

Optimiranje parametara zavarivanja pri aditivnoj proizvodnji električnim lukom i žicom

Vresk, Jurica

Undergraduate thesis / Završni rad

2020

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:235:818463>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-13**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Jurica Vresk

Zagreb, 2020.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor:

izv. prof. dr. sc. Ivica Garašić

Student:

Jurica Vresk

Zagreb, 2020.

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

Zahvaljujem se mentoru izv. prof. dr. sc. Ivici Garašiću i asistentu Ivanu Juriću, mag. ing. mech. na smjernicama i savjetima prilikom izrade ovog rada. Također se zahvaljujem svojoj obitelji i prijateljima na razumijevanju i podršci tijekom dosadašnjeg studija.

Jurica Vresk



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



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

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

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Jurica Vresk**

Mat. br.: 0035206077

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Optimiranje parametara zavarivanja pri aditivnoj proizvodnji električnim lukom i žicom**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Optimisation of Welding Parameters for Wire and Arc Additive Manufacturing**

Opis zadatka:

U teorijskom dijelu objasniti postupak aditivne proizvodnje električnim lukom i žicom s posebnim osvrtom na proizvodnju tvorevina od čeličnih materijala. Razraditi nekoliko realnih primjera primjene iz industrijske prakse. Detaljno objasniti BTF omjer te proučiti parametre teksture površine.

U eksperimentalnom dijelu rada za više razina brzine žice odrediti optimalne parametre zavarivanja pri aditivnoj proizvodnji električnim lukom i žicom uz upotrebu konvencionalnog MAG postupka zavarivanja. Na izrađenim uzorcima ispitati osnovna mehanička svojstva, odrediti parametre teksture površine te izračunati dobiveni BTF omjer. U konačnici ustanoviti vezu između parametara teksture površine i BTF omjera.

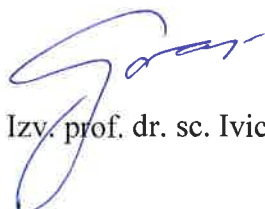
U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:
28. studenog 2019.


Datum predaje rada:
1. rok: 21. veljače 2020.
2. rok (izvanredni): 1. srpnja 2020.
3. rok: 17. rujna 2020.

Predviđeni datumi obrane:
1. rok: 24.2. – 28.2.2020.
2. rok (izvanredni): 3.7.2020.
3. rok: 21.9. - 25.9.2020.

Zadatak zadao:


Izv. prof. dr. sc. Ilica Garašić

Predsjednik Povjerenstva:


Prof. dr. sc. Branko Bauer

SADRŽAJ

POPIS SLIKA.....	III
POPIS TABLICA.....	V
SAŽETAK.....	VI
SUMMARY.....	VII
1. UVOD	1
2. ADITIVNA PROIZVODNJA	2
2.1. Priprema za aditivnu proizvodnju	2
2.2. Načelo i faze izrade u aditivnoj proizvodnji	3
2.3. Prednosti aditivne proizvodnje.....	4
2.4. Nedostaci aditivne proizvodnje.....	5
3. ADITIVNA PROIZVODNJA ŽICOM I ELEKTRIČNIM LUKOM.....	6
3.1. Povijest WAAM postupka.....	6
3.2. Prednosti WAAM postupka.....	9
3.2.1. Ulaganja	9
3.2.2. Mogućnost izbora izvora i manipulatora	10
3.2.3. Stopa depozita materijala	10
3.2.4. Veličina proizvoda	10
3.3. Primjeri proizvoda izrađenih WAAM postupkom	11
3.4. Nedostaci WAAM postupka.....	14
3.5. Greške kod WAAM postupka.....	14
4. POSTUPCI ZAVARAVANJA KOD WAAM POSTUPKA.....	15
4.1. MIG/MAG zavarivanje	15
4.2. Parametri zavarivanja.....	16
4.2.1 Napon	17
4.2.2 Struja	17
4.2.3 Brzina zavarivanja	17
4.2.3 Slobodni kraj žice.....	17
4.3. Načini prijenosa metala	17
4.3.1 Prijenos metala kratkim spojem	18
4.3.2 Prijenos metala mješovitim lukom	18
4.3.3 Prijenos metala štrcajućim lukom.....	19
4.3.3 Prijenos metala impulsnim lukom	20
5. KONSTRUKCIJSKI ČELICI	21

5.1. Svojstva građevinskih čelika	21
6. EKSPERIMENTALNI DIO	23
6.1. Opis eksperimenta	23
6.2. Oprema za zavarivanje.....	24
6.2.1 Dodatni materijal	25
6.2.2 Zaštitni plin	26
6.3. Tijek eksperimenta	26
6.4. Priprema uzoraka za ispitivanje.....	30
6.5. Makroanaliza strukture	30
6.6. Mjerenje tvrdoće (HV10) uzoraka	31
6.7. Ispitivanje i analiza parametara teksture površine	32
6.8. Analiza BTF omjera	40
7. ZAKLJUČAK.....	44
8. LITERATURA	46
PRILOG	47

POPIS SLIKA

Slika 1. Princip aditivnih postupaka proizvodnje prototipova: a – prikaz slaganja slojeva, b – 3D tvorevina [3]	3
Slika 2. Faze AM postupaka [3]	4
Slika 3. Bakerov izradak [5]	6
Slika 4. Postupak izrade tlaačne posude od strane Mitsubishija	7
Slika 6. Proizvodnja izratka za nuklearnu elektranu	8
Slika 7. Proizvodi proizvedeni na sveučilištu u Cranfield-u	9
Slika 8. Robot za zavarivanje sa šest osi gibanja [6]	9
Slika 9. Primjer stroja za izvedbu WAAM postupka (naglasak na veličini) [6]	11
Slika 10. Krilo rađeno za BAE Systems [6]	12
Slika 11. Back to back način WAAM postupka [6]	12
Slika 12. Naprava za slijetanje izrađena WAAM postupkom [6]	13
Slika 13. Izrada rebra za krilo [6]	14
Slika 14. Prikaz MIG/MAG zavarivanja	16
Slika 15. a) realni prikaz prijenosa kratkim lukom; b) shematski prikaz [9]	18
Slika 16. a) realni prikaz prijenosa mješovitim lukom; b) shematski prikaz [9]	19
Slika 16. a) realni prikaz prijenosa štrcajućim lukom; b) shematski prikaz [9]	20
Slika 17. Karakteristika impulsne struje [8]	20
Slika 18. Robotska stanica Almega OTC AX V6	24
Slika 19. Uzorci 1, 2 i 3	30
Slika 20. Prikaz postupka 3D skeniranja	33
Slika 21. Parametri teksture površine uzorka 1	35
Slika 22. Parametri teksture površine uzorka 2	36
Slika 23. Parametri teksture površine uzorka 3	37
Slika 24. Dijagram vrijednosti parametra Ssk	38
Slika 25. Dijagram vrijednosti parametra Sq	38
Slika 26. Dijagram vrijednosti parametra Sku	39
Slika 27. Dijagram vrijednosti parametra Sz	40

Slika 28. Prikaz pritezanja uzorka.....	41
Slika 29. Prikaz obrade uzorka.....	41
Slika 30. Prikaz obrađenog uzorka.....	42

POPIS TABLICA

Tablica 1. Svojstva građevinskih čelika [11]	21
Tablica 2. Čvrstoća građevinskih materijala [11]	22
Tablica 3. Karakteristike izvora DP 400	25
Tablica 4. Kemijski sastav S355 [12].....	25
Tablica 5. Mehanička svojstva S355 [12]	26
Tablica 6. Parametri zavarivanja i geometrije uzorka 1	27
Tablica 7. Parametri zavarivanja i geometrije uzorka 2.....	28
Tablica 8. Parametri zavarivanja i geometrije uzorka 3.....	29
Tablica 9. Rezultati mjerenja tvrdoće	31

SAŽETAK

U završnom radu obrađena je tema aditivne proizvodnje žicom i električnim lukom (engl. Wire and Arch Additive Manufacturing – WAAM) konstrukcijskog čelika S355. Rad se sastoji od teorijskog i eksperimentalnog dijela.

U teorijskom dijelu rada objašnjeni su osnovne aditivne proizvodnje i temeljni princip postupka aditivne proizvodnje žicom i električnim lukom (WAAM). Teorijski je obrađeno korištenje čelika S355 u navedenoj tehnologiji. Konstrukcijski čelici opisani su iz razloga što je jedan od njih (S355) korišten u samoj izvedbi eksperimentalnog dijela. Opisan je MAG postupak zavarivanja, njegove osnove, princip rada, a detaljno su obrađeni i primjeri primjene ovog postupka zavarivanja za aditivnu proizvodnju žicom i električnim lukom.

U eksperimentalnom dijelu rada određeni su optimalni parametri za aditivnu proizvodnju električnim lukom i žicom konstrukcijskog čelika S355 iz kojeg je primjenom robotiziranog zavarivanja izrađena tri uzorka. Uzorci se razlikuju ovisno o parametrima koji su bili korišteni robotiziranim MAG postupkom zavarivanja. Na izrađenim uzorcima je izmjerena tvrdoća po Vickersu (HV10). Također, u radu je izvršeno 3D skeniranje izrađenih zidova (uzoraka) te su određeni parametri teksture površine. Izvršena je mehanička obrada glodanjem da bi se osim simulacijski, BTF omjer mogao odrediti i praktično, vaganjem prije te nakon obrade.

Ključne riječi: Aditivna proizvodnja žicom i električnim lukom, konstrukcijski čelik S355, MAG postupak zavarivanja

SUMMARY

In this thesis, the topic of Wire and Arch Additive Manufacturing-WAAM aluminum alloys is discussed. The paper consists of a theoretical and experimental part.

Theoretical part explains the basic principles of Additive Manufacturing and the basic principle of Wire and Arch Additive Manufacturing (WAAM). Also theoretical part explains using of construction steel S355 in this technology. Construction steels are described because one of the steels is used in experiment. The MAG welding process, its basis, the principle of operation, and the examples of the application of this welding procedure for Wire and Arch Additive Manufacturing are described.

In the experimental part of the work, optimal parameters for Wire and Arch Additive Manufacturing of construction steel S355 was obtained, from which three samples were made using robotized welding. Differences between the samples are in parameters which were used in robotized MAG welding. Hardness was measured by Vickers hardness test (HV10). Also, 3D scanning of created walls (samples) has been performed and surface texture parameters were determined. Milling was performed on both sides of sample to the white color because sample was used in measuring weight of samples to describe BTF ratio.

Keywords: *Wire and Arch Additive Manufacturing, construction steel S355, MAG welding process*

1. UVOD

Naša je današnjica po pitanju zahtjeva korisnika i tržišta doprla na zavidnu razinu, koja potaknuta širenjem tržišta neprestano raste. Shodno tome sam napredak tehnologije i znanosti je neophodan. Da bi širenje tržišta bilo moguće potrebne su inovacije i novi izumi. Zajedno sa potrebom za inovacijama potrebno je i smanjenje troškova proizvodnje. Smanjenje troškova proizvodnje jedan je od najbitnijih faktora razvoja i napretka postojećih i tvrtki u nastanku.

Da bi se troškovi proizvodnje smanjili potrebno je smanjiti trošenje same energije, a da bi smanjili trošenje energije koja nam je potrebna za proizvodnju treba smanjiti ukupno vrijeme trajanja i proizvodnje samih proizvoda. Zbog toga dolazi do potrebe za automatizacijom, robotizacijom i modernizacijom samih proizvodnih sustava. Primjer koji to potkrjepljuje je sama autoindustrija koja za proizvodnju automobila u većinskom postotku koristi automatizirane i robotizirane sustave.

U ovom će radu najviše pisati o suvremenoj tehnologiji proizvodnje, aditivnoj proizvodnji žicom i električnim lukom. To je tehnologija koja se iz dana u dan razvija i nudi tržištu sve složenije i kompliciranije proizvode. Između ostalog u tekstu će biti opisani materijali koji se koriste u navedenoj tehnologiji te će u konačnici eksperimentalnim postupkom biti ispitana kvaliteta i primjenjivost WAAM postupka.

2. ADITIVNA PROIZVODNJA

Aditivna proizvodnja (AM) je naziv kojim se opisuje tehnologija izrade 3D izradaka taloženjem materijala sloj na sloj, neovisno radi li se o plastici, metalu ili betonu. [1] Postupka aditivne proizvodnje suprotan je ostalim konvencionalnim postupcima izrade objekata, kod kojih se u proizvodnji ne dodaje materijal kao kod aditivne proizvodnje, već se odstranjuje i odstranjivanjem „viška“ materijala dobiva se izradak. [2]

Sama tehnologija aditivne proizvodnje tek je u nastanku i puno je tu još mjesta za napredak i poboljšanje samog postupka, a prva industrijska upotreba AM postupaka zabilježena je 1987. godine. Radi se o postupku stereolitografije je proizvođača 3D Systems u kojem se tanak sloj kapljevito polimera očvršćuje UV laserom. Godine 1988. tvrtke 3D Systems i Ciba-Geigy proizvele su prvu generaciju akrilnih smola koje se primjenjuju u stereolitografiji. [3]

Prednost AM je u tome što može skratiti vrijeme i sniziti trošak potreban da se napravi nova tvorevina od početnoga koncepta do proizvodnje. Uz pomoć AM možemo prepoznati osnovne pogreške na tvorevinama koje su u kasnijim fazama proizvodnje istih skupe za ispravljanje. Između ostalog, sam postupak AM nije jeftin zbog cijene same opreme za provođenje istog, pa je zbog toga katkad teško odlučiti koliko tvorevina treba načiniti da se dobije maksimalna korist od njih. [3]

2.1. Priprema za aditivnu proizvodnju

Postoje dva bitna modela pripreme bitnih datoteka za pripremu. Jedan od modela nastanka datoteke je CAD model koji je izrađen od strane dizajnera i developera. Drugi način pripreme modela kreće od stvarnog objekta, koji se postupkom skeniranja prenosi na računalo te nakon toga kreće proizvodnja. 3D skeniranje moderna je tehnologija kojom se mogu analizirati predmeti i okolina iz stvarnog svijeta kako bi ih mogli generirati u računalu te ih u konačnici iskoristiti za daljnju upotrebu. [2]

2.2. Načelo i faze izrade u aditivnoj proizvodnji

Aditivna proizvodnja funkcioniра tako da se iz modela konstruiranog računalom izrežu slojevi jednake debljine te se nakon toga slažu jedan na drugi. Rezultat toga je stepenasti izgled površine kao što je prikazano na slici 1.



