuje UV laserom [2].

Godine 1988. tvrtke 3D Systems i Ciba-Geigy proizvele su prvu generaciju akrilnih smola koje se primjenjuju u stereolitografiji. Postupak 3D tiskanja razvijen je 1989. godine u SAD-u, na MIT-u. Tvrtka 3D Systems, osam godina nakon izrade prvih strojeva za stereolitografiju, načinila je stroj za 3D tiskanje (Actua 2100) koji se zasniva na nanošenju voska sloj po sloj primjenom inkjet postupka.

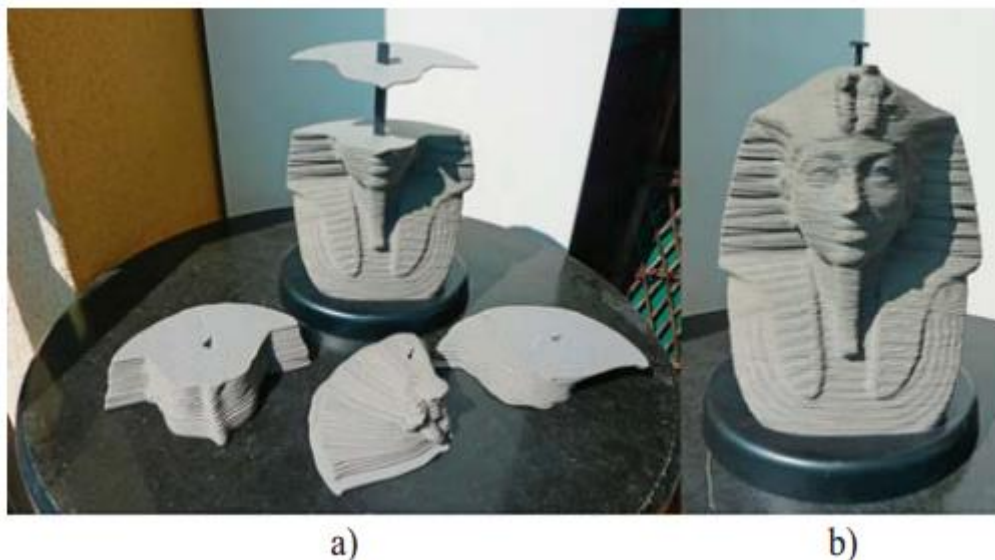
Iste godine tvrtka Z Corp predstavlja svoj 3D pisac Z402, koji radi prototipove od škroba, gipsa u obliku praha i kapljevito veziva [2].

Godine 1991. pojavili su se i drugi AM postupci, uključujući FDM tvrtke Stratasys i LOM tvrtke Helisys.

U FDM-u prototip nastaje ekstrudiranjem slojeva plastomernih materijala, dok LOM lijepi i reže slojeve papira ili folije. Tvrtka DTM (danas je u sklopu 3D Systems) stavlja 1992. na tržište strojeve koji srašćuju polimerne prahove toplinom lasera – SLS postupak [2].

2.2. Načelo i faze izrade u aditivnoj proizvodnji

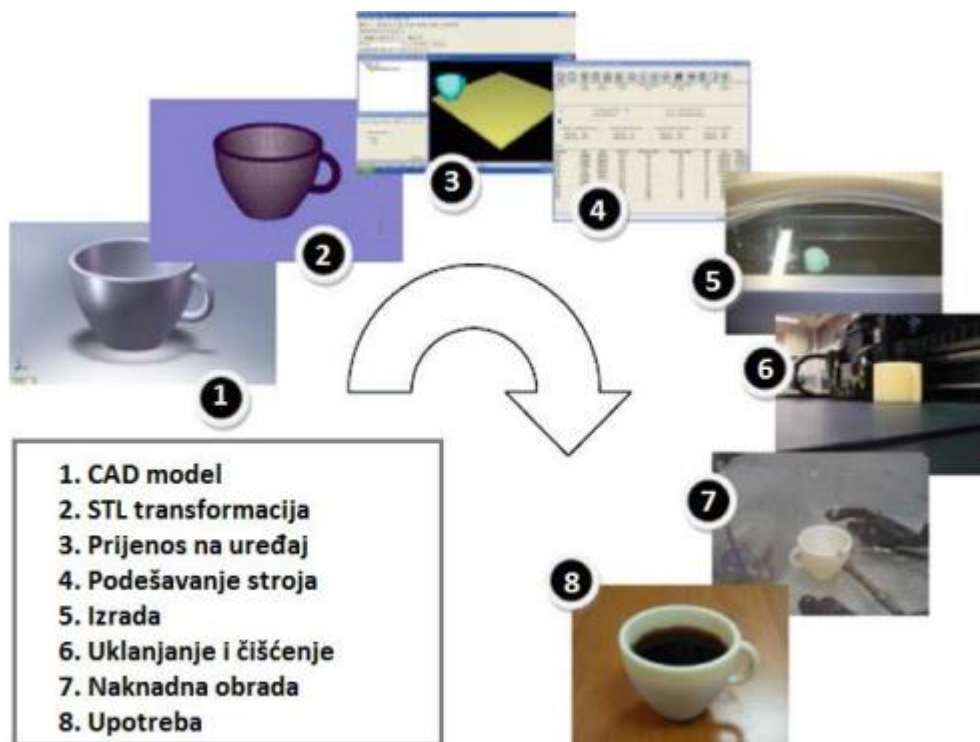
Načelo aditivne proizvodnje tvorevina može se objasniti kao što je prikazano na slici 1, iz 3D modela konstruiranoga računalom izrežu se slojevi podjednake debljine i slažu se jedan na drugi. Rezultat je takvog slaganja stepenasti izgled površine.



Slika 1. Princip aditivnih postupaka proizvodnje prototipova: a – prikaz slaganja slojeva, b – 3D tvorevina [2]

U svim postupcima proizvodnje tvorevina faze izrade su iste i sastoje se od (slika 2) [2]:

- izrade CAD modela
- pretvaranja CAD modela u STL datoteku
- prebacivanja STL datoteke na AM stroj
- podešavanja parametara AM stroja
- pravljenja prototipa
- vađenja prototipa
- naknadne obrade
- uporabe.

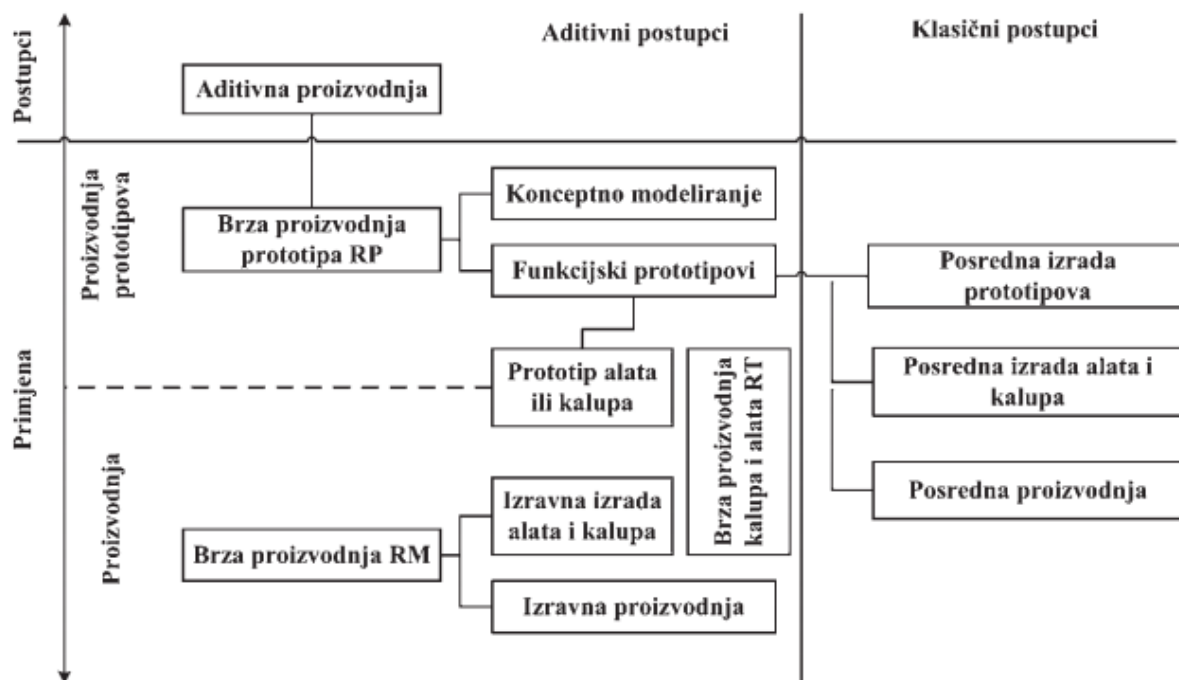


Slika 2. Faze AM postupaka [2]

2.3. Razvoj, podjela i primjena AM postupka

Podjela aditivnih postupaka prikazana je na slici 3, od izrade prototipova slojevitim postupcima do posredne uporabe tih prototipova u klasičnim postupcima prerade. Kako su se AM postupci razvijali, širila se uporaba na različitim područjima.

Najviše se upotrebljavaju za proizvodnju potrošačkih proizvoda/elektronike, zatim u automobilskoj industriji i medicini, a najmanje u arhitekturi.



Slika 3. Podjela aditivnih postupaka [2]

3. WAAM

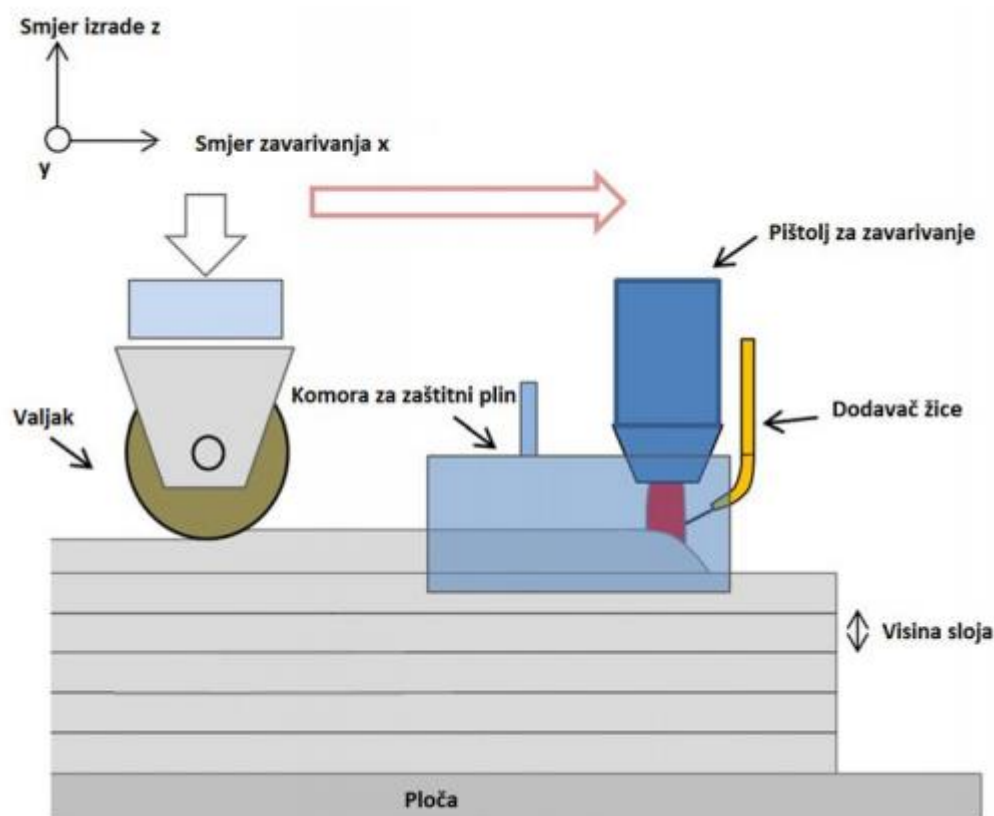
Skraćenica WAAM na engleskom jeziku označava Wire and Arc Additive Manufacturing, što u prijevodu na hrvatski znači aditivna proizvodnja s električnim lukom i žicom. WAAM postupak je nova tehnologija u aditivnoj proizvodnji koji pruža značajne pogodnosti. Komponenta se dobiva taloženjem materijala sloj po sloj što je potpuno različito u odnosu na klasične postupke gdje se od predimenzioniranog sirovog komada rezanjem materijala dobiva gotov proizvod [3].

Ova tehnologija koristi izvor struje za zavarivanje, dodavač žice i robota koji se koriste i za ostale vrste zavarivanja, tako da nije potrebno kupovati opremu predviđenu samo za WAAM, nego je moguće s postojećom opremom započeti proizvodnju. Za upravljanje izvorom i dodavačem žice može se koristiti robot ili modificirani CNC stroj.

Ova tehnologija trenutno ne može izraditi funkcionalan dio bez završne obrade odvajanjem čestica, zato što tijekom navarivanja dolazi do valovitosti koju je potrebno ukloniti. Za materijale kao što su titan i aluminij koristi se valjanje kako bi se smanjila zaostala naprezanja i postigla tražena mikrostruktura [4].

WAAM sustav uglavnom koristi standardnu opremu za zavarivanje [4]:

- izvor struje
- pištolj za zavarivanje
- robota ili CNC portalni stroj koji osigurava gibanje po zadanoj putanji
- kontrolnu jedinicu koja upravlja robotom
- uređaj za dodavanje žice koji upravlja količinom depozita .



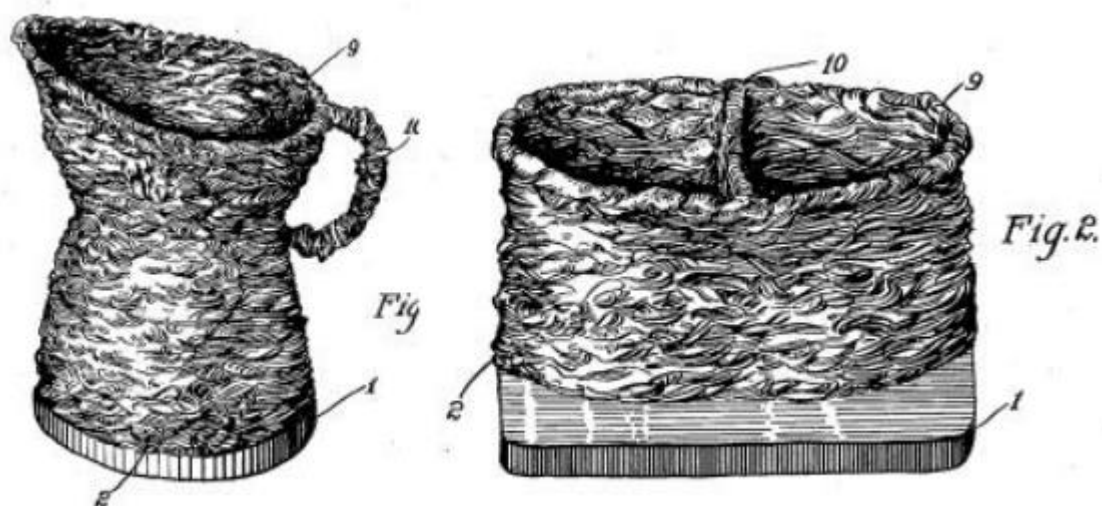
Slika 4. Oprema za WAAM [5]

3.1. Povijest razvoja procesa

Postupak WAAM prvi je patentirao Baker 1926. godine. Koristio je elektrolučno zavarivanje za izradu 3D modela taloženjem rastaljenog materijala i nizanjem sloj po sloj. Slikom 5 su prikazani neki predmeti dobiveni na taj način.

Godine 1947. Carpenter je primijenio EPP postupak za taloženje sloj po sloj. 1964. godine White je izradio valjak EPP postupkom taloženjem materijala sloj po sloj. Ujii je 1971. godine izradio posude pod tlakom koristeći više žica od različitog materijala čime je dobio funkcionalne zidove. Za izradu je koristio EPP, TIG i zavarivanje pod troskom.

Kussmail je 1983. godine koristio EPP postupak za proizvodnju visoko kvalitetnih velikih dijelova od konstrukcijskog čelika za nuklearne elektrane. Kombinacija zavarivanja i 3D glodanja je patentirana od strane Prinza i Weissa 1993. godine. Od 1994. do 1998. Sveučilište u Cranfieldu je razvijalo postupke taloženje metalnih materijala za izradu dijelova za Rolls Royce. Zrakoplovne kompanije su 2006. godine od Sveučilišta zatražile istraživanje o aditivnoj proizvodnji metalnih komponenti uz velike količine depozita od titana [4].



Slika 5. Proizvodi dobiveni postupkom nizanja sloj po sloj [4]

3.2. Prednosti i nedostaci

Prednosti WAAM postupka [4]:

- izrada komponenti od skupih materijala (titan, nikal i njihove legure)
- mogućnost automatizacije proizvodnog procesa čime se smanjuje vrijeme proizvodnje i ljudski rad
- proizvodnja komponenti sa složenom geometrijom
- smanjenje gubitka materijala
- velika količina depozita
- mnogo niži troškovi proizvodnje nego kod procesa baziranih na prašku
- potencijalno nema ograničenja u veličini dijela
- mogućnost strojne obrade tijekom procesa
- otvorena struktura sustava omogućuje primjenu bilo kojeg proizvođača izvora struje i manipulatora.

WAAM se zbog svojih prednosti koristi za srednje do velike dijelove, ali s manjom kompleksnosti. Trenutno se u proizvodnji koriste aluminij i njegove legure, bakar, titan i čelici. U tradicionalnim industrijama od ideje do gotovog proizvoda prođe ponekad i par mjeseci, dok kod WAAM-a nije potrebno dugo planiranje, nego se iz CAD modela može početi proizvoditi.

Ovakva tehnologija s trenutnim postavkama nije pogodna za veću proizvodnju. Omjer Buy To Fly (BTF, omjer mase sirovca i gotovog proizvoda) je glavna prednost WAAM-a.

Nedostatci WAAM postupka [4]:

- visoka zaostala naprezanja
- nedostatak iskustva sa ovakvom tehnologijom
- teško praćenje parametara zavarivanja
- samo jednostavne konstrukcije
- deformacije dijelova
- potrebna naknadna obrada
- nedostatak iskustva sa nerazornim ispitivanjima ovakvim konstrukcijama.

Mnoga su istraživanja provedena kako bi se riješili gore navedeni nedostaci. Smanjenje zaostalih naprezanja i deformacija dobiva se optimiranjem procesa taloženja i predgrijavanje podloge. Neujednačena geometrija zavara posljedica je smanjenog unosa topline kod velikih podloga na početku zavarivanja. Rezultat toga je veća visina zavara na početku prolaza.

Kada se električni luk zaustavi, dolazi do bježanja rastaljenog metala i dobiva se nagnuti oblik zavara. Ova greška dovodi do poroznosti prilikom izgradnje nekoliko prolaza. Da bi se dobio geometrijski ispravan proizvod, parametri procesa vezani uz geometriju se moraju pažljivo odabrati [6].

3.3. Problemi WAAM postupka

3.3.1. Zaostala naprezanja

Značajni unos topline povezan je s izvorom električnog luka, te dovodi do zaostalih naprezanja. Preostala naprezanja su povezana sa skupljanjem tijekom procesa hlađenja, te su najveća u smjeru taloženja.

Trenutno se primjenjuju sljedeće metode za ublažavanje ovog problema [4]:

- Simetrično slaganje - Ravnina simetrije je uspostavljena u skladu sa volumenom zadanog dijela. Pomoću rotacijskog alata taloženje materijala je ravnomjerno i odvija se naizmjenično sa svake strane u odnosu na ravninu simetrije.

Prednost ovog postupka je bolje upravljanje sa unosom topline. Dok se na jedan dio nanosi novi sloj depozita, drugi dio se hladi. Problem ovog postupka je taj što nekad dijelovi zahtijevaju dodatnu obradu.

- „Back to back“ slaganje - Ima jako dobro upravljanje unosa topline. Koristi se kod izrade dva simetrična dijela. Prije razdvajanja dijelova cijeli proizvod ide na toplinsku obradu radi smanjenja zaostalih naprezanja.
- Optimiranje orijentacije dijelova - Pozicionirati dijelove na način da se dobiju što kraći slojevi taloženja, jer kraći slojevi imaju manja zaostala naprezanja i distorziju.
- Visoko tlačno valjanje - Daje bolju mikrostrukturu i uklanja zaostala naprezanja.

3.3.2. *Taloženje*

Radnje za vrijeme taloženja su najučinkovitije za smanjenje deformacija i naprezanja. Da bi se spriječilo deformiranje podloge prilikom izrade zida, potrebno je ostvariti taloženje materijala sa svake strane podloge. Najpovoljnije je kada se s obje strane podloge nalaze komponente jednake geometrije. Tako dobivena komponenta ima snažan utjecaj na smanjenje deformacije, ali nema utjecaja na zaostala naprezanja. Optimizacija vremena hlađenja jedan je od načina uklanjanja zaostalih naprezanja. Podrazumijeva pravilan odabir vremena tijekom kojeg će se postojeća toplina koristiti za predgrijavanje prije nanošenja slijedećeg sloja. Paralelno nanošenje slojeva koristi se kako bi se poboljšala učinkovitost procesa i nadoknadilo vrijeme za hlađenje zida [3].

3.4. **Osnovna načela WAAM sustava**

Princip rada u aditivnoj proizvodnji zasniva se na generiranju 3D CAD modela. Dobiveni 3D modeli režu se u slojeve s pomoću matematičkih metoda i dobivaju se 2D slojevi. Zatim slijedi generiranje putanje gibanja za svaki 2D sloj, postavljanje parametara taloženja, generiranje operacijskog koda za opremu i automatska proizvodnja [6].

STL datoteka (Standard Tessellation Language) se koristi za predstavljanje 3D modela u procesu planiranja. Nakon učitavanja i prebacivanja 3D modela u STL datoteku, algoritam za rezanje reže model u slojeve određene visine. Sljedeći korak je planiranje putanje gibanja za svaki sloj 2D konture.

Zahtjevi koji se postavljaju prilikom generiranja putanji kod WAAM-a su minimalan broj prolaza, što manje elemenata gibanja i dobra geometrijska točnost. Odabiru se različite putanje gibanja ovisno o karakteristikama 2D geometrije.

Praćenje konture može generirati mnoge zatvorene krivulje koje su nepovezane i zato nije pogodna za WAAM. Hibridna putanja povezuje dobre karakteristike različitih putanja [6].

