Optimizacija aditivne proizvodnje električnim lukom i žicom pri izradi zida u zidnom (PC) položaju

Jurlina, Vedran

Undergraduate thesis / Završni rad

2021

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

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:609501

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-28**

Repository / Repozitorij:

Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb







SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Vedran Jurlina

Zagreb, 2021.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor: Student:

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

Zagreb, 2021.

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

Zahvaljujem se svim djelatnicima Katedre za zavarene konstrukcije, Fakulteta strojarstva i brodogradnje na predanom znanju tokom studija te pomoći i strpljenju pri izradi Završnog rada, a pogotovo izv. prof. dr. sc. Ivici Garašiću i višem asistentu mag. ing. mech. Ivanu Juriću. Također zahvaljujem svojoj obitelji i prijateljima na pruženoj podršci tijekom studija.

Vedran Jurlina

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: **602 - 04 / 21 - 6 / 1**	
Ur.broj: **15 - 1703 - 21 -**	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Vedran Jurlina** Mat. br.: 0035212632

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Optimizacija aditivne proizvodnje električnim lukom i žicom pri izradi zida u zidnom (PC) položaju**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Optimization of Wire and Arc Additive Manufacturing for Fabrication of Wall in Horizontal-Vectical Position**

Opis zadatka:

U teorijskom dijelu rada ukratko opisati aditivnu proizvodnju električnim lukom i žicom te navesti najčešće postupke zavarivanja koji se za tu tehnologiju koriste. Detaljno opisati robotizirano zavarivanje MAG postupkom. Opisati problematiku zavarivanja u prisilnim položajima s posebnim naglaskom na zidni položaj zavarivanja.

U eksperimentalnom dijelu odrediti optimalno područje parametara za izradu zida aditivnom proizvodnjom električnim lukom i žicom u zidnom položaju. Analizom značajki teksture površine i makroanalizom ocijeniti primijenjene parametre.

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

Zadatak zadan:
30. studenoga 2020.

Datum predaje rada:
1. rok: 18 veljače 2021.
2. rok (izvanredni): 5. srpnja 2021.
3. rok: 23. rujna 2021.

Predviđeni datumi obrane:
1. rok: 22.2. – 26.2.2021.
2. rok (izvanredni): 9.7.2021.
3. rok: 27.9. – 1.10.2021.

Zadatak zadao:

Izv. prof. dr. sc. Ivica Garašić

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Branko Bauer

SADRŽAJ

SADRŽAJ I
POPIS SLIKA II
POPIS TABLICA IV
POPIS OZNAKA V
SAŽETAK VII
SUMMARY VIII
UVOD. 1
1. WAAM postupak zavarivanja 3
2.1 Provedba postupka sa pojedinačnim koracima 4
2.2 Prednosti i nedostaci 6
2.3 Najčešći postupci zavarivanja kod WAAM tehnologije 7
3.1 Uvod u MIG/MAG postupak 11
3.2 Sile prilikom zavarivanja 12
3.3 Prijenos metala 14
3.3.1 Prijenos metala kratkim spojevima 15
3.3.2 Prijenos metala štrcajućim lukom 17
3.3.3 Prijenos metala mješovitim lukom 18
3.3.4 Prijenos metala pulsirajućim lukom 19
3.3.5 Prijenos metala strujama visoke gustoće 21
3.4.1 Općenito o industrijskim robotima 23
3.4.2 Podjela industrijskih robota prema različitim komponentama 23
3.4.3 Podjela po načinu upravljanja hoda 24
3.4.4 Podjela po geometriji radnog prostora 24
3.5 Glavne komponente robotske stanice za MIG/MAG zavarivanje 27
3.5.1 Robot za zavarivanje 27
3.5.2 Izvor struje 28
3.5.3 Računalo i upravljačka ploča 29
3.5.4 On-line, off-line i hibridna metoda programiranja 30
3.5.5 Dodatne komponente robotske stanice za MIG/MAG zavarivanje 30
3.5.5.1 Uređaji za pozicioniranje 31
3.5.5.2 Pištolj za zavarivanje i dodavač žice 32
3.5.5.3Oprema za čišćenja pištolja 33
3.5.5.4 Senzori kod robotiziranog zavarivanja 33
4. Zavarivanje u prisilnim položajima 35
4.1 Zavarivanje u zidnom položaju 35
5. Eksperimentalni dio 39
5.1 Pred eksperiment 41
5.2 Eksperiment 42
5.3 Rezanje i priprema za analizu 48
5.4 Analiza tvrdoće 50
5.5 Analiza mikrostrukture i makrostrukture 52
5.6 Analiza parametara teksture površine 55
6. ZAKLJUČAK 59
LITERATURA 60

POPIS SLIKA

Slika 1. Shematski prikaz položaja zavarivanja sa istaknutim PC položajem zavarivanja [1] 2
Slika 2. Klasični WAAM sustav [2] 3
Slika 3. Izrada WAAM komada (lijevo), djelomično strojno obrađen komad (desno) [2] 4
Slika 4. Shema WAAM postupka [2] 5
Slika 5. Proizvodnja Fe_3Al korištenjem WAAM tehnologije [2] 6
Slika 6. Zid izrađen WAAM postupkom [3] 8
Slika 7. Prikaz aditivnih tehnologija za metale [4] 9
Slika 8. Prikaz WAAM tehnologije koristeći TIG postupak zavarivanja [5] 9
Slika 9. Prikaz WAAM tehnologije korištenjem plazme kao izvora topline [6] 10
Slika 10. Shematski prikaz postupka zavarivanja MIG/MAG [10] 12
Slika 11. Shematski prikaz sila [12] 13
Slika 12. Podjela prijenosa metala kod MIG/MAG postupka zavarivanja [13] 15
Slika 13. Shema prijenosa metala putem kratkih spojeva [13] 16
Slika 14. Stvarni prikaz prijenosa metala kratkim spojevima [13] 16
Slika 15. Shema prijenosa metala štrcajućim lukom [13] 17
Slika 16. Stvarni prikaz prijenosa metala štrcajućim lukom [13] 18
Slika 17. Shematski prikaz [8] 19
Slika 18. Shema prijenosa metala štrcajućim lukom [13] 20
Slika 19. Stvarni prikaz prijenosa metala štrcajućim lukom [13] 20
Slika 20. Shema prijenosa metala rotirajućim lukom [8] 22
Slika 21. Stvarni prikaz prijenosa metala rotirajućim lukom [8] 22
Slika 22. Kartezijeva struktura [17] 25
Slika 23. Cilindrična struktura [17] 25
Slika 24. Sferna struktura(lijevo) i rotacijska struktura (desno) [17] 26
Slika 25. SCARA robot [17] 26
Slika 26. Sustav robotiziranog zavarivanja [16] 27
Slika 27. Inverter [16] 28
Slika 28. Privjesak za učenje ili kontroler [16] 29
Slika 29. Jednoosni i dvoosni uređaj za pozicioniranje [16] 31
Slika 30. Dodavač žice [16] 32
Slika 31. Oprema za čišćenje pištolja [16] 33
Slika 32. Taktilni senzor za detekciju radnog komada (lijevo), prikaz praćenja zavara pomoću optičkog senzora (desno) [16] 34
Slika 33. Oblik žljeba i TIG ručno zavarivanje u zidom položaju [18] 35
Slika 34. Zavarivanje zida u PC položaju, (a) kolinearna sapnica, (b) sapnica zamaknuta za 30° [20] 36
Slika 35. Presjek zida debljine 7 mm [20] 36
Slika 36. Ovisnost efektivne debljine zida o brzini zavarivanja (lijevo), ovisnost promjera žice o površinskoj valovitosti (desno) [20] 36
Slika 37. Površinska valovitost s obzirom na brzinu zavarivanja za BDŽ , BZ omjer (a) 15, (b) 30, (c) 45 [20] 37
Slika 38. Opadanje kvalitete zida sa povećanjem brzine žice [20] 38
Slika 39. Robotska ruka za zavarivanje Almega AX-V6 39
Slika 40. Zaštitni plin Ferroline C18 40
Slika 41. Specifikacije žice za zavarivanje SG2 [19] 40
Slika 42. Pozicioniranje robotske ruke u PC položaj 41

Slika 43. Izgled zida nakon dva prolaza (a, b), plinski protok (c). 41
Slika 44. Prikaz konstrukcije prije zavarivanja (a, b), plinski protok (c) 42
Slika 45. Programski kod 918 i 919 43
Slika 46. Izgled zida nakon tri (a), deset (c) i dvadeset i pet prolaza (d), prikaz hlađenja između prolaza (c) 44
Slika 47. Donja strana zida 45
Slika 48. Gornja strana zida 45
Slika 49. Toplinska deformacije osnovne ploče 45
Slika 50. Bliži prikaz lijevog i desnog ruba 46
Slika 51. Odrezivanje ruba zida (desno), odrezivanje zida za mikro i makro analizu (lijevo) 48
Slika 52. Obradak nakon brušenja sa brusnim papirom grubosti 600 49
Slika 53. Rezanje zida od osnovne ploče (lijevo), zid sa nanesenim penetrantom (desno) . 49
Slika 54. Uređaj za mjerenje tvrdoće po Vickersu 50
Slika 55 Graf tvrdoće po udaljenosti od vrha zida 51
Slika 56. Prikaz makrostrukture sa označenim mjestima promatranja mikrostrukture 52
Slika 57. Prikaz mikrostrukture presjeka zavara po mjestima 54
Slika 58. Prikaz dobivenih rezultata gornje strane zida 55
Slika 59. Prikaz dobivenih rezultata donje strane zida 56
Slika 60. Usporedba parametara gornje i donje strane zida 57

POPIS TABLICA

Tablica 1. Materijali koji se primjenjuju kod WAAM postupka [3] 8
Tablica 2. Prednosti i nedostaci prilikom korištenja prijenosa metala kratkim spojevima [15] 16
Tablica 3. Prednosti i nedostaci kod prijenosa metala štrcajućim lukom [13] 18
Tablica 4. Prednosti i nedostaci kod prijenosa metala mješovitim lukom [8] 19
Tablica 5. Prednosti i nedostaci kod prijenosa metala pulsirajućim lukom [8] 21
Tablica 6. Parametri zavarivanja 46
Tablica 7. Iznos tvrdoće po presjeku zida 51
Tablica 8. Prikaz parametara ravnoće površine gornje strane zida 57
Tablica 9. Prikaz parametara ravnoće površine donje strane zida 57

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
WAAM	-	Wire Arc Additive Manufacturing (Aditivna proizvodnja električnim lukom)
MAG	-	Metal active gas (elektrolučno zavarivanje taljivom žicom u prisutnosti zaštitnog plina)
CAD	-	computer aided design (računalom potpomognut razvoj)
CNC	-	Computer Numerical Control (računalno numeričko upravljanje)
PC	-	Horizontalni položaj zavarivanja
BTF	-	Buy To Fly – volumni ili maseni omjer između kupljenog sirovca i gotovog proizvoda
FGM	-	Functionally Graded Materials
Fe_3Al	-	željezov alumind
U	V	Volt
I	A	Amper
(TIG)	-	(Tungsten inert gas), Zavarivanje netaljivom volframovom elektrodom u prisutnosti zaštitnog inertnog plina
CO_2	-	Ugljični dioksid
GMAW	-	(Gas metal arc welding),Zavarivanje MIG postupkom
T	-	Translacijski zglob robota
R	-	Rotacijski zglob robota
TTT	-	Kartezijeva struktura
RTT	-	Cilindrična struktura
RRT	-	Sferna struktura
RRR	-	Revoultna struktura
SCARA	-	Selective Compliance Robot Arm
Fe	-	Željezo
Al	-	Aluminij
Ar	-	Argon

S235	-	Konstrukcijski čelik
BZ	-	Brzina zavarivanja
BDŽ	-	Brzina dobave žice
stl	-	Standard Tessellation Language, format spremanja datoteke
TTT graf	-	(time-temperature-transformation) vremensko temperaturni transformacijski graf

SAŽETAK

U ovom radu će se detaljnije obraditi robotizirano MAG zavarivanje sa naglaskom na izradu zida u zidnom (PC) položaju. Teorijski dio obuhvaća princip rada MAG zavarivanja u sklopu robotizacije, parametre izrade, općenit princip aditivne proizvodnje pomoću električnog luka i žice i problematika zavarivanja u prisilnim položajima.

U eksperimentalnom dijelu određeno je optimalno područje parametara za izradu zida u zidnom položaju. Dobiveni rezultati podvrgnuti su mikroanalizi i analizi parametara teksture površine. Analizom rezultata ispitivanja ocijenjeni su parametri zavarivanja.

Ključne riječi: Robotizirano MAG zavarivanje, WAAM, PC položaj zavarivanja.

SUMMARY

This paper will deal in detail with robotic GMAW welding with emphasis on wall fabrication in Horizontal-Vertical position. The theoretical part includes principles behind robotized GMAW welding, fabrication parameters, general principle of additive manufacturing using electric arc and wire and the problem of welding in forced positions.

The experimental part will deal with finding the optimal range of parameters for fabrication of a wall in Horizontal-Vertical position. The obtained results were subjected to microanalysis and analysis of surface texture. The analysis of the tests results were used to evaluate obtained welding parameters.

Key words: Robotised GMAW welding, WAAM, Horizontal -Vertical welding position.

UVOD

Postupak zavarivanja je proces spajanja dvaju istorodnih materijala taljenjem ili pritiskom uz ili bez dovođenja dodatnog materijala. Problem spajanja materijala potječe od samih početaka civilizacije. Ovisno o vremenskom razdoblju u povijesti ljudi su težili spajanju različitih materijala kako bi poboljšali kvalitetu svakodnevnog života. Tek od početka prve industrijske revolucije i upotrebe prvog parnog stroja dolazi do masovne uporabe čelika kao konstrukcijskog elementa. Najzastupljeniji načini spajanja metalnih konstrukcija bili su korištenjem zakovanih spojeva te uporabom kovačkog zavarivanja. Tek početkom 20. stoljeća dolazi do razvoja postupaka zavarivanja kakve poznajemo danas.

Kako bi rastalili osnovni i dodatni materijal mogu se koristiti različiti oblici izvora topline. To mogu biti plamen, električni luk, trenje, zračenje (laser), električni otpor i drugi. Zbog versatilnosti određenih postupaka provedba procesa zavarivanja moguća je na terenu pa čak i pod vodom.2.2

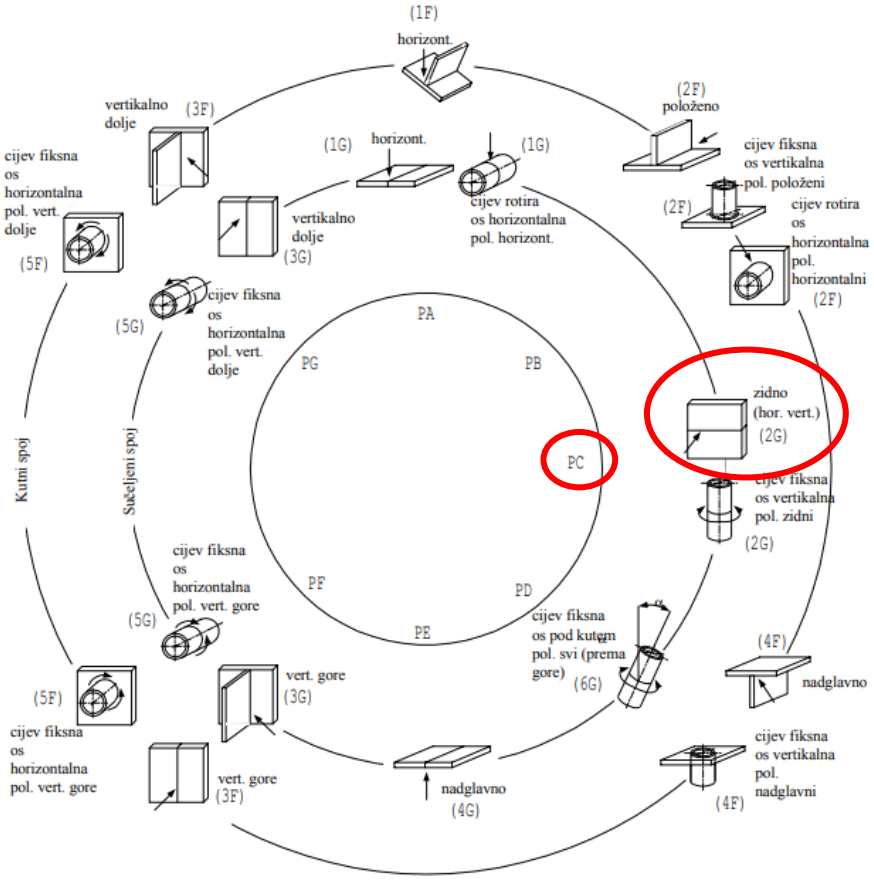
U ovom radu detaljno je opisan postupak zavarivanja zida u PC položaju korištenjem aditivne tehnologije. Položaj zavarivanja je detaljnije predočen na slici 1. Sam proces zavarivanja baziran je na MAG postupku poznatim pod nazivom elektrolučno zavarivanje taljivom žicom u prisutnosti zaštitnog plina. Aditivne tehnologije proizvodnje bazirane su na načinu dodavanja materijala sloj po sloj. Najčešće korišteni materijali u aditivnoj proizvodnji su polimeri zbog ne promjenjivosti svojeg oblika kroz široki temperaturni pojas. Zadnjih dvadesetak godina dolazi do sve veće uporabe metala u prahu kao komponente za izradu dijelova u aditivnoj proizvodnji. Izrada dijelova pomoću metalnog praha kao posljedicu ima neujednačenu mikrostrukturu zbog koncentriranog unosa topline pomoću lasera. Takvi dijelovi su podložni pukotinama nastalim zaostalim naprezanjima te je takve konstrukcije potrebno podvrgnuti naknadnoj toplinskoj obradi [2].