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

Kod svih postupaka izrade proizvoda faze izrade su jednake, kao što je prikazano na slici 2.



Slika 2. Faze AM postupaka [3]

2.3. Prednosti aditivne proizvodnje

Aditivna proizvodnja ima određene prednosti. Kod tradicionalne proizvodnje broj koraka koji je potreban za proizvodnju jednog proizvoda može potrajati mjesecima i potrebna su vrlo velika ulaganja koja u konačnici mogu biti vraćena visoko-serijskom proizvodnjom. S druge strane aditivna nam proizvodnja pruža mogućnost da taj velik broj koraka reduciramo na samo nekoliko postupaka. Baš zbog tog razloga je vrijeme proizvodnje proizvoda znatno kraće. [4]

Osim same brzine i relativno kratkog trajanja postupka aditivna proizvodnja ima mogućnost izrade proizvoda od različitih materijala. Aditivna nam proizvodnja pruža mogućnost izrade proizvoda koji će npr. u svojoj jezgri biti izuzetno dobar vodič, a izvana otporan na abrazijsko trošenje. [4]

S aditivnom proizvodnjom možemo postići skoro bilo kakvu geometriju i oblik, dok tu mogućnost zbog ograničenja alata i strojeva ponekad nemamo zbog toga što je naš proizvod ili malen ili ima čudan kut da bi se materijal odvojio kako bi trebao. Pomoću mrežaste strukture možemo proizvodu znatno smanjiti težinu, a zadržati željena svojstva. [4]

Aditivna nam proizvodnja pruža mogućnost proizvodnje specifičnih proizvoda i to u malim količinama. Kod konvencionalnih postupaka nam se zbog neisplativosti ponekad pojedinačna proizvodnja ne isplati zbog skupocjenog i dugotrajnog postupka proizvodnje. Zbog jednostavnosti samog postupka, aditivnom proizvodnjom to nam je omogućeno. [4]

2.4. Nedostaci aditivne proizvodnje

Usprkos mnogim prednostima aditivna se proizvodnja, kao i svi postupci, susreće s izazovima i posjeduje nedostatke. Strojevi za aditivnu proizvodnju izuzetno su skupi, a izrada proizvoda velikih dimenzija je dugotrajnija nego kod tradicionalnih postupaka. Uz sve to tu se i javlja naknadna obrada koja je potrebna nakon same aditivne proizvodnje.

Jedan od najvećih izazova aditivne proizvodnje je usklađivanje svojstava materijala u svim točkama finalnog izratka i kako smanjiti broj pogrešaka koje se mogu pojaviti tokom same provedbe postupka.

Istraživanja su pokazala da se problem pogrešaka unutar same strukture najviše javlja kod aditivne proizvodnje metalnim praškom koji se ne može u potpunosti sintetirati zbog zaostalih naprežanja koja se javljaju unutar novonastale strukture i imaju tendenciju razaranja same strukture.

Problem pogrešaka unutar strukture ne javlja se samo kod metala, da bi se taj problem suzbio znanstvenici pokušavaju shvatiti različite aspekte aditivne proizvodnje, kako se materijali ponašaju u interakciji jedan s drugim i kako što više smanjiti broj pogrešaka. [4]

3. ADITIVNA PROIZVODNJA ŽICOM I ELEKTRIČNIM LUKOM

Aditivna proizvodnja električnim lukom i žicom (engl. *Wire + arc additive manufacturing (WAAM)*) spada u grupu tehnologija proizvodnje koja je još u razvoju. Isplativost postupka posebno se ističe kod proizvodnje kompleksnih proizvoda materijala visoke cijene i kvalitete koji osiguravaju odlična svojstva u primjeni. Uz relativno kraće vrijeme same izrade proizvoda do izražaja dolazi znatna ušteda materijala koji se kon konvencionalnih postupaka gubi i postaje škartom.

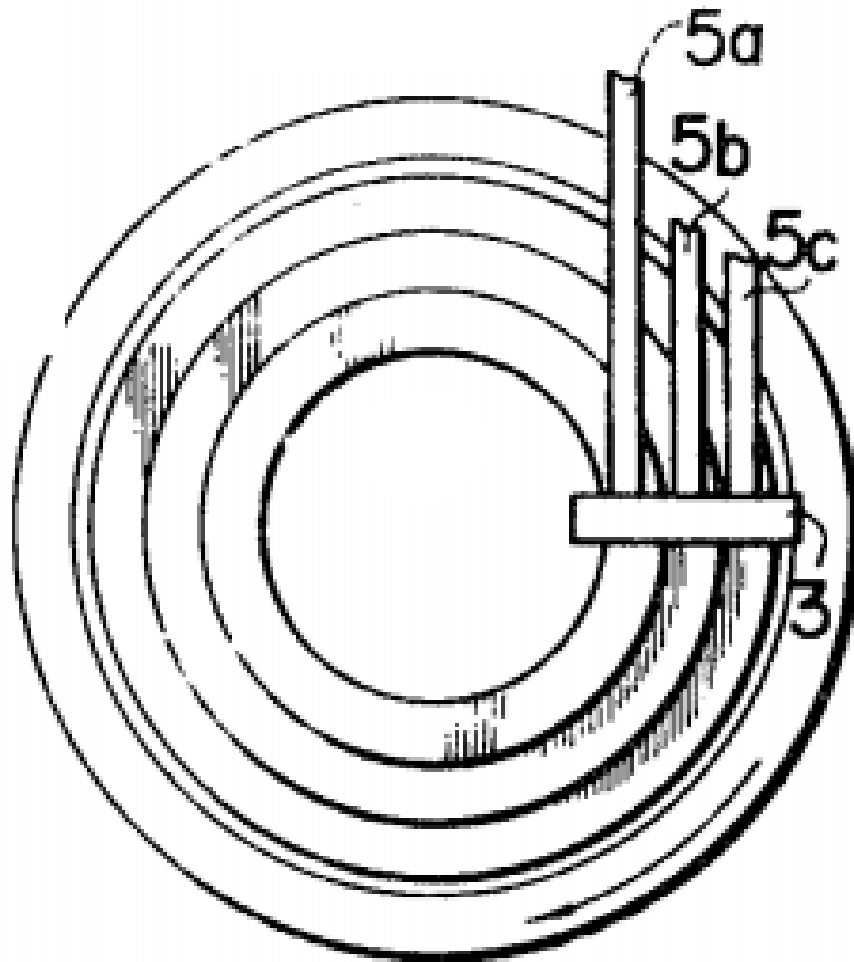
3.1. Povijest WAAM postupka

Korištenje WAAM tehnologije prvi se puta javlja 1926. godine kad je Baker prvi puta koristio električni luk kako bi otalio materijal i sloj po sloj ga naslagivao jedan na drugi u svrhu izrade trodimenzionalnog proizvoda. Njegov je proizvod prikazan na slici 3. [5]



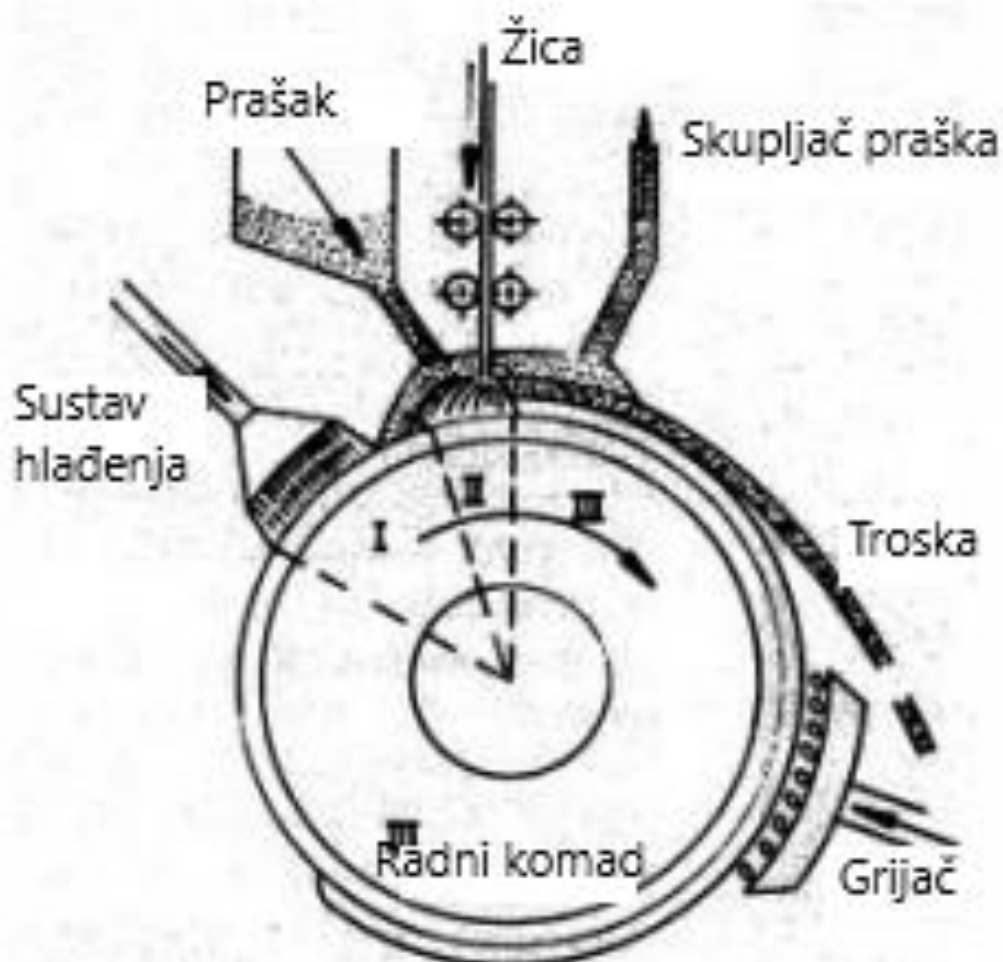
Slika 3. Bakerov izradak [5]

1947. godine Carpenter je primjenom elektrolučnog postupka zavarinjem pod praškom (EPP) staložio rastaljeni metal sloj na sloj. Taj isti postupak 1971. godine iskoristio je Mitsubischi koji je izradio tlačnu posudu koristeći više žica različitog materijala. Postupak izrade prikazan je na slici 4.



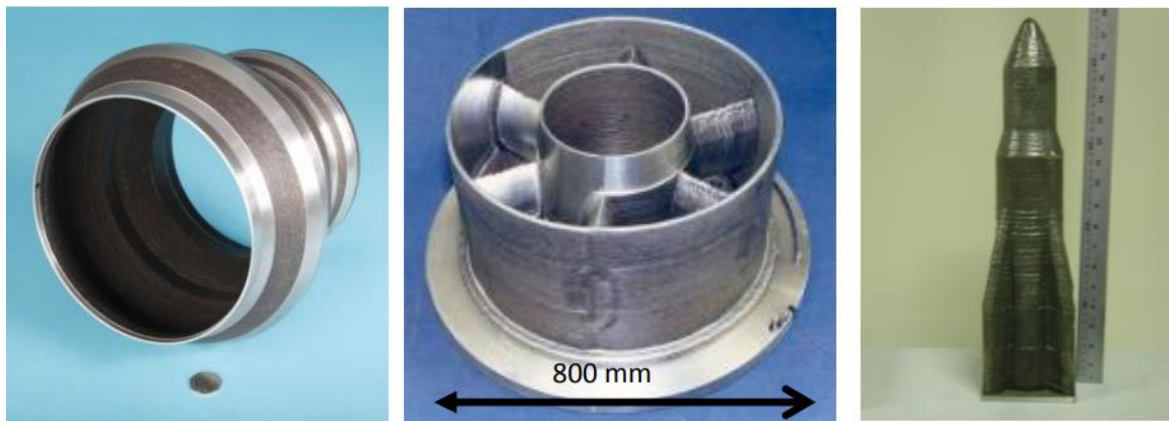
Slika 4. Postupak izrade tlačne posude od strane Mitsubishija [5]

1983. godine Kussmaull je koristio EPP postupak za izradu visokokvalitetnog konstrukcijskog čelika za potrebu nuklearne elektrane. Depozit je u tome postupku iznosio oko 80 kg/h, a ukupna težina izratka je bila 79 tona. Postupak je prikazan na slici 5.



Slika 6. Proizvodnja izratka za nuklearnu elektranu [5]

Devedesetih godina počela se kombinirati aditivna proizvodnja i strojna obrada. Na sveučilištu u Cranfield-u su počeli proučavati različite izvedbe samog procesa za potreba Rolls Royce-a. Na slici 7. nalaze se proizvodi nastali u tom periodu.