3.5. Greške kod WAAM postupka

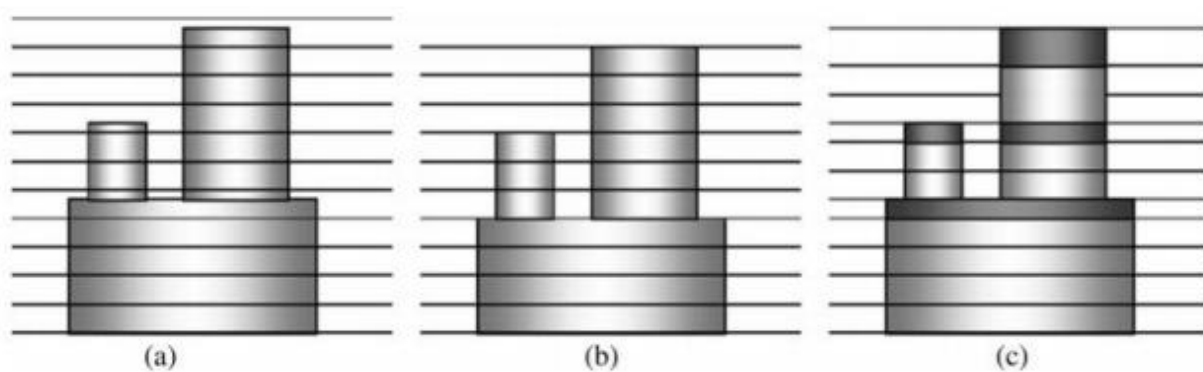
Greške koje se pojavljuju kod WAAM postupka su poroznost, ugorine i nadvišenje zavara.

Tablica 1. Greške WAAM procesa [3]

Greške	Uzroci
Poroznost	Nedovoljan protok zaštitnog plina, niska čistoća zaštitnog plina, pogrešni parametri, prevelika brzina zavarivanja, nečistoće u materijalu
Ugorine	Prevelika struja zavarivanja, prevelika brzina zavarivanja, pogrešan kut zavarivanja, kemijski sastav materijala, nedovoljno dodavanje žice
Premalo nadvišenje	Prevelika brzina zavarivanja

3.6. Točnost i kvaliteta površine

Osim deformacija izazvanih zaostalim napreznjima, drugi važan čimbenik koji ima utjecaja na točnost oblika proizvoda je rezanje na slojeve čemu je posljedica stepeničasti efekt i višak materijala. Kod rezanja na konstantne debljine dobiva se višak materijala. Problem se može riješiti pomoću prilagodljive strategije rezanja koja uključuje rezanje modela u slojeve različite debljine. Takva strategija omogućuje automatsko podešavanje debljine sloja u određenom rasponu kako bi se dobio točan oblik. Efekt stepenica se pojavljuje prilikom taloženja slojeva jednake debljine čime se ne može dobiti zakrivljeni oblik profila zida. Što je veća debljina nanesenog sloja veća će biti greška proizvedenog dijela. Točnost dijelova proizvedenih s WAAM tehnologijom je oko 10 puta lošija od onih napravljenih s tehnologijom praška. Kod velike količine depozita, WAAM proces je efikasan za jednostavnije geometrije. Kada je potrebna visoka točnost, dijelovi napravljeni WAAM procesom zahtijevaju naknadnu obradu [7].



Slika 6. Rezanje modela u slojeve: a) originalni model, b) model s konstantnom debljinom slojeva, c) model s varijabilnom debljinom slojeva prilagođenoj veličini modela [7]

Površina izrađenog dijela sastoji se od velikog broja prolaza jedan do drugoga s mogućnosti preklapanja. Oblik svakog prolaza više nalikuje paraboli nego pravokutniku. Dobiva se završna površina koja se često naziva hrapavost površine.

3.7. Materijali kod WAAM postupka

Materijali koji se primjenjuju kod WAAM postupka su titan, aluminij, čelik, bronca, bakar i nikal. Prilikom primjene svakog materijala za izradu komponente WAAM postupkom cilj je postići odgovarajuća mehanička svojstva i izbjeći nastanak grešaka [4].

Tablica 2. Materijali kod WAAM-a [8]

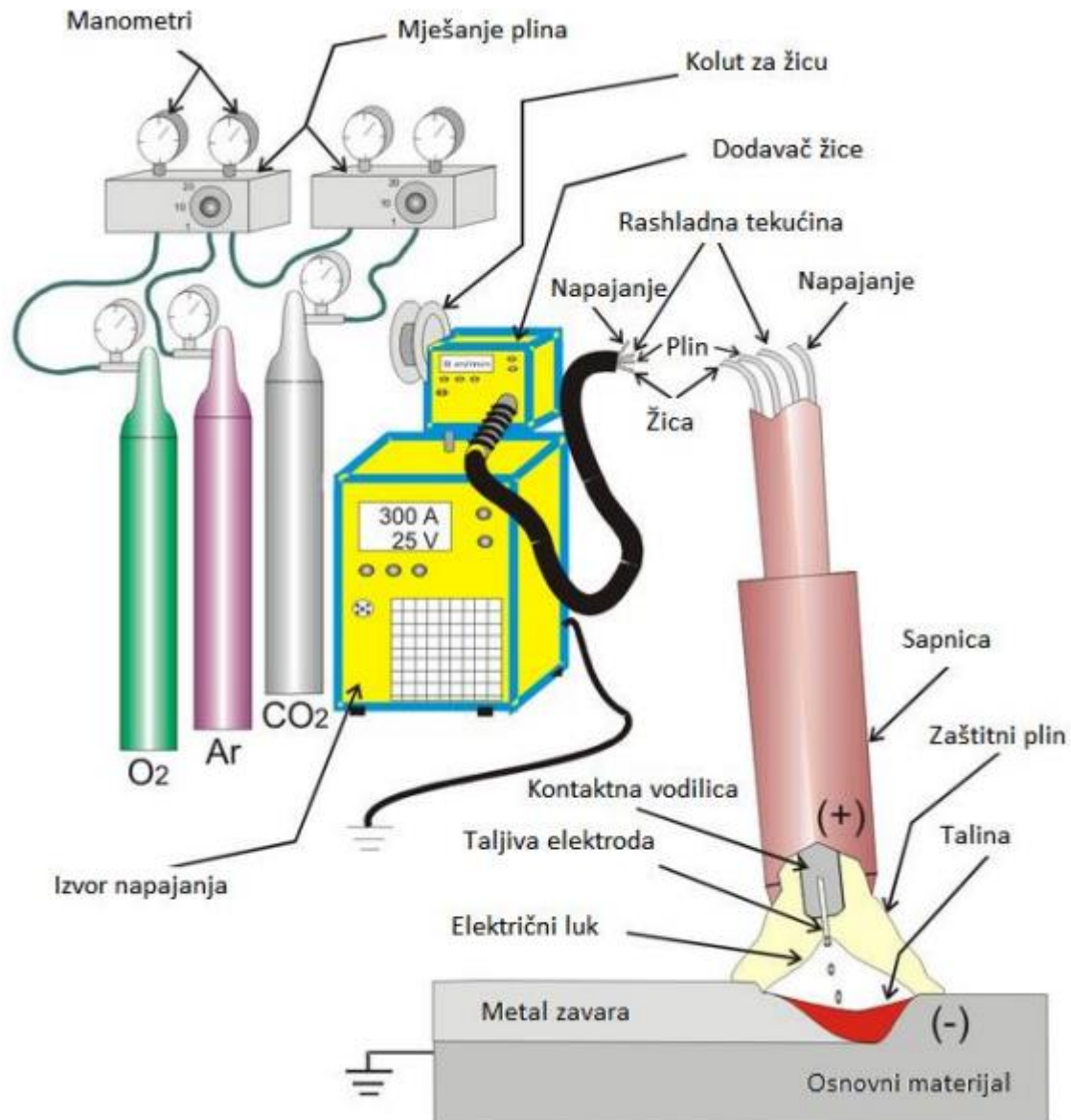
Titan	Ti-6Al-4V
Aluminij	2024, 2319, 4043, 5087
Vatrootporni materijali	Volfram, molibden, tantal
Čelik	ER60, ER80, ER90, ER120, 250 i 350, 17-4 PH, 316L
Inconel	625, 718

4. Postupci zavarivanja kod WAAM-a

Za WAAM proces se mogu primijeniti različiti postupci zavarivanja, a koji će se postupak odabrati ovisi o vrsti materijala koji se zavaruje, dimenzijama zida i kvaliteti površine. Najčešće korišteni postupci zavarivanja kod WAAM-a su TIG, MIG i plazma. TIG postupak generira neznatno prskanje i rastaljeni metal je manje aktivan, što je poželjno prilikom taloženja materijala različitih kemijskih sastava. Plazma zavarivanje se najčešće koristi kod titana. Prednost MIG postupka zavarivanja je to što je dodatni materijal sastavni dio procesa dok su kod plazme i TIG postupka potrebni dodavači žice.

4.1. MIG/MAG postupak zavarivanja

Elektrolučno zavarivanje taljivom elektrodom u zaštitnoj atmosferi plina (MIG/MAG) je postupak zavarivanja taljenjem, gdje se električki luk uspostavlja i održava između taljive žice i radnog komada koji se zavaruje. Zbog utjecaja topline električkog luka, tali se žica i osnovni materijal na mjestu zavarivanja, čime se ostvaruje zavareni spoj. Proces se odvija u zaštitnoj atmosferi koju omogućava plin ugljični dioksid (CO₂), argon (Ar) ili mješavine plinova. Ovim postupkom se mogu zavarivati svi komercijalno značajni materijali. Postupak je izuzetno pogodan za mehanizaciju, automatizaciju i robotizaciju.



Slika 7. Shematski prikaz MIG/MAG zavarivanja [9]

4.2. Parametri procesa

Parametri zavarivanja utječu na način prijenosa materijala, stabilnost električnog luka, pojavu prskanja, geometriju zavara i sveukupnu kvalitetu spoja. Glavni parametri procesa su struja, napon, brzina zavarivanja, slobodni kraj žice i promjer elektrode.

4.2.1. Jakost struje

Parametara o kojem ovisi način na koji će se prenositi rastaljeni metal u električnom luku, stabilnost luka, penetracija, količina taline i brzina zavarivanja.

Jakost struje direktno ovisi o promjeru žice, položaju zavarivanja i materijalu. Razlikuje se za različite načine prijenosa metala u električnom luku [10].

4.2.2. Napon

O naponu ovisi stabilnost električnog luka kao i njegova duljina i širina. Veza između napona i duljine električnog luka je proporcionalna. Duži električni luk dobije se pomoću većeg napona što dovodi do šireg zavara uz manju penetraciju. Iznos napona utječe na način prijenosa metala u električnom luku [11].

4.2.3. Brzina zavarivanja

Faktor jer o kojem ovisi produktivnost postupka zavarivanja. Brzina zavarivanja odabire se u korelaciji s položajem zavarivanja i jačinom struje zavarivanja. Promjena brzine zavarivanja utječe se na izgled zavara kao i na njegova mehanička svojstva. Manja penetracija i uža zavar su posljedica povećanja brzine zavarivanja. Smanjenjem brzine zavar postaje širi i penetracija bolja [12].

4.2.4. Slobodni kraj žice

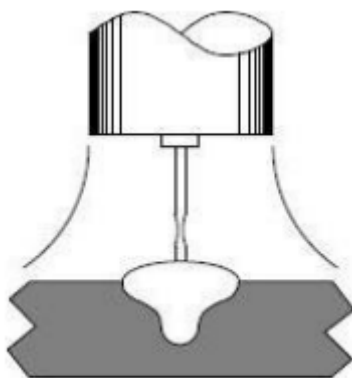
Predstavlja dio žice od kraja kontaktne vodilice do početka električnog luka, odnosno dio žice koji je vidljiv zavarivaču. Jakost struje električnog luka ovisi o promjeni slobodnog kraja žice. Povećanje slobodnog kraja žice dovodi do povećanja otpora i pada jakosti struje. Smanjenje slobodnog kraja žice dovodi do pada otpora i do porasta jakosti struje. Zbog promjene jakosti struje važno je slobodan kraj žice držati konstantnim da bi se dobila konstantna vrijednost penetracije [13].

4.3. Prijenos metala u električnom luku

Prijenos metala predstavlja proces leta rastaljene kapljice od vrha elektrode kroz električni luk do taline metala zavara. Kod elektrolučnog zavarivanja taljivom elektrodom rastaljeni se metal prenosi premošćivanjem ili slobodnim letom. Prijenos metala premošćivanjem obuhvaća prijenos metala kratkim spojevima i prijenos metala mješovitim lukom dok se slobodnim letom kapljice mogu prenositi štrcajućim ili impulsnim lukom [14].

4.3.1. Zavarivanje kratkim spojevima

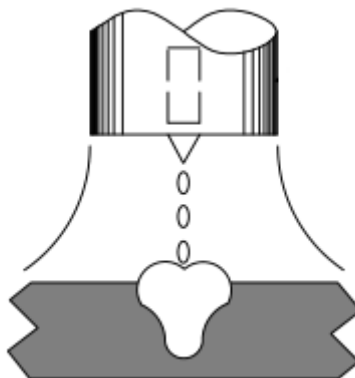
Kratkim spojevima metal se prenosi s malim unosom energije uz male struje zavarivanja i niske napone električnog luka (13 - 21 V, 50 - 170 A). Metal se prenosi s elektrode na radni komad samo za vrijeme dok je elektroda u kontaktu s kupkom zavara. Frekvencija kojom elektroda dotiče kupku zavara je od 20 do 200 puta u sekundi. Kako žica prilazi metalu, dolazi do kratkog spoja, luk nestaje, a struja počinje rasti. U tom periodu stvara se tekući rastaljeni most između žice i kupke zavara koji se povećava kako se kapljica usisava u kupku zavara zbog površinskih napetosti. Kako struja kratkog spoja u tom trenutku nije jako izražena, premala je elektromagnetna sila koja bi suzila („pinch-efekt“) metalni most. Potom, zahvaljujući smanjenom električnom otporu u premošćivanju, struja raste progresivno zagrijavajući žicu Jouleovim efektom. Most je tako „odrezan“ kombiniranim efektom površinske napetosti i naposljetku progresivnih elektromagnetskih sila (pinch-efekt) koje se javljaju kao posljedica povećanja struje u posljednjoj fazi. Time se kratki spoj prekida, dolazi do skoka napona, a struja počinje eksponencijalno padati prema svojoj nominalnoj vrijednosti. Porast struje mora biti dovoljno visok kako bi se ugrijala elektroda i da se obavi prijenos metala, ali ne smije biti previsok kako bi prskanje uzrokovano silovitim odvajanjem kapljice bilo što manje. Stopa rasta struje kontrolirana je podešavanjem induktiviteta u izvoru struje. Po uspostavi električnog luka kreće taljenje vrha elektrode koja se kontinuirano, jednolikom brzinom, kreće prema radnom komadu i tako se smanjuje razmak koji je ostao otkidanjem njenog vrha. Kada elektroda premosti razmak i dotakne radni komada proces se ponavlja [15].



Slika 8. Prijenos metala kratkim spojem [15]

4.3.2. Zavarivanje štrcajućim lukom

Moguće je postići veoma stabilan, aksijalni prijenos materijala bez prskanja, ali uz značajan udio inertnog plina, argona. Što je udio argona u mješavini veći potrebna je manja struja zavarivanja. Struje moraju biti dovoljno velike kako bi se prešla kritična granica i omogućio fini prijelaz bez prskanja, iznad vrijednosti tzv. prijelaznih struja. Na vrijednostima malo iznad kritične struje stvara se usmjereni štrcajući prijenos. Iznad te struje prijelaz se ostvaruju veoma sitnim kapljicama, a frekvencija je nekoliko stotina kapljica u sekundi koje se ubrzano aksijalno gibaju kroz međuprostor prema radnom komadu bez da i u jednom trenutku dođe do direktnog kontakta između elektrode i kupke zavara. Da bi se smanjile sile površinske napetosti kapljice dodaje se mala količina kisika (do 2 %) čime se smanjuje vrijednost kritične struje. Pošto je općenito pri prijenosu metala štrcajućim lukom veliki unos topline, u nekim slučajevima nije moguće primijeniti tako velik unos topline, kao npr. kod tankih limova gdje može doći do izgaranja materijala umjesto njegovog zavarivanja. Također, zbog velikog depozita može doći do stvaranja prevelike kupke zavara kod nadglavnog i vertikalnog zavarivanja [15].

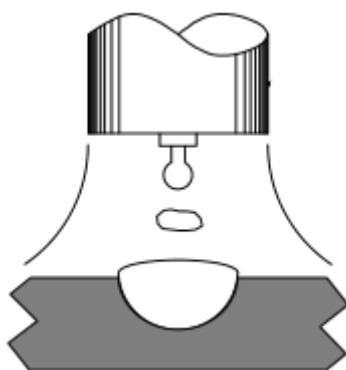


Slika 9. Prijenos metala štrcajućim lukom [16]

4.3.3. Zavarivanje prijelaznim lukom

Prijenos metala mješovitim lukom je kombinacija štrcajućeg i kratkog luka sa krupnijim kapljicama. Prijelaz se odvija pri relativno niskim strujama dok je elektroda priključena na pozitivan pol, ali uz veći napon kojem je cilj povećati dužinu luka kako bi se spriječilo stvaranje kratkog spoja (22 - 25 V, 170 - 235 A). Prijelazni luk karakterizira se veličinom kapljica čiji je promjer veći od onog elektrode (1.5 do 3 puta) i malom brzinom prijelaza kapljica, svega 1 do 10 kapljica u sekundi.

Kapljica se zadržava na vrhu elektrode za vrijeme svojeg rasta površinskom napetošću i reakcijom mlaza para. Kada veličina kapljice dostigne svoju kritičnu mjeru na nju najviše djeluje gravitacijska sila i aerodinamične sile radi čega je proces moguć samo u položenom položaju. Na strujama malo većim od onih za prijenos kratkim spojem, aksijalni prijenos mješovitim lukom postiže se u jako inertnoj zaštiti. Ako je dužina luka prekratka, zbog malog napona, kapljica koja raste može dotaknuti radni materijal pri čemu dolazi do pregrijavanja i raspada kapljice što proizvodi značajno prskanje. Dužina luka mora biti dovoljna kako bi se omogućilo odvajanje kapljice prije nego što dodirne kupku zavara. S druge strane, veći napon luka po svojoj je prilici nepogodan zbog nedostatnog protaljivanja, nedovoljne penetracije i pretjeranog nataljivanja metala. Zbog ovih nedostataka koji prolaze iz niskih struja i visokih napona kako bi se izbjegli kratki spojevi, upotreba ovog načina prijenosa materijala u proizvodnji je ograničena [15].



Slika 10. Prijenos metala prijelaznim lukom [16]

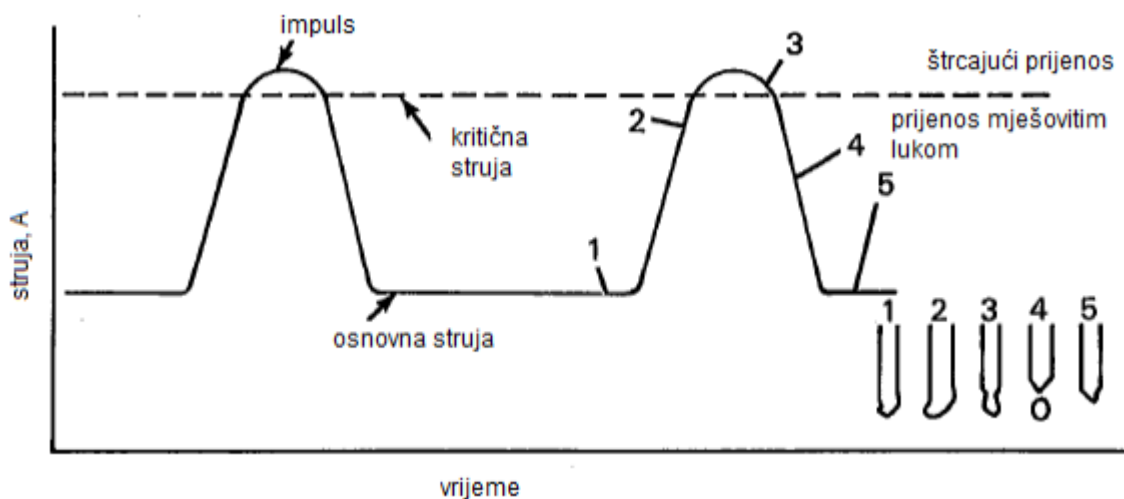
4.3.4. Zavarivanje impulsnim strujama

Prema novoj klasifikaciji načina prijenosa metala prijenos metala impulsnim strujama spada pod područje kontroliranog prijenosa, a komercijalna upotreba počela je 60-ih godina. Ovim prijenosom moguće je ostvariti štrcajući tip prijenosa s vrijednostima struja ispod kritične struje. Ovakav prijenos metala ima mnogobrojne prednosti nad klasičnim MAG zavarivanjem: povoljniji prijenos metala, smanjeno štrcanje, manje deformacije, svi položaji zavarivanja i mogućnost automatizacije [15].

Struja ima dvije razine, što je vidljivo na slici 8 [15]:

- osnovna struja, koja održava luk, ali ga ne opskrbljuje s dovoljno energije da se formira kapljica na vrhu elektrode

- struja impulsa, čiji je vrh amplitude veći od kritične struje koja je potrebna za štrcajući luk.



Slika 11. Karakteristika impulsne struje [15]

4.4. Zaštitni plinovi kod MAG zavarivanja

Primarna funkcija zaštitnog plina kod MAG zavarivanja je stvoriti zaštitu oko zavarenog spoja na način da se izolira od okolišne atmosfere kako ne bi došlo do kontaminacije metala zavara. Većina metala zagrijavanjem na zraku razvije veliki afinitet prema stvaranju oksida i u manjoj mjeri nitrida. Tako dolazi do reakcije kisika s ugljikom iz taline koji zajedno tvore ugljični monoksid i ugljični dioksid što može rezultirati nepravilnostima u metalu zavara. Osim što služi kao zaštitna atmosfera, zaštitni plin svojim djelovanjem utječe i na karakteristiku električnog luka, način prijenosa metala, profil zavara/navara, brzinu zavarivanja, pojavu ugorina, čišćenje površine i svojstva metala zavara [17].

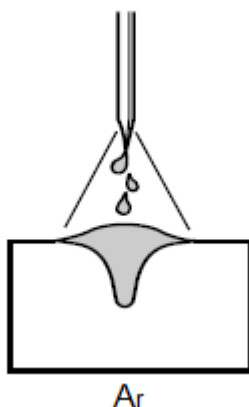
4.4.1. Argon

Argon (Ar) je jednoatomni kemijski inertni plin bez boje i mirisa, nije zapaljiv niti otrovan te nije topiv u talini metala. Argon u procesu zavarivanja treba imati čistoću veću ili jednaku 99,99 %. Argon ima 1,380 puta veću gustoću u odnosu na zrak tako da u slučaju horizontalnog zavarivanja pruža jako dobru zaštitu.