Osim zavarivanja putem metala u prahu aditivna proizvodnja je također moguća korištenjem metalne žice. WAAM (Wire and Arc Additive Manufacturing) tehnologija koja je dobila na važnosti zbog mogućnosti primjene već postojeće tehnologije što je čini jeftinije od ostalih oblika aditivne proizvodnje metala. Skupa sa nižom cijenom WAAM tehnologija odlikuje se manjom poroznošću i manjom potrebom za naknadnom strojnom obradom od aditivne proizvodnje metala prahom. Glavni pokretači ove tehnologije dolaze sa područja

avioindustrije koja zahtjeva veliki broj geometrijski zahtjevnih konstrukcija sa što manjom težinom [2].

Postupak izrade proizvoda putem WAAM tehnologije sastoji se od slijedećih koraka [2]:

- dizajniranje CAD modela
- rezanje modela u slojeve
- generiranje putanje alata
- odabir parametara zavarivanja
- taloženje materijala i završna strojna obrada.



Slika 1. Shematski prikaz položaja zavarivanja sa istaknutim PC položajem zavarivanja [1]

1. WAAM postupak zavarivanja

Patent WAAM tehnologija potječe još iz 1925. godine ali je tehnologija postala zanimljiva tek u zadnjim godinama 20. stoljeća. Zbog korištenja električnog luka kao izvora topline i žice kao dodatnog materijala početna i najbitnija prednost nad ostalim oblicima aditivne proizvodnje je cijena. WAAM koristi već postojeću opremu za zavarivanje (izvor struje, zaštitni plin, pištolje itd.) koju kombinira sa robotskom rukom ili CNC upravljanim strojevima koji omogućuju više osno kretanje pištolja za zavarivanje kao što je prikazano na slici 2 [2].



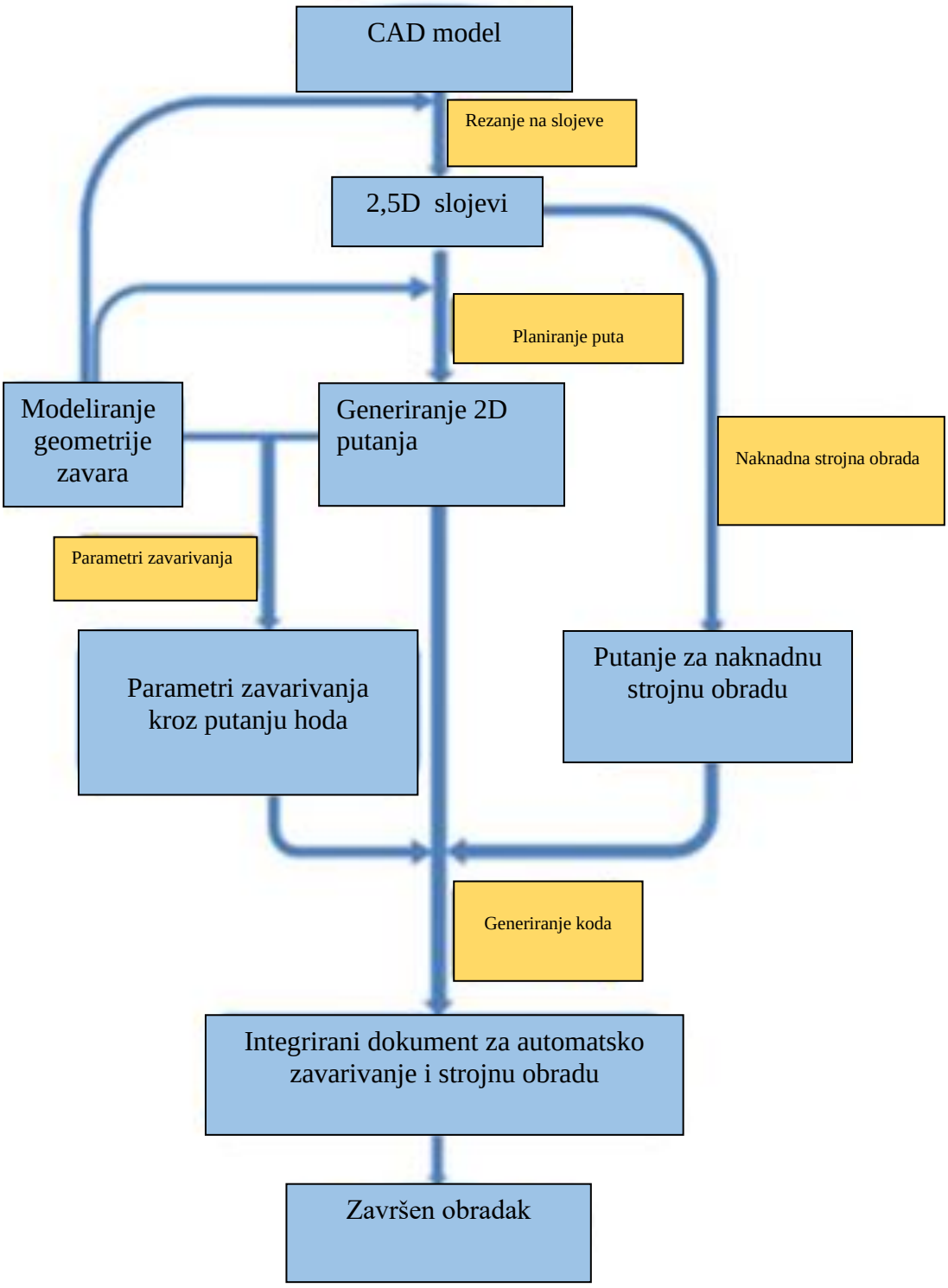
Slika 2. Klasični WAAM sustav [2]

2.1 Provedba postupka sa pojedinačnim koracima

Postupci prilikom proizvodnje dijelova putem aditivne proizvodnje u početku zahtijevaju konstruiranje proizvoda putem odgovarajućeg softverskih alata ili putem povratnog inženjerstva korištenjem 3D skenera. Nakon dobivenog CAD modela, potrebno je spremiti file u odgovarajući tip datoteke (.stl format) koji predstavlja podatke o geometriji koji se mogu naknado koristi u alatu za „rezanje“ CAD modela po visini u dvodimenzionalne isječke pomoću kojih se tada generira putanja alata (pištolja za zavarivanje). Putanja alata se generira u obliku 2,5 D što znači da robotski manipulator koristi samo dvije osi dok radi putanju za jedan prolaz te se potom diže za određenu visinu i postupak se ponavlja. U slijedećoj fazi proizvodnje potrebno je odabrati optimalne parametre zavarivanja kao što su brzina zavarivanja, napon, jakost struje, brzina dovođenja dodatnog materijala, protok zaštitnog plina i slično. Potrebno je pažljivo uskladiti parametre zavarivanja kako ne bi došlo do nepotrebnog preklapanja ili do lijepljenja slojeva. Na posljetku moguće je provesti strojnu obradu ukoliko je potrebno osigurati dimenzijsku točnost ili čak provesti toplinsku obradu ukoliko se od proizvoda traži jednolika mikrostruktura. Na slici 3 može se razaznati proces proizvodnje proizvoda putem WAAM tehnologije i djelomično strojno obrađenog dijela, dok na slici 4 možemo uočiti prikaz potpunog proizvodnog procesa od CAD modela do samog proizvoda [2].



Slika 3. Izrada WAAM komada (lijevo), djelomično strojno obrađen komad (desno) [2]

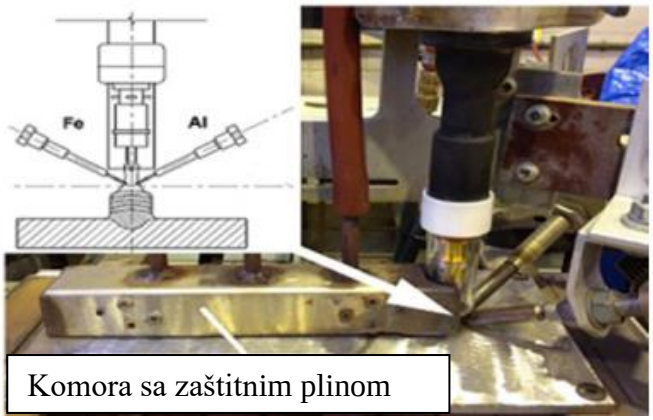


Slika 4. Shema WAAM postupka [2]

2.2 Prednosti i nedostaci

WAAM tehnologija posjeduje brojne prednosti u odnosu na konvencionalne načine obrade. Troškovi opreme su puno manji zbog toga jer se treba kombinirati već postojeća oprema (oprema za zavarivanje i robotski manipulator ili CNC stroj). Zbog korištenja već postojeće žice za zavarivanje manji su i troškovi dodatnog materijala zajedno sa mnogo većim izborom različitih materijala. WAAM omogućuje znatno veće stope depozicije dodatnog materijala do 130 g/min. Zbog mogućnosti postizanja puno većih brzina zavarivanja dolazi do narušavanja geometrijske preciznosti komada. Jedna od odlika WAAM tehnologije je manja količina otpadnog materijala što se u avioindustriji naziva BTF (Buy To Fly – volumni ili maseni omjer između kupljenog sirovca i gotovog proizvoda), ovaj omjer pogotovo dolazi do izražaja prilikom izrade dijelova od titanija. Titanij je materijal poznat po visokoj cijeni i problematičnoj strojnoj obradivosti [2].

Zbog relativno jednostavne strukture WAAM tehnologije vrlo je jednostavno automatizirati proizvodnju. Jedini ograničavajući parametri su veličina osnovne ploče i komora za stvaranje zaštitne plinske atmosfere. Osim automatizacije također je moguće korištenje više dodatnih materijala različitog sastava. Ovakve vrste kompozita nazivaju se FGM (Functionally Graded Materials), te se odlikuju varijacijom u sastavu i strukturi kroz svoj volumen. Jedan od najčešće korištenih kompozitnih materijala u aditivnoj proizvodnji je željezov alumind (Fe_3Al) čiji proces izrade je prikazan na slici 5. Željezov alumind uglavnom se koristi prilikom aditivne proizvodnje u obliku praška što dovodi do pojave poroznosti i šupljina. Dok prilikom korištenja WAAM tehnologije ovakve nepoželjne pojave su reducirane te dolazi do sporijeg širenja pukotina [2].

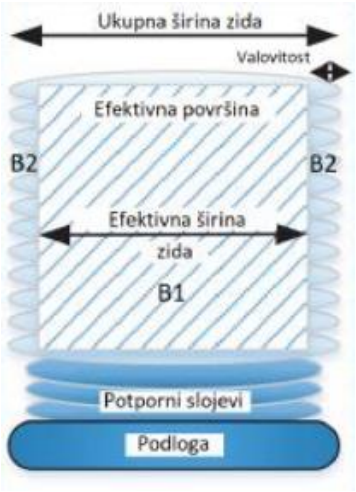


Slika 5. Proizvodnja Fe_3Al korištenjem WAAM tehnologije [2]

WAAM tehnologija je pogodna za izradu većih komad jednostavnije geometrije. Zbog višestrukih prolaza pištolja dolazi do visokog unosa topline i do anizotropnosti svojstva. Dolazi do povećanja vlačne čvrstoće ali i smanjenje otpornosti na udarni rad loma u području okomito na smjer polaganja materijala. Jedan od zahtjevnijih dijelova planiranja WAAM postupka je modelirane pojedinačnih slojeva i njihovog preklapanja te ukoliko taj dio nije izveden kvalitetno dolazi do suvišnog preklapanja, nedovoljnog stapanja slojeva što za posljedicu ima smanjenje mehaničkih svojstva. Druga vrsta problema koja se može pojaviti prilikom provedbe WAAM tehnologije su zaostala naprezanja uzrokovana pre velikim unosom topline. To dovodi do deformacije cijelog obradka u smjeru okomitom na smjer polaganja materijala. Iz ovog problema proizašla je strategija po imenu *Balanced Building Strategy* koja se bazira na tome da je potrebno odrediti najpogodniju ravninu simetrije komada tako da se osnovna ploča podudara s tom ravninom. Slojevi se tada nanose početno s jedne strane pa potom s duge strane kako bi naprezanja s jedne strane poništila naprezanja sa suprotne [2].

2.3 Najčešći postupci zavarivanja kod WAAM tehnologije

Tijekom WAAM postupka toplinska energija električnog luka tali dodatni materijal u obliku žice te nastaju kapljice metala koje se talože u slojevima jedna do druge. Zbog moguće kontrole taloženja kapljica mogu se dobiti oblici čija je minimalna širina iznosi 1 – 2 mm. Depozit nataloženog materijala kreće se 50 – 130 g/min. Na slici 6 prikazan je presjek zida dobiven WAAM postupkom. Potrebno je obratiti pažnju između efektivne širine zida i ukupne širina zida. Površina označena sa B1 nam predstavlja efektivnu površinu dok B2 predstavlja površinu koju je potrebno povrgnuti naknadnoj strojnoj obradi. Pomoću vidljivih površina B1 i B2 moguće je odrediti najpoželjnije parametre zavarivanja [3].



Slika 6. Zid izrađen WAAM postupkom [3]

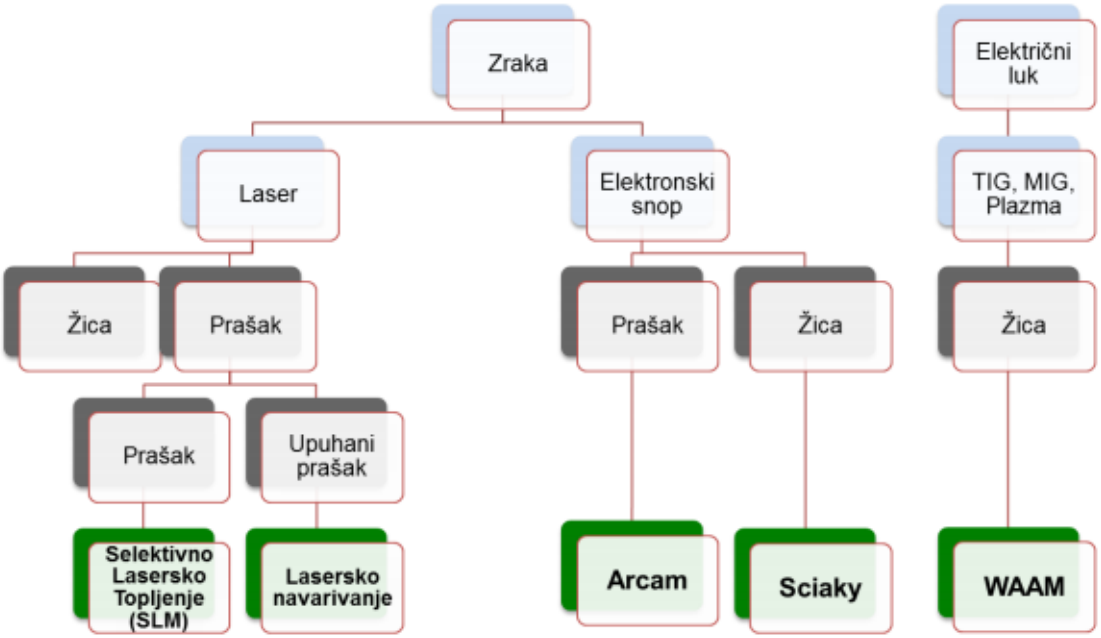
Prilikom korištenja WAAM tehnologije cilj je postići zadovoljavajuća mehanička svojstva i izbjeći moguće nastajanje grešaka kao što je poroznost. Tablica 1 prikazuje neke od materijala koji su najviše koriste prilikom provođenja WAAM tehnologije [3].