Slika 7. Proizvodi proizvedeni na sveučilištu u Cranfield-u

3.2. Prednosti WAAM postupka

3.2.1. Ulaganja

Cijelokupna oprema koja je potrebna da bi se mogla početi proizvodnja ovom tehnologijom sastoji se od robota sa šest osi gibanja, izvora struje i sapnice. Cijena robota kreće se oko 60000€ i izvora struje oko 35000€. Cijeli sistem kojim se može započeti proizvodnja izradaka od aluminija i čelika u konačnici dođe oko 100000€. [6]



Slika 8. Robot za zavarivanje sa šest osi gibanja [6]

3.2.2. *Mogućnost izbora izvora i manipulatora*

Izbor strojeva kojim će se zavarivati i robota nikad nije unaprijed određena. Krajnji korisnik potencijalno može kombinirati bilo koji izvor snage i manipulatora. Sa svime se upravlja programom WAAMsoft koji je prilagodljiv specifičnoj opremi. Uz to korisnik može mijenjati parametre taloženja. Program sam izbacuje optimalne parametre izvođenja postupka, ali korisnik, ako želi, te parametre slobodno može mijenjati. [6]

3.2.3. *Stopa depozita materijala*

Depozit materijala dovoljno je velik da bi se veliki proizvodi mogli proizvesti u razumnom vremenu. S depozitom materijala od 1kg/h do 4 kg/h za aluminij i čelik, većina je izradaka proizvediva u vremenu od jednog dana. Izvedivi su i veći depoziti materijala, ali s većim depozitom ne može se garantirati točnost postupka. Za primjer, kod depozita od 10 kg/h moguće je postići BTF omjer koji iznosi 10, ali u tome slučaju dolazi do prevelikog depozita materijala i potrebna je značajna strojna obrada, pa postupak u konačnici nije isplativ. Držanjem depozita za titan i aluminij oko 1 kg/h i čelik 3 kg/h osiguravamo BTF omjer od iznosa 1,5, a isplativost i ušteda su maksimalni. [6]

3.2.4. *Veličina proizvoda*

S materijalima poput aluminija i čelika, gdje nemamo potrebe za komorama koje bi omogućile idealne uvjete zaštite plinom nismo ograničeni po pitanju veličine proizvoda, jedini faktor koji na to utječe su mogućnosti manipulatora. Za materijale poput titana, gdje je zaštita plinom bitna, ograničeni smo veličinom komore u kojoj izvodimo sami postupak taloženja. [6]



Slika 9. Primjer stroja za izvedbu WAAM postupka (naglasak na veličini) [6]

3.3. Primjeri proizvoda izrađenih WAAM postupkom

Visina sloja uobičajno se kreće između 1 i 2 mm, čime dobivamo neravnine na površini oko 0,5 mm ako imamo jedan sloj. Samom WAAM tehnologijom ne možemo dobiti konačan izradak, pa je nadnadna obrada prijekopotrebnna.

Na slici 10. prikazano krilo proizvedeno za *BAE Systems*. Samo je krilo bilo izrađeno pomoću plazma zavarivanja na robotu za sedam osi gibanja. Krilo je bilo simetrično izrađivano s jedne i druge strane radne ploče tzv. e. *back to back building*. Razlog tome su naprezanja koja nastaju u radnom komadu, pa zbog toga da bi se ta naprezanja poništila postupak vodimo simetrično sa obje strane radne ploče (slika 11.) Depozit kod izrade krila bio je 0,8 kg/h, a BTF omjer 1,2. [6]

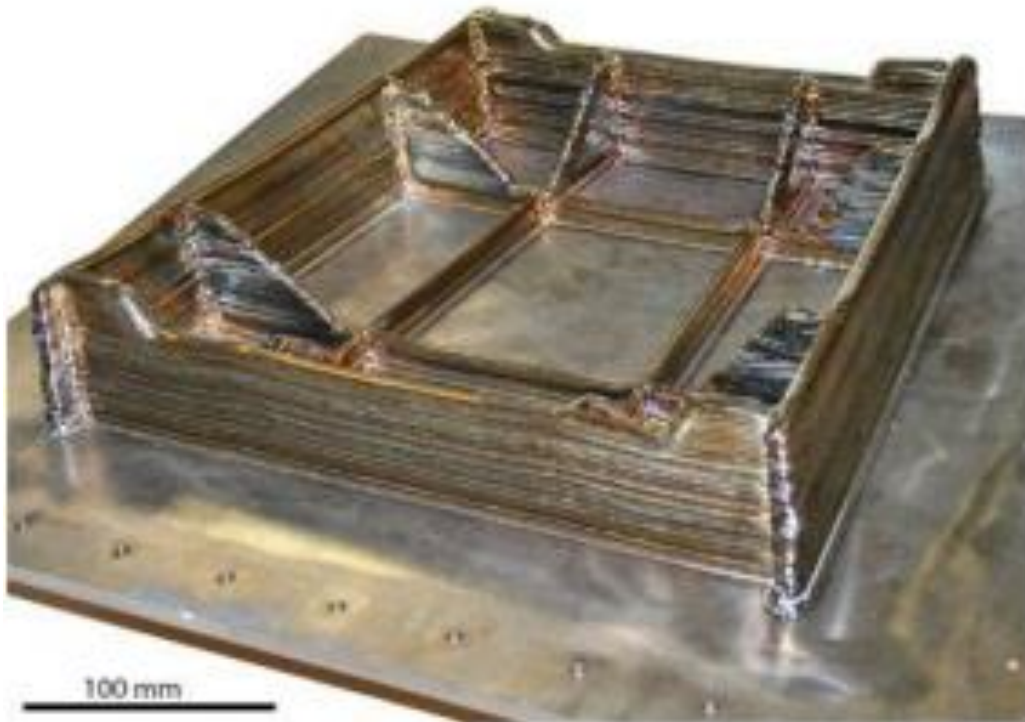


Slika 10. Krilo rađeno za *BAE Systems* [6]



Slika 11. *Back to back* način WAAM postupka [6]

Sljedeći primjer prikazuje izradu naprave za slijetanje iz 24 kg Ti-6Al-4V. Komad je također izrađen depozitom od 0,8 kg/h i BTF omjerom od 1,2. Izradom tog proizvoda pomoću WAAM tehnologije uštedjelo se oko 220 kg istoimenog materijala. [6]



Slika 12. Naprava za slijetanje izrađena WAAM postupkom [6]

Sljedeći primjer dokazuje koliko se ustvari može uštedjeti izradom pomoću WAAM tehnologije. U pitanju je izrada rebra za krilo. Standardnim postupkom izrade iz komada aluminija od 700 kg dobilo se rebro mase od 18 kg. To nam daje BTF omjer od otprilike 39. Isto rebro izrađeno je WAAM tehnologijom depozitom od 1,1 kg/h. Konačni BTF omjer bio je 12, što nam daje konačnu uštedu materijala od oko 500 kg. [6]



Slika 13. Izrada rebra za krilo [6]

3.4. Nedostaci WAAM postupka

Naspram mnogih prednosti, WAAM postupak ima i nedostatke. Jedan od najizraženijih su zaostala naprezanje. Zaostala su naprezanja problem koji se javlja i u standardnom zavarivanju. Kod WAAM tehnologije se taloženjem slojeva konstantno jedan na drugi unosi mnogo energije, zbog koje u konačnici dolazi do zaostalih naprezanja. Da bi se to neutraliziralo kod WAAM postupaka pojavljuje se npr. *back to back* način taloženja koji je već prije bio spomenut i pojašnjen. Naknadna obrada jedan je od nedostataka koji je neizbježan. Sama se obrada pokušava reducirati izborom parametara, da bi se osigurao čim manji BTF omjer i time se smanjila količina završne obrade i škarta. Nedostatak koji se iz dana u dan suzbija je nedostatak iskustva sa ovakvom tehnologijom.

3.5. Greške kod WAAM postupka

Greške kod WAAM postupka slične su kao i kod standardnog zavarivanja. Kod WAAM-a se pojavljuju poroznost, ugorine i premalo nadvišenje. Do poroznosti dolazi zbog nedovoljnog

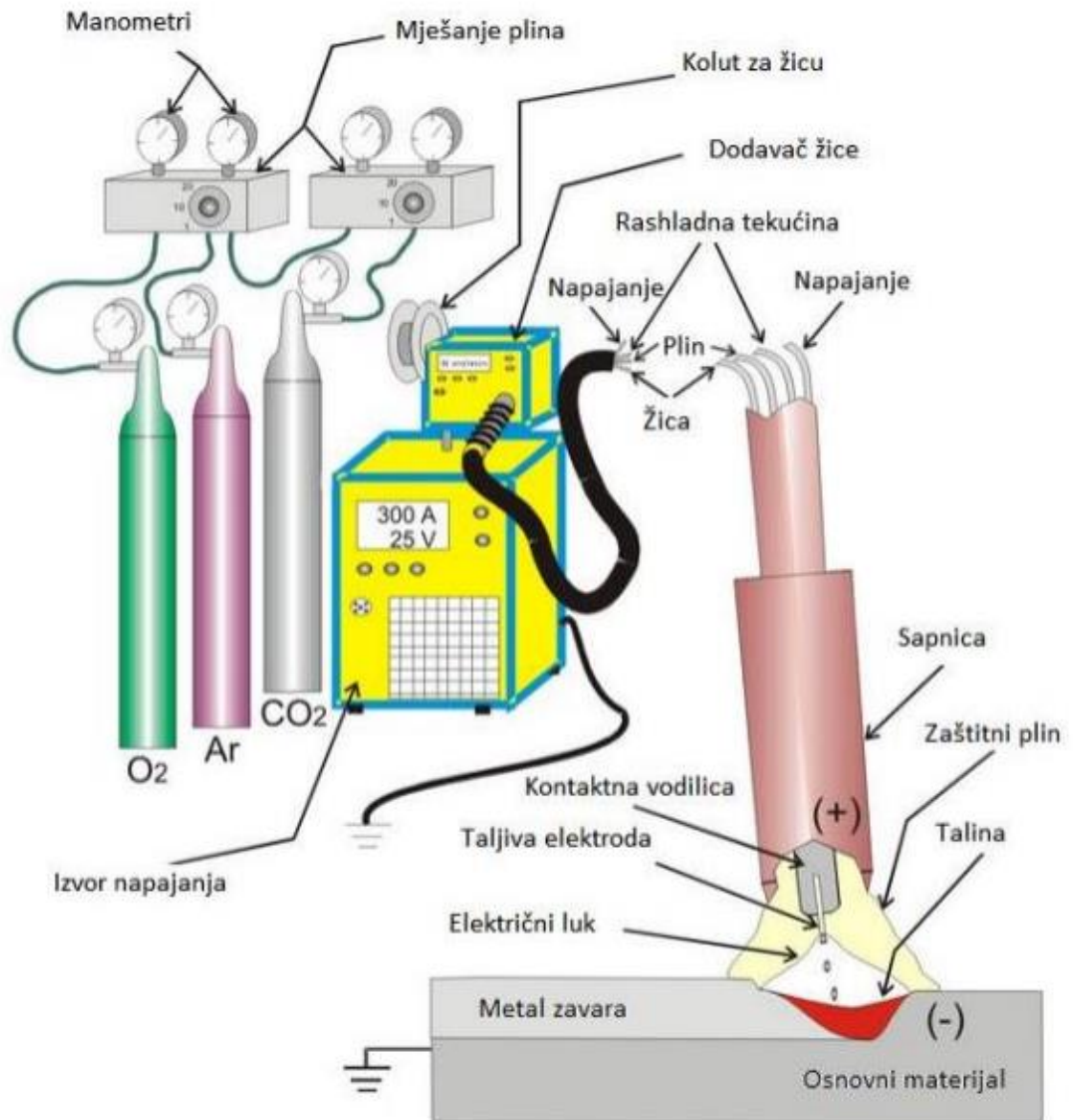
protoka zaštitnog plina, niske čistoće plina, pogrešnih parametara ili čak nečistoća u materijalu. Uz preveliku struju zavarivanja povezuju se ugorine, koje mogu nastati i zbog nedovoljno dodavanja žice, kemijskog sastava materijala ili pogrešnog kuta zavarivanja, dok zbog prebrzog zavarivanja dolazi do premalog nadvišenja.

4. POSTUPCI ZAVARIVANJA KOD WAAM POSTUPKA

Kod WAAM postupka primjenjivo je više postupaka zavarivanja, ovisno o našem proizvodu, parametrima zavarivanja i veličini proizvoda izabiremo postupak koji je najefikasniji. Postupci koji se najčešće koriste kod WAAM zavarivanja su MIG, TIG i plazma. Kod taloženja materijala različitih kemijskih sastava najbolji je TIG postupak. On generira neznatno prskanje i rastaljeni je metal manje aktivan. Kod titana najčešće koristimo plazma zavarivanje. Prednost MIG postupka ispred TIG i plazma zavarivanja je taj što je dodavač žice sastavni dio opreme za zavarivanje.

4.1. MIG/MAG zavarivanje

MIG/MAG (Metal Inert Gas/Metal Active Gas) je postupak elektrolučnog zavarivanja taljivom elektrodom u zaštitnoj atmosferi. To je postupak spajanja metala taljenjem i očvršćivanjem dijela osnovnog metala i dodatnog metala pri čemu se za zaštitu rastaljenog metala koriste inertni, aktivni ili mješavine inertnih i aktivnih plinova. Mješavine plinova se koriste sa svrhom poboljšanja prijenosa metala i svojstava zavarenog spoja. Električni luk se održava između taljive, kontinuirane elektrode u obliku žice u pravilu spojene na pozitivni pol istosmjernog izvora i radnog komada. [7] Ovim postupkom se mogu zavarivati svi komercijalno značajni materijali. Postupak je izuzetno pogodan za mehanizaciju, automatizaciju i robotizaciju.



Slika 14. Prikaz aparata za MIG/MAG zavarivanje

4.2. Parametri zavarivanja

Parametri zavarivanja utječu na stabilnost električnog luka, geometriju zavara, rasprskavanje, stabilnost električnog luka, prijenos metala i cjelokupnu kvalitetu spoja. Najvažniji parametri su napon, struja, brzina zavarivanja, promjer elektrode i slobodni kraj žice.

4.2.1 Napon

O naponu ovisi stabilnost električnog luka kao i njegova duljina i širina. Veza između napona i duljine električnog luka je proporcionalna. Dulji 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. [8]

4.2.2 Struja

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. [8]

4.2.3 Brzina zavarivanja

Povećanjem brzine zavarivanja smanjujemo unos topline u radni komad i depozit samog dodatnog materijala po duljini zavara. Inicijalno se povećanjem brzine može i uzrokovati povećanje penetracije zbog izravnijeg djelovanja električnog luka na sam radni komad. Daljnjim se povećanjem brzine smanjuje penetracija i dolazi do pojave zajeda zbog nedovoljne količine dodatnog materijala.