Zavarivanje u zaštiti argona rezultira talinom s visokom površinskom napetošću, brzim skrućivanjem taline i malim gubicima legiranih elemenata.

Argon se može koristiti u dvokomponentnim i višekomponentnim plinskim mješavinama. Koristi se za zavarivanje metala na bazi željeza i neželjeznih legura. Izvrsna stabilnost električnog luka i provodnost električne struje posljedica su niskog ionizacijskog potencijala argona.

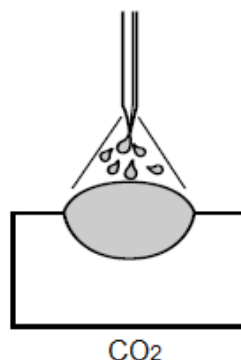
Pri zavarivanju neželjeznih legura argon se koristi kao zaštitni plin u samostalnom obliku i u tom slučaju pruža izuzetno stabilan električni luk i veliku penetraciju i to u području zavarivanja štrcajućim lukom. Može koristiti i u slučaju zavarivanja tankostijenih konstrukcija kratkim spojevima [17].



Slika 12. Profil geometrije navarenog spoja u zaštiti argona [17]

4.4.2. Ugljični dioksid

Ugljični dioksid (CO_2) je dvokomponentni plin (sastoji se od dva elementa – ugljika i kisika u masenim odnosima 27,3 % ugljika i 72,7 % kisika) što ga razlikuje od svih ostalih korištenih plinova u svrhu zaštite zavarenog spoja. Ugljični dioksid je plin bez boje i mirisa, neotrovan i nezapaljiv. Prilikom zavarivanja u zaštitnoj atmosferi koja sadrži CO_2 između rastaljenog metala i CO_2 dolazi do reakcije što ga svrstava u kategoriju aktivnih zaštitnih plinova. Primjena aktivnih plinova zahtijeva posebnu pažnju zbog pojave oksidacije [17].



Slika 13. Profil geometrije navarenog spoja u zaštiti ugljičnog dioksida [17]

4.4.3. Kisik

Plin bez boje i mirisa, neutrovan i nezapaljiv, ali izrazito podržava gorenje. Idealan je plin za povećanje temperatura plamena kod plinskog zavarivanja i rezanja. Primjena kisika u procesu zavarivanja povećava stabilnost električnog luka i smanjuje površinsku napetost. Dodavanjem od 1 % do 5 % O₂ smanjuje se promjer kapljica dodatnog metala, poboljšava se spajanje na rubovima, a površina zavara znatno je ravnija. Dodaje se argonu kod MAG postupaka u svrhu povećanja stabilnosti luka. Prisutnost kisika pri zavarivanju ima značajan utjecaj na mikrostrukturu materijala zavara, a time i na njegova osnovna mehanička svojstva, posebno na udarni rad loma. Stoga se u zavarivanju uvodi pojam ekvivalenta kisika radi procjene utjecaja zaštitnog plina na svojstva zavara. Kisik se koristi samo u plinskim mješavinama, u malim postotcima [18].

4.5. Plinske mješavine

4.5.1. Dvokomponentne plinske mješavine

Dvokomponentne mješavine plinova kod MAG zavarivanja najčešće se javljaju u dva oblika, kao mješavina argona (Ar) i ugljičnog dioksida (CO₂) ili kao mješavina argona (Ar) i kisika (O₂). Ar - CO₂ su najčešće primjenjivane dvokomponentne plinske mješavine. Podržavaju sva četiri načina prijenosa materijala u električnom luku. Disociranjem CO₂ u električnom luku oslobađa se kisik koji daje talini dodatnu viskoznost i doprinosi stabilizaciji električnog luka. Svojom toplinskom vodljivošću CO₂ također utječe na veću širinu provara [19].

Tablica 3. Uobičajene dvokomponentne plinske mješavine i njihova svojstva [19]

Redni broj	Plinska mješavina	Način prijenosa materijala u električnom luku	Svojstva
1.	98 % Ar + 2% CO ₂	štrcajući luk	velika brzina zavarivanja; za uporabu s elektrodama od ugljičnog i nehrđajućeg čelika
2.	95 % Ar + 5% CO ₂	štrcajući luk	impulsni luk s elektrodama od ugljičnog čelika
3.	90 % Ar + 10% CO ₂	štrcajući luk	za prijenos metala štrcajućim i impulsnim lukom kod ugljičnih čelika
4.	82 % Ar + 18% CO ₂	štrcajući luk	popularna mješavina u Europi za zavarivanje širokog spektra debljine osnovnog materijala
5.	80 % Ar + 20% CO ₂	kratki spojevi	još veće smanjenje prskanja taline pri zavarivanju

4.5.2. Trokomponentne plinske mješavine

Trokomponentne plinske mješavine koriste se pri zavarivanju ugljičnih i nehrđajućih čelika, te u nekim slučajevima legura nikla. Kod prijenosa metala kratkim spojevima na ugljičnom čeliku, dodatak od 40 % helija u mješavinu argona i ugljičnog dioksida dovodi do šireg profila zavara. Helij omogućuje veću toplinsku vodljivost za prijenos materijala kratkim spojevima pri zavarivanju ugljičnih i nehrđajućih čelika. Trokomponentne plinske mješavine često se primjenjuju kod zavarivanja nehrđajućih čelika [19].

Prednosti trokomponentnih mješavina [19]:

- smanjeno rasprskavanje
- poboljšana viskoznost taline
- ravni i položeni izgled zavara
- stabilniji električni luk.

Tablica 4. Uobičajene trokomponentne plinske mješavine i njihova svojstva [19]

Redni broj	Plinska mješavina	Način prijenosa materijala	Svojstva
1.	90% He + 7,5 % Ar + 2,5 % CO ₂	kratki spojevi impulsni luk	za zavarivanje čelika kratkim spojevima, služi za zavarivanje osnovnog materijala debljeg od 1,6 mm od nehrđajućeg čelika i nikla impulsnim lukom, velike brzine pri zavarivanju nehrđajućeg čelika
2.	55 % He + 42,5 % Ar + 2,5 % CO ₂	impulsni luk	mogućnost primjene pri zavarivanju nehrđajućih čelika i nikla kratkim spojevima, niži udio He omogućava mu primjenu i kod štrcajućeg luka
3.	38 % He + 56 % Ar + 6 % CO ₂	kratki spojevi	uporaba na ugljičnom čeliku i na niskolegiranim čelicima
4.	90 % Ar + 8 % CO ₂ + 2 % O ₂	kratki spojevi štrcajući luk impulsni luk	za zavarivanje ugljičnih čelika, visok udio inertne komponente smanjuje prskanje

5. Inconel 625

Nikal krom molibden legure dobro su poznate po svojim svojstvima puzanja uz visoku otpornost na koroziju. Vrlo velika primjenu u naftnoj i petrokemijskoj industriji. Međutim, zbog svoje previsoke cijene jeftinija je alternativa obloga Ni legura na osnovnom materijalu. Legura Ni može se nanjeti različitim metodama poput valjanja, eksplozivnim oblogama ili navarivanjem. Postupak navarivanja jednostavan i zahtijeva malu pripremu. Navarivanje se koristi za poboljšanje korozijskih svojstava razne opreme koja se primjenjuje u naftnoj i petrokemijskoj industriji. Iako je postupak jednostavan i lagan za primjenu, potrebna je kontrola udjela Fe u navaru. Sadržaj Fe mora biti ispod 5 % kako nebi bilo negativnog utjecaja na korozijsku postojanost navara [20].

5.1. Kemijski sastav Inconela 625

Inconel 625 je nikal-krom legura. Njezin sastav prikazan je u tablici 5.

Tablica 5. Kemijski sastav Inconela 625 [21]

Element	Ni	Cr	Fe	Mo	Nb	C	Mn	Si	P	S	Al	Ti	Co
maks.	min.	20,0	maks.	8,0	3,15	maks.	maks.	maks.	maks.	maks.	maks.	maks.	maks.
masnени udio, %	58,0	do 23,0	5,0	do 10,0	do 4,15	0,1	0,5	0,5	0,015	0,015	0,40	0,40	1,0

Molibden i niobij su dva vrlo važna elementa u leguri Inconel 625, koji u sprezi sa nikal-krom matricom čine leguru vrlo čvrstom, zbog toga su postupci precipitacijskog očvršćivanja nepotrebni. Takva kombinacija elemenata odgovorna je za odličnu otpornost na široki raspon jakih korozijskih djelovanja, također čini leguru otpornom na oksidaciju i pougljičenje na visokim temperaturama [21].

5.2. Mehanička svojstva Inconela 625

Mehanička svojstva legure Inconel 625 dana su u tablici 6.

Tablica 6. Mehanička svojstva legure Inconel 625 na sobnoj temperaturi [21]

Mehaničko svojstvo	Vlačna čvrstoća, R_m , MPa	Konvencionalna granica razvlačenja, $R_{p0,2}$, MPa	Istezanje, A_5 , %	Tvrdoća po Brinellu, HB
Vrijednost	827 – 1034	414 – 621	30 – 60	maks. 240

Vrijednosti navedene u tablici podložne su određenim promjenama, ovisno o obliku proizvoda i vrsti toplinske obrade proizvoda. Inconel 625 koristi se za izradu proizvoda koji se upotrebljavaju u morskoj atmosferi, u svemirskoj industriji, kemijskoj industriji, pogotovo kada se zahtijeva rad na povišenim temperaturama [21].

6. Upotreba WAAM postupka

WAAM postupak omogućuje decentraliziranu proizvodnju dijelova od raznih vrsta materijala kao što su čelici, aluminij i legure, titan i legure, bakar i drugi.

Danas kada je cilj smanjiti vrijeme proizvodnje, a kod skupljih materijala i njihovu cijenu ovakva tehnologija daje optimalna svojstva. Koristi se i za izradu prototipa za automobilsku i avioindustriju.

WAAM proces se primjenjuje za izradu srednjih do velikih dijelova i dijelova srednje složenosti. Veliki broj dijelova u zrakoplovnoj industriji se izrađuju strojnom obradom iz bloka materijala i imaju veliki BTF omjer. On se definira kao omjer volumena početnog sirovca V_i i volumena konačnog proizvoda V_f .

$$\text{BTF} = \frac{V_i}{V_f} \quad (1)$$

U automobilskoj industriji se aditivna proizvodnja koristi kao uspješni alat u konstrukciji i izradi prototipova, jer se može skratiti vrijeme razvoja i smanjiti proizvodni troškovi.

7. Eksperimentalni dio

Eksperimentalni dio proveden je u svrhu određivanja optimalnih parametara zavarivanja MAG postupkom i odabira načina prijenosa metala pri izradi WAAM zidova. Pomoću literature i radnih proba određeni su parametri zavarivanja. Eksperimentalni dio proveden je u laboratorijima Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu.

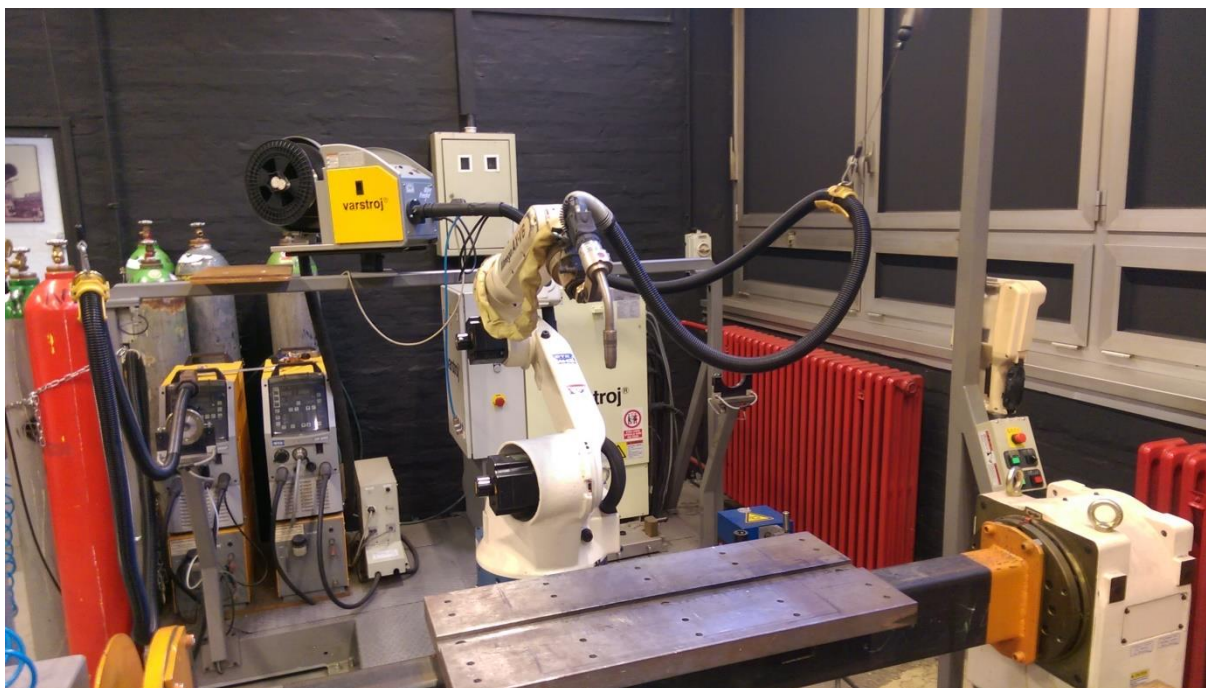
7.1. Oprema za zavarivanje

Robotskom stanicom Almega OTC AX V6 provedeno je zavarivanje zidova (slika 14). Ključni dio robotske stanice je robotska ruka OTC Almega AX V6 koja ima 6 stupnjeva slobode gibanja. Pomoću privjeska za učenje izvršava se on-line programiranje koje se sastoji od definiranja putanji gibanja i tehnoloških parametara zavarivanja.

Uz prikazane dijelove, robotska stanica ima:

- "shock" senzor koji reagira u slučaju kolizije robota s objektima iz okoline
- uređaj za čišćenje sapnice
- rezanje žice i nanošenje sredstva protiv naljepljivanja kapljica
- elektrolučni senzor AX-AR
- izvor struje za TIG zavarivanje.

Bitna komponenta robotske stanice je izvor struje tvrtke OTC Daihen DP 400 sa pripadajućim karakteristikama prikazanim u tablici 8. Pomoću ovog izvora struje moguće je izvesti MIG/MAG konvencionalno zavarivanje, MIG/MAG impulsno zavarivanje i REL zavarivanje obloženim elektrodama.



Slika 14. Robotska stanica Almega OTC AX V6

Tablica 7. Karakteristika izvora struje DP 400 [22]

Izvor struje		DP 400
Priključni napon, V/Hz		3 – 400 / 50
Područje struje zavarivanja, A		30 - 400
Područje napona zavarivanja, V		15,5 - 34
Intermitencija	100 %	283 A
	50 %	400 A
Promjer žice za zavarivanje, mm		0,8 – 1,2
Masa, kg		45
Dimenzije, mm		653 × 300 × 595

7.2. Smjese zaštitnih plinova

Korištene smjese plinova prikazane su u tablici 8.

Tablica 8. Zaštitni plinovi [23]

Naziv plina	Grupa po ISO 14175	Volumni sastav, %			
		Ar	He	CO ₂	H ₂
Inoxline C2	M12	97,5	-	2,5	-
Inoxline He3 H1	R1	95,3	3	-	1,5
Inoxline H5	R1	95	-	-	5
Argon 5.0	I1	100	-	-	-

7.3. Parametri zavarivanja

Tijekom procesa izrade zidova očitavani su parametri zavarivanja, mjerena je visina zida pomičnim mjerilom i međuprolazna temperatura nakon svakog prolaza.

Unesena toplina računa se prema sljedećem izrazu [24]:

$$Q = k \times \frac{U \times I}{v_z} \times \frac{60}{1000} \quad (2)$$

Q – unos topline u zavar, kJ/cm

k – stupanj iskorištenja postupka zavarivanja (kod MAG postupka iznosi 0,8)

U – napon zavarivanja, V

I – jakost struje zavarivanja, A

v_z – brzina zavarivanja, cm/min

Za izradu zida 1 korišten je prijenos metala kratkim spojevima, brzina zavarivanja bila je 38 cm/min, a za zaštitni plin korištena je dvokomponentna mješavina plinova Inoxline C2. Slobodni kraj žice je iznosio 10 mm, a protok plina je bio 19 l/min. Ostali parametri zavarivanja, napon, međuprolazna temperatura, visina nakon svakog prolaza i unesena toplina su prikazani u tablici 9.

Tablica 9. Parametri zavarivanja zida 1 nakon svakog prolaza

Prolaz	Visina, mm	Jakost struje, A	Napon, V	Međuprolazna			Unesena toplina, kJ/cm
				temperatura, °C			
1.	2,8	138	18,1	23,1	24,2	23,7	3,16
2.	4,5	135	18,1	37,7	37,5	33,3	3,09
3.	6,5	134	18,0	49,5	105,1	90,1	3,05
4.	8,5	135	18,0	54,6	82,1	88,9	3,07
5.	10,4	134	18,0	63,2	93,9	99,3	3,05
6.	12,3	133	18,1	62,2	103,6	103,8	3,04
7.	14,1	133	18,1	74,4	119,8	105,1	3,04
8.	16,0	133	18,0	78,1	109,0	116,8	3,02
9.	18,0	132	18,1	70,7	104,7	101,3	3,02
10.	19,8	132	18,1	72,1	99,8	109,5	3,02
11.	21,9	132	18,2	87,2	106,8	106,8	3,03
12.	23,4	132	18,1	79,6	104,0	112,8	3,02
13.	25,6	131	18,2	77,7	91,7	92,3	3,01
14.	27,4	132	18,1	88,1	114,3	117,7	3,02
15.	29,4	133	18,1	111,2	116,0	119,0	3,04
16.	31,3	133	18,0	80,1	103,1	106,0	3,02
17.	33,0	132	18,1	116,1	118,9	118,3	3,02
18.	34,8	130	18,2	77,2	102,5	104,1	2,99
19.	36,8	130	18,2	108,8	118,7	114,3	2,99
20.	38,7	130	18,2	76,3	91,6	99,7	2,99
21.	40,8	130	18,2	118,4	116,6	116,4	2,99
22.	42,5	132	18,1	104,5	112,9	131,0	3,02
23.	44,4	132	18,1	83,9	93,6	91,3	3,02
24.	46,3	130	18,2	100,3	119,1	116,8	2,99
25.	48,1	132	18,1	106,7	111,0	109,6	3,02

26.	49,9	132	18,1	92,9	113,7	119,8	3,02
27.	51,9	132	18,1	108,1	114,2	110,0	3,02
28.	54,8	130	18,2	104,9	117,8	111,7	2,99
29.	55,6	133	18,1	131,8	114,5	111,1	3,04
30.	57,4	130	18,2	98,7	119,8	112,6	2,99
31.	59,5	130	18,2	119,2	116,8	118,2	2,99
32.	61,4	130	18,2	102,4	112,8	117,3	2,99

Zid 2 izrađen je prijenosom metala kratkim spojevima, brzina zavarivanja je bila također 38 cm/min kao i kod zida 1. Za zaštitni plin korištena je trokomponentna mješavina plinova Inoxline He3H1. Slobodni kraj žice je iznosio 10 mm, a protok plina je bio 19 l/min. Ostali parametri zavarivanja, napon, međuprolazna temperatura, visina nakon svakog prolaza i unesena toplina su prikazani u tablici 10.

Tablica 10. Parametri zavarivanja zida 2 nakon svakog prolaza

Prolaz	Visina, mm	Jakost struje, A	Napon, V	Međuprolazna temperatura, °C			Unesena toplina, kJ/cm
1.	2,7	133	18,1	33,0	31,0	31,0	3,04
2.	4,5	127	18,3	49,2	50,8	59,1	2,94
3.	6,3	129	18,1	48,0	73,6	77,3	2,95
4.	8,0	128	18,3	62,1	89,6	92,1	3,07
5.	9,8	130	18,2	57,9	88,4	98,3	2,96
6.	11,6	127	18,4	54,9	69,0	78,2	2,95
7.	13,3	129	18,2	61,1	83,9	85,6	2,97
8.	15,0	129	18,2	79,9	93,6	109,2	2,97
9.	16,7	126	18,4	68,6	63,3	104,1	2,93
10.	18,7	125	18,5	71,1	97,1	107,1	2,92
11.	20,6	126	18,3	72,3	94,6	94,8	2,91
12.	22,2	127	18,2	84,0	103,1	110,8	2,92
13.	24,2	127	18,3	80,2	105,6	108,4	2,94

14.	25,8	124	18,4	89,6	111,3	117,7	2,88
15.	27,5	125	18,4	89,5	111,1	111,7	2,91
16.	29,3	124	18,5	95,6	110,5	118,0	2,89
17.	31,2	127	18,3	92,0	109,4	113,3	2,94
18.	32,9	122	18,6	93,7	114,0	118,3	2,87
19.	34,6	125	18,4	102,3	116,9	106,8	2,91
20.	36,4	122	18,6	103,4	116,4	118,3	2,87
21.	38,2	125	18,4	97,6	105,6	104,1	2,91
22.	40,0	123	18,5	107,0	108,4	116,6	2,87
23.	41,8	122	18,6	103,0	108,0	105,7	2,87
24.	43,5	122	18,6	105,1	116,0	114,1	2,87
25.	45,4	124	18,5	101,2	107,9	103,5	2,89
26.	47,2	121	18,7	105,4	115,9	114,2	2,86
27.	49,0	122	18,5	106,8	113,2	109,8	2,87
28.	51,0	121	18,6	92,6	105,8	105,1	2,84
29.	52,8	123	18,5	111,4	112,9	105,5	2,87
30.	54,7	121	18,6	106,4	112,3	118,1	2,84
31.	56,6	121	18,6	114,3	111,6	107,2	2,84
32.	58,8	121	18,7	99,3	101,6	103,7	2,86
33.	60,6	123	18,5	115,3	118,8	107,6	2,87
34.	62,2	119	18,7	98,7	102,1	105,2	2,81

Zid 3 izrađen je prijenosom metala kratkim spojevima, brzina zavarivanja je bila 36 cm/min. Za zaštitni plin korištena je dvokomponentna mješavina plinova Inoxline H5. Slobodni kraj žice je iznosio 10 mm, a protok plina je bio 19 l/min. Ostali parametri zavarivanja, napon, međuprolazna temperatura, visina nakon svakog prolaza i unesena toplina su prikazani u tablici 11.