Tablica 1. Materijali koji se primjenjuju kod WAAM postupka [3]

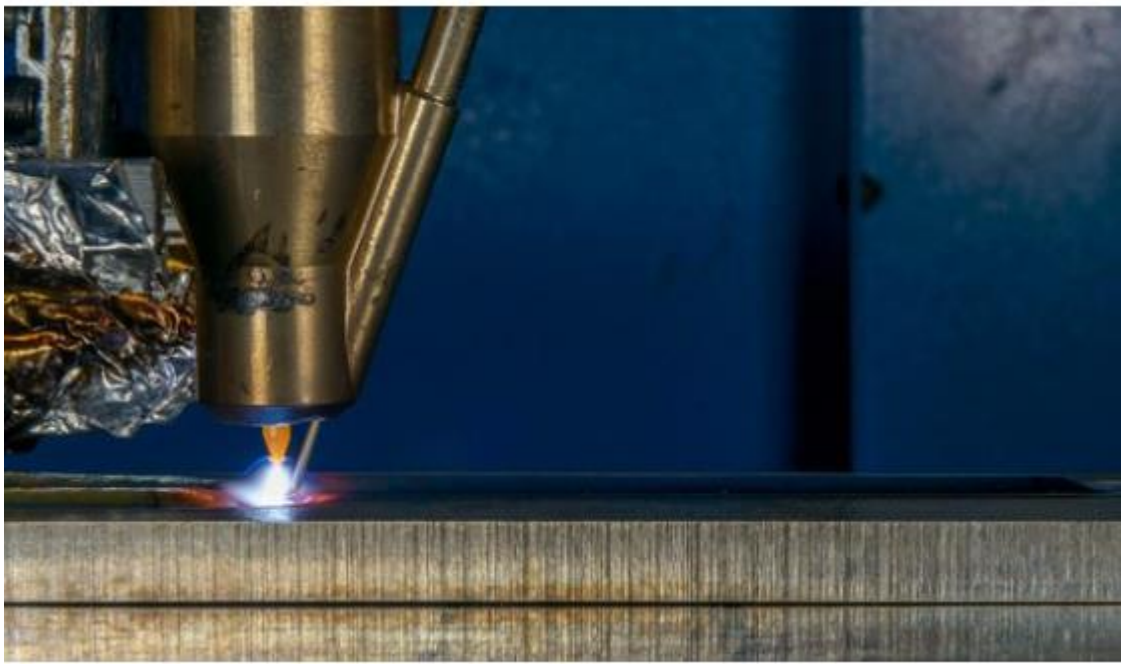
Titan	Ti-6Al-4V
Aluminij	2024, 2319, 4043, 5087
Vatrootporni materijali	Volfram, molibden, tantal
Čelik	nelegirani i niskolegirani, martenzitni, nehrđajući
Inconel	625, 718

Zavarivački postupci koji se mogu klasificirati kao osnova za aditivnu proizvodnju električnim lukom i žicom su samo oni koji koriste električni luk kao izvor topline. Dodatni materijal u obliku žice čiju dobavnu brzinu je moguće upravljati računalom te kompatibilnost sa robotskom rukom ili CNC strojem. Ti postupci su TIG, MIG/MAG i plazma. Zavarivanje netaljivom volframovom elektrodom u prisutnosti zaštitnog plina (TIG) kao i zavarivanje plazmom nužno je opremiti automatskom dobavom žice što dodano povećava cijenu cjelokupnog procesa. MAG/MIG postupak u sebi sadrži automatsku dobavu dodatnog

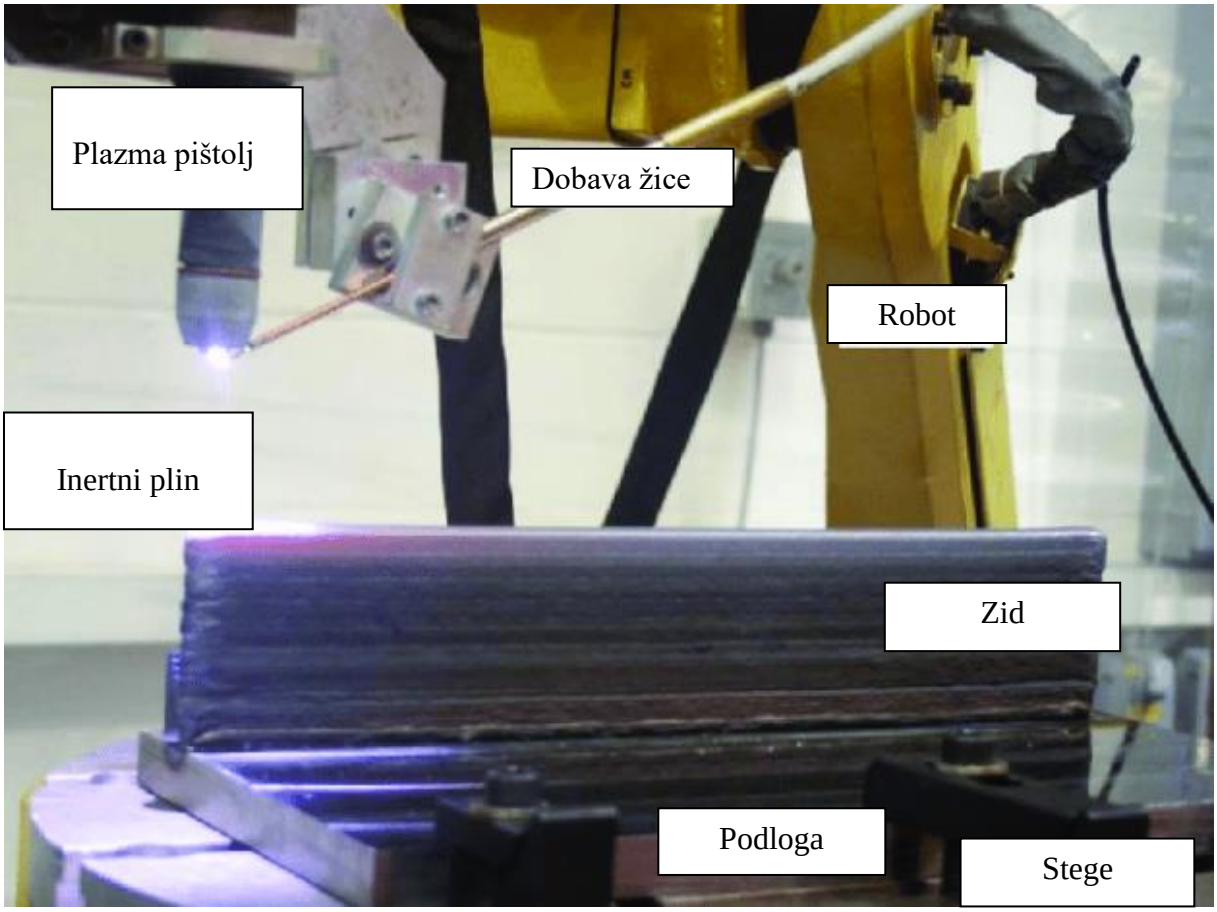
materijala što ga čini optimalnim zavarivačkim procesom za WAAM tehnologiju. Na slici 7 prikazana je detaljnija podjela aditivnih podjela za metale [4].



Slika 7. Prikaz aditivnih tehnologija za metale [4]



Slika 8. Prikaz WAAM tehnologije koristeći TIG postupak zavarivanja [5]



Slika 9. Prikaz WAAM tehnologije korištenjem plazme kao izvora topline [6]

Na slikama 8 i 9 prikazano je provođenje aditivne tehnologije zavarivanja električnim lukom i i žicom sa korištenim položaja zavarivanja PA.

Postupci zavarivanja najviše ovise o vrsti materijala koji se zavaruje, širini zida, visini zida, kvaliteti površine zida. Ukoliko uspoređujemo MIG i TIG postupak kod WAAM tehnologije, TIG postupak generira vrlo neznatno prskanje i rastaljeni metal ima manju vjerojatnost za reakcijom što je poželjno prilikom taloženja više materijala različitog sastava. Plazma zavarivanje se uglavnom koristi kod zavarivanja titanija [7].

3.1 Uvod u MIG/MAG postupak

Elektrolučno zavarivanje metalnom taljivom elektrodom u zaštitnoj okolini spada u postupak zavarivanja taljenjem. Zavarivanje se može odvijati u atmosferi inertnog plina (argon, helij) ili u kombinaciji dvaju plinova (ugljikov dioksid + argon). Metalna žica elektroda tali se pomoću električnog luka te postupak može biti automatski, poluautomatski i popuno robotiziran [4].

Prednosti MIG/MAG postupka [4]:

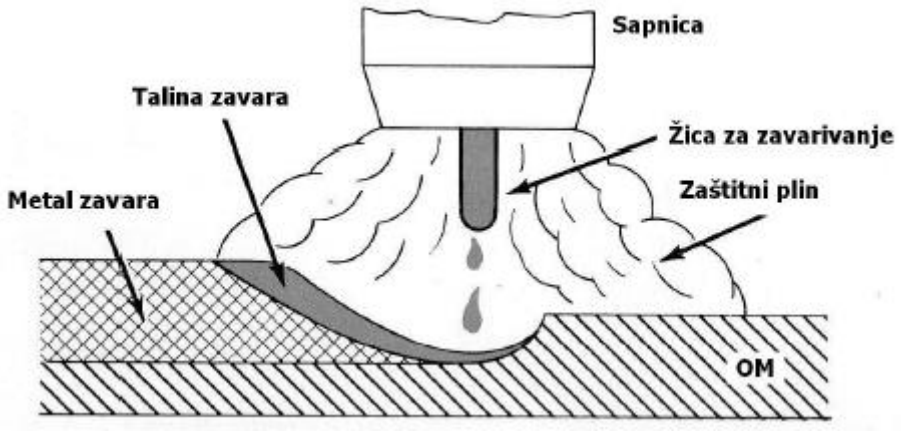
- može se koristit za zavarivanje svih vrsta metala
- veliki odabir parametara i načina prijenosa metala
- zavarivanje u svim položajima
- mogućnost primjene različitih plinskih mješavina i praškom punjene žice
- široki raspon debljina
- visoka proizvodnost i učinkovitost
- može se automatizirati
- može se primijeniti i za lemljenje.

Nedostaci MIG/MAG postupka [4]:

- potencijale greške prilikom rada na terenu zbog loše zaštite (vjetar)
- problemi sa dovođenjem žice (aluminij)
- greške uzrokovanom nepravilnim odabirom parametara zavarivanja i tehnike rada
- prskanje taline kod zavarivanja štrcajućim spojevima (potreba za naknadnom obradom)
- kompleksniji uređaji.

MIG/MAG tehnologija koristi automatsku dobavu dodatnog materijala u obliku žice uz pomoć pogonskog sistema. Dobavni materijal u obliku žice također služi kao elektroda koja svojim taljenjem popunjava željeno područje. Ukoliko se zavarivanje vrši na udaljenosti većoj od pet metara od izvora struje primjenjuje se sekundarni pogon za dobavu dodatnog materijala koji je smješten u pištolju. Ovakav princip je poznat pod nazivom *push-pull* te se također

primjenjuje ukoliko se radi s mekšim ili tanjim materijalima (aluminij). Shematski prikaz procesa zavarivanja korištenjem MIG/MAG tehnologije prikazan je na slici 10 [9].



Slika 10. Shematski prikaz postupka zavarivanja MIG/MAG [10]

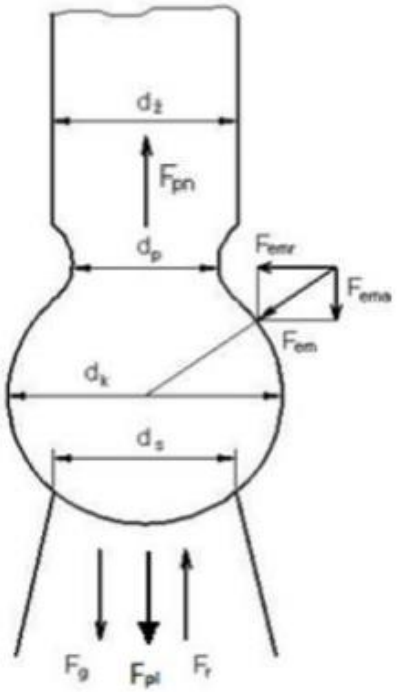
3.2 Sile prilikom zavarivanja

Prilikom provedbe procesa zavarivanja MIG/MAG postupkom dolazi do nastajanja sila uzrokovanim kemijskih reakcija u području prijenosa metala. Sile utječu na električni luk i samim time utječu na prijenos metala i u konačnici na kvalitetu gotovog zavara [11].

Na slici 11 prikazan je shematski prikaz djelovanje zavarivačkih sila na kapljicu metala. Sa sheme se može primijetiti da neke sile pridonose prijenosu metala dok druge odmažu [12].

Sile koje utječu na prijenos metala su [12]:

- elektromagnetska sila [F_{em}]
- gravitacijska sila [F_g]
- sila površinske napetosti [F_{pn}]
- sila strujanja i tlaka koje stvara plazma [F_{pl}]
- sila eksplozije u kapljicama metala [F_e]
- reaktivna sila [F_r].



Slika 11. Shematski prikaz sila [12]

Opis pojedine kote [12]:

$d_ž$ - promjer elektrode (žice)

d_k - promjer kapljice rastaljenog metala

d_s - promjer spoja

d_p - promjer na kojem dolazi do odvajanja kapljice od ostatka elektrode

F_e - elektromagnetska sila

F_{emr} - radijalna komponenta elektromagnetske sile

F_{ema} - aksijalna komponenta elektromagnetske sile

F_g - gravitacijska sila

F_{pl} - sila strujanja i pritiska plazme

F_r - reakcijska sila.

Ukoliko uzmemo u obzir djelovanje svih sila prikazanih na slici 11 može se primijetiti da najveći utjecaj na električni luk ima elektromagnetska sila koja sa svojom radijalnom i aksijalnom komponentom stvara takozvani *pinch efekt*. Osim ovisnosti o sili veličina kapljice metala također ovisi o ostalim parametrima kao što su struja zavarivanja i protok zaštitnog plina. Postojeći oblik kapljice nastaje zbog postojanja površinske napetosti koja djeluje na vanjsku i unutarnju površinu kapljice te joj daje specifičan oblik. Gravitacijska sila pomaže prilikom prijenosa rastaljenije kapljice sa elektrode na radni komad. Djelovanje sile strujanja usmjerava gibanje i smjer kapljice metala dok sila reaktivnog djelovanja je sila koja se protivi odvajanju nastale kapljice [12].

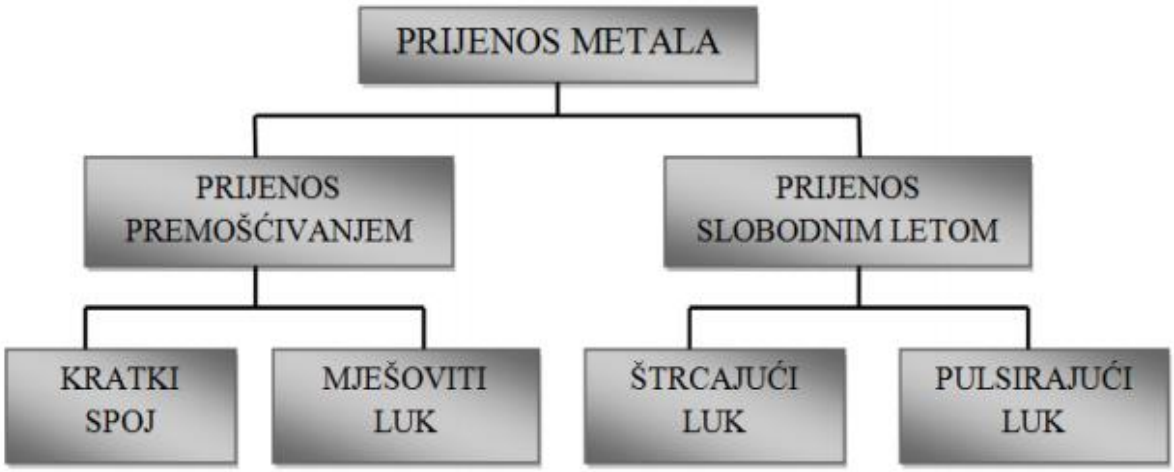
3.3 Prijenos metala

Prilikom zavarivanja MIG/MAG postupkom zavarivanja prijenos metala sa elektrode na radni komad moguće je izvesti na nekoliko načina. Prijenos metala se može ostvariti na način da se rastaljene kapljice s vrha elektrode prenesu putem slobodnog pada ili čak električnim lukom. Ukoliko dođe do kontakta između osnovnog materijala i još nerastaljene elektrode dolazi do kratkog spoja što je također jedan od mogućih načina prijenosa metala, kombinacije dva ili više principa prijenosa metala su također moguće [13].