4.2.3 Slobodni kraj žice

Definira se kao duljina elektrode od kontaktne vodilice do radnog komada. Povećanjem slobodnog kraja žice možemo povećati depozit rastaljenog materijala zbog Joulove topline. Slobodni se kraj žice proteže najčešće od 5 do 15 mm kod zavarivanja kratkim spojevima odnosno do 25 mm kod drugih vrsta prijenosa metala. Jakost struje ovisi direktno o slobodnom kraju žice, povećanjem slobodnog kraja žice dolazi do povećanja otpora i pada jakosti struje. U suprotnom, kod smanjenja slobodnog kraja žice dolazi do pada otpora i povećanja jakosti struje. Zbog toga, tokom samog izvođenja postupka zavarivanja, slobodni kraj žice moramo držati konstantnim da bi penetracija bila konstantna.

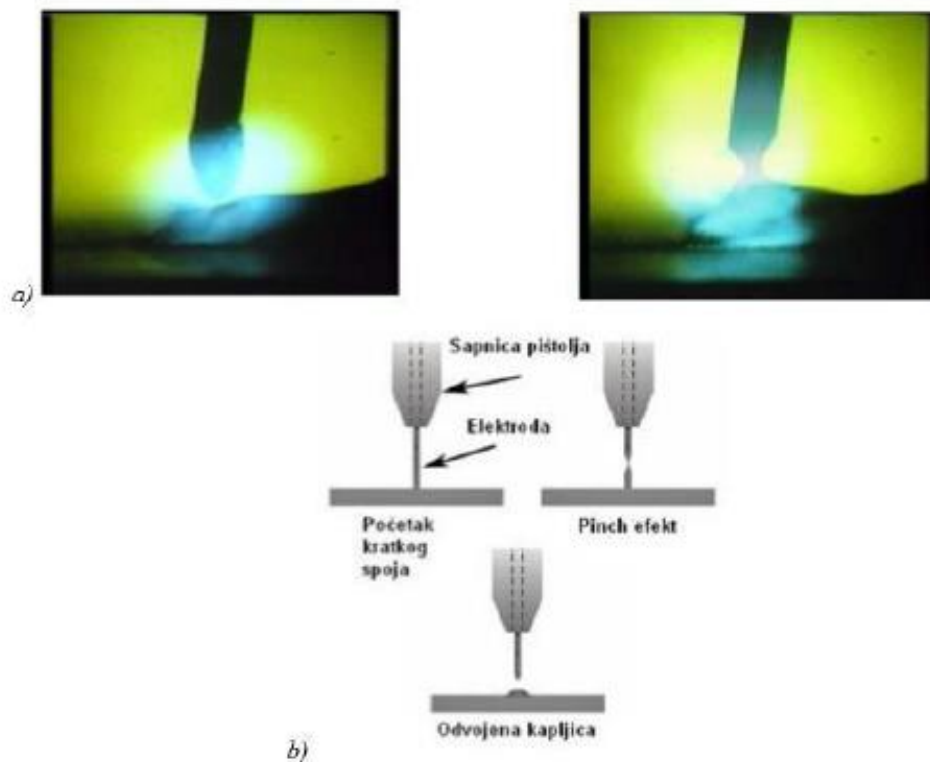
4.3. Načini prijenosa metala

Način prijenosa metala predstavlja let rastaljene kapljice od elektrode 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. [8]

4.3.1 Prijenos metala kratkim spojem

Kod tog se oblika prijenosa metala koriste manji iznosi struje. Prijenos se metala ostvaruje taljenjem kontinuirano dobavljene žice uz pomoć kratkih spojeva koji se pojavljuju. Na dodiru rastaljenog metala i elektrode dolazi do kratkog spoja kojemu vrijednost padne na nulu, a struja naglo postigne visoku vrijednost zbog čega se kapljica odvoji od vrha elektrode. Taj se efekt naziva „pinch effect“. Promjeri žica koje se koriste kod prijenosa kratkim spojem su 0,8 mm, 1,0 mm i 1,2 mm. Sam se postupak ponavlja do 250 puta u minuti.

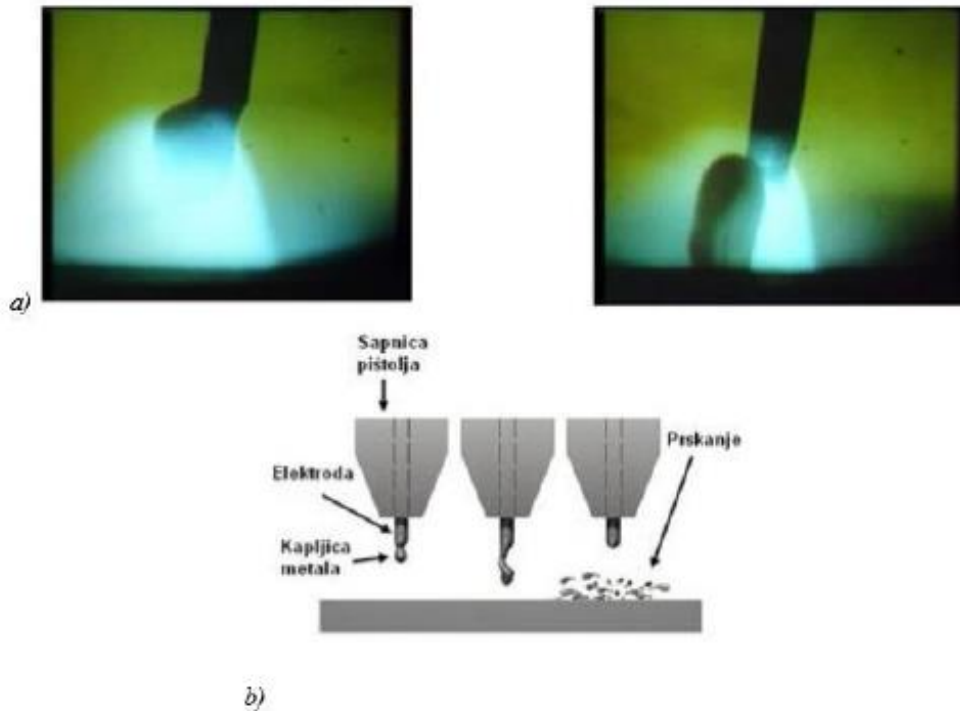


Slika 15. a) realni prikaz prijenosa kratkim lukom; b) shematski prikaz [9]

4.3.2 Prijenos metala mješovitim lukom

Prijenos metala ovim se postupkom djelomično odvija pomoću prijenosa kratkim spojem. Na vrhu žice stvara se kapljica koja se odvaja od žice uz pomoć sila u električnom luku, ali i veliku ulogu

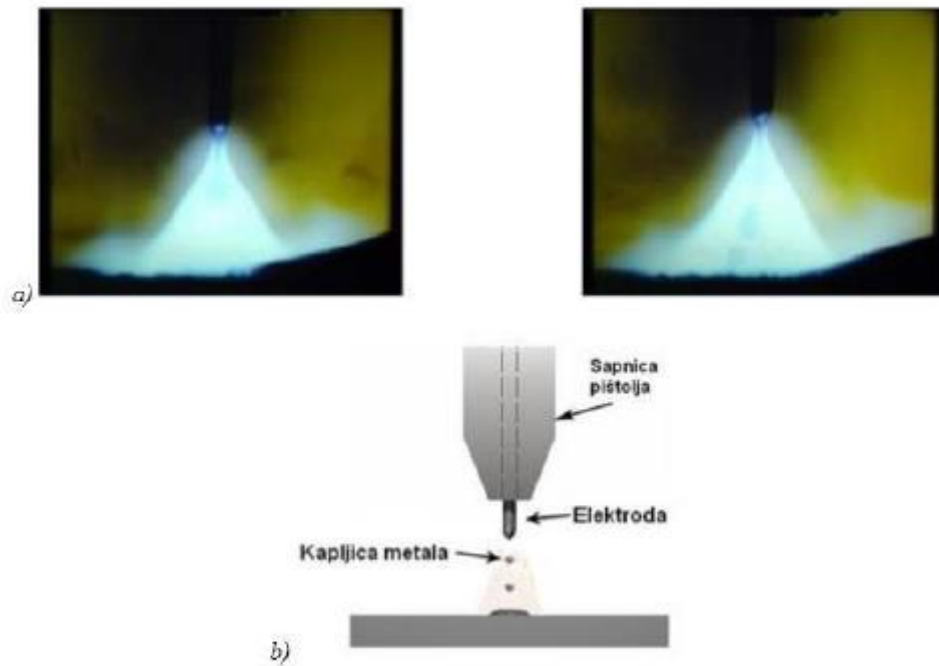
u tom odvajanju ima i gravitacija. Pošto kapljica raste gravitacija postaje sve izraženija i odvaja kapljicu od žice. Ponekad se i dogodi da se kapljica ne odvoji pa dotakne samu talinu, te prilikom toga dolazi do nastajanja kratkog spoja. Najveći problem tog prijenosa je taj što se teško kontrolira pa dolazi do intenzivnog prskanja.



Slika 16. a) realni prikaz prijenosa mješovitim lukom; b) shematski prikaz [9]

4.3.3 Prijenos metala štrcajućim lukom

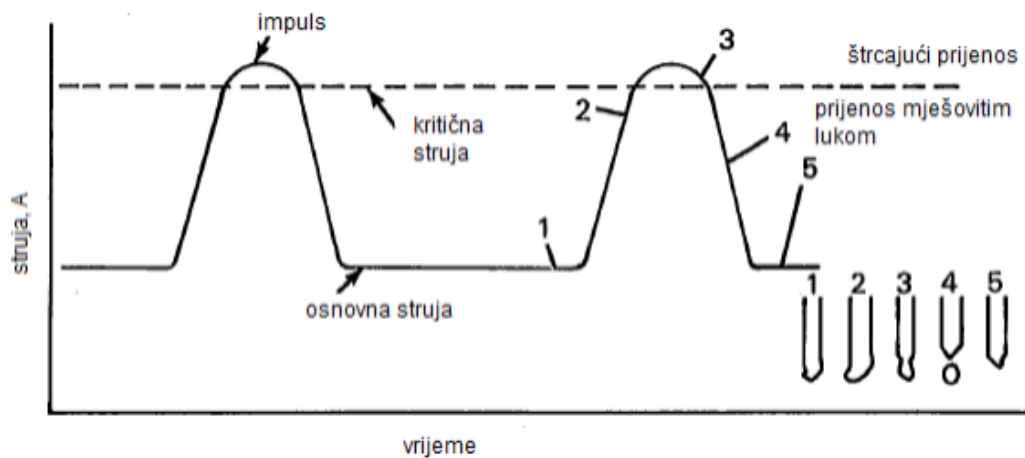
Taj način prijenosa metala karakterizira visoki napon i jake struje samog postupka koje omogućuju stvaranje mlaza finih i sitnih kapljica koje velikim brzinama putuju i udaraju u osnovni materijal. Prijenos metala kod štrcajućeg je luka omogućen električnim lukom bez kratkih spojeva. Struje visoke gustoće omogućuju visoki učinak postupka i čine ga ekonomičnim.



Slika 16. a) realni prikaz prijenosa štrcajućim lukom; b) shematski prikaz [9]

4.3.3 Prijenos metala impulsnim lukom

Korištenje impulsnog luka danas se sve više koristi. Same impulsne uređaje karakteriziraju strujni impulsi određenog trajanja i frekvencija. Time je omogućena dobra kontrola zavarivanja tankih materijala i provarivanja korijena. Prednosti postupka su smanjeno prskanje, stabilan luk i kod manjih struja, jednoličan zavar i mogućnost primjene u svim položajima zavarivanja.



Slika 17. Karakteristika impulsne struje [8]

5. KONSTRUKCIJSKI ČELICI

Opći konstrukcijski čelici obuhvaćaju najširu grupu konstrukcijskih čelika, a najčešće se primjenjuju kod nosivih zavarenih konstrukcija velike mase. Ova skupina čelika najčešće se koristi za izradu mostova, dizalica, nosača, brodskih konstrukcija, dijelova vozila, opreme u industriji nafte i plina i dr.

Konstrukcijski čelici u strojarstvu koriste se kod izrade karakterističnih konstrukcijskih dijelova strojeva i uređaja. Najčešće služe za izradu vratila, osovina, zupčanika, nosača opruga, vijaka, poklopaca, ventila, kućišta itd. S obzirom na mehanička svojstva konstrukcijski čelici moraju imati visoku granicu razvlačenja, dovoljnu plastičnu deformabilnost (radi izbjegavanja pojave krhkog loma), visoku granicu puzanja i čvrstoću pri povišenim temperaturama te zadovoljavajuću žilavost i dinamičku izdržljivost. Pored toga, konstrukcijski čelici moraju biti otporni na trošenje i koroziju, te obradivi odvajanjem čestica (rezanje), zavarljivi, skloni hladnom oblikovanju (savijanje, štancanje, duboko vučenje) itd.