Tablica 11. Parametri zavarivanja zida 3 nakon svakog prolaza

Prolaz	Visina, mm	Jakost struje, A	Napon, V	Međuprolazna temperatura, °C			Unesena toplina, kJ/cm
1.	3,5	130	18,6	35,0	34,3	34,0	3,22
2.	5,1	120	19,2	44,0	47,7	77,8	3,07
3.	7,1	126	18,8	94,3	97,5	75,0	3,16
4.	9,4	124	19,0	62,5	91,1	91,2	3,14
5.	11,4	125	18,9	66,7	117,0	104,3	3,15
6.	13,5	124	19,1	69,3	114,6	97,2	3,16
7.	15,5	126	18,8	74,1	108,7	91,0	3,16
8.	17,4	123	19,1	69,0	96,9	97,5	3,13
9.	19,5	123	19,1	87,3	110,8	105,0	3,13
10.	21,3	124	19,0	86,2	102,4	98,6	3,14
11.	23,6	125	19,0	95,8	109,8	104,3	3,17
12.	25,5	123	19,1	83,8	108,7	107,7	3,13
13.	27,6	123	19,1	90,6	118,9	105,2	3,13
14.	29,6	121	19,2	88,0	109,2	106,8	3,10
15.	31,6	124	19,0	106,2	117,8	104,1	3,14
16.	33,6	120	19,3	96,5	113,3	115,4	3,09
17.	35,8	122	19,1	100,3	117,9	107,6	3,11
18.	37,8	123	19,0	82,3	98,4	97,1	3,12
19.	40,0	125	18,9	92,7	107,5	109,6	3,15
20.	42,0	120	19,2	97,4	105,9	111,2	3,07
21.	44,0	122	19,0	112,4	118,3	116,4	3,10
22.	46,0	125	18,9	104,3	107,5	113,8	3,15
23.	48,1	124	19,0	110,2	118,4	112,9	3,14
24.	50,1	120	19,2	100,9	107,1	116,4	3,07
25.	52,1	122	19,0	102,7	118,9	114,3	3,10

26.	54,2	123	18,9	98,9	104,1	109,6	3,10
27.	56,1	123	19,0	103,1	118,5	111,8	3,12
28.	58,2	121	19,3	95,1	102,5	99,6	3,11
29.	60,3	121	19,3	113,2	115,5	103,2	3,11
30.	62,3	121	19,3	100,4	107,0	111,9	3,11

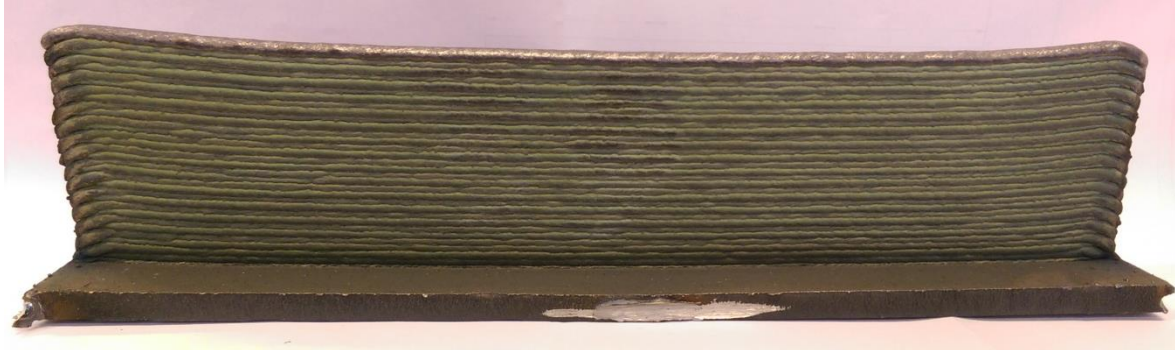
Zid 4 izrađen je prijenosom metala kratkim spojevima, brzina zavarivanja je bila 38 cm/min. Za zaštitni plin korišten je Argon 5.0. Slobodni kraj žice je iznosio 10 mm, a protok plina je bio 19 l/min. Ostali parametri zavarivanja, napon, međuprolazna temperatura, visina nakon svakog prolaza i unesena toplina su prikazani u tablici 12.

Tablica 12. Parametri zavarivanja zida 4 nakon svakog prolaza

Prolaz	Visina, mm	Jakost struje, A	Napon, V	Međuprolazna temperatura, °C			Unesena toplina, kJ/cm
1.	2,8	131	18,4	36,0	34,7	36,5	3,04
2.	4,7	126	18,5	57,0	64,0	75,6	2,94
3.	6,5	126	18,5	59,6	56,5	98,3	2,94
4.	8,2	124	18,6	62,5	106,6	114,7	2,91
5.	10,0	126	18,5	62,1	99,3	113,0	2,94
6.	11,8	124	18,6	70,0	101,4	110,1	2,91
7.	13,6	127	18,5	76,3	101,2	112,2	2,97
8.	15,3	125	18,5	70,1	99,4	109,9	2,92
9.	17,3	124	18,6	74,7	103,3	107,4	2,91
10.	19,0	124	18,6	65,9	89,5	91,3	2,91
11.	20,8	125	18,5	92,8	108,9	107,5	2,92
12.	22,3	126	18,4	75,3	101,6	109,2	2,93
13.	24,4	126	18,4	88,2	109,3	106,0	2,93
14.	26,0	124	18,7	80,2	94,7	101,1	2,93
15.	27,8	125	18,5	105,3	114,5	113,6	2,92

16.	29,8	123	18,7	95,5	115,3	117,8	2,91
17.	31,6	122	18,6	108,3	108,6	108,6	2,87
18.	33,4	122	18,7	91,3	106,7	106,7	2,88
19.	35,4	122	18,6	101,4	104,8	104,8	2,87
20.	37,2	122	18,7	107,7	115,5	115,5	2,88
21.	39,0	123	18,6	109,9	116,7	116,7	2,89
22.	40,8	121	18,7	92,3	101,3	101,3	2,86
23.	42,6	122	18,6	100,7	109,2	109,2	2,87
24.	44,6	123	18,6	102,7	112,2	112,2	2,89
25.	46,4	122	18,6	105,2	105,9	105,9	2,87
26.	48,4	122	18,6	113,8	119,4	119,4	2,87
27.	50,2	122	18,6	110,3	105,3	105,2	2,87
28.	52,0	121	18,6	108,0	113,9	112,8	2,84
29.	53,8	120	18,8	107,3	116,0	104,2	2,85
30.	55,7	120	18,8	113,4	117,7	112,3	2,85
31.	57,5	121	18,8	112,9	102,1	102,0	2,87
32.	59,2	122	18,6	101,0	100,0	102,8	2,87
33.	60,8	122	18,6	103,2	103,4	102,6	2,87
34.	62,6	123	18,5	104,4	107,6	108,8	2,87

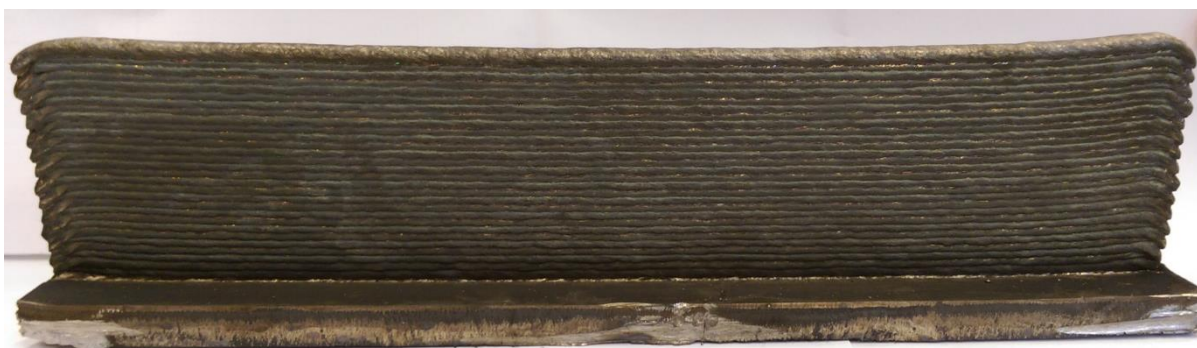
Dobiveni zidovi prikazani su sljedećim slikama.



Slika 15. Zid 1 (uzorak 1)



Slika 16. Zid 2 (uzorak 2)



Slika 17. Zid 3 (uzorak 3)



Slika 18. Zid 4 (uzorak 4)

7.4. Priprema i izrada ispitnih uzoraka

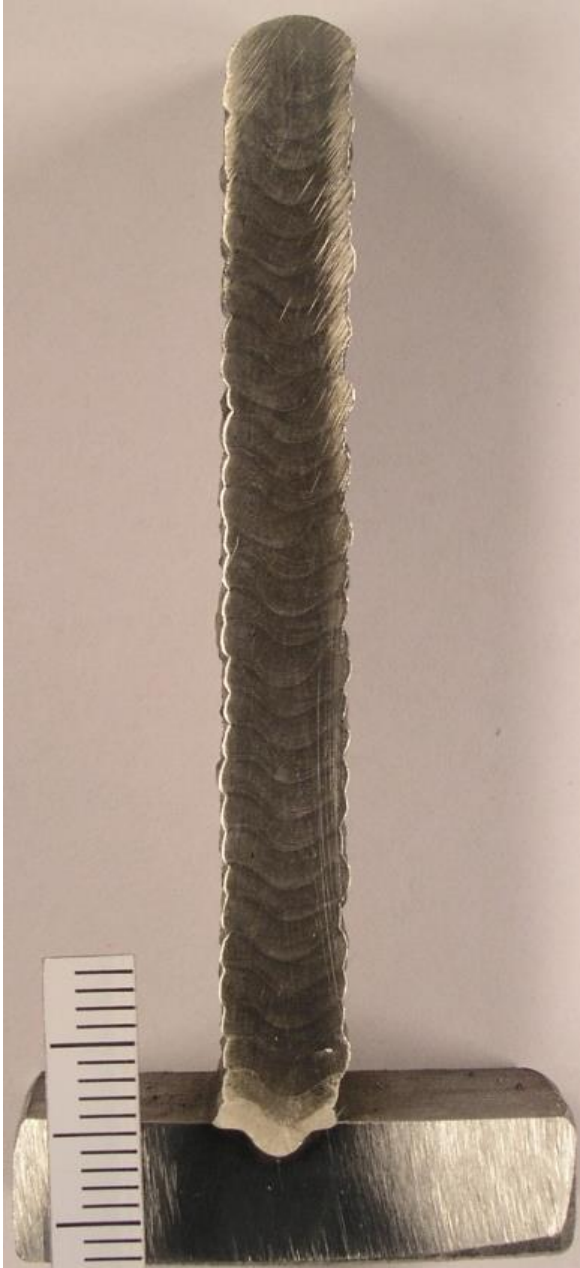
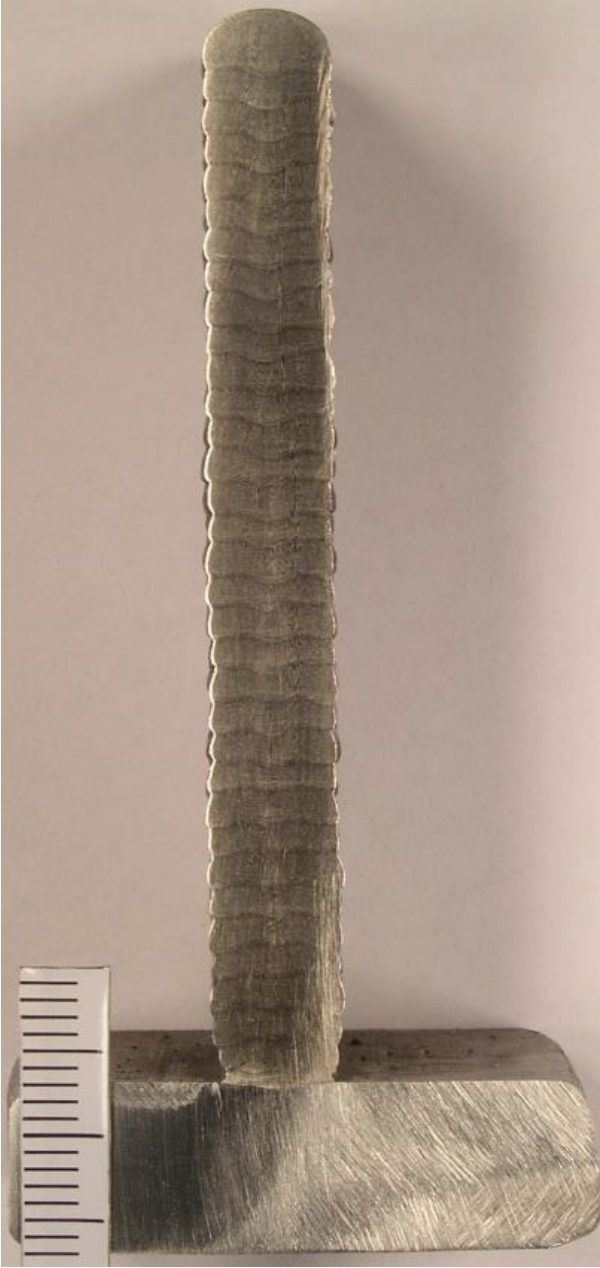
Prvo je na tračnoj pili sa svakog zida izrezan segment duljine 25mm. Nakon rezanja slijedilo je ručno grubo brušenje brusnim papirom: P120, P320 i P600. Dalje je slijedilo fino brušenje uzoraka koje je provedeno u Laboratoriju za materijalografiju Fakulteta strojarstva i brodogradnje na uređaju Pohenix Alpha Grinder Polisher. Brzina brušenja je bila 300 min^{-1} za sve hrapavosti brusnog papira. Voda je korištena kao rashladno sredstvo tijekom svih faza finog brušenja. Primijenjeni su slijedeći brusni papiri granulacije: P320, P500, P1000, P2000, P4000.

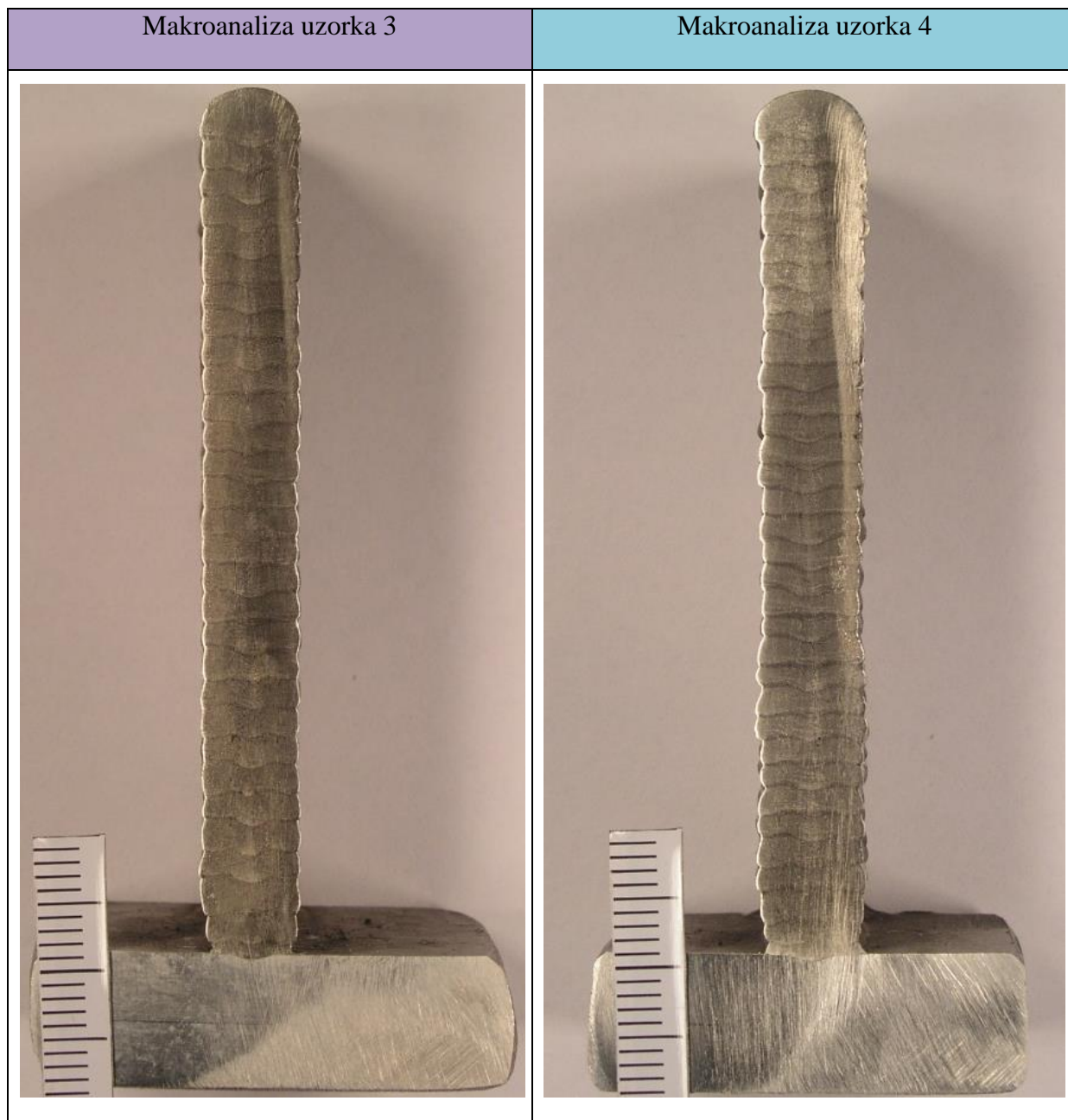
Za makrostrukturnu i mikrostrukturnu analizu uzorci su nagriženi elektrokemijski u 10 %-tnoj oksalnoj kiselini uz napon od 8 V i u trajanju od 60 sekundi. Nagrizanje je provedeno u Laboratoriju za zaštitu materijala, Fakulteta strojarstva i brodogradnje. Obradeni uzorci fotografirani su digitalnim fotoaparatom Olympus C-5050. Analiza mikrostrukture provedena je na uređaju OLYMPUS GX51

7.4.1. Makroanaliza uzoraka

Nisu uočene veće nepravilnosti na makroizbruscima, kod svakog uzorka jasno su vidljivi prolazi te je također vidljiva mala penetracija ploče. Najpravnomjernije slaganje slojeva materijala u prolazima ima uzorak 3, samim time mu je vanjska površina zida puno ravnija u odnosu na druge uzorke. Uzorak 1 ima loše slaganje materijala u prolazima što rezultira neravnom vanjskom površinom zida. U tablici 13 su prikazani svi uzorci.

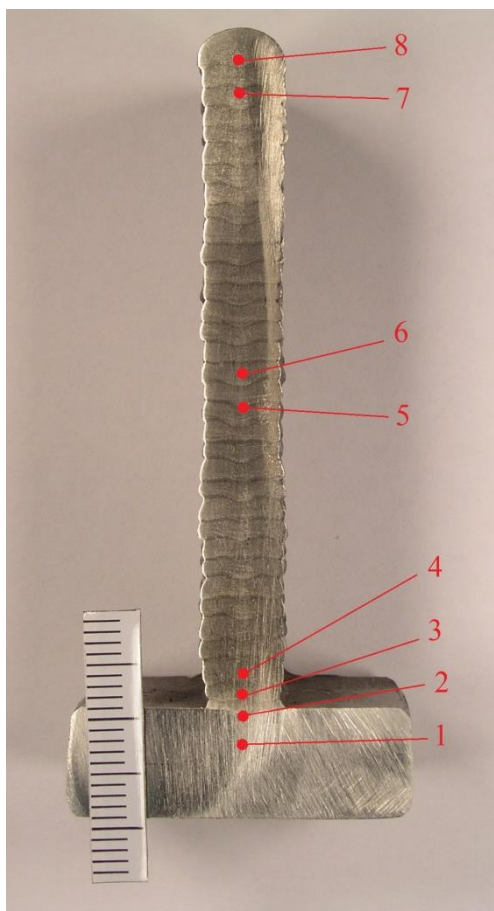
Tablica 13. Makrostruktura uzoraka

Makroanaliza uzorka 1	Makroanaliza uzorka 2
	



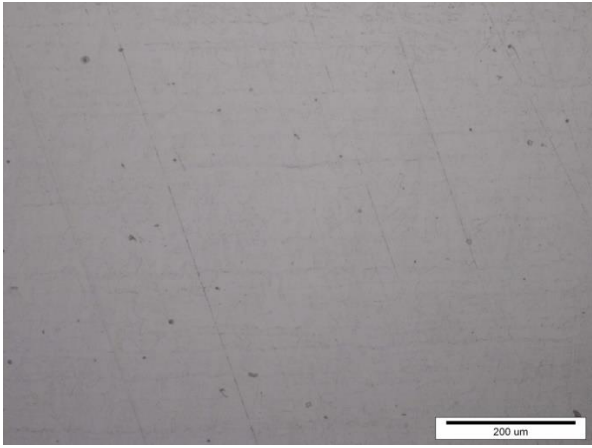
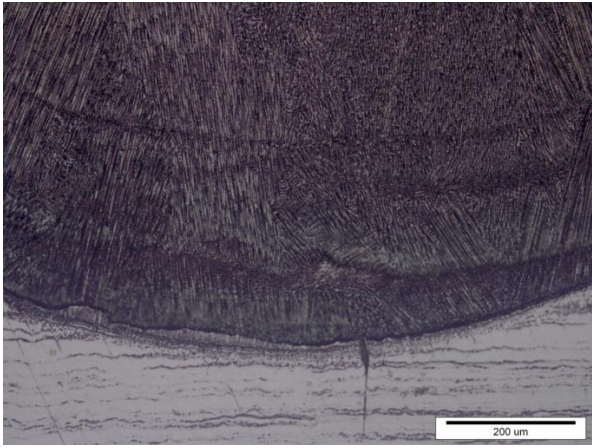
7.4.2. Mikroanaliza uzoraka