Metode prijenosa metala ovise o slijedećim čimbenicima [13]:

- jakost struje
- iznosu napona električnog luka
- vrsti dodatnog materijala
- promjer elektrode (žice ili dodatnog materijala)
- vrsti zaštitnog plina ili mješavine.

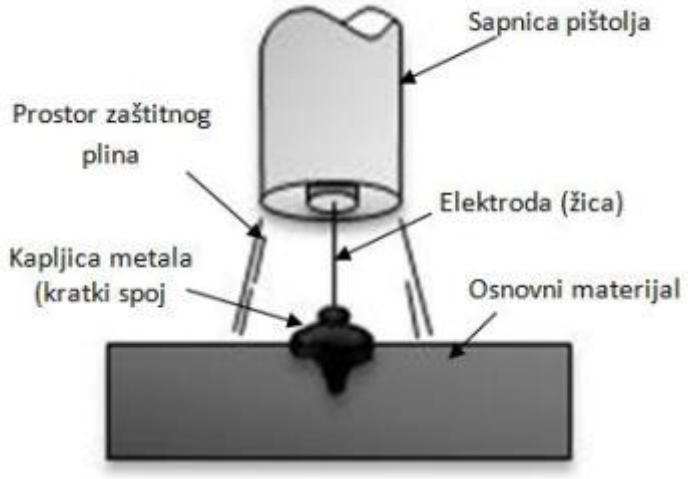
S obzirom na karakteristike luka može se razlučiti četiri različita načina prijenosa metala. Načini prijenosa metala prikazani su na slici 12 [13].



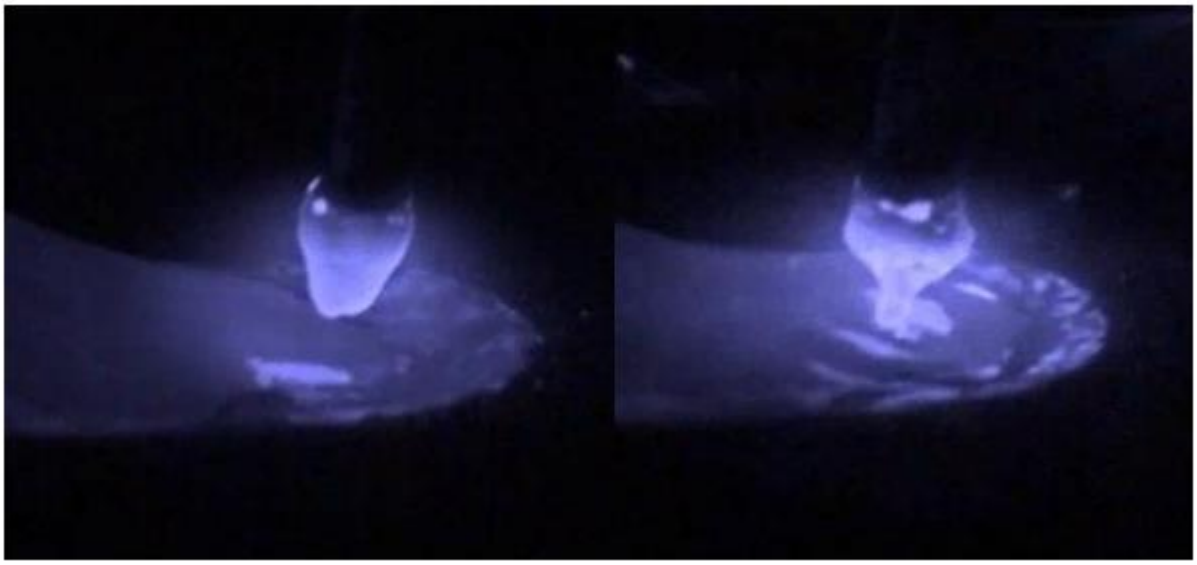
Slika 12. Podjela prijenosa metala kod MIG/MAG postupka zavarivanja [13]

3.3.1 Prijenos metala kratkim spojevima

Prijenos metala kratkim spojevima ostvariv je prilikom korištenja najmanjeg iznosa jačine struje i najmanje debljine dodatnog materijala. Kod ovog postupka žica ili praškom punjena žica je konstantno dovođena te prilikom kontakta sa osnovnim metalom dolazi do uspostave kratkog spoja što dovodi do stvaranja taline. Ovaj postupak je okarakteriziran sa malim unosom topline zbog toga što do samog odvajanja dodatnog materijala dolazi tek prilikom dodira, ovaj proces se ponavlja od dvadeset do dvjesto puta u sekundi. Period nastanka kapljice se može podijeliti na vrijeme električnog luka i vrijeme kratkog spoja. Prijenos metala dolazi prilikom kratkog spoja, za vrijeme kojeg dolazi do porasta intenziteta struje i javljanja elektromagnetske sile koja stvara takozvani *pinch efekt* koji je bio objašnjen u prethodnom poglavlju. Rezultat ovakvog prijenosa metala su zavari malog presjeka. Ovaj princip je pogodan za situacije kada je potrebno minimizirati deformacije na način unošenja što manje količine topline. Najčešće korišteni parametri za ovaj tip prijenosa metala su 13-21 V i iznos struje 50-170 A [12,14]. Na slici 13 prikazan je model navedenog prijenosa metala sa stvarnim prikazom na slici 14, tablica 2 prikazuje neke prednosti i nedostatke ovog postupka.



Slika 13. Shema prijenosa metala putem kratkih spojeva [13]



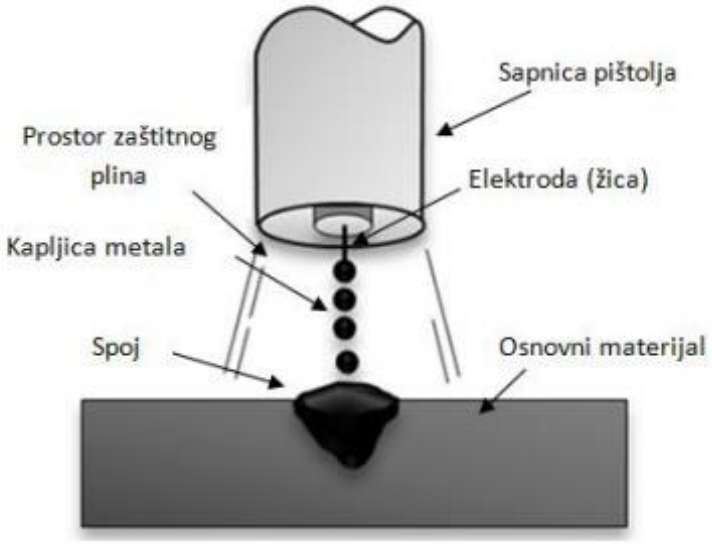
Slika 14. Stvarni prikaz prijenosa metala kratkim spojevima [13]

Tablica 2. Prednosti i nedostaci prilikom korištenja prijenosa metala kratkim spojevima [15]

PREDNOSTI	NEDOSTACI
Primjena u svim zavarivačkim položajima	Ograničenje primjene postupka radi debljine materijala
Primjena na cijevnim pozicijama	Ograničenje primjene postupka radi pripreme spoja
Manje deformacije uslijed manjeg unosa topline	Lošija mogućnost kontrole procesa
Jednostavno rukovanje	Povećana mogućnost gubitka zaštitnog plina vanjski utjecaji (rad na otvorenom)
Iskoristivost elektrode 90% i više	

3.3.2 Prijenos metala štrcajućim lukom

Prijenos metala ovim postupkom može biti ostvaren uz velik iznos struje i napona. Prijenos rastaljenog metala odvija se slobodnim padom kroz atmosferu ioniziranog zaštitnog plina. Sile koje se javljaju u električnom luku otkidaju kapi sa dodatnog materijala te ih usmjeravaju prema radnom komadu. Prikaz prijenosa metala prikazan je na slici 15. Prijenos metala štrcajućim lukom moguć je prilikom unosa veće količine topline u sam zavar. Zbog povećanja vrijednosti struje dolazi do intenzivnijeg javljanja *pinch efekta* i smanjenja promjera kapljice (promjer kapljice je manji od promjera dodatnog materijala) [13].

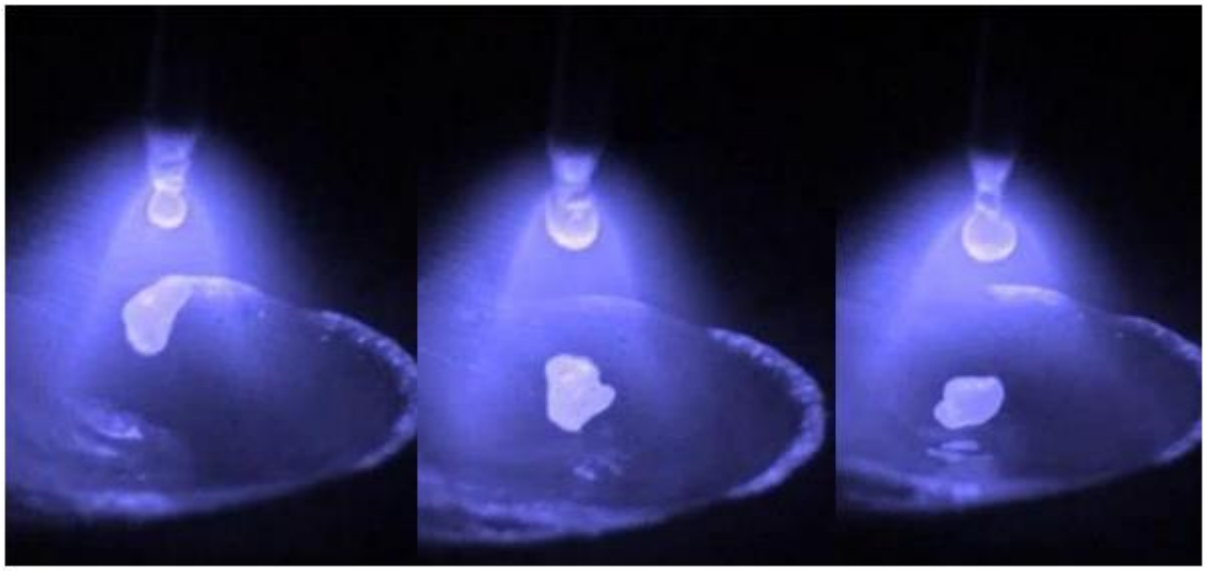


Slika 15. Shema prijenosa metala štrcajućim lukom [13]

Izuzetak kod ovog načina prijenosa metala je potreba za primjenjivanjem plinskih mješavina sa maksimalnom dopuštenom koncentracijom aktivnih plinova 18 %. Ukoliko se u smjesi kao aktivni plin koristi kisik dolazi do dubljeg ali i užeg oblika zavara dok kod upotrebe CO_2 dolazi do plićeg i oblog oblika zavara. Sam postupak ima primjenu kod zavarivanja debljih pozicija u horizontalom položaju, zbog velike količine unesene topline rad u prisilnim položajima je znatno otežan [13]. Tablica 3 prikazuje prednosti i nedostatke prijenosa metala štrcajućim lukom.

Tablica 3. Prednosti i nedostaci kod prijenosa metala štrcajućim lukom [13]

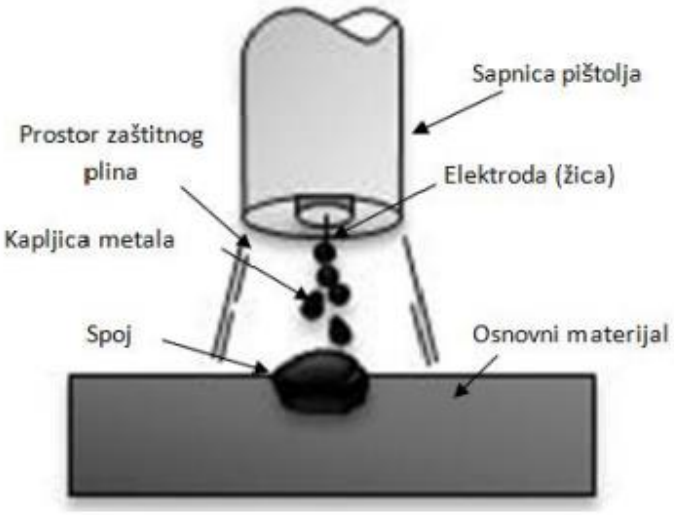
PREDNOSTI	NEDOSTACI
Velika količina rastaljenog materijala	Mogućnost primjene u horizontalnom položaju
Velika iskoristivost dodatnog materijala (<98%)	Povećana koncentracija plinova nastalih u procesu zavarivanja
Moguće primijeniti širok spektra dodatnog materijala	Povećana mogućnost gubitaka zaštitnog plina uslijed vanjskih utjecaja
Jednostavno izvođenje zavarivanja	Povećano zračenje što iziskuje bolju zaštitu zavarivača i okoline
Malo okolno štrcanje i manji troškovi naknadnog čišćenja	Obavezna upotreba skupljih plinskih mješavina



Slika 16. Stvarni prikaz prijenosa metala štrcajućim lukom [13]

3.3.3 Prijenos metala mješovitim lukom

Kod ovakvog načina prijenosa metala dolazi do kombinacije između prijenosa metala kratkim spojevima i štrcajućim lukom. Ovaj postupak je bio zastupljen 60-tih i 70-tih godina prošlog stoljeća, ali je danas u potpunosti zamijenjen. Na slici 17 prikazan je shematski prikaz prijenosa metala mješovitim lukom [13].



Slika 17. Shematski prikaz [8]

Prijenos kapljica nije aksijalan i sama iregularnost pojedinih prijenosa čini ovaj proces vrlo nepouzdanim. Slika 18 prikazuje stvarni prikaz prijenosa metala dok tablica četiri opisuje prednosti i nedostatke navedenog postupka [8].

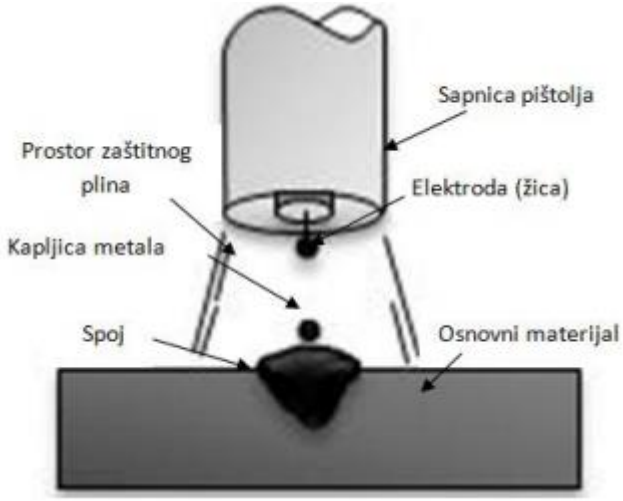
Tablica 4. Prednosti i nedostaci kod prijenosa metala mješovitim lukom [8]

PREDNOSTI	NEDOSTACI
Mogućnost korištenja jeftinih zaštitnih plinova, mješavine sa visokim udjelima CO_2	Povećana vjerojatnost nastajanja nepotpune fuzije u zavarenom spoju
Sposobnost zavarivanja visokim brzinama	Značajno povećanje prskanja
Niska cijena izvora struje za zavarivanje	Niska iskoristivost elektrode (87-93 %)
Niska cijena dodatnog materijala	Razlika u promjeru odvojenih kapljica (neregularnost)

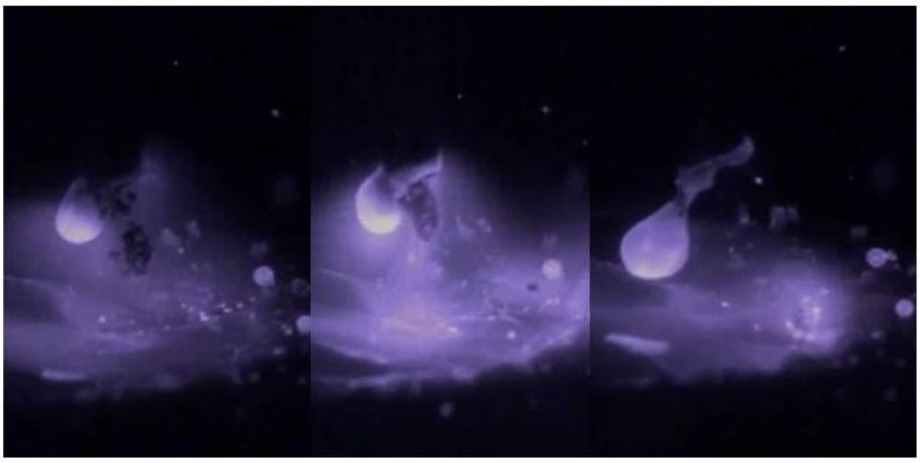
3.3.4 Prijenos metala pulsirajućim lukom

Prijenos metala pulsirajućim lukom je varijanta prijenosa metala štrcajućim lukom, sa iznosom prosječne struje zavarivanja manjim od minimalnim vrijednosti struje kod prijenosa metala štrcajućim lukom. Iznos struje varira između minimalne vrijednosti osnovne struje i maksimalne vrijednosti vršne struje. Osnovna struja ima najmanju moguću vrijednost kod koje je moguće održati električni luk, dok vršna struja ili impulsna ima vrijednost koja joj omogućuje

prijenos metala bez uspostave kratkog spoja. Vršna struja također omogućuje prijenos jedne kapi rastaljenog metala po svakom impulsu. Impulsi mogu poprimati različite oblike: sinusoidan, trokutast ili četvrtast oblik [8,15]. Na slici 18 prikazana je shema prijenosa metala pulsirajućim lukom dok na slici 19 je stvarni prikaz prijenosa metala pulsirajućim lukom.