Općenito se konstrukcijski čelici mogu podijeliti na ugljične (nelegirane) i legirane. Konstrukcijski čelici (nelegirani i legirani koji sadrže $C < 0,60\%$) često se primjenjuju za izradu strojeva i uređaja koji rade u neagresivnim sredinama i pri temperaturama od -25°C do 300°C , kao i za nosive i građevinske konstrukcije. [10]

5.1. Svojstva građevinskih čelika

Naziv	Oznaka	Vrijednost
MODUL ELASTIČNOSTI	E	210 000 N/mm ²
MODUL POSMIKA	G	81 000 N/mm ²
POISSONOV BROJ	n	0.3
Koeficijent linearnog toplinskog istezanja	α	$12 \cdot 10^{-6}$ 1/K
GUSTOĆA (zapreminska masa)	γ	7850 kg/m ³

Tablica 1. Svojstva građevinskih čelika [11]

Nominalna kvaliteta	Debljina elementa t^* [mm]			
	$t \leq 40$ mm		$40 \text{ mm} < t \leq 100$ mm	
	f_y [N/mm ²]	f_u [N/mm ²]	f_y [N/mm ²]	f_u [N/mm ²]
S235	235	360	215	340
S275	275	430	255	410
S355	355	510	335	490

Tablica 2. Čvrstoća građevinskih materijala [11]

6. EKSPERIMENTALNI DIO

Svrha eksperimentalnog dijela rada bila je taloženjem materijala pomoću robotiziranog zavarivanja izraditi zidove ko su u konačnici bili vagani, obrađivani i ispitivani. Zidovi su izrađivani sa EZ-SG2 žicom koja je svojstvima slična građevinskim čelicima S235 i S355. Tokom procesa taloženja parametri su zapisivani i tokom ovog rada uspoređivani i komentirani. Najvažniji dio samog eksperimentalnog dijela je određivanje konačnog BTF omjera eksperimentalno.

6.1. Opis eksperimenta

Eksperimentalni dio proveden je u tri dijela, a to su:

- priprema i stezanje podloge za nanošenje zidova
- izrada WAAM zidova od čelika
- izrezivanje uzorka iz zidova i njihovo ispitivanje.

Priprema podloge za WAAM zidove uključivala je pritezanje podloge stegama i čeličnim uporištima kako bi se osiguralo usidrenje čelične podloge zbog velikih deformacija i naprezanja koje se javljaju prilikom samog zavarivanja. Nakon stezanja, podloga na koju su zavareni zidovi očišćena je i pripremljena za početak navarivanja. Kako ne bi došlo do velikih temperaturnih razlika između čelične ploče i navarenih zidova, netom prije početka navarivanja čelična je ploča predgrijana plamenom.

Cilj eksperimenta je bio tokom samog navarivanja držati konstantna 2 parametra, brzinu žice i brzinu samog zavarivanja. Tijekom procesa bilježena je međuprolazna temperatura u tri točke navarenog uzorka nakon svakog prolaza, te visina uzorna na početku, sredini i samom kraju uzorka. Postupak izrade svakog ispitnog zida vodio se do tog trenutka kad nije bila postignuta zadovoljavajuća visina zida od 40 mm do 45 mm. Međuprolazna temperatura koja se nastojala držati tokom procesa bila je oko 150 °C.

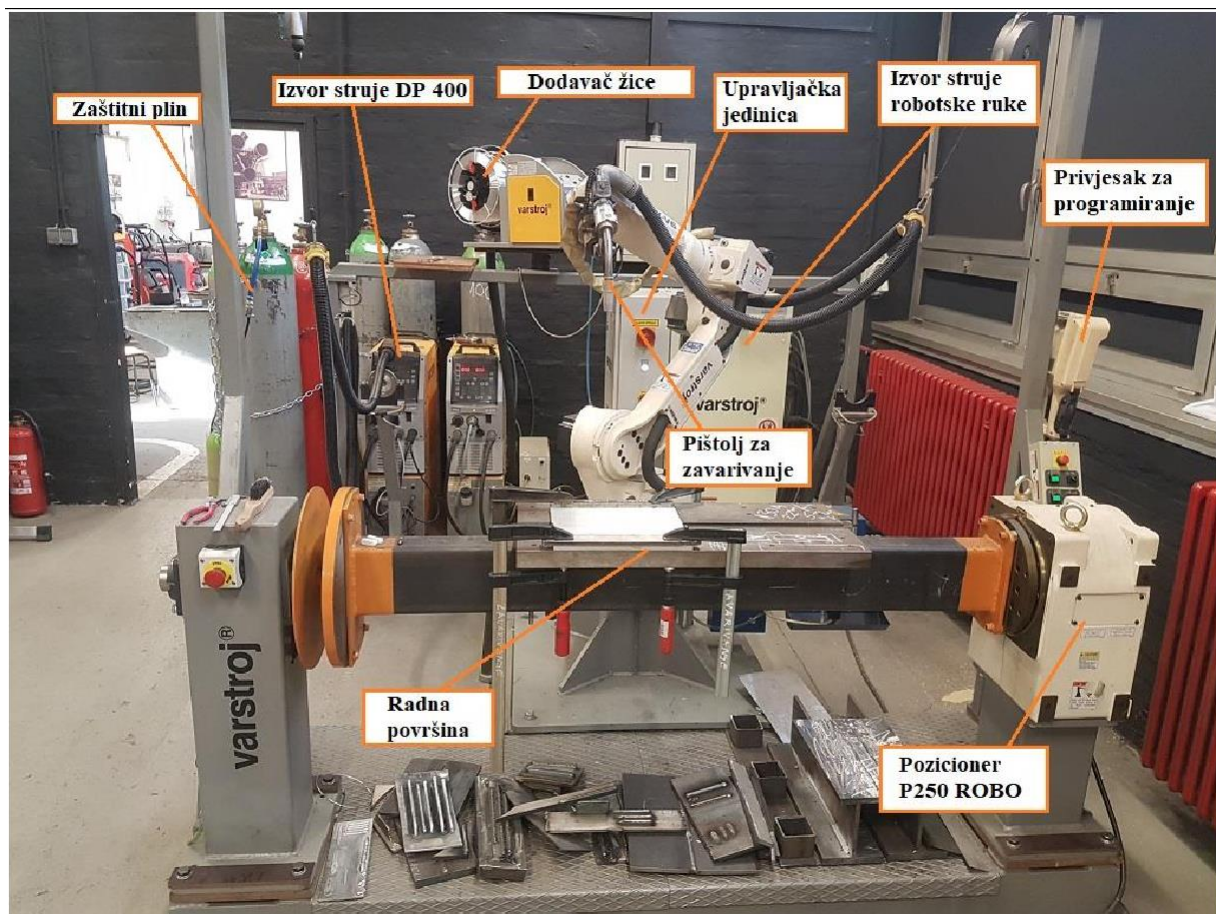
U posljednjem dijelu eksperimentalnog dijela rada, uzorci su mehanički pripremljeni za daljnja ispitivanja. Od svaka od 3 zida odrezana su po 2 primjerka (jedan s lijeve, jedan s desne rubne strane) za makroanalizu i mjerenje čvrstoće. Središnji dio, koji je ostao dugačak oko 200 mm bio je 3D skeniran i nakon toga podvrgnut mehaničkoj obradi da bi se eksperimentalno odredio BTF

omjer. Na kraju svih postupaka, izrađeni uzorci su uspoređeni i komentirani.

6.2. Oprema za zavarivanje

Za izradu zidova korištena je robotska stanica Almega OTC AX V6. Glavni dijelovi robota su robotska ruka sa 6 stupnjeva slobode gibanja koja na sebi ima pištolj za zavarivanje te privjesak za *on-line* programiranje robota. Programiranje se vrši definiranjem putanji gibanja te bilježenjem željenih pozicija zavarivačkog pištolja.

Uz navedena dva dijela, ovaj robot sadrži i *shock* senzor koji služi za sprečavanje značajnijih oštećenja ako bi došlo do kolizije robota s nekim od elemenata iz okoline, uređaje za rezanje žice, čišćenje sapnice te nanošenje sredstva protiv naljepljivanja kapljica. Tu je dodatni izvor struje za TIG postupak zavarivanja te elektrolučni senzor AX-AR. Slika 17 prikazuje spomenuti robot te su na slici navedeni svi njegovi dijelovi.



Slika 18. Robotska stanica Almega OTC AX V6

Za izradu uzoraka korišten je izvor struje za zavarivanje OTC Daihen DP 400, a u tablici 3 prikazane su njegove karakteristike. Ovaj izvor struje omogućuje konvencionalno i impulsno MIG i MAG zavarivanje te REL zavarivanje obloženim elektrodama.

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, A	100 %	283
	50 %	400
Promjer žice za zavarivanje, mm		0,8 – 1,2
Masa, kg		45
Dimenzije (D × Š × V), mm		653 × 300 × 595

Tablica 3. Karakteristike izvora DP 400

6.2.1 Dodatni materijal

Za izradu uzorka korištena je puna žica S355, poprečnog presjeka 1,2 mm. Posjeduje odlična mehanička i antikorozivna svojstva zbog kojih se uglavnom koristi u brodogradnji, automobilskoj i željezničkoj industriji. Također, zavarljivost ove legure je vrlo dobra, a zavar je bez poroznosti ako je pravilno izveden.

S355	Maseni udio elemenata, %							
	C	Si	Mn	P	S	N	Cu	Al
	0,15-0,20	0,30	1,6	0,025	0,015	0,010	0,20	0,015-0,080

Tablica 4. Kemijski sastav S355 [12]

S355	Mehanička svojstva			
	$R_{p0,2}$, MPa	R_M , MPa	Produljenje, %	Temperatura tališta, °C
	355	470 – 630	22	1500 - 1600

Tablica 5. Mehanička svojstva S355 [12]

6.2.2 Zaštitni plin

Plin korišten za zavarivanje je bio u postotku 82% Ar i 18% CO₂. Navedena se mješavina koristi za zavarivanje nelegiranih i niskolegiranih čelika. Argon, koji u većem postotku čini navedenu plinsku mješavinu je bezbojni plemeniti plin bez mirisa, te je gušći od zraka. Najvažnije mu je svojstvo inertnost, zbog čega se svrstava u red idealnih zaštitnih plinova.

6.3. Tijek eksperimenta

Prije samog početka izvođenja eksperimentalnog dijela završnog rada, pripremljena je ploča na koju su zidovi navarivani. Ploča se prije početka navarivanja očistila alkoholom i brusila četkom, kako bi se tokom zavarivanja ostvario što kvalitetniji električni luk. Također se, zbog kvalitetnije provedbe eksperimenta, podloga na koju su se zidovi navarivali predgrijala plinskim plamenom.

Parametri zavarivanja na kojima je tijekom tog eksperimenta bio naglasak bili su brzina žice i brzina navarivanja. Omjer između ta 2 parametra bio je jednak ($\frac{\text{brzina žice}}{\text{brzina zavarivanja}} = 15$) i to je osnova oko koje su se parametri slagali. Kod izrade uzorka 1 brzina žice bila je 495 cm/min, dok je brzina zavarivanja shodno omjeru iznosila 33 cm/min. Prosječan iznos struje kod provođenja navarivanja uzorka 1 iznosio je oko 200A, napona oko 20V, dok se temperatura provođenja držala na oko 150°C. Za izradu uzorka 2 iznos struje se kretao oko 160A, napona oko 18V, a temperatura provođenja procesa ostaje ista, kako za uzorak 2 tako i za uzorak 3, do se iznos struje za izradu uzorka 3 kretao oko 86A, a napona oko 16,5V. Temperatura se kontrolirala tako da je bila mjerena u 3 točke uzorka (lijevo, sredina i desno) Fluke IR Thermimetar uređajem koji beskontaktno mjeri

temperaturu. Također je nakon svakog prolaza, na istim mjestima kako je mjerena i temperatura, bila mjerena i visina.

Zavarivanje je vršeno naizmjenično s lijeva na desno i obrnuto. Ovakve putanje pištolja su korištene da ne bi došlo do uspostave odnosno prekida luka samo na jednoj strani zida što bi dovelo do različite geometrije zida na nasuprotnim stranama. Razlog tome je nešto viša struja kod uspostave električnog luka.

Tablicama 6, 7, i 8 prikazani su očitani parametri zavarivanja i dimenzije nastalog zida nakon svakog prolaza, a slikom 19 prikazano je postepeno nastajanje WAAM zida klasičnim MIG postupkom.

PARAMETRI ZAVARIVANJA – Uzorak 1				
Prolaz	Struja, A	Napon, V	Temperatura, °C	Visina zida, mm
1.	200	19,7	100	2,7
2.	201	20,2	110	4,8
3.	195	20,1	110	6,7
4.	202	19,9	123	8,1
5.	200	20,4	140	9,6
6.	205	20,1	150	11
7.	196	20	150	13
8.	200	20,6	150	14,8
9.	195	20,1	150	16
10.	200	19,8	150	17,5
11.	204	20,2	150	19,5
12.	203	20,4	150	20,4
13.	200	19,8	150	22,4
14.	201	20,1	150	23,7
15.	195	20,5	150	25,3
16.	200	20,3	150	27,2
17.	201	19,5	150	28,6
18.	194	20,4	150	30,5
19.	206	19,9	150	32,1
20.	204	20,1	150	33,8
21.	193	20	150	35,3
22.	200	20,4	150	37,1
23.	207	20,6	150	38,6
24.	203	19,8	150	40,5
25.	195	20,2	150	41,6
26.	204	20,1	150	43,5

Tablica 6. Parametri zavarivanja i geometrije uzorka 1

PARAMETRI ZAVARIVANJA – Uzorak 2				
Prolaz	Struja, A	Napon, V	Temp- eratura , °C	Visina zida, mm
1.	164	17,5	100	3
2.	161	18	110	5,2
3.	158	18	110	7
4.	154	18,3	123	8,3
5.	155	18,1	140	9,5
6.	153	18,3	150	11,6
7.	154	18,1	150	13,5
8.	154	18,2	150	15,2
9.	156	18	150	16,8
10.	150	17,8	150	18,9
11.	151	18,2	150	20,3
12.	156	18	150	21,8
13.	158	18,1	150	23,5
14.	152	18,3	150	25,2
15.	156	18,2	150	26,8
16.	163	17,8	150	28,3
17.	160	18,2	150	30,2
18.	161	18	150	32
19.	158	18,4	150	33,7
20.	160	18,1	150	35,2
21.	157	18,2	150	37
22.	160	18	150	39
23.	155	17,9	150	40,8
24.	160	18,2	150	43

Tablica 7. Parametri zavarivanja i geometrije uzorka 2

PARAMETRI ZAVARIVANJA – Uzorak 2				
Prolaz	Struja, A	Napon, V	Temp- eratura , °C	Visina zida, mm
1.	85	17,8	150	3
2.	87	16	150	6,5
3.	89	16,2	150	7,2
4.	85	16,8	150	9,2
5.	82	16,7	150	11
6.	81	16,4	150	13,2
7.	87	16,9	150	14,8
8.	84	16,4	150	16,9
9.	86	16,5	150	19
10.	85	16,8	150	20,9
11.	83	16,4	150	22,8
12.	82	16,9	150	24,8
13.	89	16,8	150	26,7
14.	84	16,4	150	28,3
15.	82	16,7	150	30,5
16.	85	16,8	150	32,3
17.	87	17	150	34
18.	84	16,5	150	36,22
19.	82	16,8	150	38
20.	84	16,4	150	40
21.	86	16,7	150	42,5

Tablica 8. Parametri zavarivanja i geometrije uzorka 3

Iz tablica koje prikazuju geometriju i parametre zavarivanja jasno je vidljivo da se broj prolaza kod zidova mjenja.