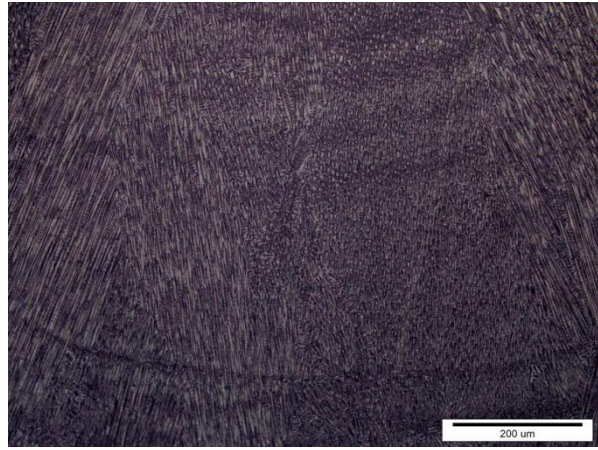
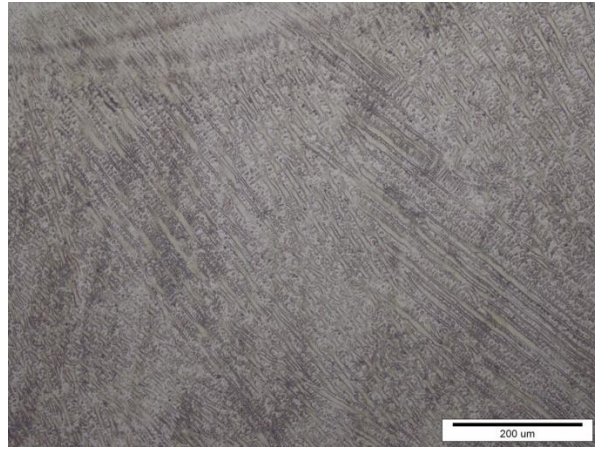
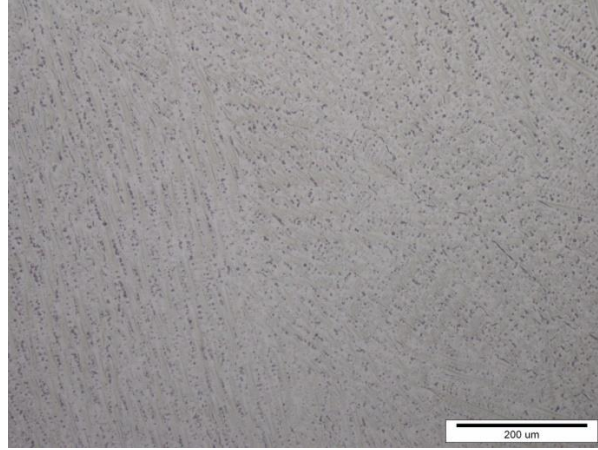
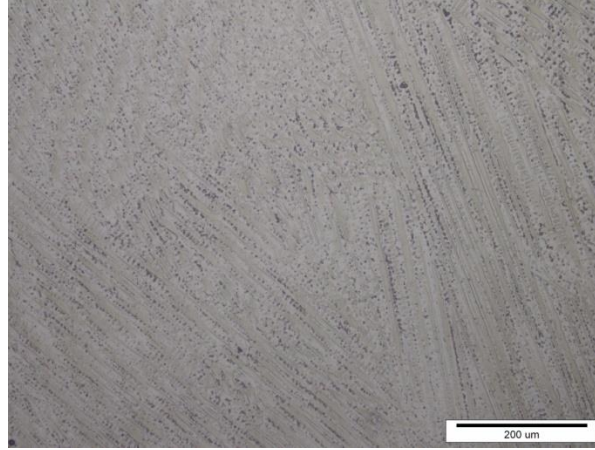
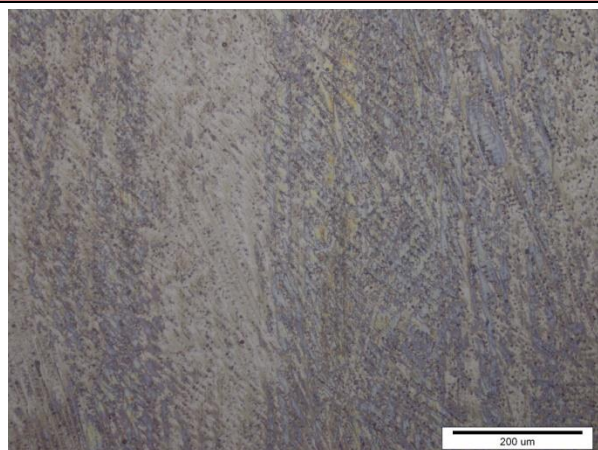
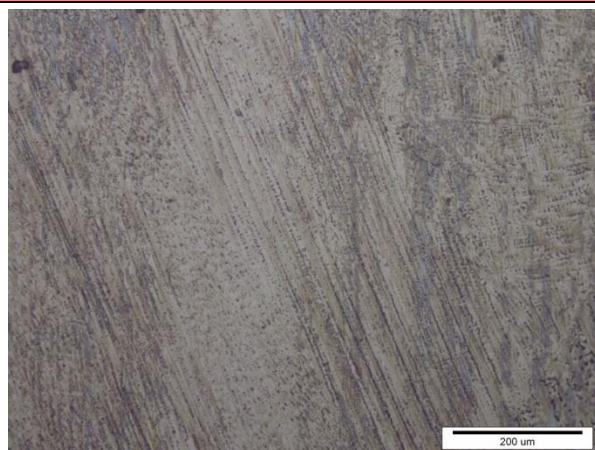
Na uzorcima je analizirana mikrostruktura na 8 mjesta što je vidljivo na slici 23. Na ovaj način postoji uvid u stanje osnovnog materijala, stanje zone utjecaja topline i stanje uzorka. Legura Inconel 625 može sadržavati karbide, koji su svojstveni ovoj vrsti legure. Karbidi koji mogu biti pronađeni su MC i M_6C (bogatni niklom, niobijem, molibdenom i ugljikom). Na svim uzorcima u materijalu zida su vidljivi karbidi, dok su u području staljivanja uz karbide prisutni i drugi uključci koji su posljedica miješanja materijala. U tablicama 14, 15, 16 i 17 prikazane su mikrostrukture uzoraka.



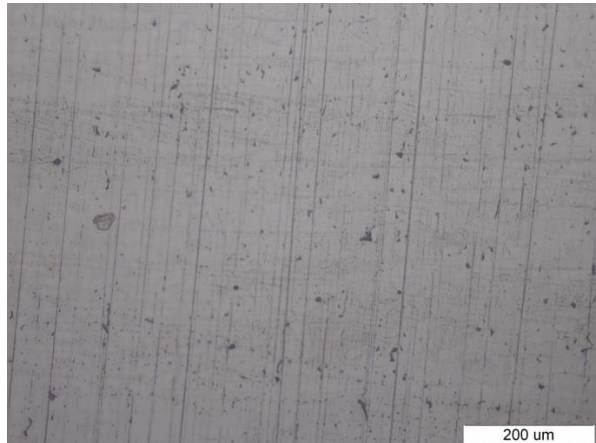
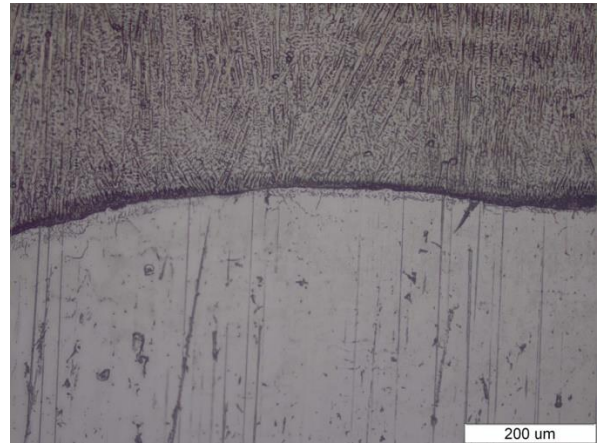

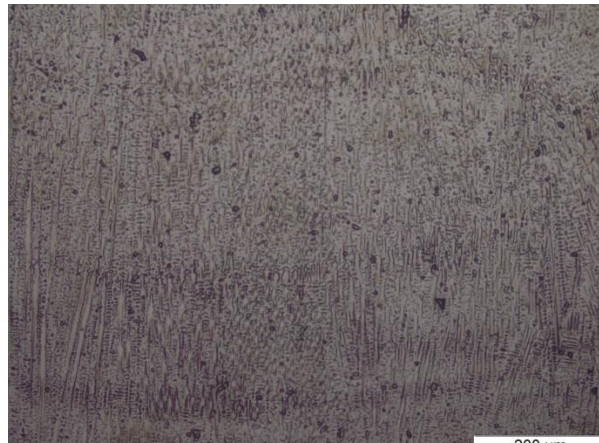
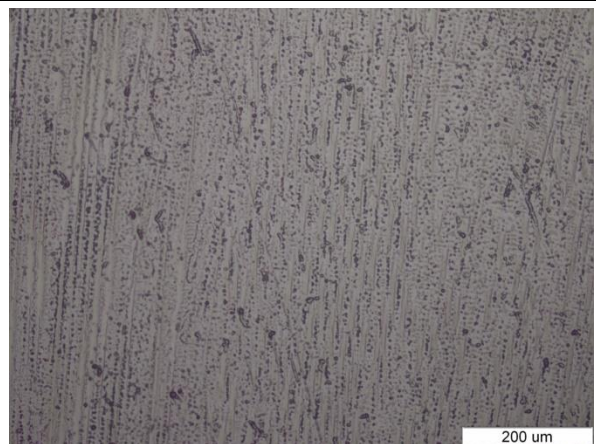
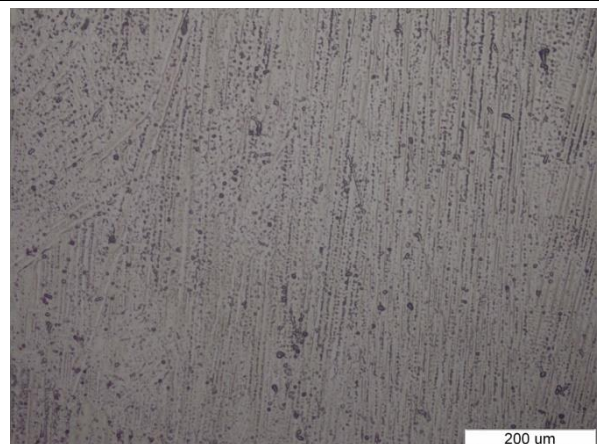
Slika 19. Pozicije na kojima je analizirana mikrostruktura

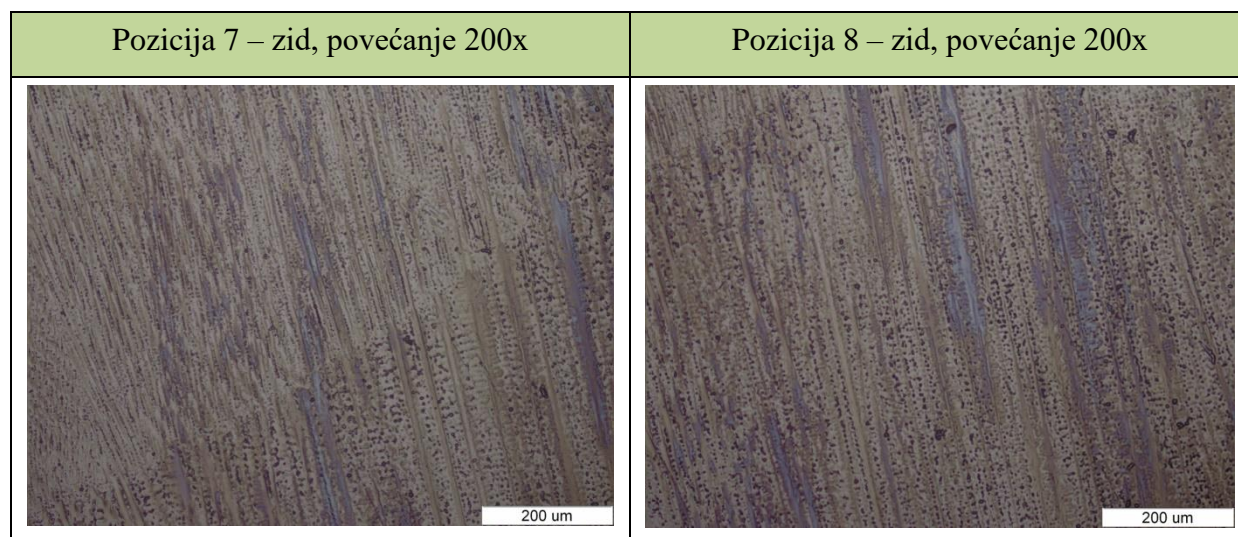
Tablica 14. Mikrostruktura uzorka 1

Pozicija 1 – osnovni materijal, povećanje 200x	Pozicija 2 – linija staljivanja, povećanje 200x
	

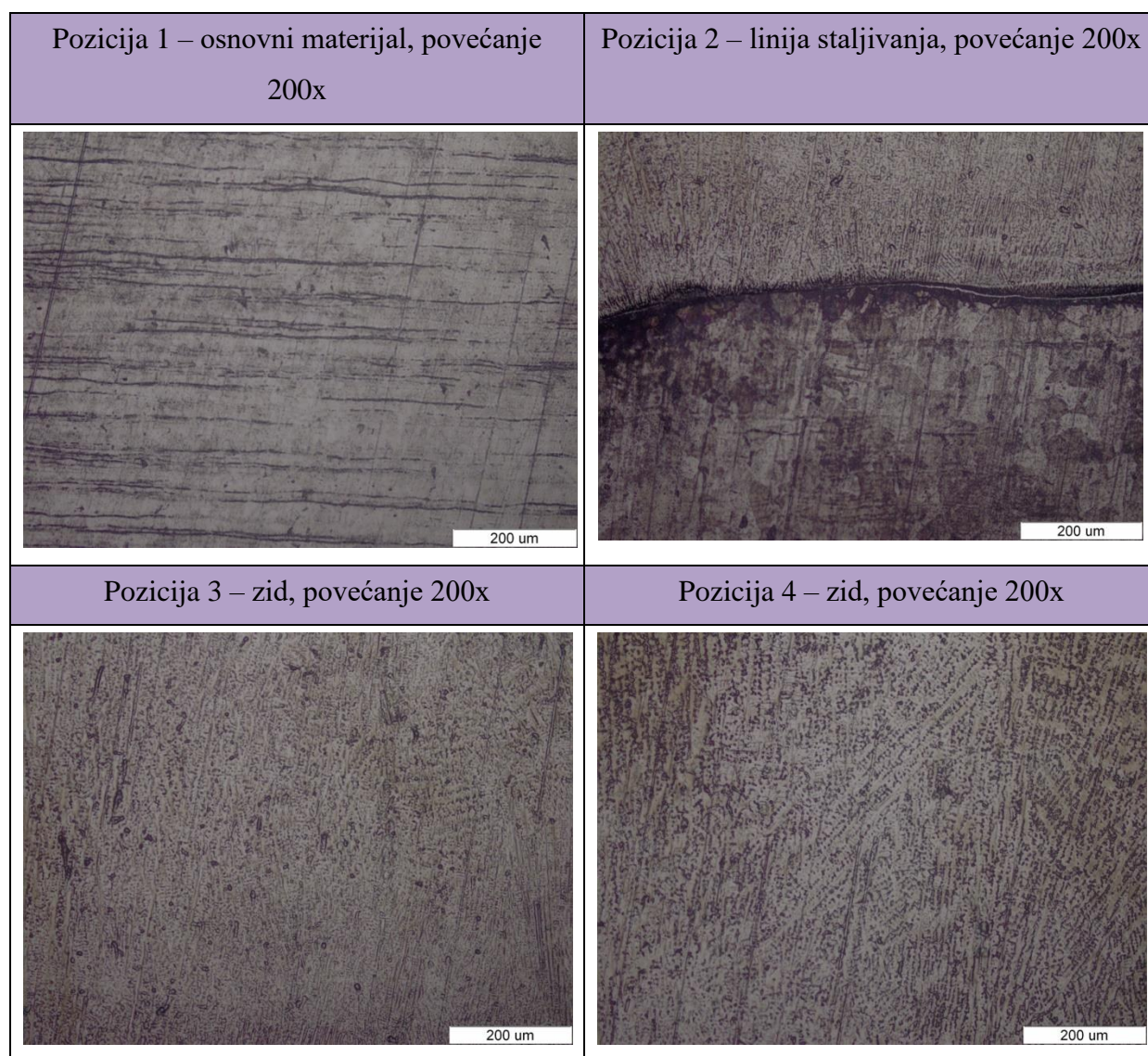
<p>Pozicija 3 – zid, povećanje 200x</p>	<p>Pozicija 4 – zid, povećanje 200x</p>
	
<p>Pozicija 5 – zid, povećanje 200x</p>	<p>Pozicija 6 – zid, povećanje 200x</p>
	
<p>Pozicija 7 – zid, povećanje 200x</p>	<p>Pozicija 8 – zid, povećanje 200x</p>
	

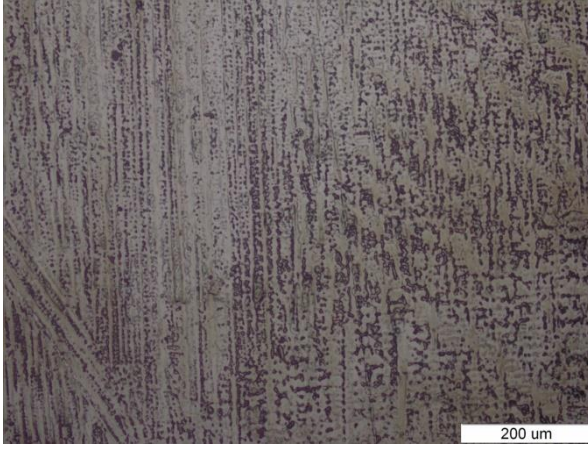
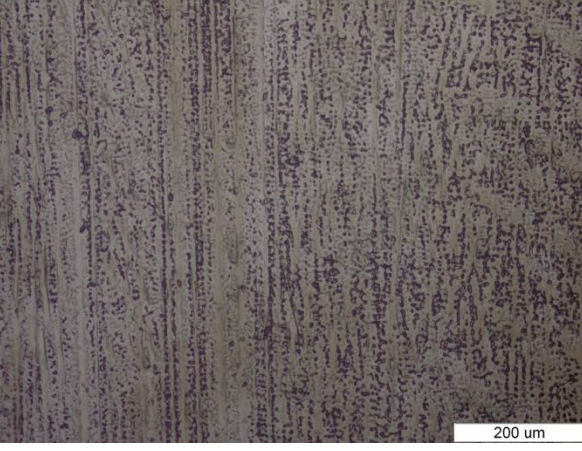


Tablica 15. Mikrostruktura uzorka 2

Pozicija 1 – osnovni materijal, povećanje 200x	Pozicija 2 – linija staljivanja, povećanje 200x
	
Pozicija 3 – zid, povećanje 200x	Pozicija 4 – zid, povećanje 200x
	
Pozicija 5 – zid, povećanje 200x	Pozicija 6 – zid, povećanje 200x
	

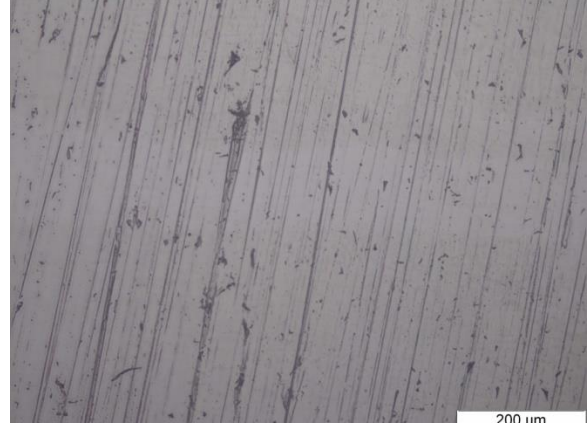
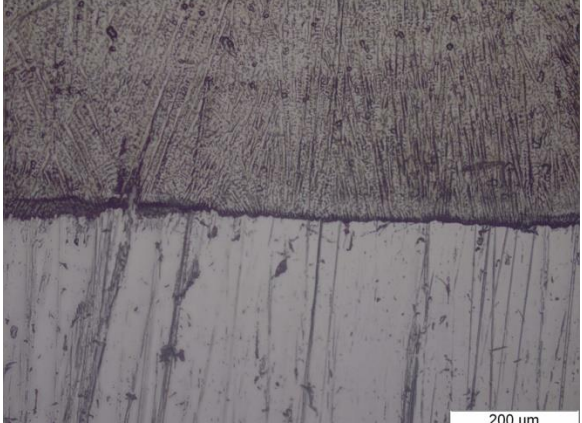


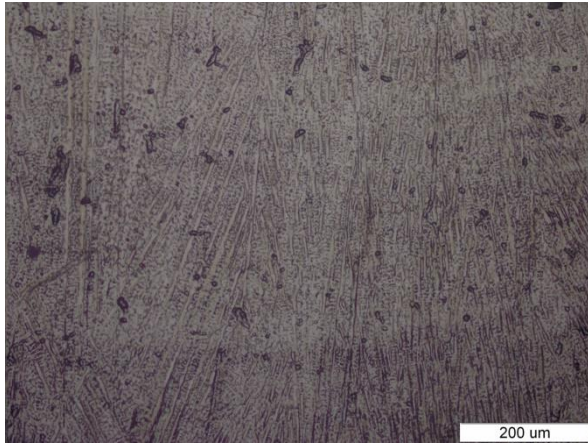

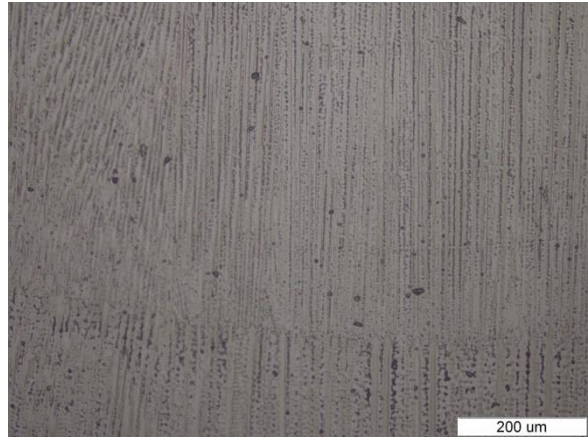
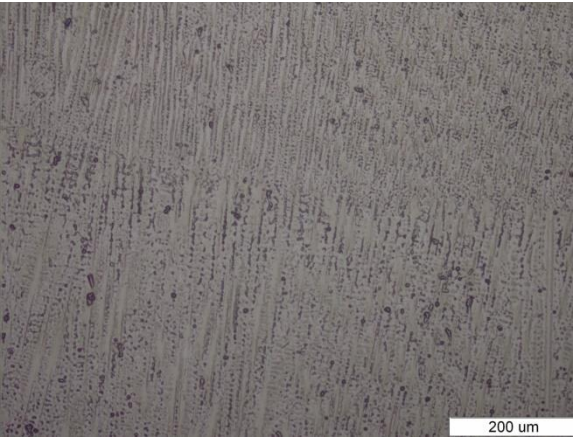
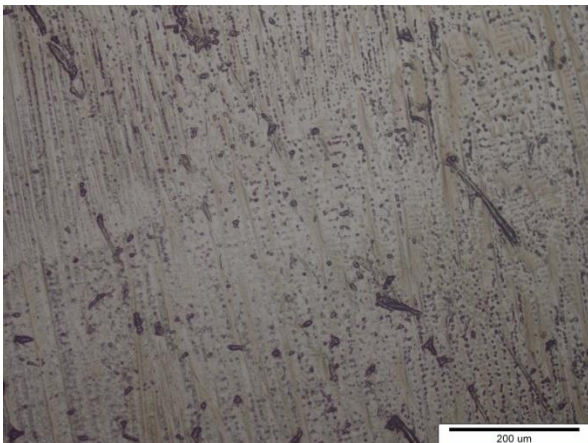
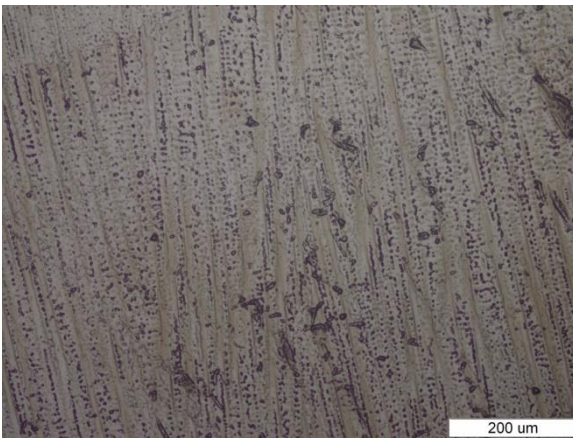
Tablica 16. Mikrostruktura uzorka 3