Slika 18. Shema prijenosa metala štrcajućim lukom [13]



Slika 19. Stvarni prikaz prijenosa metala štrcajućim lukom [13]

Zbog manje potrebne prosječne struje nego kod štrcajućeg luka unos topline u sam metal je znatno smanjena, što omogućava zavarivanje materijala svih debljina i korištenje žice većeg promjera. Postupak je primjenjiv u svim položajima [8]. Tablica 5 opisuje prednosti i nedostatke prijenosa metala pulsirajućim lukom.

Tablica 5. Prednosti i nedostaci kod prijenosa metala pulsirajućim lukom [8]

PREDNOSTI	NEDOSTACI
vrlo malo prskanje	veća cijena uređaja i opreme za zavarivanje
odličan izgled zavara	složeniji postupak zavarivanja (parametri)
mala količina nastalih zavarivačkih plinova	otežana primjena na otvorenim gradilištima
manje deformacije koje su posljedica unosa topline	potreba za korištenjem skupih plinskih mješavina
niska koncentracija otopljenog vodika u zavarenom spoju	
pogodan za automatizirane i robotizirane procese	
pogodan za Tandem GMAW postupke	
velika brzina zavarivanja	
širok raspon debljina materijala koje se zavaruju	

3.3.5 Prijenos metala strujama visoke gustoće

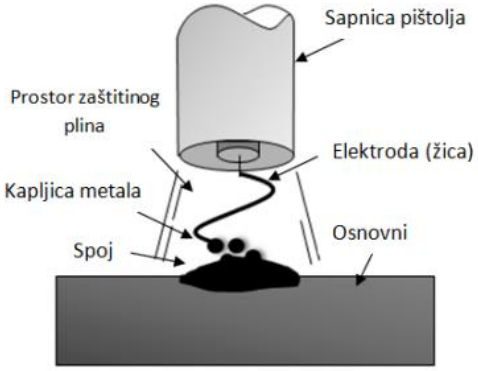
Prijenos metala strujama visoke gustoće objedinjuje sve MIG/MAG postupke koji imaju veliku količinu rastaljenog metala. Temelj ovih parametara proizlazi iz specifičnih karakteristika.

Karakteristike su slijedeće [15]:

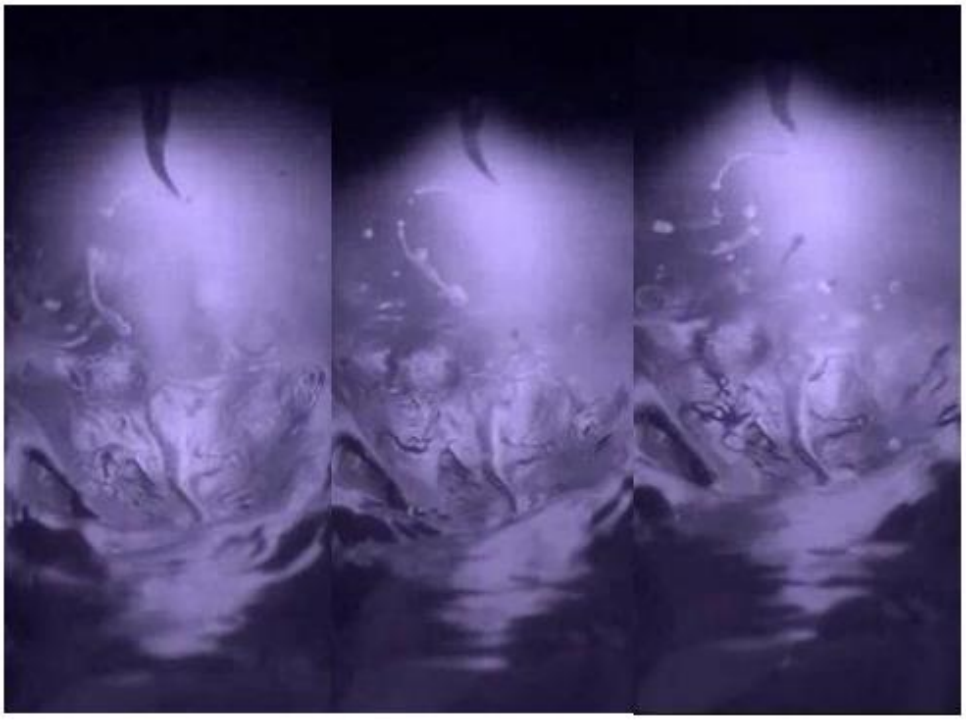
- brzina dodavanja žice
- duljina slobodnog kraja žice
- smjesa zaštitnih plinova
- jakost struje i napon električnog luka.

Ovu vrstu prijenosa metala može se podijeliti u skupinu prijenosa metala sa rotirajućim i nerotirajućim lukom. Iznos depozita dodatnog materijala može doći i do 25 kg/h što je nekoliko puta više nego kod prijenosa štrcajućeg luka (4–6 kg/h) [15]. Rotirajući luk je posljedica povećanih parametara koji prelaze 450 A za jakost struje i preko 35 V za iznos jačine napona. Prilikom povišenih parametara zavarivanja radijalna komponenta elektromagnetske sile generira strujne tokove u samoj žici što kao posljedicu ima rotaciju električnog luka. Ovaj oblik prijenosa metala ima manju penetraciju sa širim i plosnatijim oblikom zavara. Korištenje zaštitnog plina je neophodno kako bi se održala površinska napetost i spriječilo razdvajanje

sitnih čestica [15]. Slika 20 prikazuje shemu prikaza rotirajućim lukom dok slika 21 prikazuje stvarni prikaz prijenosa metala rotirajućim lukom.



Slika 20. Shema prijenosa metala rotirajućim lukom [8]



Slika 21. Stvarni prikaz prijenosa metala rotirajućim lukom [8]

Prijenos metala nertotirajućim lukom ima aksijalan prijenos kapljica rastaljenog metala na osnovni metal. Količina depozita rastaljenog metala kreće se između 5 i 15 kg/h. Zbog koncentriranog izgleda električnog luka prijenos metala sliči prijenosu metala sa štrcajućim lukom. Kao posljedicu nerotirajući luk ima veću penetraciju pri istim parametrima zavarivanja [15].

3.4.1 Općenito o industrijskim robotima

Industrijski robot se može definirati kao programibilni manipulator koji je moguće upravljati i programirati u tri ili više osi. Moguća je izvedba stacionarne i pokretne izvedbe robotskog manipulatora. Pokretne izvedbe su više zatupljene u industriji. Prema fizičkoj strukturi moguće je napraviti podjelu na glavne dijelove [16]:

- mehanička struktura koja je sastavljena od krutih segmenata povezanim zglobovima,
- aktuatori ili pogonske jedinice koje postavljaju manipulator u određenu poziciju putem zakretanja zglobova,
- senzori koji su zaduženi za detekciju statusa manipulatora te statusa okoline,
- upravljački sustav koji omogućuje nadzor i upravljanje kretanja manipulatora.

Zbog svoje vrlo kompleksne građe nije jednostavno izvršiti jednu generalnu podjelu robota. Pa zbog toga jedna podjela može biti prema vrsti pogona, druga prema načinu upravljanja, a treća prema geometriji radnog prostora.

3.4.2 Podjela industrijskih robota prema različitim komponentama

Prema vrsti pogona industrijski roboti dijele se na [16]:

- električni
- hidraulični
- pneumatski pogon.

U današnjoj uporabi najviše se koriste roboti sa električnim pogonom. Kao električni pogon koriste se istosmjerni i izmjenični koračni elektromotori koji zbog svoje niske cijene, brzog i preciznog vođenja u kombinaciji sa svojom kompaktnošću pružaju najbolje performanse s obzirom na cijenu. Hidraulički motori se koriste prilikom upravljanja tereta velike mase. Zbog vrlo male stlačivosti ulja omogućava se precizno i brzo vođenje. Nedostaci se javljaju prilikom istjecanja ulja i ulaska zraka u sustav. Pneumatski motori pogodni su za

robote manjih dimenzija. Pneumatski pogon dobiva na značaju prilikom manipulacije s lomljivim predmetima gdje mehanički pogon nije idealan [16].

3.4.3 Podjela po načinu upravljanja hoda

Kako bi robot uspješno izvršio dani zadatak potrebno je točno koordinirati položaj i samu orijentaciju alata. Potrebno je riješiti direktni kinematički problem, drugim riječima potrebno je odrediti položaj i orijentaciju alata preko pozicije zglobova. Prema tome upravljanje gibanjem može se podijeliti u dvije podjele [16]:

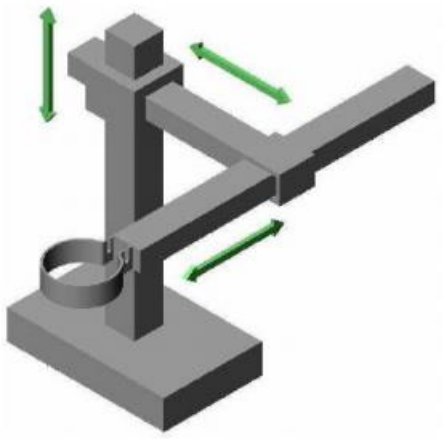
- od točke do točke (točnost pozicioniranja je bitnija od putanje)
- kontinuirano gibanje po putanji (trajektorija i točnost pozicioniranja imaju podjednaku važnost).

3.4.4 Podjela po geometriji radnog prostora

Prema geometriji radnog prostora može se načiniti slijedeća podjela [16]:

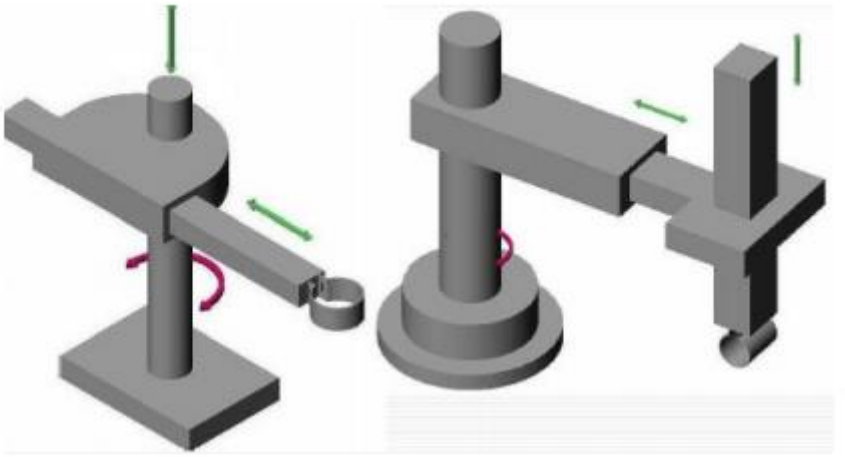
- pravokutna ili TTT struktura
- cilindrična ili RTT struktura
- sferna ili RRT struktura
- rotacijska ili RRR struktura
- SCARA robot.

Pravokutna struktura sastoji se od tri translacijska zgloba sa osima međusobno okomitim. Svaki stupanj slobode odgovara jednoj osi Kartezijevog koordinatnog sustava. Ovaj sustav odlikuje se visokom točnošću i najčešću primjenu ima kod montaže [16]. Slika 22 prikazuje TTT strukturu.



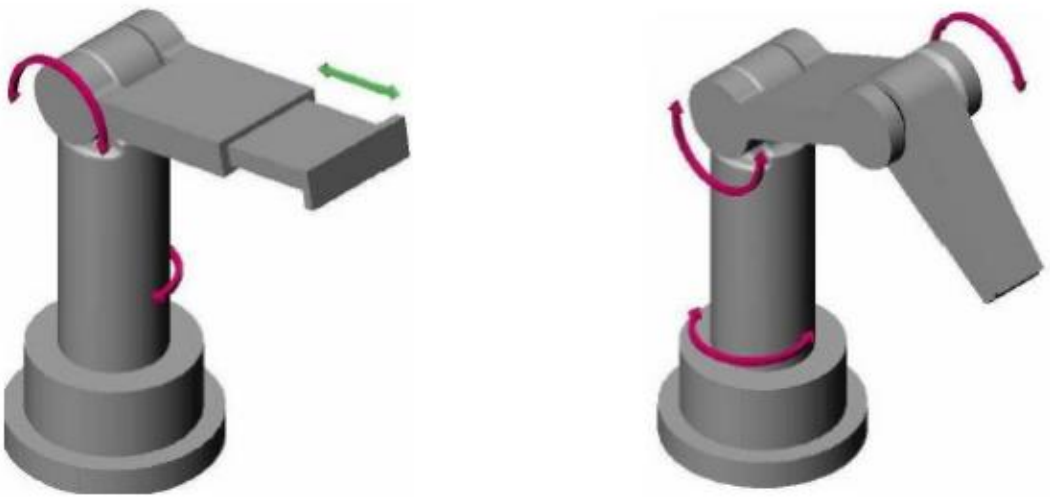
Slika 22. Kartezijeva struktura [17]

Ukoliko jedan translacijski zglob zamijenimo rotacijskim, dobiva se cilindrična ili RTT struktura prikazana na slici 23. Zbog smanjene točnosti pozicioniranja primjenjuje se u kombinaciji sa hidrauličkim pogonom za manipulaciju većih objekata [16].



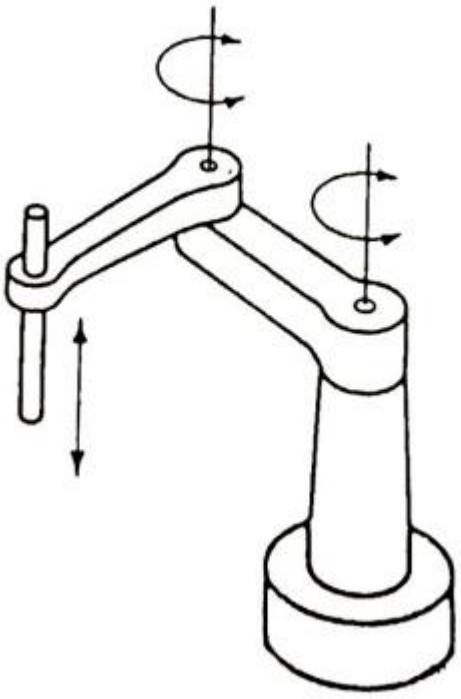
Slika 23. Cilindrična struktura [17]

Daljnjom zamjenom cilindričnog zgloba za rotacijski zglob dobiva se sferna konfiguracija. Kao posljedica korištenja sferne konfiguracije dolazi do smanjenja točnosti i krutosti sustava. Ukoliko se svi zglobovi zamijene rotacijskim dobiva se rotacijska struktura. Obje strukture prikazane su na slici 24 [16].