6.4. Priprema uzoraka za ispitivanje

Nakon odvajanja uzoraka, vrši se rezanje rubnih točaka zida na dužini od 10 mm kako bi se dobila što ravnija površina koja je na rubovima nepravilnija zbog uspostave i prekidanja luka te rezanje uzoraka na duljinu od 25 mm iz svakog navarenog zida za daljnje istraživanje. Postupak rezanja vrši se na tračnoj pili.

Nakon izrezivanja uzoraka izvršilo se ručno grubo brušenje brusnim papirom različitih granulacija. Korišteni brusni papiri redom imali su sljedeće oznake: P80, P100, P150, P240, P400, P500. Nakon brušenja uzorci su isprani vodom kako bi se uklonile eventualne nečistoće.

6.5. Makroanaliza strukture

Uzorci 1, 2 i 3 spremni za maakroanalizu prikazani si na slici 20.



Slika 19. Uzorci 1, 2 i 3

Makroanalizom uzoraka nisu uočene veće nepravilnosti na materijalu. Poroznosti također nisu uočene, dok je penetracija u osnovnu ploču vrlo velika i zadovoljavajuća. Neovisno o promjeni parametara, kvaliteta same izrade je skoro identična što je vidljivo sa slike. Linija staljivanja kao i zona utjecaja topline osnovnog i dodatnog materijala jasno je vidljiva na svakom od uzoraka.

6.6. Mjerenje tvrdoće (HV10) uzoraka

Nakon ispitivanja mikrostrukture provedeno je mjerenje tvrdoće uzoraka. Mjerenje tvrdoće provedeno je metodom HV 10. Mjerenje se vršilo od osnovnog materijala prema vrhu uzorka u 15 točaka. U osnovnom materijalu provedena su 2 mjerenja, u ZUT-u 4, dok su provedena mjerenja prema vrhu uzorka bila na razmaku od prosječno 5 mm. Valja napomenuti da su na vrhu uzorka provedena 3 mjerenja tvrdoće na razmaku od 1,5 mm iz razloga što zadnji prolaz nije podvrgnut procesu normalizacije jer nema prolaza koji slijede iza njih. Dobiveni rezultati mjerenja prikazani su u tablici 9.

Tvrdoća HV 10				
Mjerenja		Uzorak 1	Uzorak 2	Uzorak 3
OSNOVNI MATERIJAL	1.	145	146	151
	2.	149	167	157
ZUT	3.	165	203	178
	4.	182	206	182
	5.	189	187	187
	6.	181	179	176
DUŽ UZORKA	7.	176	175	176
	8.	166	175	173
	9.	172	176	178
	10.	171	163	170
	11.	180	172	172
	12.	176	177	175
VRH UZORKA	13.	170	181	197
	14.	196	199	197
	15.	199	198	198

Tablica 9. Rezultati mjerenja tvrdoće

Iz dobivenih se rezultata približno dočarava raspodjela tvrdoće duž cijelog uzorka. Kod svakog je uzorka vidljivo da je u ZUT-u došlo do značajnog porasta tvrdoće, u središnjem dijelu uzorka dolazi do pada i stabilizacije tvrdoće. Kod vrha uzorka opet je vidljiv značajan porast tvrdoće.

6.7. Ispitivanje i analiza parametara teksture površine

Provedba ovog ispitivanja vršila se 3D skenerom DAVID video SLS-2 povezanim na računalo. Radi se o sustavu sa jednim projektorom i jednom kamerom. Projektor ima zadatak projiciranja svjetlosnog uzorka na predmet skeniranja, a kamera na temelju toga može jednoznačno odrediti prostorni položaj bilo koje točke na uzorku (na površini koja se skenira). Također treba napomenuti da prije početka skeniranja treba uređaj kalibrirati, a nakon toga njegov položaj mora ostati konstantan i nepromijenjen kod skeniranja sva četiri uzorka.

Prilikom provedbe ispitivanja nastojalo se postići zatamnjenje prostorije u kojoj se provodilo ispitivanje. Prije početka skeniranja svi uzorci su se očistili alkoholom te je nanesen bijeli razvijač sprej kako bi se postigli što kvalitetniji rezultati. Na slici 21 prikazan je postupak provedbe skeniranja.



Slika 20. Prikaz postupka 3D skeniranja

Nakon skeniranja provedeno je rezanje dobivenih uzoraka u Microsoft programu Print 3D te njihovo spremanje u STL formatu što je ujedno posljednji postupak pripreme uzoraka za provedbu ispitivanja parametara teksture površine.

Skenirani uzorci bili su obrađeni u programu MountainsMap. Objašnjenja dobivenih parametara objašnjena su u nastavku.

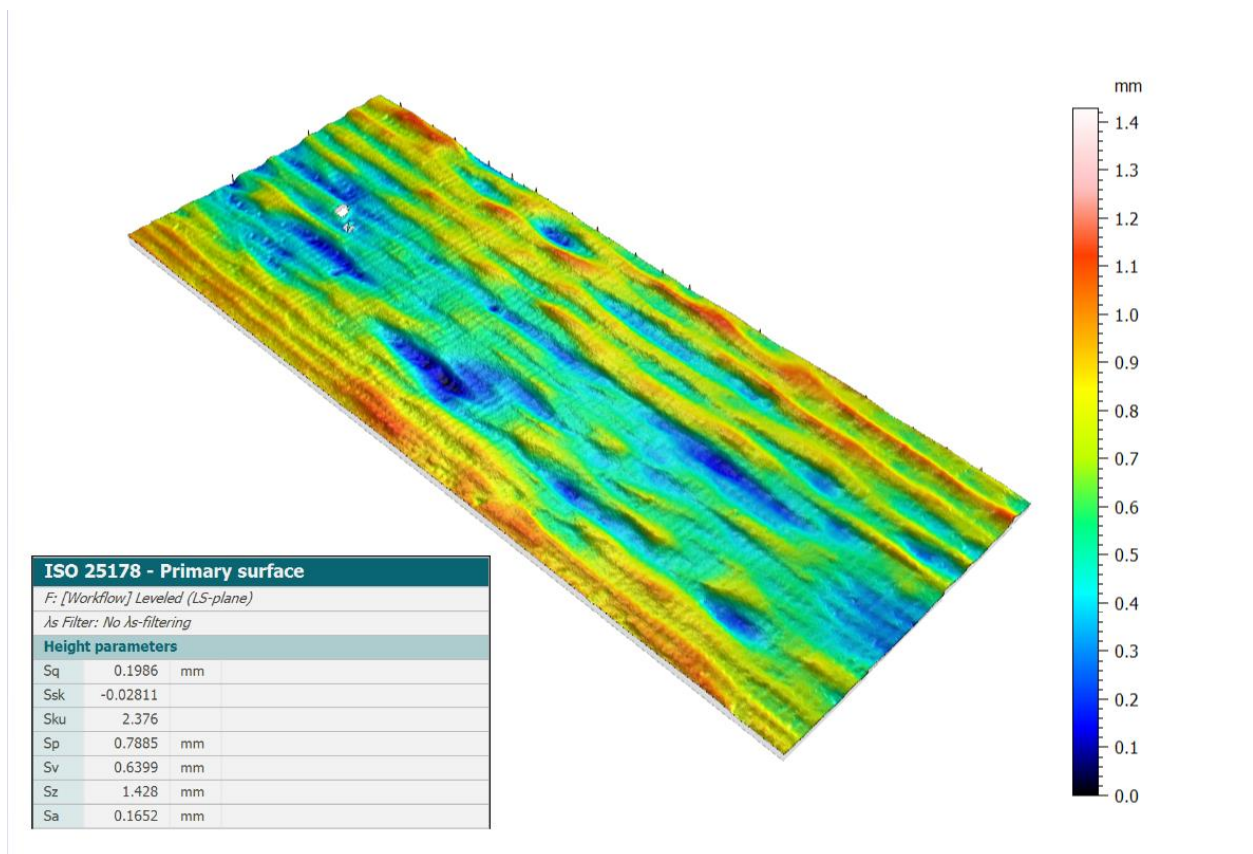
Sq i Sa parametri nazivaju se prosječna visina neravnina (engl. *Average Roughness*) i srednja kvadratna visina neravnina (engl. *Root Mean Square Roughness*), a ocjenjuju se na cijeloj skeniranoj površini. Ovi parametri predstavljaju ukupnu mjeru teksture koja obuhvaća površinu. Neosjetljivi su u vrhovima, udubinama i razmacima različitih značajki teksture. Zbog toga vrijednosti ovih parametara mogu biti varljive kod mnogih površina sa izrazito različitim značajkama prostorne i visinske simetrije. Dakle, mogu se dobiti slični rezultati Sq i Sa parametra,

za dvije tekstualno potpuno različite površine što ukazuje na slabu osjetljivost ovih parametara. Međutim, kada se utvrdi vrsta površine, ovi parametri mogu otkriti značajna odstupanja u površinskim karakteristikama. Parametar S_q se karakteristično koristi za analizu neobrađenih površina dok se S_a koristi za mehanički obrađene površine. [13]

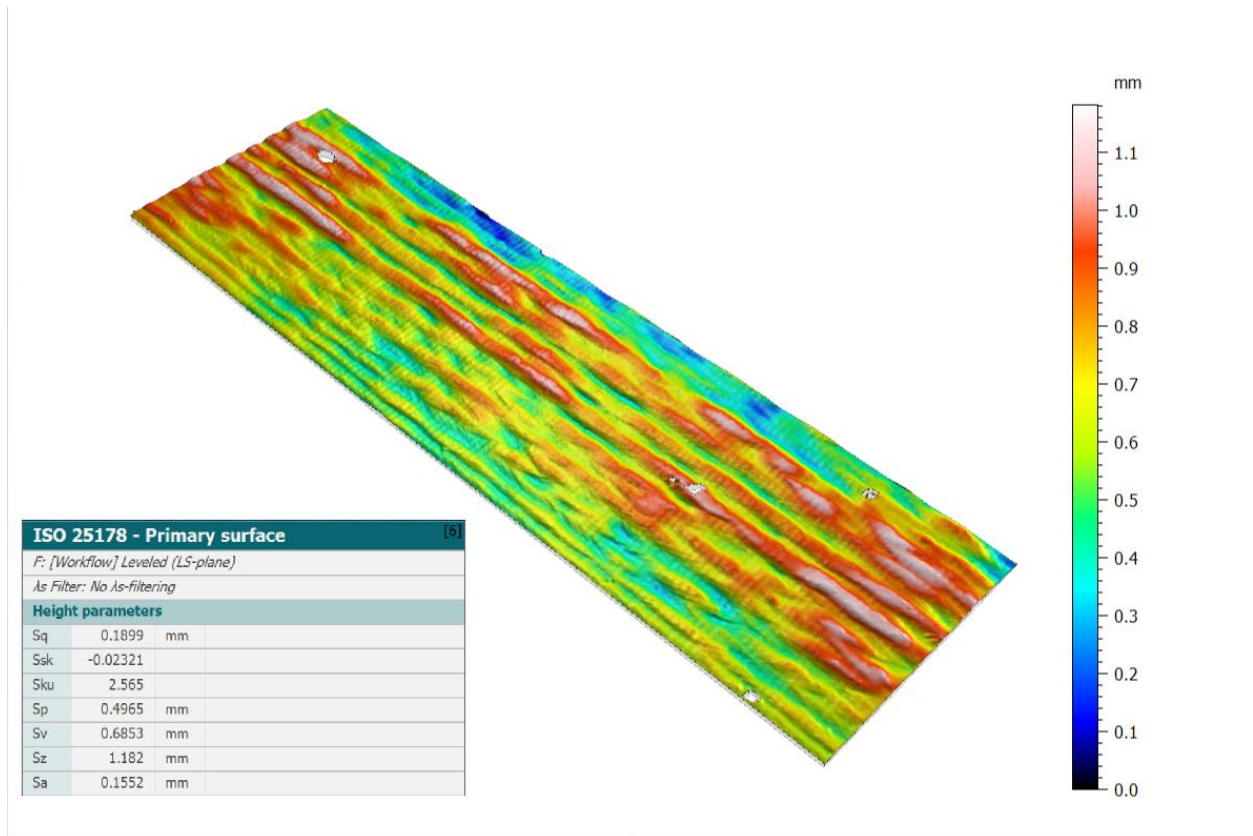
S_{sk} i S_{ku} oznake koje označavaju parametar asimetrije (engl. *Skewness*) i parametar spljoštenosti (engl. *Kurtosis*). S_{sk} predstavlja stupanj simetrije površinskih nadvišenja oko srednje ravnine. S_{sk} indicira prevlast vrhova, tj. ($S_{sk} > 0$) ili prevlast udubina ($S_{sk} < 0$) koje obuhvaća promatrana površina. Parametar S_{ku} ukazuje na prisutnost neuobičajeno visokih vrhova i udubina ($S_{ku} > 3,00$) ili njihov manjak ($S_{ku} < 3,00$) koji čine teksturu. Ako se visine neravnina ponašaju po normalnoj krivulji, tada je vrijednost S_{sk} 0.00 a S_{ku} 3.00. Površine koje se opisuju kao postupno promjenjive bez ekstremnije izraženih vrhova i udubina imaju tendenciju vrijednosti S_{ku} manju od 3.00. Parametar S_{sk} vrlo je koristan kod brušenih površina i praćenja različitih tipova trošenja. [13]