Pozicija 5 – zid, povećanje 200x	Pozicija 6 – zid, povećanje 200x
	
Pozicija 7 – zid, povećanje 200x	Pozicija 8 – zid, povećanje 200x
	

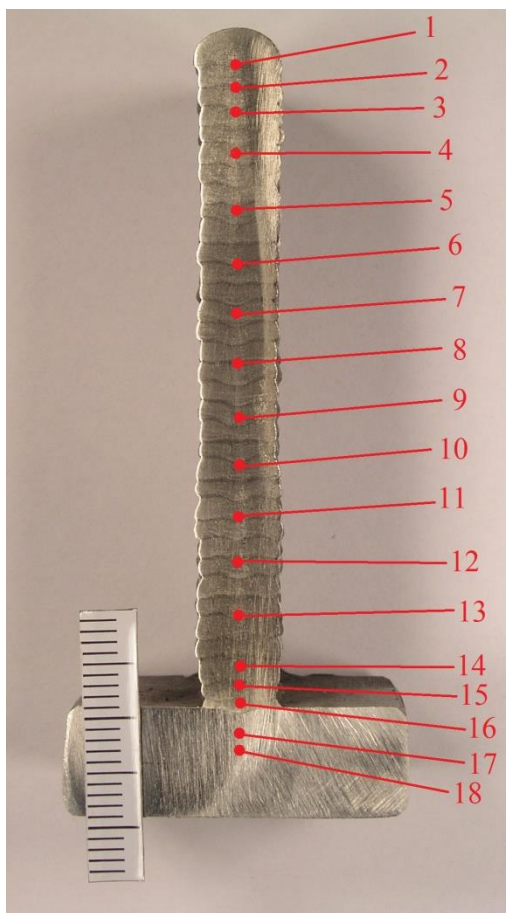
Tablica 17. Mikrostruktura uzorka 4

Pozicija 1 – osnovni materijal, povećanje 200x	Pozicija 2 – linija staljivanja, povećanje 200x
	

<p>Pozicija 3 – zid, povećanje 200x</p>	<p>Pozicija 4 – zid, povećanje 200x</p>
	
<p>Pozicija 5 – zid, povećanje 200x</p>	<p>Pozicija 6 – zid, povećanje 200x</p>
	
<p>Pozicija 7 – zid, povećanje 200x</p>	<p>Pozicija 8 – zid, povećanje 200x</p>
	

7.5. Mjerenje tvrdoće

Ispitivanje tvrdoće uzoraka mjereno je po Vickersu (HV 10) u metalu zavara (zidu), zoni utjecaja topline i osnovnom materijalu. Ispitivanje je provedeno na tvrdomjeru REICHTER. Mjerenje se provelo vertikalno od vrha prema osnovnom materijalu. Provedeno je 18 mjerenja kao što je prikazano na slici 20. Razmaci između točaka pri samom vrhu zida i u zoni utjecaja topline su puno manji nego razmaci po središnjem dijelu zida. Rezultati mjerenja prikazani su u tablici 18 i 19.



Slika 20. Pozicije mjerenja tvrdoće

Tablica 18. Mjerenje tvrdoće uzorka 1 i uzorka 2

Uzorak 1			Uzorak 2		
Broj mjerjenja	Dijagonala, mm	HV 10	Broj mjerjenja	Dijagonala, mm	HV 10
1.	0,283	232	1.	0,302	203
2.	0,285	228	2.	0,295	213
3.	0,284	230	3.	0,297	210
4.	0,292	218	4.	0,301	205
5.	0,285	228	5.	0,300	206
6.	0,282	233	6.	0,302	203
7.	0,290	221	7.	0,292	218
8.	0,290	221	8.	0,300	206
9.	0,289	222	9.	0,302	203
10.	0,293	216	10.	0,297	210
11.	0,287	225	11.	0,294	215
12.	0,287	225	12.	0,300	206
13.	0,285	228	13.	0,298	209
14.	0,289	222	14.	0,288	224
15.	0,298	209	15.	0,282	233
16.	0,296	212	16.	0,275	245
17.	0,330	170	17.	0,300	206
18.	0,335	165	18.	0,310	193

Uočili smo da su tvrdoće kod uzorka 1 podjednake u cijelom zidu, ali i da dolazi do pada tvrdoće u zoni utjecaja topline. Kod uzorka 2 došlo je do suprotne pojave, do porasta tvrdoće u zoni utjecaja topline.

Tablica 19. Mjerenje tvrdoće uzorka 3 i uzorka 4

Uzorak 3			Uzorak 4		
Broj mjerjenja	Dijagonala, mm	HV 10	Broj mjerjenja	Dijagonala, mm	HV 10
1.	0,310	193	1.	0,312	191
2.	0,310	193	2.	0,306	198
3.	0,300	206	3.	0,311	192
4.	0,300	206	4.	0,304	201
5.	0,296	212	5.	0,306	198
6.	0,305	199	6.	0,301	205
7.	0,309	194	7.	0,307	197
8.	0,303	202	8.	0,305	199
9.	0,311	192	9.	0,304	201
10.	0,300	206	10.	0,309	194
11.	0,308	196	11.	0,301	205
12.	0,297	210	12.	0,300	206
13.	0,299	207	13.	0,300	206
14.	0,305	199	14.	0,300	206
15.	0,297	210	15.	0,301	205
16.	0,295	213	16.	0,303	202
17.	0,303	202	17.	0,317	185
18.	0,302	203	18.	0,315	187

Uočili smo da su tvrdoće kod uzorka 3 i 4 podjednake u cijelom zidu i da ne dolazi do pada ili rasta tvrdoće u zoni utjecaja topline.

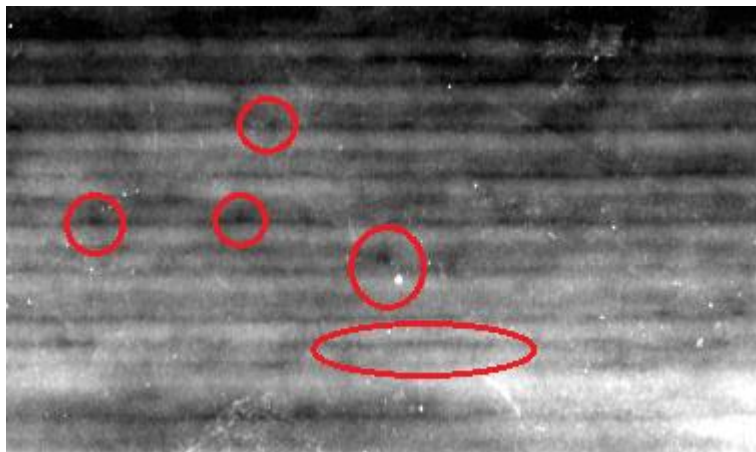
7.6. Radiografsko ispitivanje

Radiografska kontrola pri ispitivanju kvalitete metodama prozračavanja u praksi koristi rendgenske zrake ili gama zrake. Rendgenske zrake nastaju pri naglom kočenju ubrzanog snopa elektrona na metalnoj ploči, dok gama zrake nastaju prilikom spontanog raspada nestabilnih atomskih jezgri (prirodnih radioaktivnih materijala i radioaktivnih izotopa). Oba su zračenja u biti elektromagnetska zračenja. Rendgenske i gama zrake ostavljaju trag na filmskoj emulziji (industrijske folije), na čemu se i zasniva radiografsko ispitivanje grešaka u unutrašnjosti materijala. U tablici 20 prikazani su podaci o opremi zajedno sa parametrima snimanja i skeniranja.

Tablica 20. Podaci o opremi i parametri snimanja i skeniranja

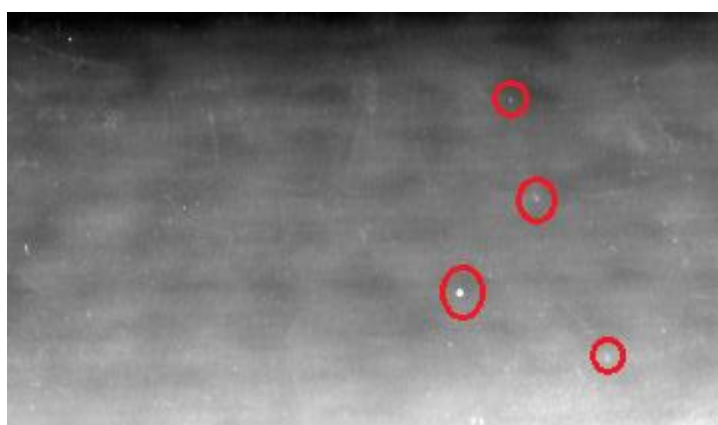
Podaci o rendgenu, skeneru i slikovnoj ploči	
Rendgen	BALTEAU GM 300D
Skener	VMI 3600SF
Slikovna ploča	Industrex XL blue 10" x 12"
Parametri snimanja	
Napon	150 kV
Struja	4 mA
FF udaljenost	1000 mm
Vrijeme ekspozicije	5 min
Parametri skeniranja	
Napon lasera	15 V
Napon fotomultiplikatora	5,25 V
Rezolucija skeniranja	50 μm

Na slici 21. prikazan je detalj s uzorka 1. Naznačene crne točke, koje se jasno vide, predstavljaju pore, dok su bijele točke kapljice dodatnog materijala na površini. Označena linija prikazuje grešku naljepljivanja.



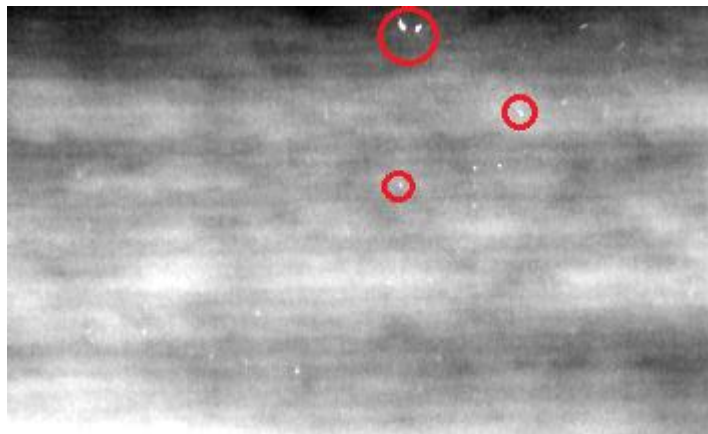
Slika 21. Detalj radiografske snimke uzorka 1

Na slici 22. prikazan je detalj s uzorka 2. Naznačene krupnije bijele točke predstavljaju naljepljene kapljice na površini zida, a sitnije bijele točke predstavljaju površinske nečistoće. Nisu pronađene pore ni neke druge veće nepravilnosti. Prolazi nisu izraženi što znači da je došlo do kvalitetnog slaganja slojeva.



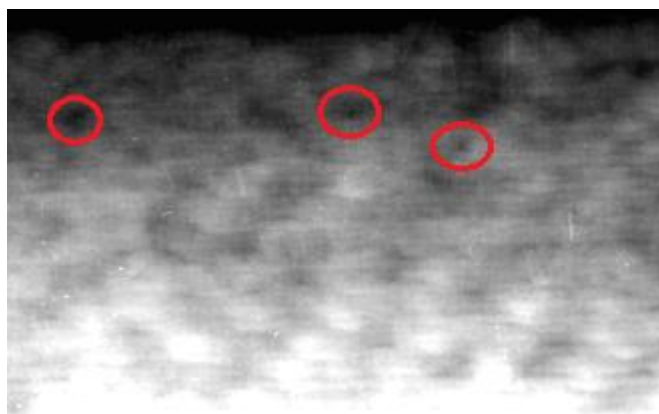
Slika 22. Detalj radiografske snimke uzorka 2

Slika 23. prikazuje detalj s uzorka 3. Naznačene bijele točke predstavljaju naljepljene kapljice na površini zida. Analiziranjem cijele snimke uzorka nisu pronađene pore. Inoxline H5 plinska mješavina je omogućila stabilan postupak zavarivanja i kvalitetnu zaštitu metala zavara.



Slika 23. Detalj radiografske snimke uzorka 3

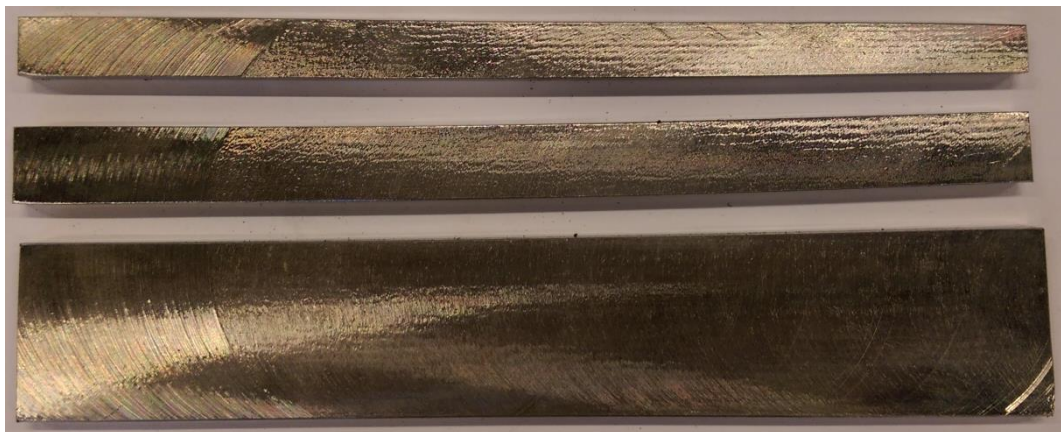
Na slici 24. prikazan je detalj s uzorka 4. Naznačene točke predstavljaju pore koje su se pojavile u par zadnjih prolaza izrade zida.



Slika 24. Detalj radiografske snimke uzorka 4

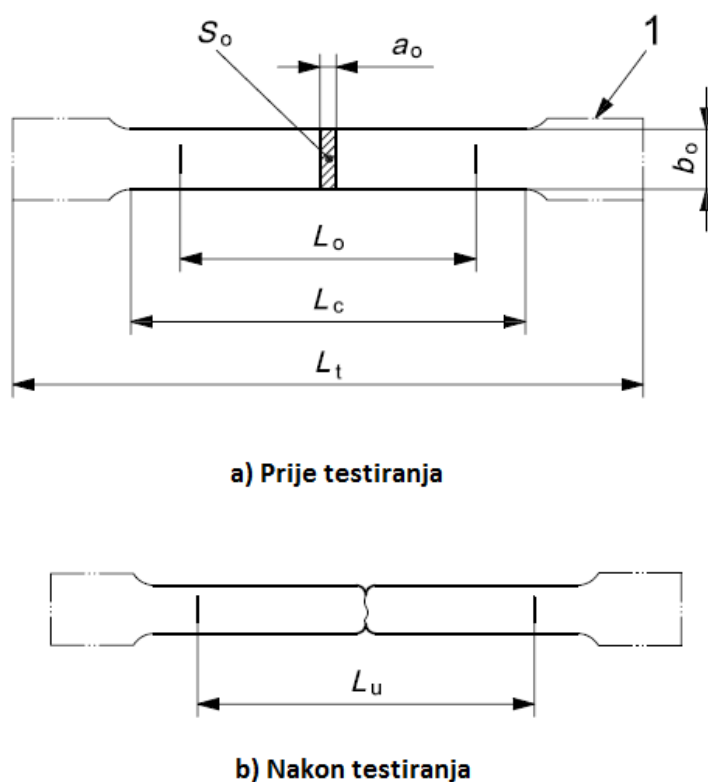
7.7. Statički vlačni pokus

Za statički vlačni pokus izrađena je epruveta iz svakog zida. Korištenjem ručne plazme Hypertherm Powermax 45 svaki zid je odvojen od ploče na koju je bio navaren. Nakon toga je slijedila strojna obrada površine u Laboratoriju za alatne strojeve. Zatim su obrađeni uzorci izrezani na tračnoj pili na dimenzije za izradu epruveta za mjerenje vlačne čvrstoće i udarnog rada loma (slika 25).



Slika 25. Uzorak nakon poravnavanja površine i izrezivanja segmenata za daljnju obradu

Dimenzije epruveta za statički vlačni pokus određene su prema normi ISO 6892-1:2009. Slika 26 prikazuje epruvete prije i nakon testiranja s kotiranim ključnim dimenzijama.



Slika 26. Dimenzije ispitnih epruveta: a) prije ispitivanja; b) nakon ispitivanja [25]

a_0 – početna debljina epruvete, mm

b_0 – početna širina ispitnog područja epruvete, mm

L_0 – duljina suženog dijela epruvete, mm

L_t – duljina ispitnog područja epruvete, mm

L_t – ukupna duljina epruvete, mm

L_u – duljina ispitnog područja epruvete nakon testiranja, mm

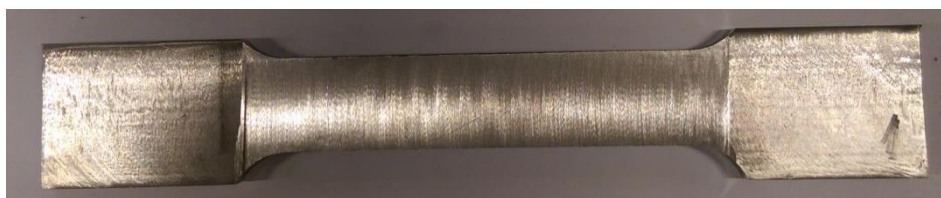
S_0 – površina ispitnog područja epruvete, mm²

1 – krajevi za prihvat.

Tablica 21. Određene dimenzije epruveta na temelju norme ISO 6892-1:2009

a_0 , mm	b_0 , mm	L_0 , mm	L_c , mm
5	20	60	90

Na slici 27 prikazan je primjer ispitne epruvete za statički vlačni pokus.



Slika 27. Primjer ispitne epruvete

Ispitivanje se provelo na kidalici tvrtke HECKERT koja je povezana s računalom koje mjeri vlačnu čvrstoću (R_m), konvencionalnu granicu razvlačenja ($R_{p0,2}$), silu razvlačenja (F_m) te prekidnu silu (F_k). Na slici 28 prikazani su kidalica i uzorak.



Slika 28. Kidalica i uzorak postavljen za testiranje

7.7.1. Uzorak 1

Slika 29 prikazuje uzorak nakon statičkog vlačnog ispitivanja.

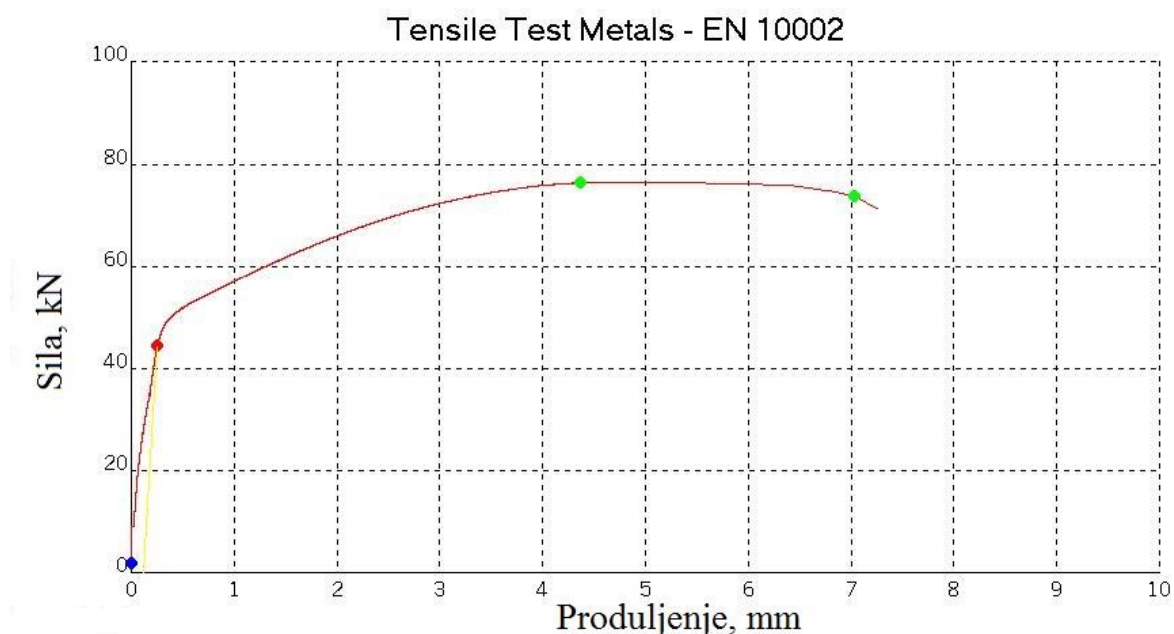


Slika 29. Uzorak 1 nakon ispitivanja

U tablici 22 prikazani su rezultati nakon statičkog vlačnog ispitivanja.