Slika 24. Sferna struktura(lijevo) i rotacijska struktura (desno) [17]

Kao posebni slučaj može se izdvojiti SCARA A (eng. Selective Compliance Robot Arm) robot koji ima jedan rotacijski i dva translacijska zgloba. Zbog toga što SCARA robot ima sve tri osi vertikalne poželjan je za korištenje kod montaže po vertikalnoj osi [16].



Slika 25. SCARA robot [17]

3.5 Glavne komponente robotske stanice za MIG/MAG zavarivanje

Glavne komponente koje sačinjavaju sustav za zavarivanje su [16]:

- robot za zavarivanje
- izvor struje
- upravljačka jedinica
- privjesak za učenje – kontroler.



Slika 26. Sustav robotiziranog zavarivanja [16]

3.5.1 Robot za zavarivanje

Prilikom odabira robota za zavarivanje potrebno je poznavati više parametara kao što su [16]:

- broj osi – poželjno je imati robota sa šest stupnjeva slobode kako bi se pištolj mogao dovesti u sve željene položaje
- brzina gibanja – potrebno je uzeti u obzir primjenu robota te vrijeme potrebno za izvršenje operacije ukoliko se radi o serijskoj proizvodnji
- nosivost robota – nosivost se kreće od nekoliko kilograma pa sve do nekoliko tona te je presudan faktor prilikom odabira robota
- točnost – koliko precizno robotska ruka može postići traženu točku u prostoru

- ponovljivost – sposobnost robota da prilikom ponavljanja istog procesa nekoliko puta može svaki puta doći u istu željenu točku u prostoru. Prihvatljiva pogreška je 1mm zbog nesavršenosti zupčanika
- doseg robota - najveća udaljenost koju robot može postići između zgloba i baze robota.

3.5.2 Izvor struje

Za izvor struje koriste se uređaji koji su sposobni dobavljivati struju različitih specifikacija. Ovisno o građi struje i ovisnosti o izlaznoj struji uređaji se mogu podijeliti na [16]:

- transformatore
- ispravljače
- invertere.

Kao izvor struje kod MIG/MAG zavarivanja najčešće se koriste inverteri. Inverteri su sposobni proizvoditi istosmjernu ili visokofrekventnu pulsirajuću struju. Specifičnost invertera je ta da prilikom pretvorbe istosmjerne u izmjeničnu struju dolazi do povećanja frekvencije s 50 Hz na 5 – 10 kHz. Uz inverter je također potreban manji transformator koji bi prilagodio struju na potrebnu jačinu struje i potreban napon [16].



Slika 27. Inverter [16]

3.5.3 Računalo i upravljačka ploča

Računalo se koristi za upravljanje senzorima i procesima automatskog zavarivanja, dok se privjesak koristi kao posrednik između operatera i radne stanice. Privjesak za učenje ili kontroler koristi se za podešavanje operacija i parametara, izvođenje napisanih programa i kontrolu procesa. Kontroler također sadrži tipke za prebacivanje na automatski način kao i tipku za automatsko zaustavljanje cijelog procesa poznatu pod nazivom „gljiva“.



Slika 28. Privjesak za učenje ili kontroler [16]

Programiranje ili učenje robota često se zahtjeva za obavljanje složenih nelinearnih putanja i zahtjevnih podataka. Osnovne metode programiranja su *on-line*, *off-line* i hibridne metode [16].

3.5.4 *On-line, off-line* i hibridna metoda programiranja

On-line programiranje je vrsta programiranja koja se radi isključivo na radnom mjestu. Obavlja se na način da se preko kontrolera ručno dovodi ruka na mjesto zavara te se pozicija pohranjuje u memoriju i zajedno s određenim parametrima zavarivanja koji čine program. Česte korekcije i popravljanja zahtijevaju zastoj u proizvodnji pa zbog toga je ovaj postupak jedino prigodan za pojedinačne komade. Ova metoda ne zahtjeva stručni kadar na području robotike i programiranja, ali zahtjeva veliku vještinu i znanje na području zavarivanja [16].

Off-line metoda programiranja izvodi se na lokaciji neovisno o robotu. Potrebna je grafička simulacija izvođenja programa kako bi bilo lakše provela optimizacija cijelog ili samo dijela procesa. Korištenjem grafičkog sučelja omogućuje se isplativija proizvodnja malih serija pa čak i pojedinačnih proizvoda. Ovakva vrsta programiranja zahtjeva stručniji kadar koji mora bit vješt u poznavanju CAD softvera i osnove programiranja u nekom jeziku. Prednost *on-line* programiranja je ta što se postižu znatne uštede u vremenu. Smanjuju se pogreške a može se obavljati neovisno o radnom mjestu. Ovakva metoda programiranja pogodna je za male serije [16].

Hibridna metoda programiranja ili miješana metoda poznata je po tome što se dio programa koji je vezan uz tok operacija izvodi *off-line* dok se dio odabira točaka izvodi *on-line.* Robot se ručno dovodi u željene točke, pozicije se spremaju u memoriju te nakon toga se na računalu izrađuje program. Ova metoda prikladna je za izradu srednjih serija kao i stvaranje izrade baza podataka za robotizirano zavarivanje [16].

3.5.5 Dodatne komponente robotske stanice za MIG/MAG zavarivanje

Dodane komponente koje ulaze u proces zavarivanja su [16]:

- uređaj za pozicioniranje
- pištolj za zavarivanje
- dodavač žice
- sustav za čišćenje pištolja
- senzori kod robotiziranog zavarivanja

- taktilni senzori
- optički senzori
- senzori električnog luka.

3.5.5.1 Uređaji za pozicioniranje

Uređaj za pozicioniranje koristi se kako bi postigli željeno zakretanje i pozicioniranje radnog komada. On omogućuje brzo i jednostavno stezanje kao i otpuštanje radnog komada. Potrebno je prilagoditi geometriju uređaja za pozicioniranje kako bi robot imao što jednostavniji pristup svim područjima predviđenim za zavarivanje. Uređaji za pozicioniranje za pogonski sustav koriste programibilan servomotor i rezolver. Različite izvedbe uređaja za pozicioniranje su [16]:

- pozicioner s jednim stupnjem slobode gibanja
- pozicioner s dva stupnja slobode gibanja
- orbitalna izvedba
- kombinacija više izvedbi.



Slika 29. Jednoosni i dvoosni uređaj za pozicioniranje [16]

3.5.5.2 Pištolj za zavarivanje i dodavač žice

Prilikom odabira pištolja za zavarivanje potrebno je voditi računa o snazi uređaja i načinu dovođenja dodatnog materijala. Ukoliko radno područje stroja prelazi 400 A potrebno je omogućiti vodeno hlađenje pištolja, za manje iznose koristi se zračno hlađenje. Plinska sapnica i kontaktna vodilica su dijelovi koji zahtijevaju najviše zamjena na samom pištolju za zavarivanje. Pištolj za zavarivanje se montira na robotsku ruku sa odgovarajućom montirnom rukom. Na pištolj je potrebno priključiti odgovarajući dodavač žice. Dodavači žice mogu se podijeliti u dvije skupine [16]:

- dodavač s kontinuiranim dovođenjem žice
- hladni dodavač žice.

Kontinuirano dovođenje žice je svojstveno za MIG/MAG postupak te je uključeno u strujni krug. Preko žice se uspostavlja električni luk i u konačnici zavar. Hladni dodavač žice je svojstven za TIG postupak te u ovom slučaju žica nije uključena u strujni krug već se tali toplinom proizvedenom električnim lukom. Na slici 30 prikazan je dodavač žice [16].



Slika 30. Dodavač žice [16]

3.5.5.3 Oprema za čišćenja pištolja

Robotsko zavarivanje je visokoautomatiziran proces. Kako bi se osigurala ponovljivost potrebno je očistiti sapnicu od nakupina uzrokovanih prskanjem i odrezati vrh žice kako bi lakše došlo do uspostavljanja električnog luka. Do uspostavljanja električnog luka dolazi zbog *skin-efekta* koji govori da elektroni putuju po površini elektrode zbog induktivnosti slojeva vodiča. Zbog toga je preferabilno prije početka operacije zavarivanja odrezati žicu pod kutom kako bi se osiguralo lakše uspostavljanje električnog luka.



Slika 31. Oprema za čišćenje pištolja [16]

3.5.5.4 Senzori kod robotiziranog zavarivanja

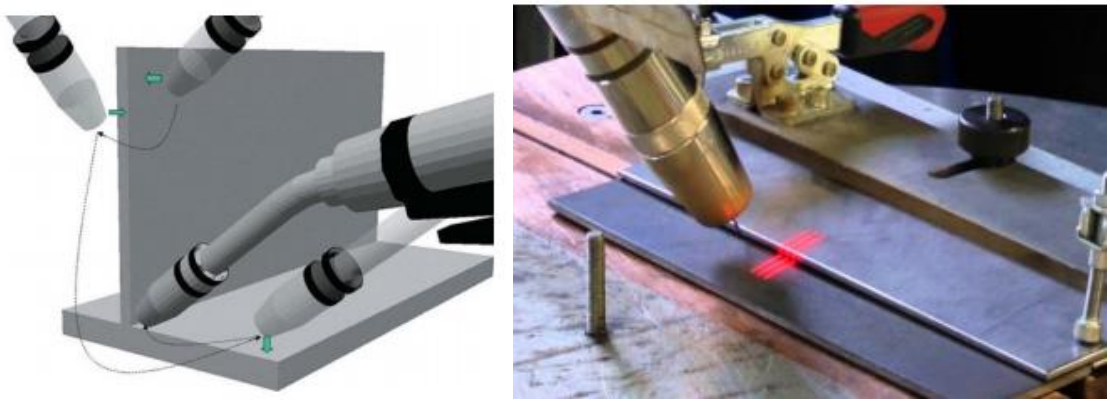
Kako bi se uspješno nadzirao svaki korak zavarivanja došlo je do uvođenja senzora u opremu zavarivanje. Zadatak senzora je da mjeri stvarne parametre te ih uspoređuje sa zadanima i na temelju toga se provodi regulacija cijelog sustava. Vrste senzora koje se upotrebljavaju kod zavarivanja su [16]:

- taktilni ili dodirni senzori
- optički senzori
- senzor detekcije električnog luka.

Taktilni senzori služe za detekciju položaja mjesta zavara preko žice ili nekog drugog mjernog instrumenta, prema spremljenim pozicijama gibanje robota se prilagođava. Programiranje se provodi na način da se pištolj malom brzinom dovodi do mjesta zavara sve dok ne dođe do kontakta. Nedostatak taktilnih senzora je loša otpornost na toplinu radne okoline i nemogućnost prilagodbe ukoliko dođe do pomaka komada u stvarnom vremenu [16].

Optički senzori funkcioniraju na način da se tijekom zavarivanja emitiraju zrake na radni komad te se one reflektiraju na CCD (eng. Charge Couple Device) kameru. Analogni signali se pretvaraju u digitalne iz kojih se mogu definirati geometrijske značajke zavara i prema tome se može izvršiti nužna kolekcija. Nedostatak ovakvog tipa senzora je potreba za već predodređenom putanjom [16].

Senzori električnog luka se najviše koriste u kombinaciji sa taktilnim i optičkim senzorima. Ovakvi senzori funkcioniraju na način praćenja iznosa struje i napona, udaljenost između sapnice i radnog komada proporcionalna je sa strujom u uvjetima konstantnog napona. Duljina električnog luka proporcionalna je s naponom luka. Senzori uspoređuju parametre i održavaju udaljenost između radnog komada i sapnice konstantnim. Upotreba ovakvih senzora je moguća jedino u prisutnosti njihanja pištolja za zavarivanje. Na slici 32 prikazani su taktilni i optički senzori [16].



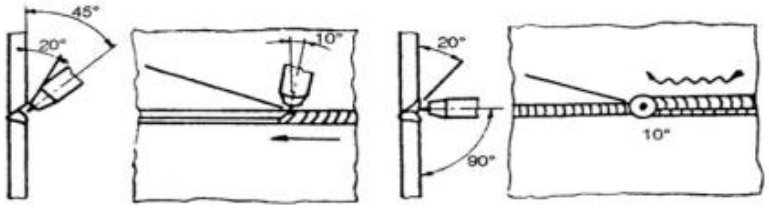
Slika 32. Taktilni senzor za detekciju radnog komada (lijevo), prikaz praćenja zavara pomoću optičkog senzora (desno) [16]

4 Zavarivanje u prisilnim položajima

Zavarivanje u prisilnim položajima odnosi se na sve položaje u kojima je otežan prijenos dodatnog materijala na radni komad zbog utjecaja gravitacije. Česte greške koje mogu nastati prilikom zavarivanja su ne mogućnost zadržavanja taline na predviđenom mjestu i javljanje protaljenog dijela. Za prisilne položaje najčešće se koriste TIG tehnologija u ručnom i automatskom obliku i MIG/MAG tehnologija sa uvjetom prijenosa metala u obliku kratkih spojeva.

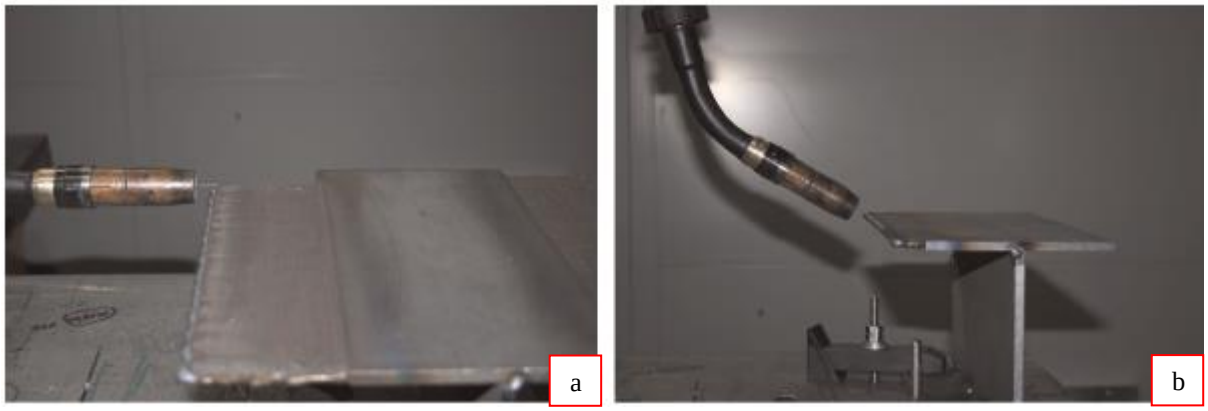
4.1 Zavarivanje u zidnom položaju

Pirikom zavarivanja u zidnom položaju potrebno je osigurati da što manje taline teži prema dolje. To je iznimno važno kod WAAM tehnologije, ukoliko u prvom prolazu izgradnje horizontalnog zida dođe do većih nepravilnosti u oblika zavara svaki slijedeći prolaz će rezultirati sa multipliciranom greškom. Ukoliko se zavaruju deblji materijali potrebno je koristiti vezane spojeve kod kojih donji sloj služi kao potpora gornjem [18].



Slika 33. Oblik žljeba i TIG ručno zavarivanje u zidom položaju [18]

Prilikom zavarivanja zida u PC položaju potrebno je obratiti pažnju na razne parametre koji utječu na kvalitetu i oblik izrađenog zida. Potrebno je mijenjati smjer zavarivanja prilikom svakog prolaza kako bi se izbjeglo neželjeno curenje taline. Optimalni oblik prijenosa metala je putem kratkih spojeva dok protok zaštitnog plina poželjno je držati oko 15 l/min. Na slici 34 prikazani su dva načina izrade zida u PC položaju. Na slici 34 (a) sapnica je kolinearna sa osnovnom pločom dok na slici 34 (b) sapnica je zakrenuta za 30° s obzirom osnovnu ploču. Rezultati oba slučaja zavarivanja daju debljinu zida u iznosu od 4 mm. Ukoliko je tražena veća debljina zida potrebno je povećati iznos brzine dobave žice i sukladno tome povećati iznos struje zavarivanja dok je brzina zavarivanja relativno mala 20 cm/min. Rezultat navedenih parametara je vidljiv na slici 35 [20].