Parametar S_p označava maksimalnu visina vrha (engl. *Max Peak Height*), parametar S_v maksimalnu vrijednost udubine (engl. *Max Valley Depth*), a parametar S_z maksimalna visina površine (engl. *Max Height of Surface*). Ovi parametri procjenjuju apsolutno najviše i najniže točke pronađene na površini. Parametar S_z određuje se oduzimanjem vrijednosti najviše i najniže zabilježene točke ($S_z = S_p - S_v$). Budući da se ovi parametri pronalaze iz pojedinih točaka, kod njih postoji tendencija rezultiranja u neponovljivim mjerenjima. Stoga, prilikom korištenja ova tri parametra potrebno je pravilno postaviti prostorne pojasne širine kako bi se uklonili nepravilni vrhovi i udubine te prosječna višestruka mjerenja na slučajnim mjestima uzduž uzorka s ciljem dobivanja statistički značajnog rezultata. Tipična primjena parametra S_z pronalazi se kod pjeskarenih i prevlačenih površina. Parametar S_p može naći primjenu kod površina koje će se koristiti u kliznom kontaktu dok parametar S_v za analizu površina u kojima postoji mogućnost zadržavanja fluida u udubinama, kao što su sustavi premazivanja i podmazivanja. [13]

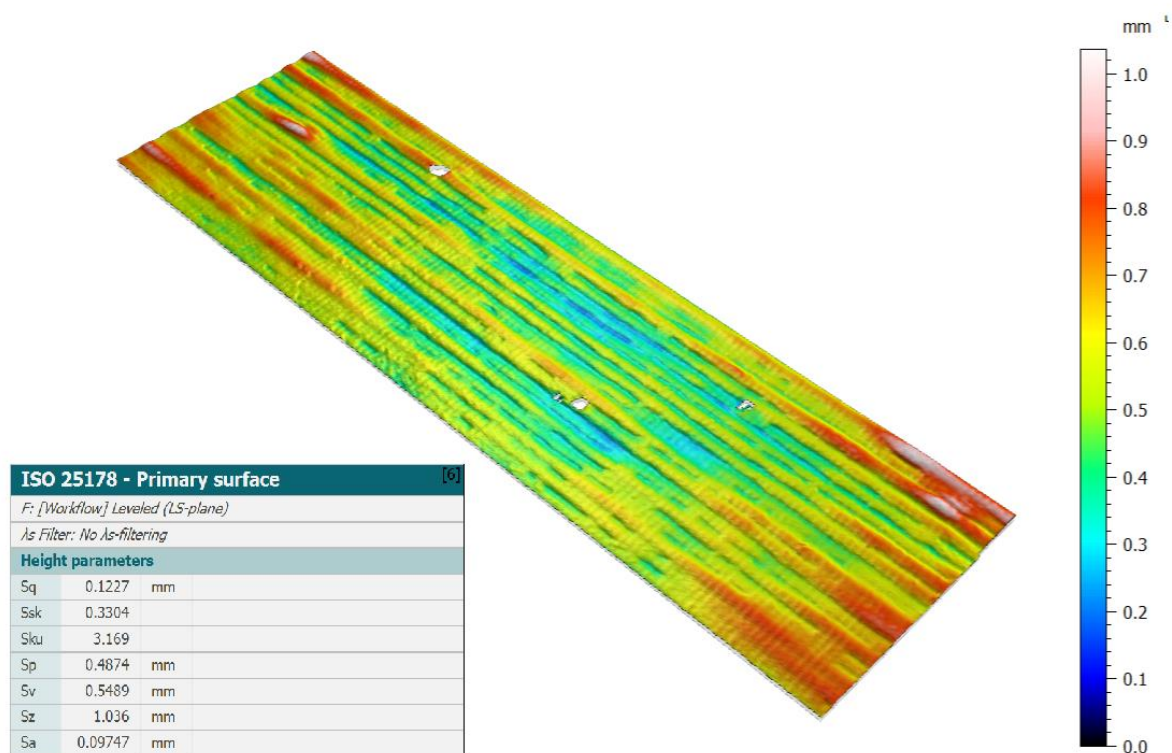
Na slici 21, 22 i 23 prikazani su parametri površina i slike neravnina na uzorcima 1, 2 i 3.



Slika 21. Parametri teksture površine uzorka 1

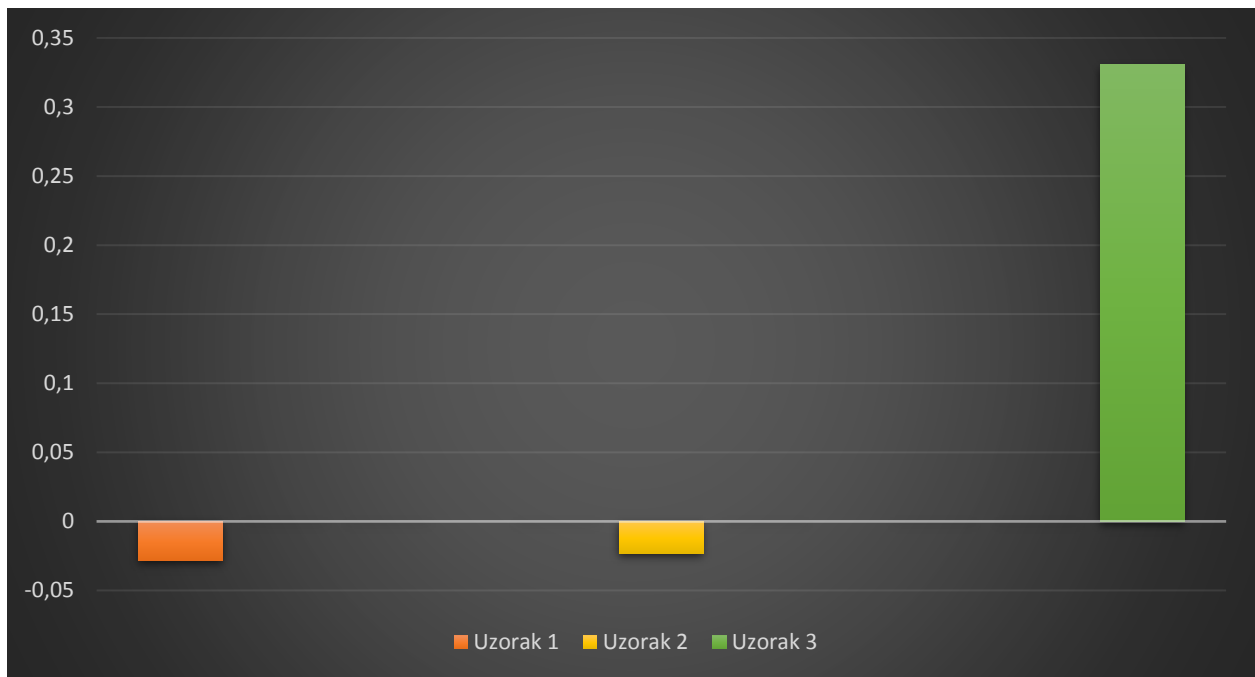


Slika 22. Parametri teksture površine uzorka 2



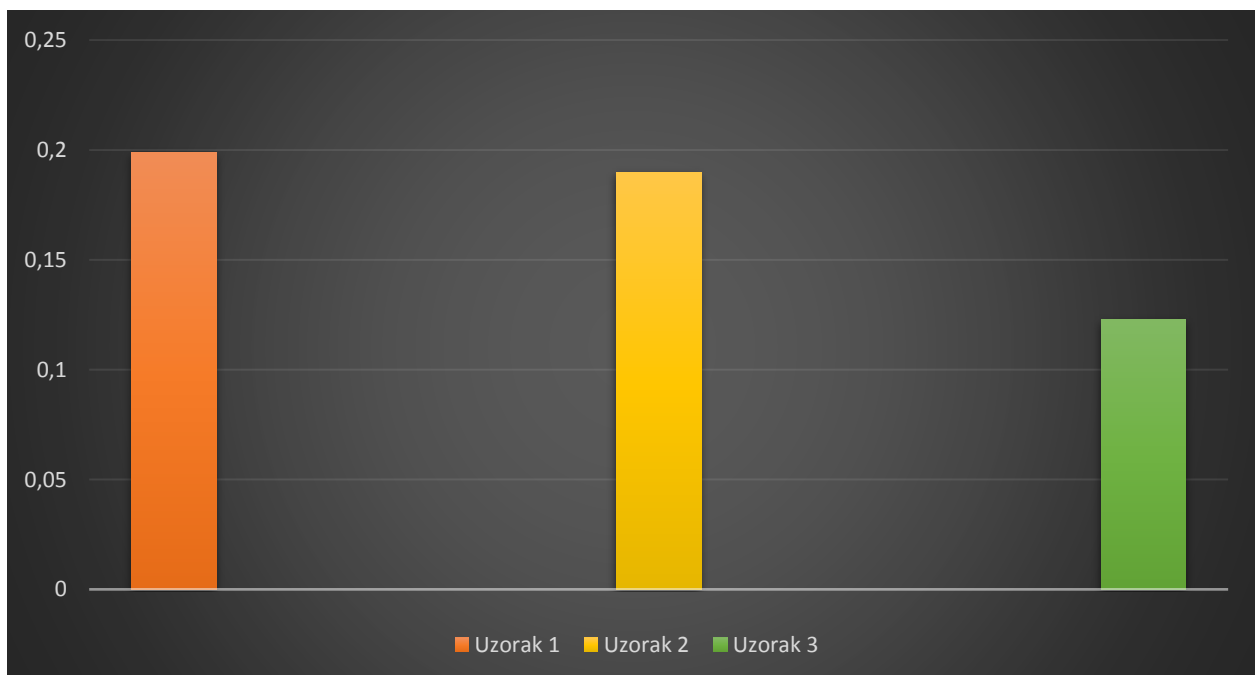
Slika 23. Parametri teksture površine uzorka 3

Analizom parametara dobivenih MountainsMap-om, iz vrijednosti parametra Ssk možemo zaključiti da kod uzoraka 1 i 2 prevladavaju udubine, dok su kod uzorka 3 izraženiji vrhovi. Na slici 25 Prikazan je dijagram vrijednosti parametra Ssk.



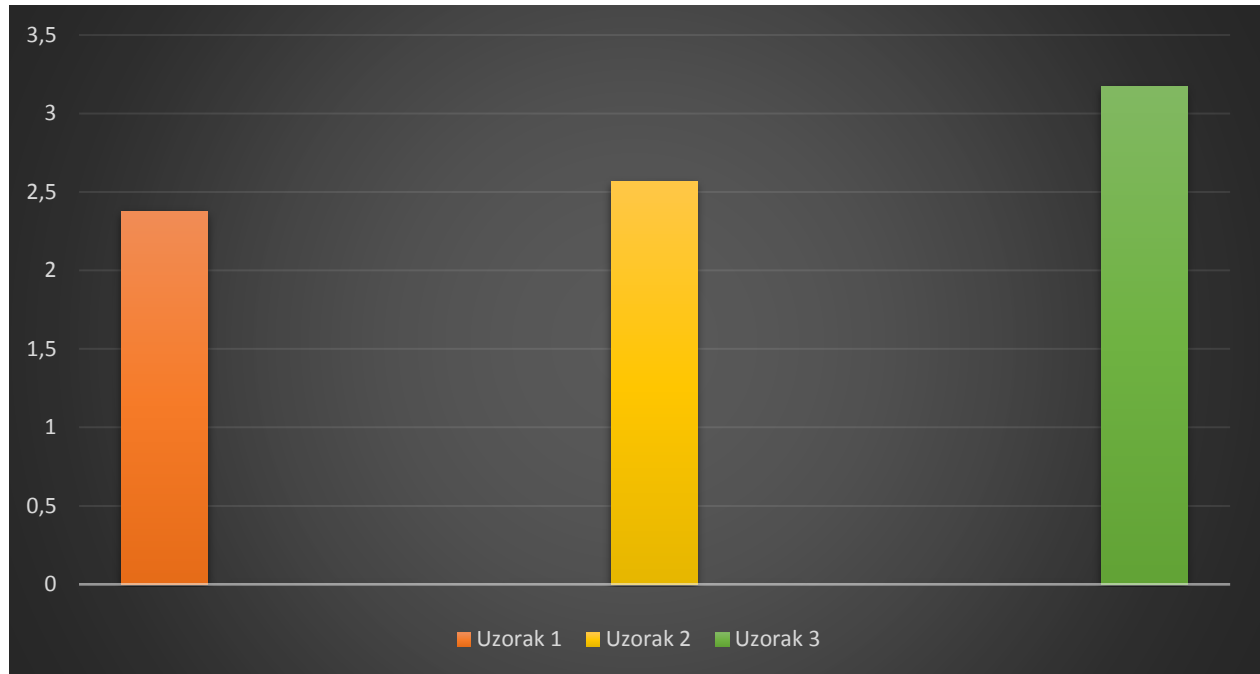
Slika 24. Dijagram vrijednosti parametra Ssk

Sljedeći parametar, prosječna visina neravnina, prikazan je na slici 26. Sq je najveći kod uzorka 1 i kako se brzina zavarivanja i brzina žice kod samog postupka smanjivala tako se i smanjuje Sq parametar.