Tablica 22. Rezultati ispitivanja za uzorak 1

$R_{p0,2}$, MPa	R_m , MPa	F_m , kN	F_k , kN	L_u , mm
436,79	751,94	76,26	73,59	90,15



Slika 30. Dijagram naprezanja za uzorak 1

Duljina ispitnog područja uzorka 1 se produljila za 30,15 mm što je istežanje od 33,4 % (A_5). To je rezultat koji zadovoljava mehaničke specifikacije dodatnog materijala prema katalogu istežljivost je od 30 % do 60 %. $R_{p0,2}$ također zadovoljava mehaničke specifikacije, dok je R_m manja od raspona koji je dan u katalogu.

7.7.2. Uzorak 2

Slika 31 prikazuje uzorak nakon statičkog vlačnog ispitivanja.

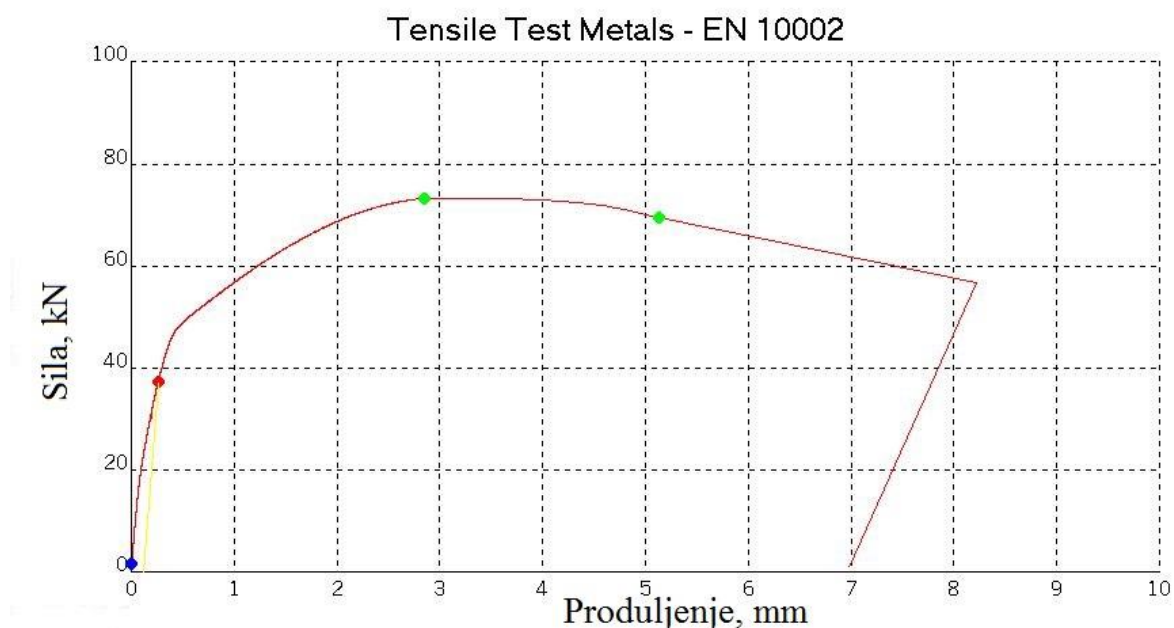


Slika 31. Uzorak 2 nakon ispitivanja

U tablici 23 prikazani su rezultati nakon statičkog vlačnog ispitivanja.

Tablica 23. Rezultati ispitivanja za uzorak 2

$R_{p0,2}$, MPa	R_m , MPa	F_m , kN	F_k , kN	L_u , mm
354,32	698,13	73,16	69,35	89,6



Slika 32. Dijagram naprezanja za uzorak 2

Duljina ispitnog područja uzorka 2 se produljila za 29,6 mm što je istežanje od 33 % (A_5). To je rezultat koji zadovoljava mehaničke specifikacije dodatnog materijala prema katalogu istežljivost je od 30 % do 60 %. $R_{p0,2}$ i R_m ne zadovoljavaju mehaničke specifikacije prema katalogu.

7.7.3. Uzorak 3

Slika 33 prikazuje uzorak nakon statičkog vlačnog ispitivanja.

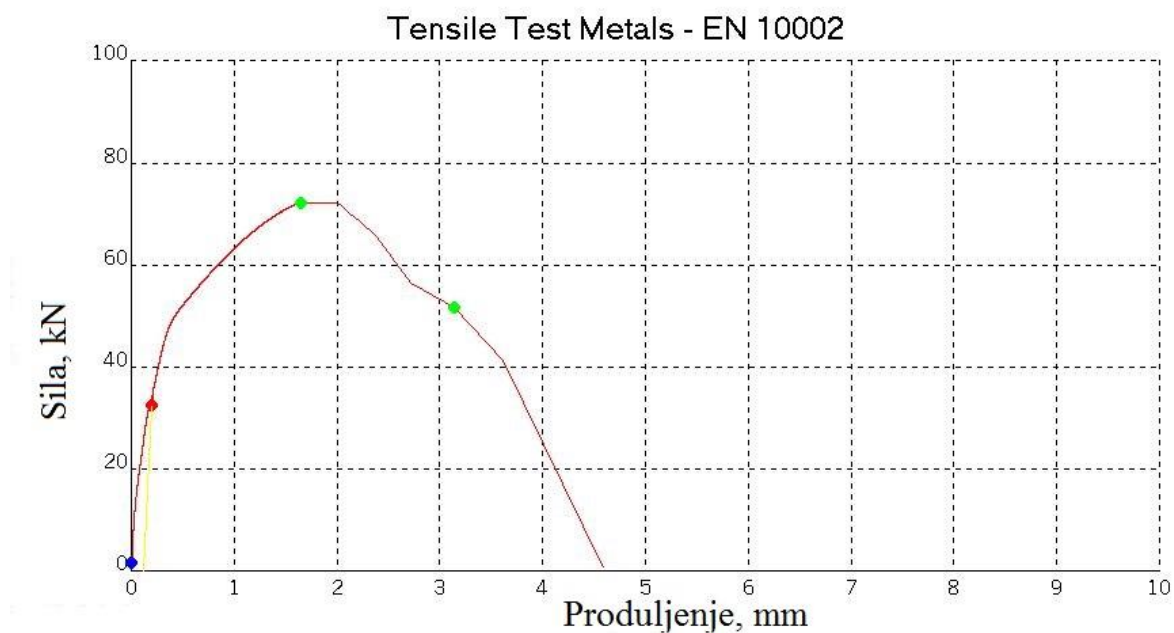


Slika 33. Uzorak 3 nakon ispitivanja

U tablici 24 prikazani su rezultati nakon statičkog vlačnog ispitivanja.

Tablica 24. Rezultati ispitivanja za uzorak 3

$R_{p0,2}$, MPa	R_m , MPa	F_m , kN	F_k , kN	L_u , mm
315.63	699.88	72,20	51,48	80,8



Slika 34. Dijagram naprezanja za uzorak 3

Epruveta je pukla izvan mjernog područja, mogući razlog tome je loša priprema same epruvete. Dobiveni rezultati nisu zadovoljili mehaničke specifikacije dodatnog materijala prema katalogu.

7.7.4. Uzorak 4

Slika 35 prikazuje uzorak nakon statičkog vlačnog ispitivanja.

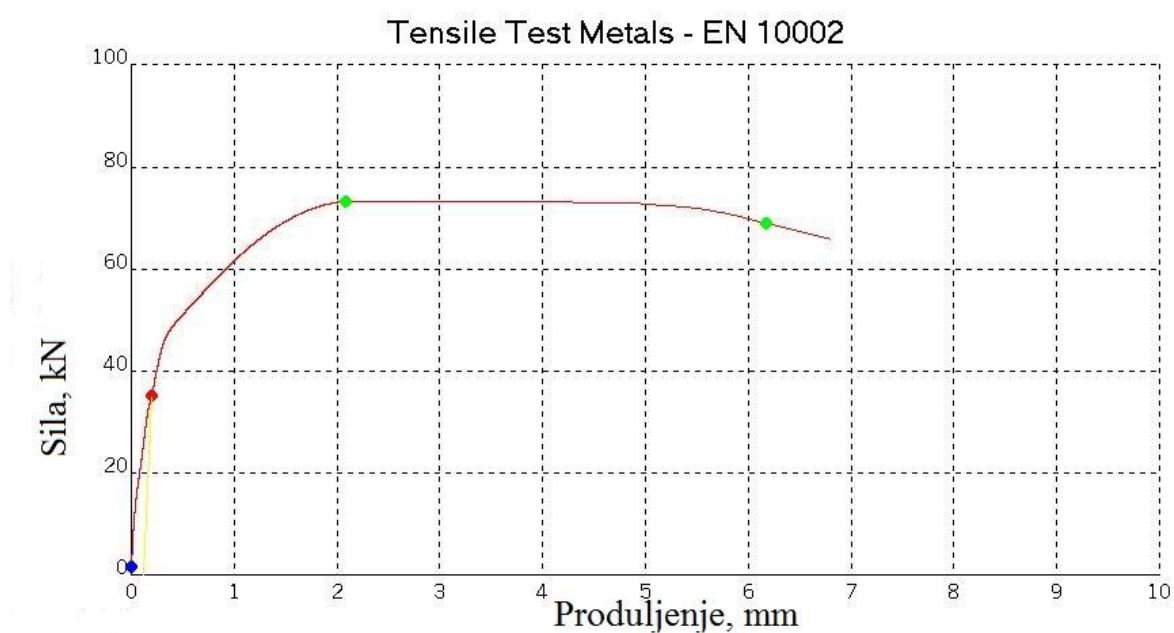


Slika 35. Uzorak 4 nakon ispitivanja

U tablici 25 prikazani su rezultati nakon statičkog vlačnog ispitivanja.

Tablica 25. Rezultati ispitivanja za uzorak 4

$R_{p0,2}$, MPa	R_m , MPa	F_m , kN	F_k , kN	L_u , mm
336,25	698,99	73,14	68,79	93,77

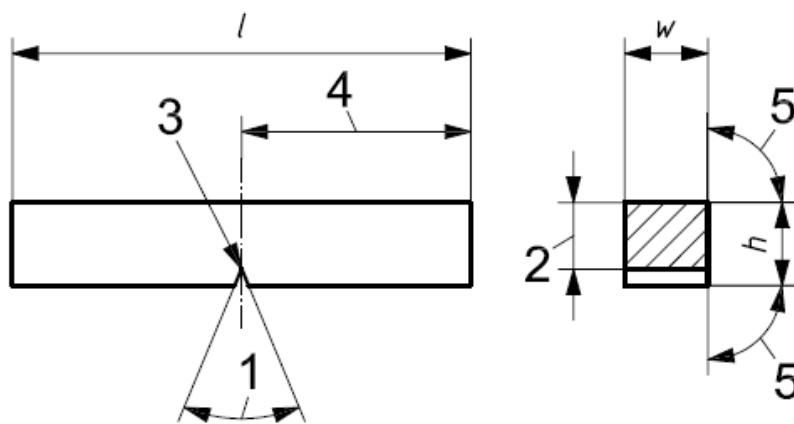


Slika 36. Dijagram naprežanja za uzorak 4

Duljina ispitnog područja uzorka 4 se produjila za 33,77 mm što je istežanje od 36 % (A_5). To je rezultat koji zadovoljava mehaničke specifikacije dodatnog materijala prema katalogu istežljivost je od 30 % do 60 %. $R_{p0,2}$ i R_m ne zadovoljavaju mehaničke specifikacije prema katalogu.

7.8. Ispitivanje udarnog rada loma

Prema normi ISO 148-1:2009 određene su dimenzije epruveta za ispitivanje udarnog rada loma. Na slici 59. prikazana je skica epruvete s označenim ključnim veličinama. Temperatura ispitnih epruveta je sobna.



Slika 37. Skica epruveta za ispitivanje žilavosti s označenim ključnim veličinama [26]

l – duljina epruvete, mm

w – širina epruvete, mm

h – visina epruvete, mm

1 – kut zareza

2 – visina epruvete ispod zareza

3 – radijus utora

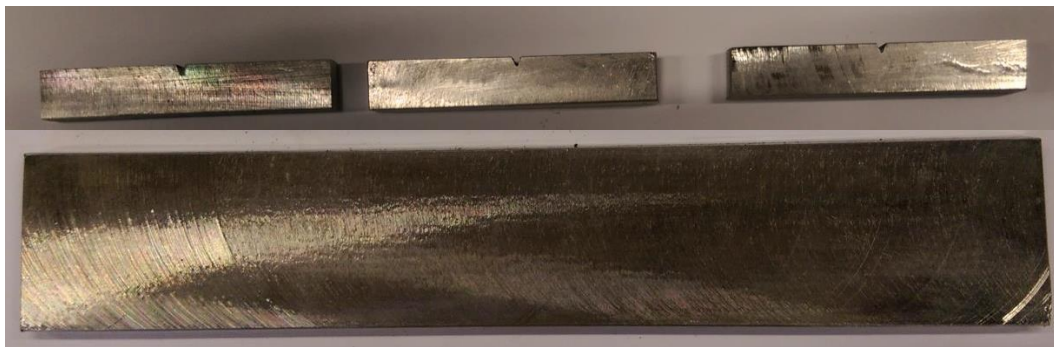
4 – udaljenost plohe simetrije od kraja epruvete

5 – kut između susjednih ploha epruvete

Tablica 26. Određene dimenzije epruveta na temelju norme ISO 148-1:2009

l , mm	w , mm	h , mm
55	10	5

Na slici 38 prikazani su primjeri epruveta za ispitivanje udarnog rada loma. Epruvete su izrezane uzdužno iz gornjeg dijela zida.



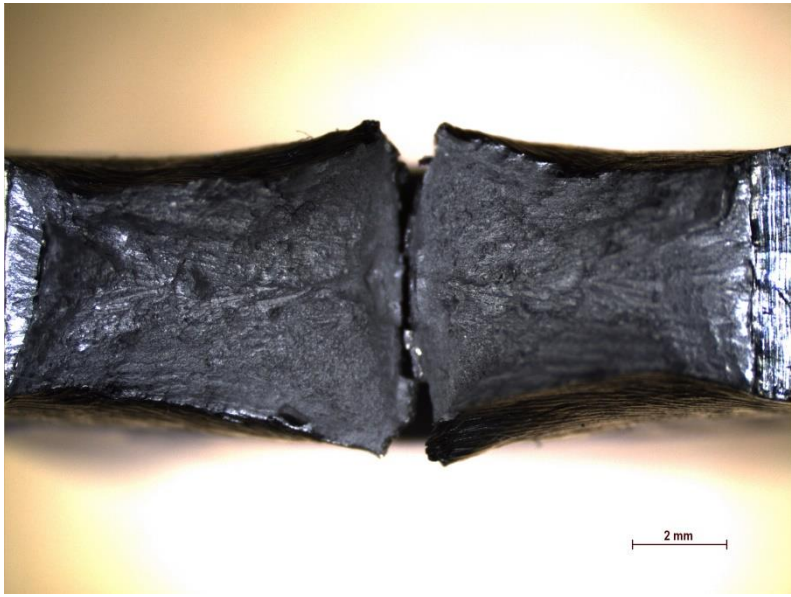
Slika 38. Primjer ispitnih epruveta

U tablicama 27, 28, 29 i 30 prikazani su rezultati mjerenja zajedno sa slikama prijelomnih površina.

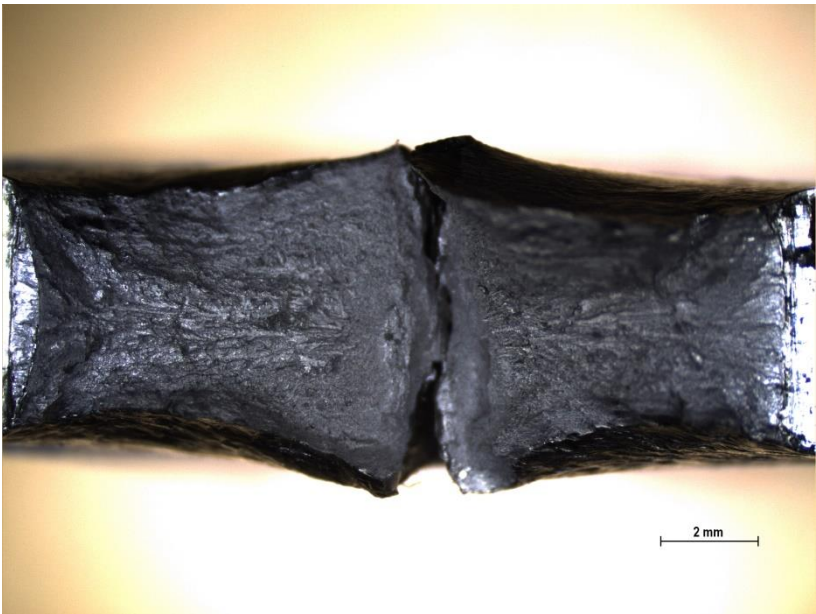
Tablica 27. Rezultati ispitivanja za uzorak 1

Uzorak 1 - prijelomna površina, povećanje 10x		
Redni broj epruvete	Udarni rad loma, KV, J	
1.	112	
2.	111	
3.	94	


Tablica 28. Rezultati ispitivanja za uzorak 2

Uzorak 2 - prijelomna površina, povećanje 10x		
Redni broj epruvete	Udarni rad loma, KV, J	
1.	126	
2.	107	
3.	130	

Tablica 29. Rezultati ispitivanja za uzorak 3

Uzorak 3 - prijelomna površina, povećanje 10x		
Redni broj epruvete	Udarni rad loma, KV, J	
1.	122	
2.	119	
3.	124	

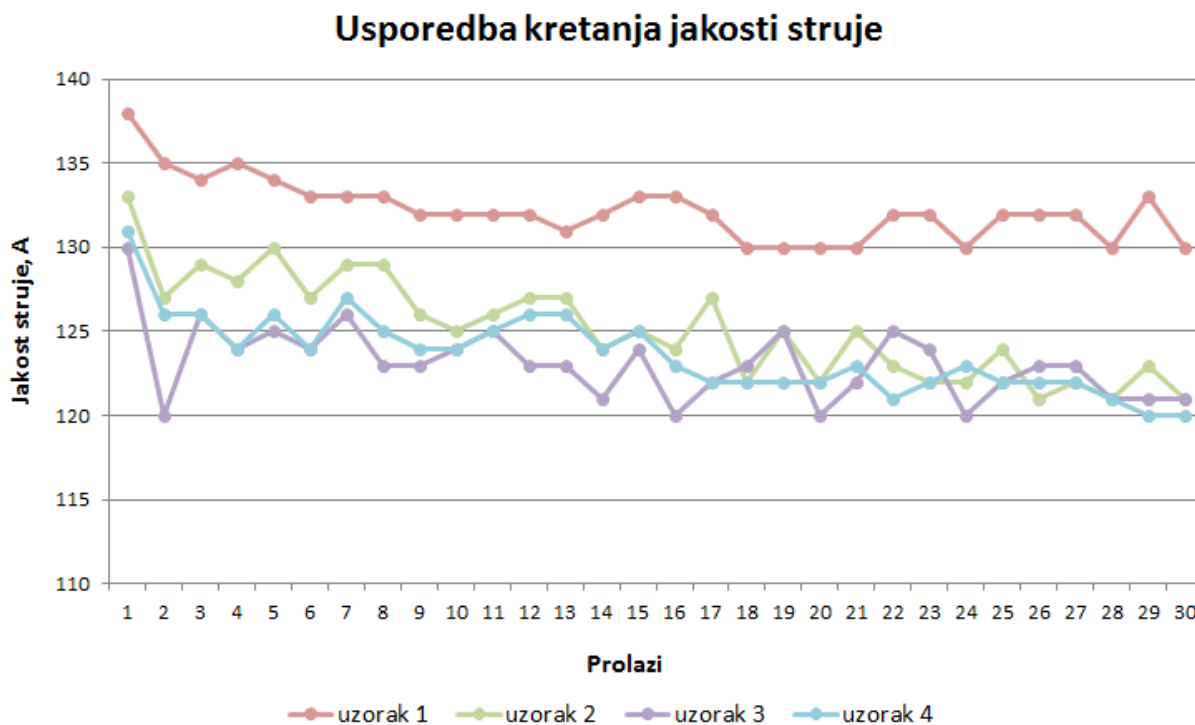
Tablica 30. Rezultati ispitivanja za uzorak 4

Uzorak 4 - prijelomna površina, povećanje 10x		
Redni broj epruvete	Udarni rad loma, KV, J	
1.	124	
2.	115	
3.	120	

Uočili smo da je iznos udarnog rada loma podjednak za sve uzorke. Legura Inconel 625 ima visok udarni rad loma što je dokazano ovim ispitivanjem.

7.9. Analiza rezultata

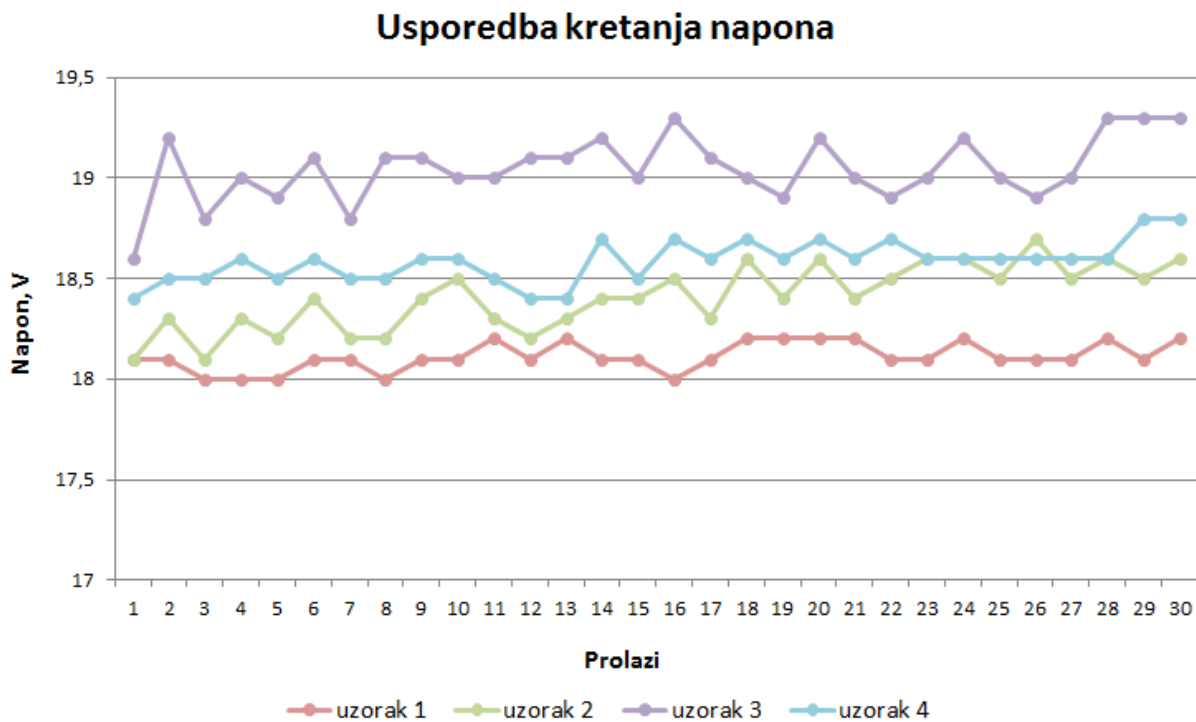
Na slici 39 prikazana je usporedba kretanja jakosti struje tijekom navarivanja slojeva za sva četiri uzorka. Jakosti struja variraju oko svojih vrijednosti bez značajnijih odstupanja. Prisutan je padajući trend što znači da su struje na početku zavarivanja veće od onih na kraju. Uzorak 1 zavaren je većom jakosti struje u odnosu na druge uzorke.