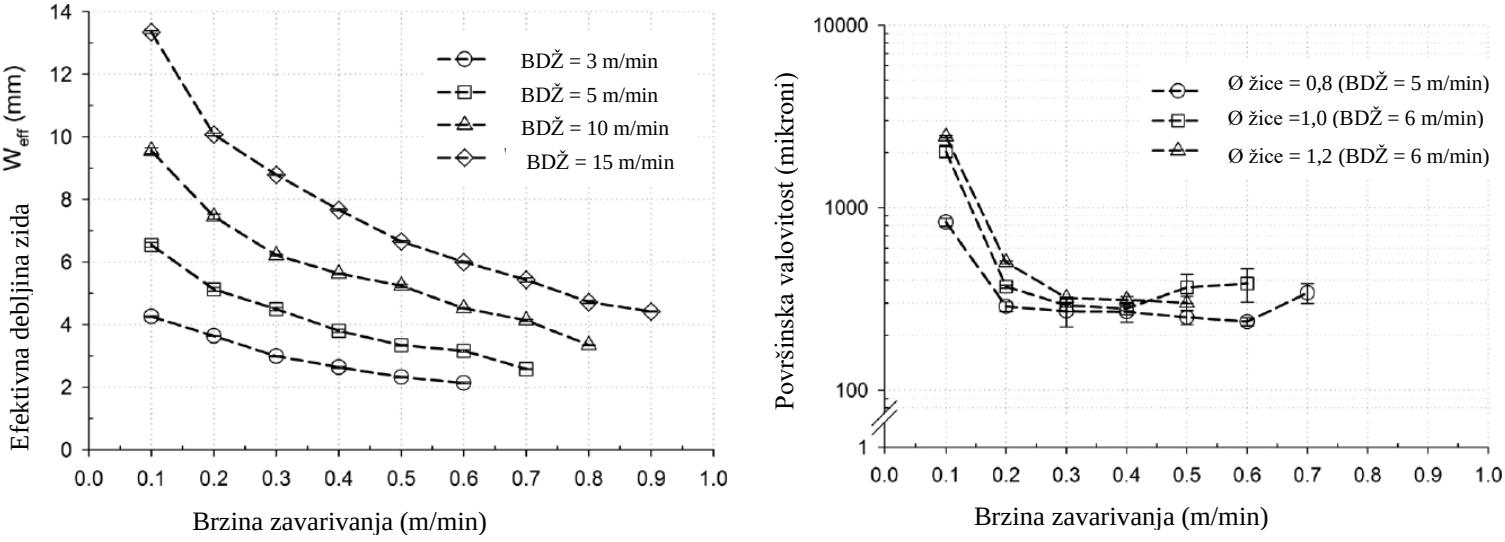


Slika 34. Zavarivanje zida u PC položaju, (a) kolinearna sapnica, (b) sapnica zamaknuta za 30° [20]



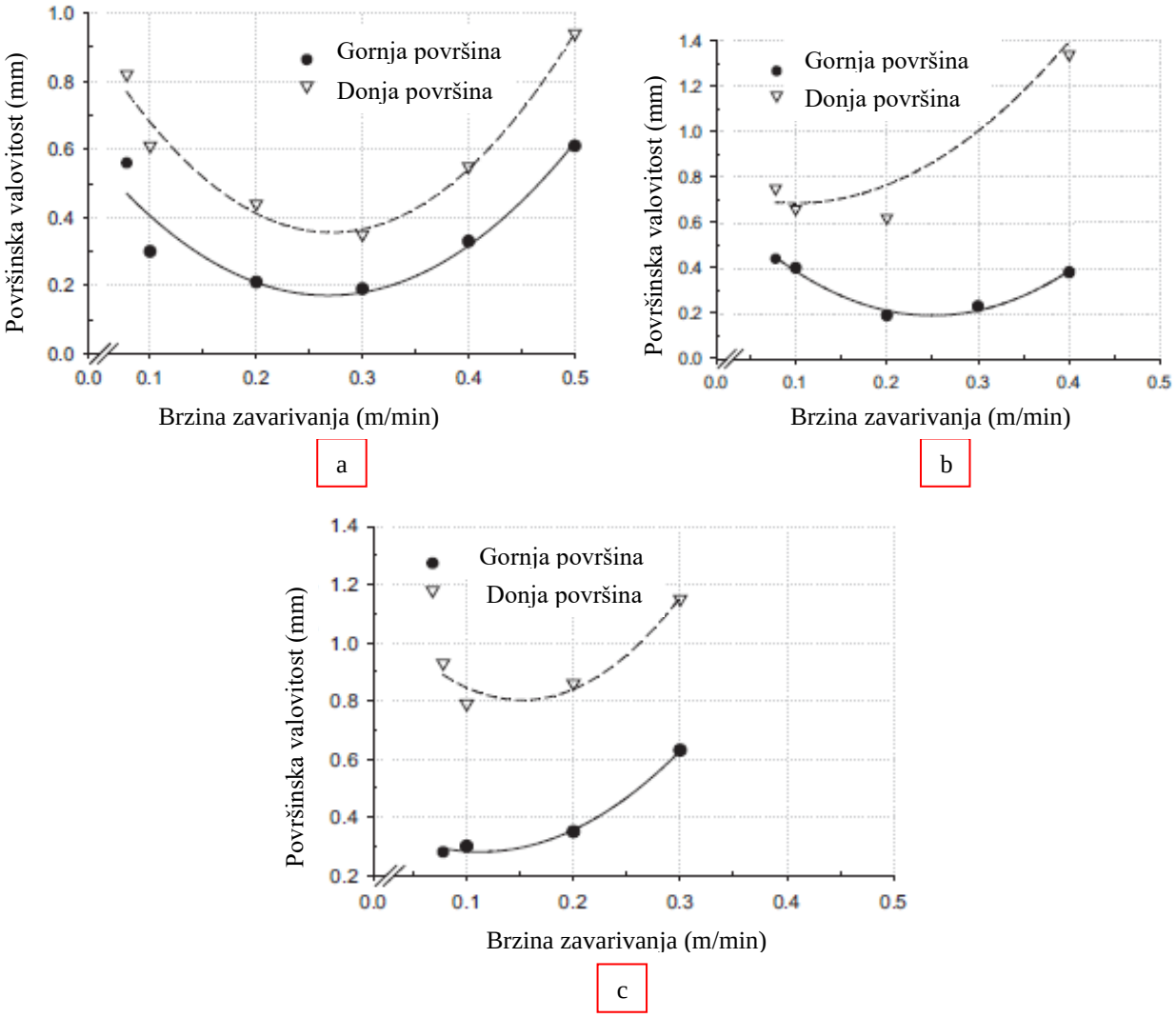
Slika 35. Presjek zida debljine 7 mm [20]

Empirijski podaci korišteni prilikom zavarivanja zidova prikazanim na slikama 34 i 35 preuzeti su iz tablica prikazanim na slici 36. (Brzina dobave žice = BDŽ)

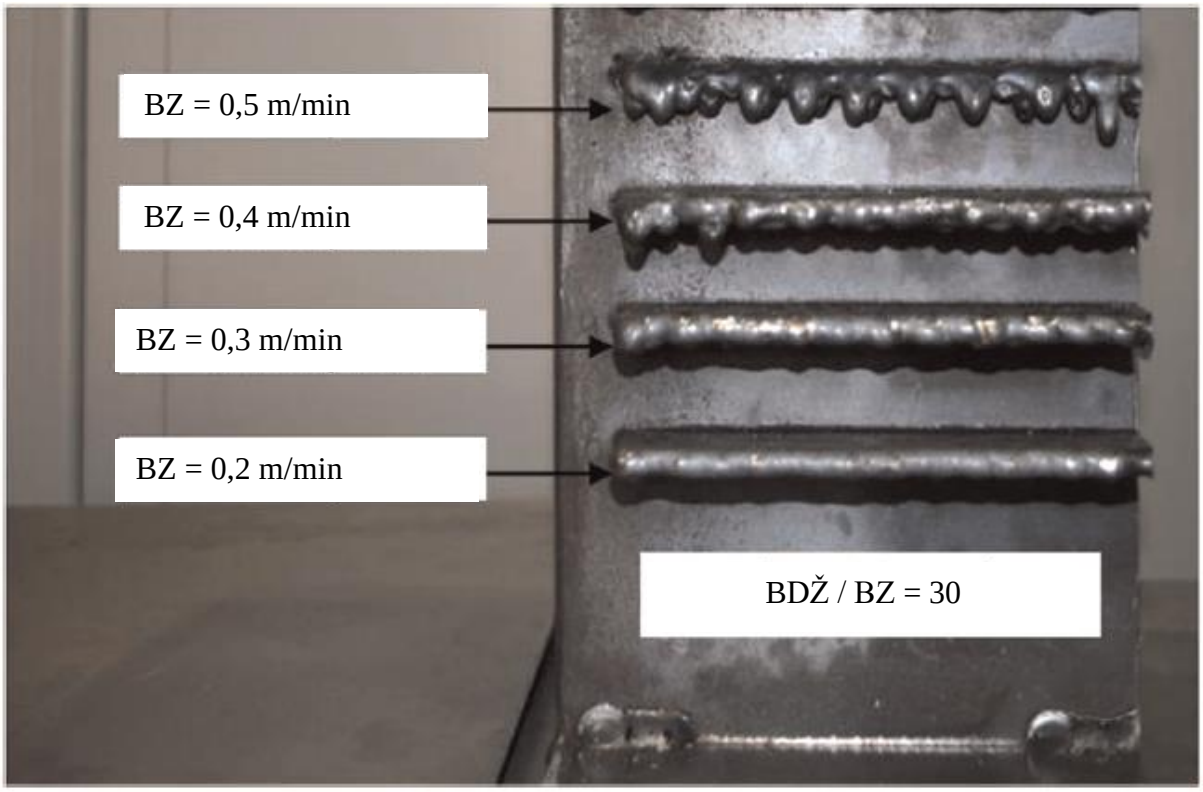


Slika 36. Ovisnost efektivne debljine zida o brzini zavarivanja (lijevo), ovisnost promjera žice o površinskoj valovitosti (desno) [20]

Zbog velikog utjecaja brzine zavarivanja na kvalitetu zavarivanja provedena su daljnja ispitivanja u PC položaju sa iznosom brzine zavarivanja od 0,078 m/min do 0,6 m/min. Omjerom BDŽ i BZ (BZ-brzina zavarivanja) je održan konstantnim kako bi se osiguralo konstantan depozit dodatnog materijala. Površinska valovitost dobivenih rezultata najčešće poprima oblik slova U prikazanima na slici 37. BZ koja korespondira sa najmanjim iznosom površinske valovitosti je između 0,2 i 0,25 m/min. Daljnjim povećavanjem BZ dolazi do opadanja kvalitete zida prikazanim na slici 38. Zidovi na slici 38 izrađeni su sa omjerom BDŽ i BZ u iznosu od 30 sa BZ u iznosu od 0,2 m/min na najnižem zidu. Na svakom slijedećem zidu BZ raste u inkrementima od 0,1 m/min [20].



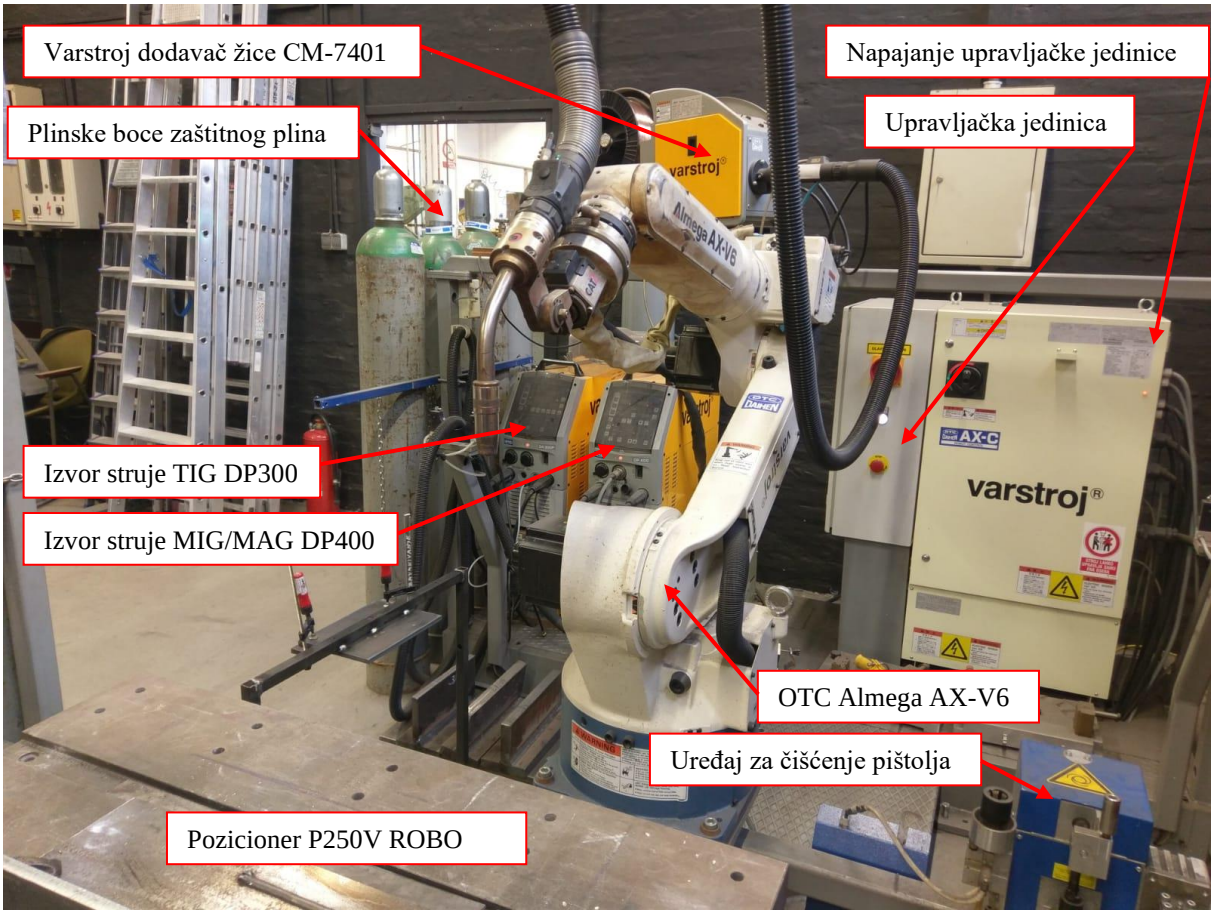
Slika 37. Površinska valovitost s obzirom na brzinu zavarivanja za BDŽ , BZ omjer (a) 15, (b) 30, (c) 45 [20]



Slika 38. Opadanje kvalitete zida sa povećanjem brzine žice [20]

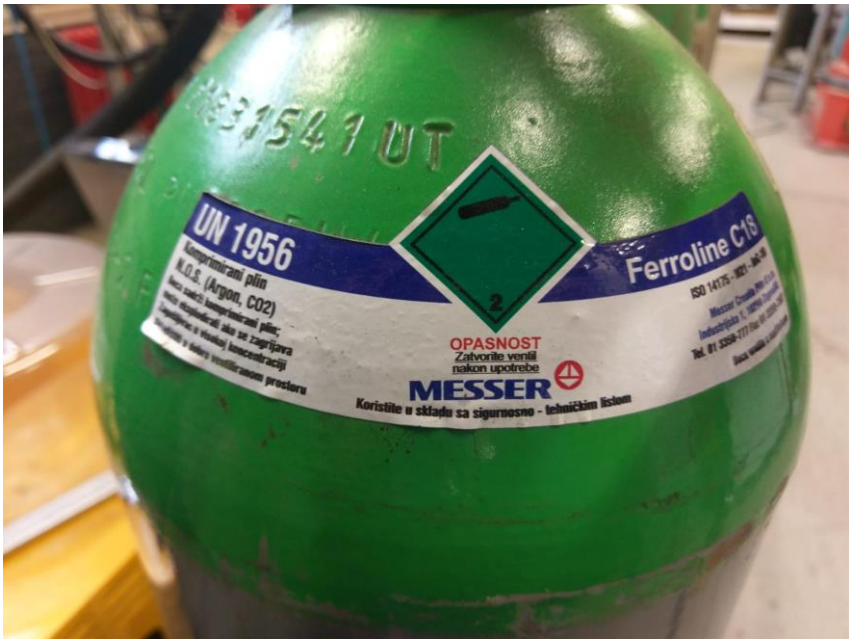
5. Eksperimentalni dio

Eksperimentalni dio rada proveden je u Laboratoriju za zavarivanje Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. Eksperiment j proveden na robotu Almega AX-V6 u konfiguraciji VRC-1G MIG + 1G TIG/1dm, za izvor struje korišten je OTC Daihen Varstroj DP400 sa poluautomatskim dodavačem žice OTC Daihen CM-7401. Za MAG zavarivanje korišten je zaštitni plin sa 18 % CO_2 i 72 % Ar. Prije početka samog eksperimenta poveden je pred eksperiment kako bi se utvrdio optimalno područje zavarivanja za zavarivanje zida u PC položaju. Nakon zavarivanja provedeno je rezanje jednog dijela komada za analizu mikrostrukture, makrostrukture i tvrdoće. Preostali komad zida podvrgnut je analizi parametara teksture površine. Na temelju dobivenih rezultata dan je zaključak na odabrane parametre.