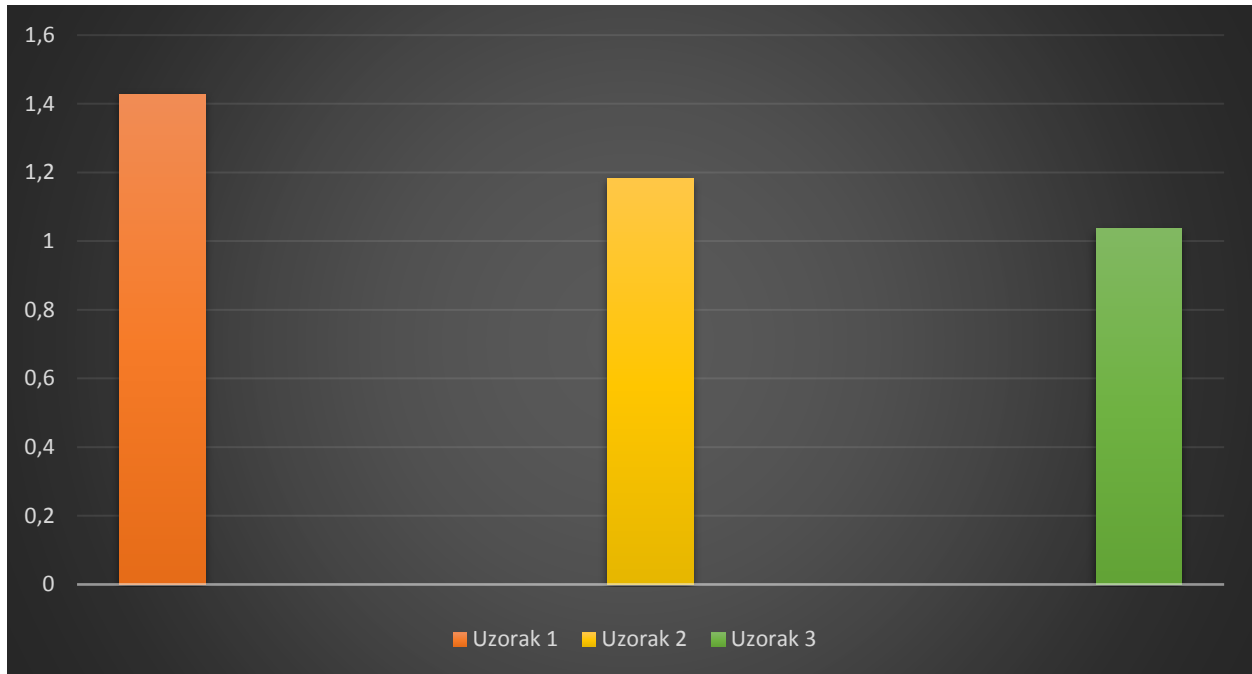
Slika 25. Dijagram vrijednosti parametra Sq

Vrijednosti parametara Sku kod uzoraka 1 i 2 nalazi se ispod vrijednosti 3.00 što označuje da su površine tih uzoraka bez ekstremnije izraženih vrhova i udubina, dok je kod uzorka 3 ta vrijednost blago iznad 3.00 što označuje prisutnost ekstremnijih vrhova i udubina na površini uzorka. Na slici 27 prikazan je dijagram sa vrijednostima parametra Sku za uzorke.



Slika 26. Dijagram vrijednosti parametra Sku

Posljednji parametar uzet u analizu je Sz, koji označuje maksimalnu visinu promatrane površine, tj. razliku između najviše i najniže izmjerene točke na površini. Ovaj parametar najviši je za uzorak 1, za uzorak 2 nešto manji i za uzorak 3 najmanji, što nam govori da je površina uzorka 3 najravnija. Dijagram vrijednosti parametra Sz prikazan je na slici 28.

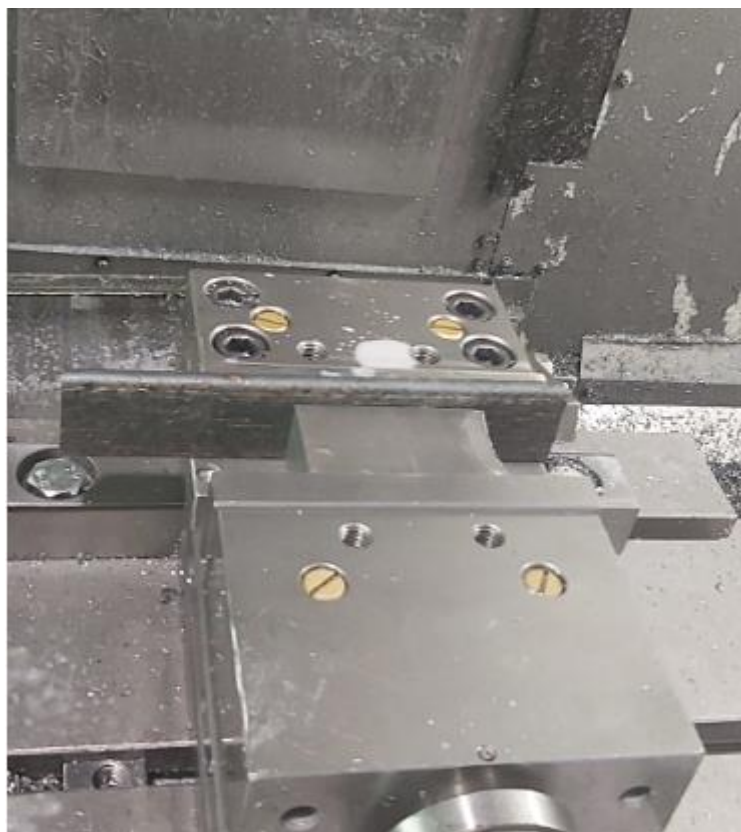


Slika 27. Dijagram vrijednosti parametra Sz

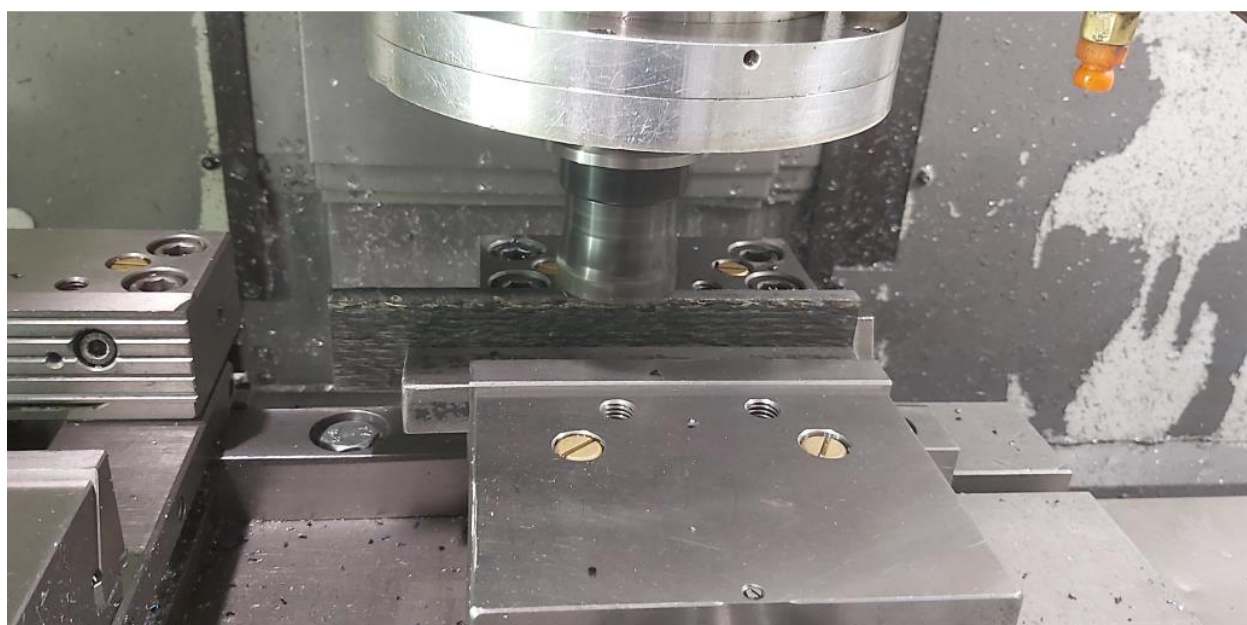
6.8. Analiza BTF omjera

Nakon što je provedena makroanaliza i izmjerena tvrdoća, zidovi su izvagani i nakon toga podvrgnuti strojnoj obradi, kako bi se pomoću mase prije i nakon obrade odredio BTF omjer i kako bi se pomoću toga mogla komentirati efikasnost postupka.

Uzorci su bili obrađivani na glodalici marke Hurco. Slike prikaza obrade nalaze se u nastavku.



Slika 28. Prikaz pritezanja uzorka



Slika 29. Prikaz obrade uzorka



Slika 30. Prikaz obrađenog uzorka

Nakon odstranjivanja krajeva koji su bili iskorišteni za makroanalizu i mjerenje tvrdoće, središnji dijelovi svakog uzorka, dugački 200 mm, izvagani su. Masa uzorka 1 iznosila je 588 g, uzorka 2 552 g, a uzorka 3 488 g. Nakon toga, uzorci su podvrgnuti strojnoj obradi i ponovo izvagani. Masa uzorka 1 nakon obrade iznosi 414 g, uzorka 2 400 g i uzorka 3 366 g.

$$BTF_{uzorak1} = \frac{588}{414} = 1,42$$

$$BTF_{uzorak2} = \frac{552}{400} = 1,38$$

$$BTF_{uzorak3} = \frac{488}{370} = 1,32$$

Iz dobivenih vrijednosti BTF omjera pojedinačno za svaki uzorak, može se zaključiti da što je kod provođenja postupka brzine žice i zavarivanja manja BTF omjer ispada manji, tj. sam proces je isplativiji i efikasniji.

7. ZAKLJUČAK

WAAM postupak u današnjem se svijetu sve više proučava i istražuje. Zbog svoje jednostavnosti i ne prevelikih zahtjeva za samo provođenje procesa razvoj se samog postupka sve više potiče. U ovom završnom radu izrađena su 3 uzorka primjenom navedenog postupka u svrhu dokazivanja promjene geometrije i kvalitete postupka s obzirom na dva glavna parametra, brzinu žice i brzinu zavarivanja.

Cilj eksperimentalnog dijela završnog rada bio je pomoću određenih parametara ispitati koji su optimalniza provođenje samog postupka. Izrađeni su uzorci postigli vrlo zadovoljavajuću razinu kvalitete. Iz konačnog izračuna BTF omjera zaključeno je da je uzorak 3 ispao optimalan, tj. gubitak mase je kod njega bio najmanji, a samim time BTF omjer najveći. Kod uzoraka se moglo primjetiti kako je sa smanjivanjem brzine žice i brzine zavarivanja padao i broj prolaza koji su bili potrebni da bi se dostigla željena visina uzorka, pa se iz toga može zaključiti da je razlog tome manji unos topline, pa i samim time, manje “razlijevanje” navarenog materijala.

Kod mjerenja tvrdoće korištena je metoda po Vickersu (HV10). Svaki je uzorak bio mjeren u 15 točaka, da bi se što vjernije prikazao raspored tvrdoće duž uzorka i ZUT-a. Svi su uzorci nakon mjerenja imali vrlo slične tvrdoće iz čega se može zaključiti da sam izbor parametara nije utjecao na faktor tvrdoće.

Analiza parametara teksture površine provedena je da bi se mogli dobiti podaci o kvaliteti izrade površine za pojedini uzorak. Iz same je analize vidljivo da je promjena parametara uvelike utjecala na teksturu i kvalitetu dobivene površine, što se moglo iščitati iz dobivenih tablica i parametara koji se nalaze u tablici. Kvaliteta površine je rasla sa smanjenjem parametara, tj. sa smanjenjem brzine žice i brzine zavarivanja.

Posljednje ispitivanje i analiza koja je provedena bila je analiza BTF omjera pomoću mase prije i poslije strojne obrade uzoraka. Iz toga se ponovo moglo zaključiti da je tekstura blisko povezana s BTF omjerom, pošto je uzorak koji je imao kvalitetniju površinu imao bolji BTF omjer.

Nakon završetka svih analiza i ispitivanja dolazi se do zaključka da izborom parametara zavarivanja uvelike možemo utjecati na kvalitetu provođenja postupka i finalne kvalitete proizvedenog uzorka. Ovaj postupak zavarivanja omogućuje smanjeni unos topline koji sa sobom

nosi brojne prednosti kao što su ušteda energije, veća preciznost, manje deformacije, uz mogućnost zavarivanja sa vrlo niskim parametrima, koji omogućuju WAAM-u izradu proizvoda manjih debljina. Daljnji razvoj i istraživanje ovog postupka zavarivanja za primjenu u WAAM tehnologiji mogao bi se usmjeriti na kombinaciju niskih i visokih parametara zavarivanja, te izradu proizvoda složenije geometrije sa različitim debljinama stjenki.

8. LITERATURA

- [1] <https://additivemanufacturing.com/basics/>
- [2] <https://phys.org/news/2017-12-additive.html>
- [3] A. Pilipović: Iz svijeta plastike i gume, članak: Aditivna proizvodnja, 2013
- [4] <https://phys.org/news/2017-12-additive.html>
- [5] https://conferences.ncl.ac.uk/additivemx/ponencias/Filomeno_Martina_Mexico_short.pdf
- [6] https://www.researchgate.net/publication/277921887_WireArc_Additive_Manufacturing
- [7] Kralj, S., Andrić, Š.: Osnove zavarivačkih i srodnih postupaka; Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 1992.
- [8] Krišto, Mate – Primjena legure Inconel625 za aditivnu proizvodnju električnim lukom i žicom, Zagreb 2017.
- [9] Brumec, Gašpar - *Zavarivanje cjevovoda MAG postupcima*, Zagreb 2010.
- [10] Fembar, Saša – Analiza svojstava konstrukcijskih i alatnih čelika, Karlovac 2016.
- [11] http://gfosweb.gfos.hr/portal/images/stories/studij/strucni/metalne-konstrukcije/1_sastav%20i%20vrste%20celika.pdf
- [12] https://www.thyssenkrupp-steel.com/media/content_1/publikationen/precision_steel/produktinformationen_1/baustahl/thyssenkrupp_s355jr_product_information_precision_steel_en.pdf
- [13] https://www.michmet.com/3d_s_height_parameters.htm

PRILOG

I. CD-R disc