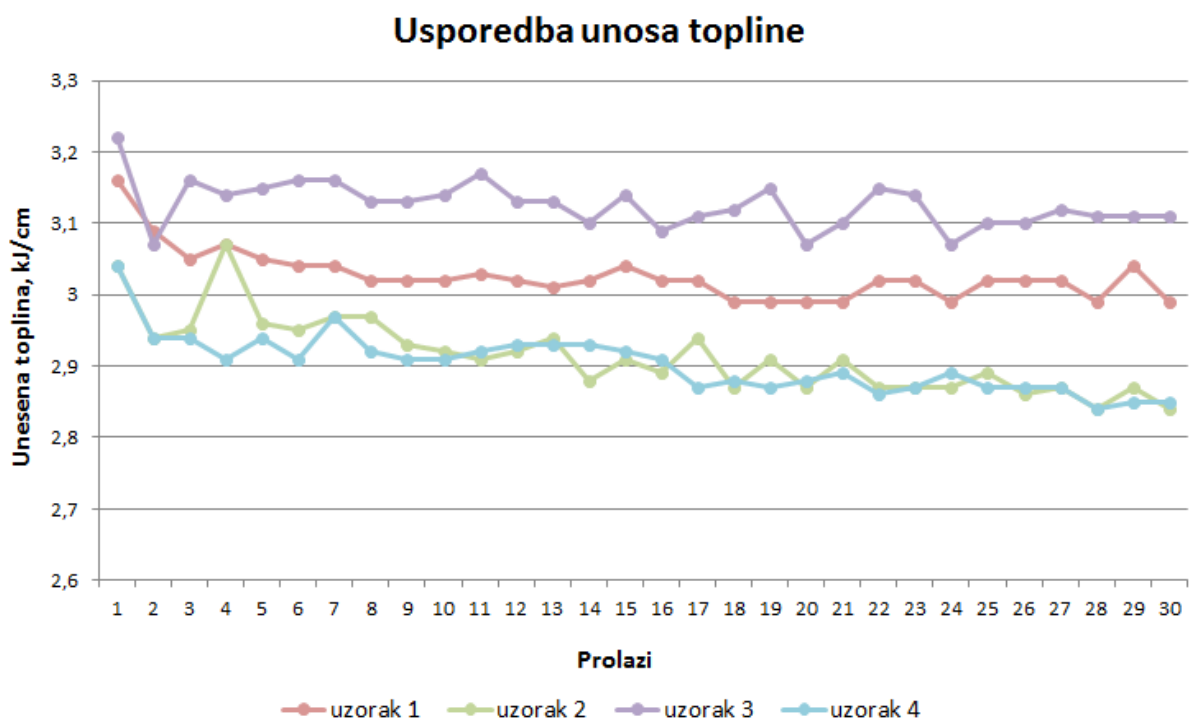
Slika 39. Usporedba kretanja jakosti struje

Na slici 40 prikazana je usporedba očitanih vrijednosti napona tijekom zavarivanja za sva četiri uzorka. Najveća odstupanja zabilježena su kod uzorka 3, dok je najmanje odstupanje ima uzorak 1. Promjene napona bile su male za što je zaslužna ravna statička karakteristika izvora struje.

Na slici 41 prikazan je graf s usporedbom unosa topline za svaki pojedini prolaz. Uočili smo da je unos topline u prvom prolazu nešto veći u odnosu na ostale prolaze za svaki uzorak. Povećani unos topline je posljedica korištenja manje brzine zavarivanja u prvom prolazu u svrhu dobivanja šire baze za lakše navarivanje ostalih slojeva. Unos topline kod uzorka 3 je najveći iako ima najnižu jakost struje. Razlog tome je korištenje manje brzine zavarivanja tijekom cijelog procesa izrade uzorka 3.

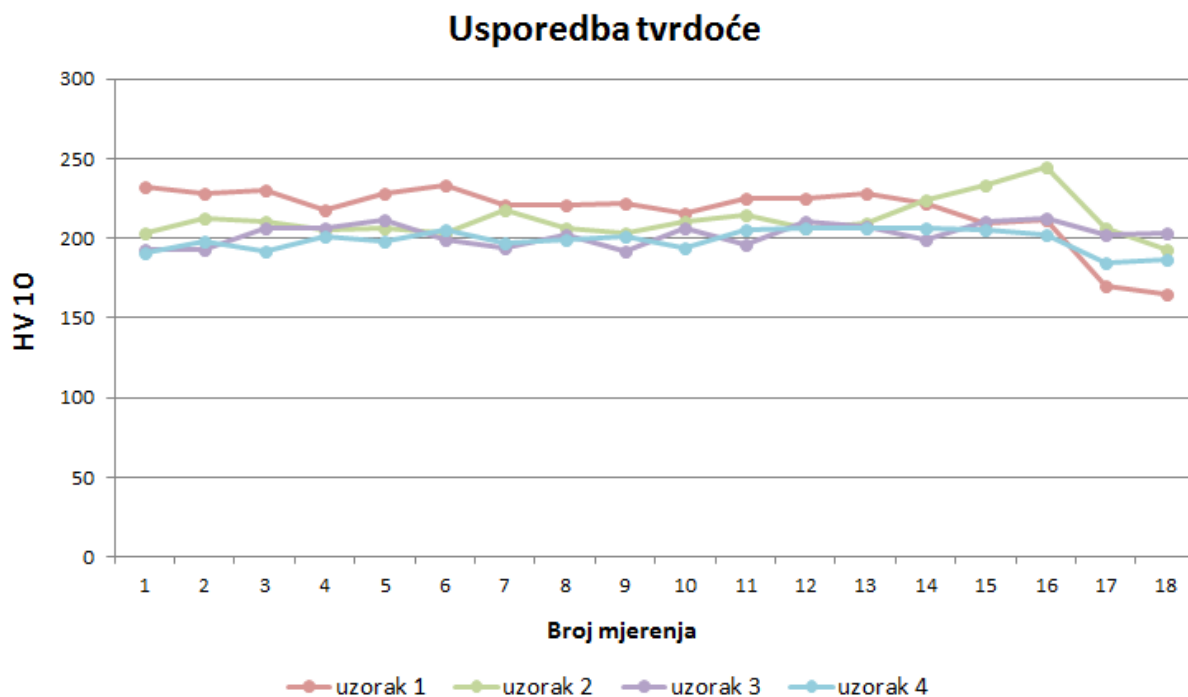


Slika 40. Usporedba kretanja vrijednosti napona tijekom zavarivanja



Slika 41. Usporedba unosa topline

Slika 42 prikazuje graf sa svim izmjerenim tvrdoćama. Izmjerene tvrdoće su podjednake za sve uzorke, nema većih odstupanja. Uočili smo da su zadnje dvije tvrdoće manje od ostalih, a to je zato jer su mjerene u osnovnom materijalu.



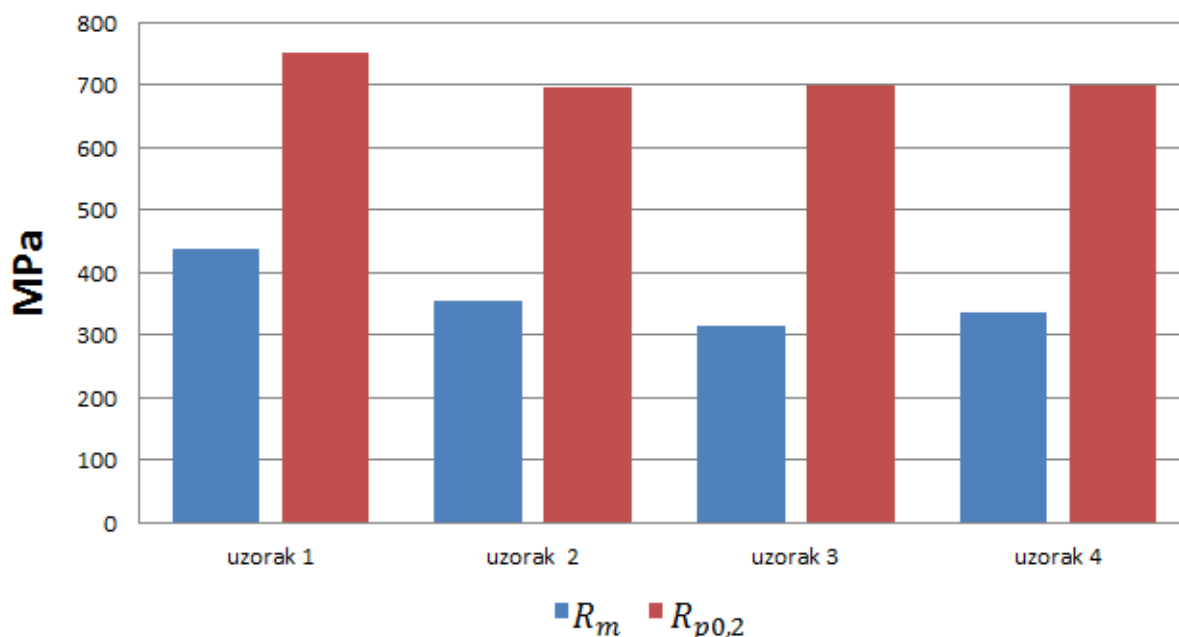
Slika 42. Usporedba tvrdoće

Slika 43 prikazuje usporedbu vlačne čvrstoće i konvencionalne granice razvlačenja za sve uzorke. Dobiveni rezultati su podjednaki za sve uzorke, nema većih odstupanja.

Na slici 44 prikazan je dijagram usporedbe sila razvlačenja i prekidnih sila za sve uzorke. Uzorak 3, koji je puknuo izvan mjernog područja, ima manju prekidnu silu u odnosu na druge uzorke.

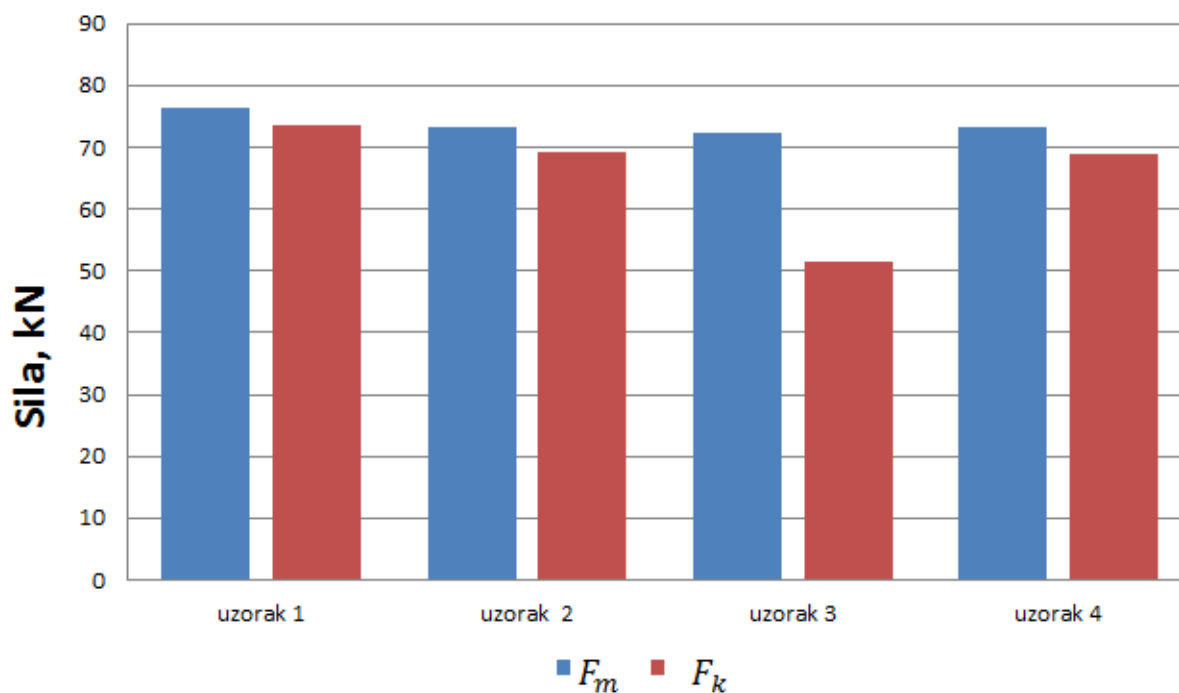
Slika 45 prikazuje usporedbu rezultata udarnog rada loma provedenog na uzorcima sobne temperature. Uočeno je da nema velike razlike u dobivenim rezultatima.

Vlačna čvrstoća i konvencionalna granica razvlačenja

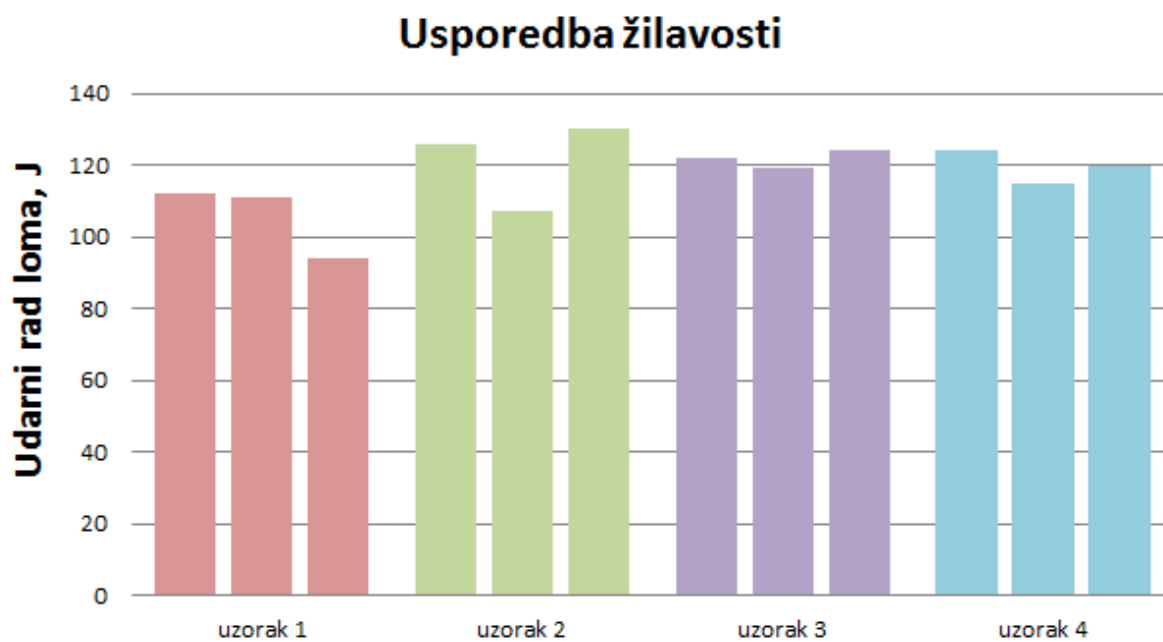


Slika 43. Dijagram vlačne čvrstoće i konvencionalne granice razvlačenja

Sila razvlačenja i prekidna sila



Slika 44. Dijagram sile razvlačenja i prekidne sile



Slika 45. Usporedba udarnog rada loma

8. ZAKLJUČAK

U eksperimentalnom dijelu bilo je potrebno definirati optimalne parametre MAG postupka za aditivnu proizvodnju legure Inconel 625 električnim lukom i žicom. Izrađena su 4 zida pomoću istih parametara zavarivanja, ali korištenjem različitih mješavina zaštitnih plinova.

Analizom dobivenih rezultata donešeni su sljedeći zaključci:

- Na snimkama makrostrukture vide se svi prolazi i način slaganja slojeva zida. Uzorak 3 ima najpravnomjernije slaganje slojeva što je posljedica većeg unosa topline. Na uzorku 1 uočeno je lošije slaganje prolaza za što se pretpostavlja da je posljedica korištenja plinske mješavine Inoxline C2 koja ima veći ekvivalent kisika. Vanjske površine zidova su poprilično ravne, nije bilo većih odstupanja u dimenzijama poprečnih presjeka zidova što se vidi na makrouzorcima.
- Kod mikrostrukture uočeni su uključci karbida kod svih uzoraka za koje se pretpostavlja da su nastali zbog povećanog udjela ugljika u dodatnom materijalu kao i zbog utjecaja zaštitnog plina. Zona utjecaja topline zasićenija je karbidima u odnosu na ostatak zida što je posljedica miješanja osnovnog i dodatnog materijala.
- Provedeno ispitivanje tvrdoće dalo je podjednake rezultate za sve ispitne uzorke. Zaključeno je da korištene smjese zaštitnih plinova nemaju značajnijeg utjecaja na mikrostrukturu.
- Analizom radiografskih snimki zaključeno je da nema većih nepravilnosti u uzorcima. Na uzorcima 1 i 4 primijećeno je nekoliko pora manjih dimenzija. Površine svih uzoraka prekrivene su kapljicama dodatnog materijala.
- Odabrane plinske mješavine zaštitnih plinova dale su podjednake rezultate statičkog vlačnog pokusa za sve uzorke. Također je ispitivanje udarnog rada loma dalo podjednake rezultate za sve uzorke.

Zaključeno je da su sve odabrane mješavine zaštitnih plinova pogodne za korištenje u aditivnoj proizvodnji električnim lukom i žicom uzoraka od Inconel 625 legure. Primjenjiva je u mnogim granama industrije za izradu dijelova visoke čvrstoće, iznimne žilavosti i odlične otpornosti na koroziju. Potencijalna primjena je izrada komponenti oceanografskih instrumenata, dijelova turbina i mlaznih motora.

LITERATURA

- [1] ASTM F2792-12a: Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies ASTM International, 2012.
- [2] Pilipović A.: Aditivna proizvodnja; Polimeri, Volumen 33, Svezak 3, 2012.
- [3] Busachi A., Erkoyuncu A. J., Martina F., Ding J.: Designing a WAAM Based Manufacturing System for Defence Applications, Elsevier, 2015.
- [4] S. W. Williams, F. Martina, A. C. Addison, J. Ding, G. Pardal, P. Colegrove; Wire+Arc Additive Manufacturing; Materials Science and Technology; 2016.
- [5] J. Donoghue, A.A. Antonysamy, F.Martina, P.A. Colegrove, S.W. Williams, P.B.Prangnell; The effectiveness of combining rolling deformation with Wire–Arc Additive Manufacture on β -grain refinement and texture modification in Ti–6Al–4V; ELSEVIER; 2016.
- [6] Ding D., Pan Z., Cui D., Li H.: Process Planning Strategy for Wire and Arc Additive Manufacturing, University of Wollongong, 2014.
- [7] Ding D., Pan Z., Cui D., Li H.: Wire-feed additive manufacturing of metal components: technologies, developments and future interests, International Journal Advanced Manufacturing Technology, 2015.
- [8] Williams S.: WAAMMat, Welding Engineering And Laser Processing Centre, Cranfield University, 2016
- [9] Barra, S.R: SitedeSoldagem, 2003.,
<http://www.sitedasoldagem.com.br/conceito%20basico/>, dostupno 15.4.2017.
- [10] Kralj, Slobodan: Skripta za učenje iz kolegija Zavarivanje 1, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb
- [11] Garašić, I.: MIG/MAG-elektrolučno zavarivanje taljivom elektrodom u zaštitnoj atmosferi inertnog/aktivnog plina, Autorizirana predavanja, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2015.
- [12] Shinagawa, K.: Essential factors in gas metal arc welding, Kobe Steel LTD, 4. izdanje, Tokio, 2011.
- [13] http://www.lincolnelectric.com/assets/global/Products/Consumable_MIGGMAWWires-SuperArc-SuperArcL-56/c4200.pdf , dostupno 19.6.2017.

- [14] Kralj, S.; Andrić, Š.: Osnove zavarivačkih i srodnih postupaka; Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 1992.
- [15] Delač, Domagoj: Klasifikacija postupaka zavarivanja prema HRN EN ISO 4063, Završni rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2014.
- [16] Guidelines for Gas Metal Arc Welding, https://www.millerwelds.com/-/media/miller-electric/files/pdf/resources/bookspamphlets/mig_handbook.pdf , dostupno 23.6.2017
- [17] Jurica, Maja: Utjecaj zaštitnog plina i načina prijenosa metala na svojstva zavarenoga spoja čelika X80, Doktorski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2015.
- [18] Kolednjak, Davor: Utjecaj parametara zavarivanja na strukturu i svojstva čelika API 5L X80, Doktorski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Sveučilište u Zagrebu, 2014.
- [19] Levačić, Lidija: Trokomponentne plinske mješavine za MAG zavarivanje, Diplomski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2015.
- [20] https://www.researchgate.net/profile/Balaguru_Sethuraman/publication/300001446_Welding_Parameters_for_Inconel_625_Overlay_on_Carbon_Steel_using_GMAW/links/5919e7b90f7e9b1db6528a47/Welding-Parameters-for-Inconel-625-Overlay-on-Carbon-Steel-using-GMAW.pdf , dostupno 25.6.2017.
- [21] <http://www.specialmetalswiggin.co.uk/pdfs/products/INCONEL%20alloy%20625.pdf> , dostupno 25.6.2017.
- [22] http://www.varstroj.si/welding-machines_ang/mig-mag-welding_ang/vs_eng/vps-4000-digit-eng.html , dostupno 25.6.2017.
- [23] <http://www.messer.hr/products/castolin/tabzavrez.pdf> , dostupno 26.06.2017.
- [24] HRN EN 1011-1: 2009: Preporuke za zavarivanje metalnih materijala – 1. dio: Opće smjernice za elektrolučno zavarivanje, 2009.
- [25] Norma ISO 6892-1:2009: Metallic materials – Tensile testing – Part 1: Method of test at room temperature
- [26] Norma ISO 148-1:2009: Metallic materials – Charpy pendulum impact test – Part 1: Test method

PRILOZI

CD-R disc