Slika 39. Robotska ruka za zavarivanje Almega AX-V6

Zaštitni plin korišten prilikom eksperimenta je Ferroline C18 sa 18 % ugljičnog dioksida i 72 % argona, boca je prikazana na slici 35. Korištena žica za zavarivanje ima promjera 1,2 mm oznake SG 2 sa specifikacijama prikazanim na slici 35.



Slika 40. Zaštitni plin Ferroline C18

NORME

HRN EN ISO 14341-A	AWS / ASME SFA-5.18	DIN 8559	W. Nr.
G 42 4 C/M 3Si1	ER70S-6	SG 2	1.5125

SVOJSTVA I PODRUČJE PRIMJENE

Pobakrena ili pobrončana žica za zavarivanje u zaštitnoj atmosferi plina CO_2 ili mješavine plinova Ar/CO_2. Za zavarivanje nelegiranih i niskolegiranih čelika čvrstoće do 590 N/mm².

Grupa čelika	HRN (stari)	DIN (W. Nr.)	HRN / EN / ISO
Konstrukcijski čelici	Č 0261 do Č 0545	St 33 (1.0035) do St 52-2N (1.0050)	S 185 do E 295 Fe 310-0 do Fe 490-2
Kotlovski čelici	Č 1202 Č 1204 Č 3133 Č 3105	HI (1.0345) HII (1.0425) 17Mn4 (1.0481) 19Mn6 (1.0473)	P235GH P265GH P295GH P355GH
Čelici za cijevi	Č 1212 do Č 3100	St 35.4 (1.0309) do St 52.4 (1.0581) StE 210.7 (1.0307) do StE 360.7 (1.0582)	DX55D do P355T2 L210 do L360NB
Brodski čelici	A, B, D, E AH 32 do EH 36	A, B, D, E AH 32 do EH 36	
Sitnozrnati čelici	ČRO 250 do ČRO 350 ČRV 250 do ČRV 350	StE 285 (1.0486) StE 355 (1.0562) WStE 285 (1.0487) WStE 355 (1.0565)	P275N P355N P275NH P355NH
Čelični lijev	ČL 0300 do ČL 0500	GS-38 (1.0416) do GS-52 (1.0551)	C18D do S355JRC

MEHANIČKA SVOJSTVA ČISTOG METALA ZAVARA

R_{eL} N/mm²	R_m N/mm²	A_5 %	KV (-40°C) J
> 430	500 - 640	> 22	≥ 47

ORIJENTACIJSKI KEMIJSKI SASTAV ŽICE

	C	Mn	Si	Cu
%	0,06 - 0,13	1,4 - 1,6	0,7 - 1,0	≤ 0,3

ZAŠTITNI PLIN

C1 ili M21

PAKIRANJE

Promjer žice mm	Namotaj
0,6; 0,8; 1,0; 1,2; 1,6	Slobodan (S-L); žica do žice (S-S)

1 kg - plastični kolut (promjer žice 0,6 i 0,8 mm)
5 kg - plastični kolut (promjer žice 0,6 i 0,8 mm)
15 kg - plastični (S-L ili S-S) ili žičani kolut (S-S) (promjer žice 0,8; 1,0; 1,2 i 1,6 mm)
250 kg - bačva (promjer žice 0,8; 1,0 i 1,2 mm)

ODOBRENJA

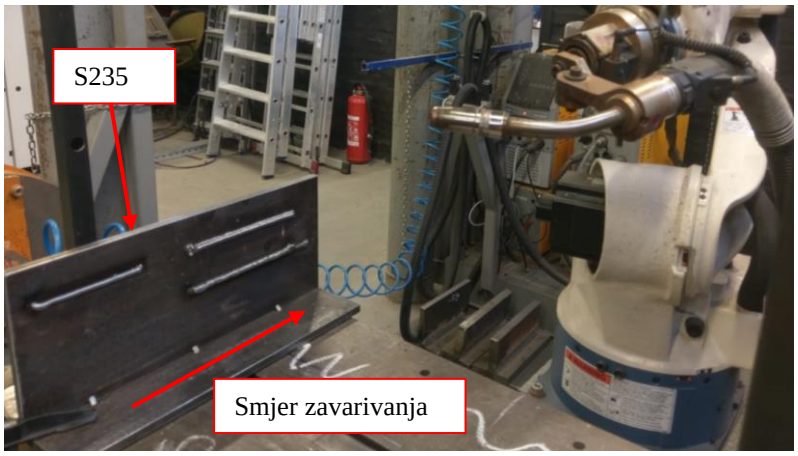
ABS (3YSA); BV (SA 3Y M); CRS (3YS); DB; DNV (IIIYMS); GL (3YS); LR (3S,3YS); RINA (3YS); TÜV

= +

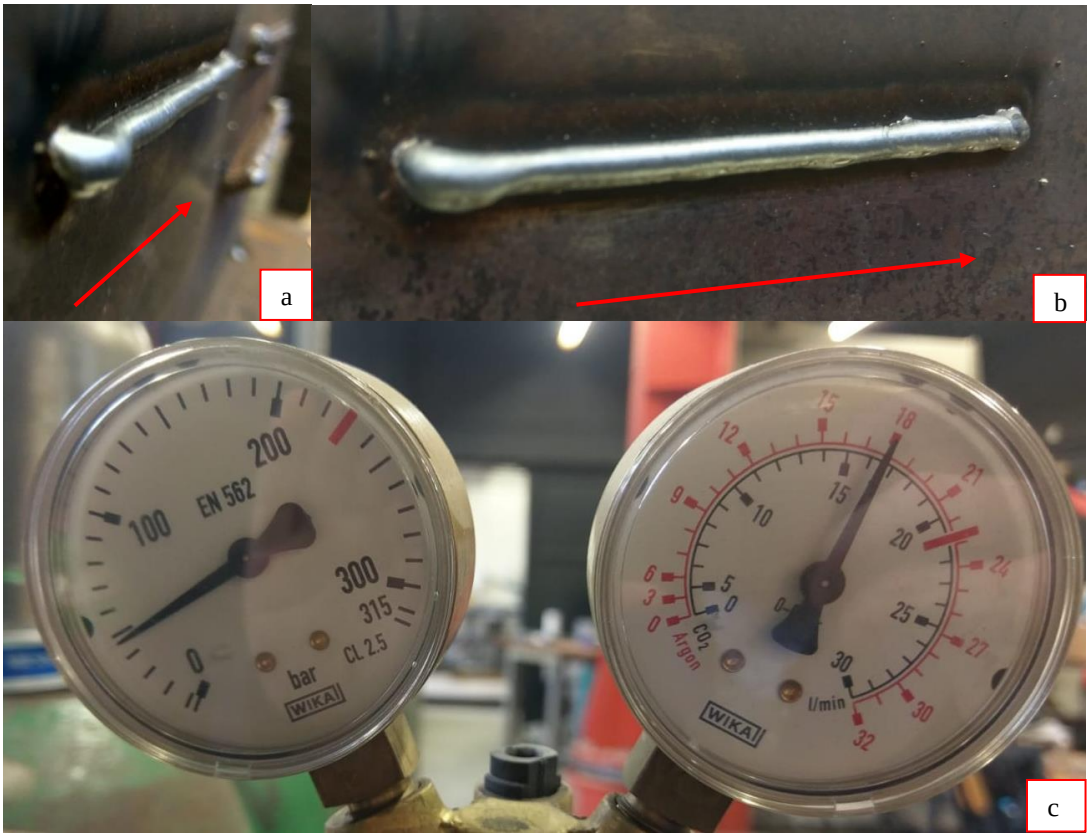
Slika 41. Specifikacije žice za zavarivanje SG2 [19]

5.1 Pred eksperiment

Robotska ruka postavljena je u PC položaj korištenjem samo jedanog programa. Program se sastoji od brzog dostavnog gibanja do mjesta malo iznad zavara, potom sporog dostavnog gibanja do mjesta početka zavarivanja, uspostava električnog luka, provedba procesa zavarivanja, prekid električnog luka i povratak u početnu poziciju.



Slika 42. Pozicioniranje robotske ruke u PC položaj

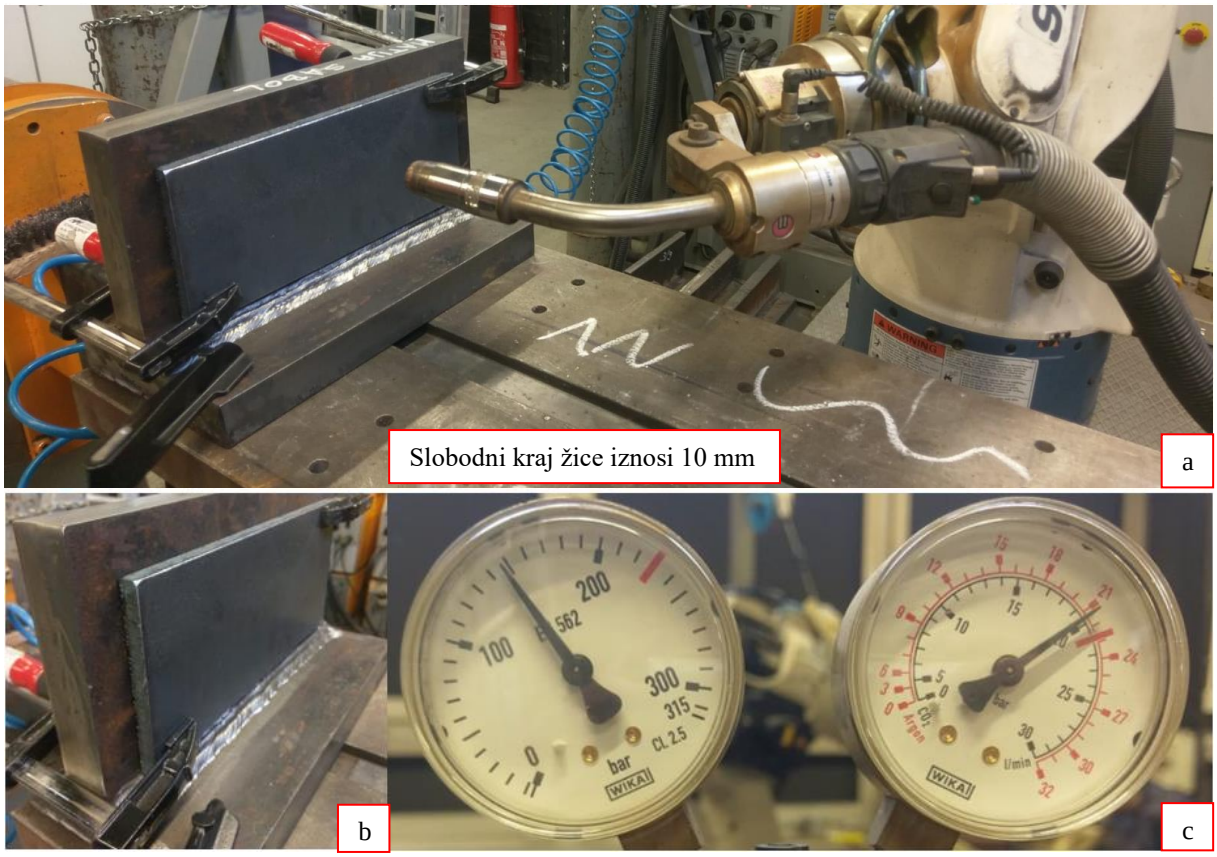


Slika 43. Izgled zida nakon dva prolaza (a, b), plinski protok (c).

Prilikom provođenja eksperimenta korišteni su parametri zavarivanja: jačina struje 90 A, brzina zavarivanja: 30 cm/min te protok plina: ~18 l/min. Na slici 38 (a) može se primijetit nastajanje brijega što je posljedica visokofrekvencijskog starta prilikom uspostavljanja električnog luka i povećanje površinske napetosti koja rezultira povlačenjem okolnog materijala prema sebi. Ovaj problem je u konačnom eksperimentu riješen na način da se prolazi s obje strane. Na slici 38 (a) također s može primijetiti deformacija u obliku naginjanja zida prema gornjoj strani zbog intenzivnog odvođenja topline. U prvih nekoliko prolaza najveći dio topline se odvodi kondukcijom kroz radni komad i T ploče. Zbog mogućnosti javljanja pora u glavnom eksperimentu povećan je protok zaštitnog plina.

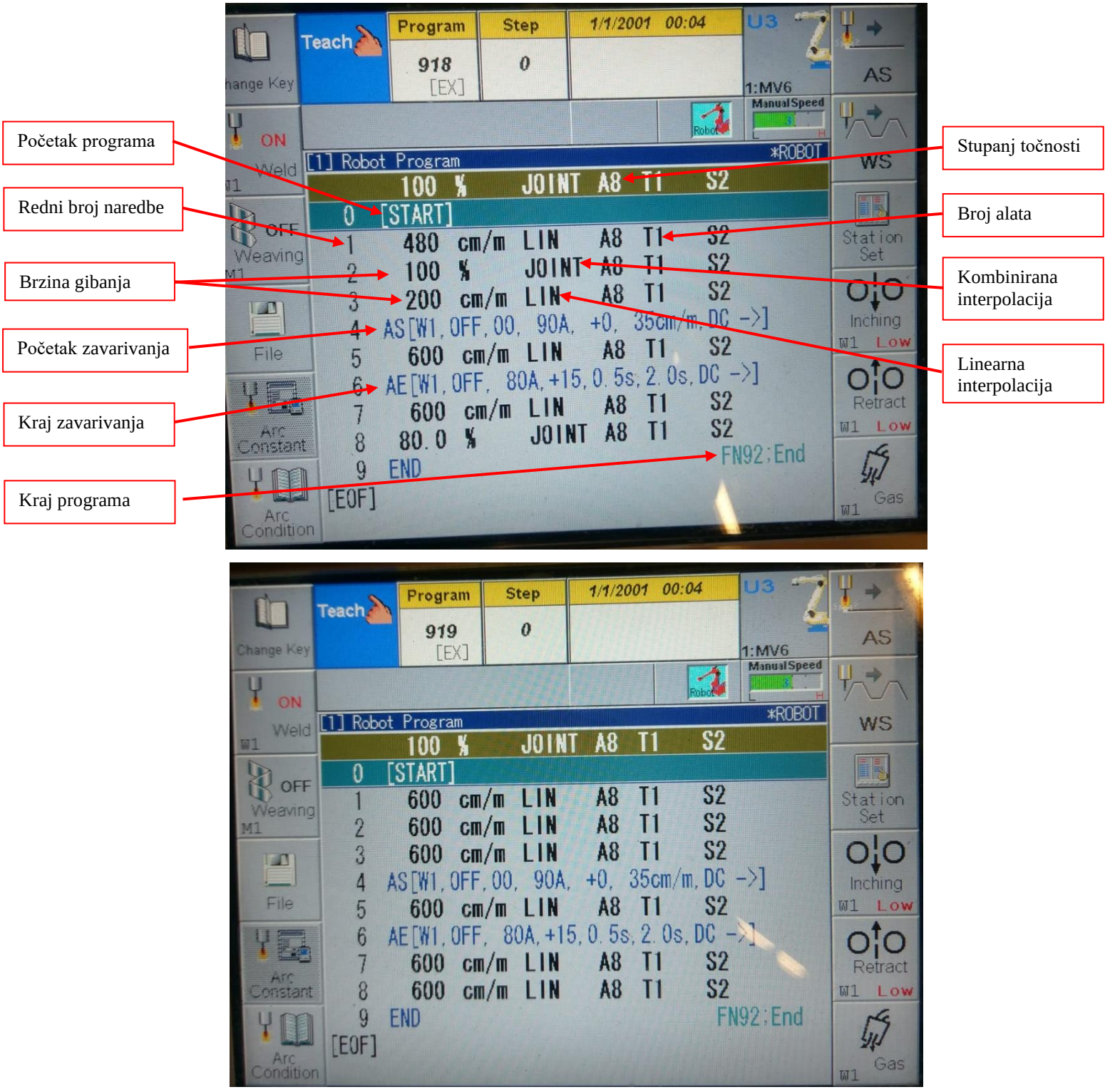
5.2 Eksperiment

Nakon odabranih parametara probni komad se zamjenjuje sa znatno debljim komadom kako bi poboljšali odvođenje topline te se na njega steže ploča čelika S235. Konstrukcija radnog komada prikazana je na slici 39.



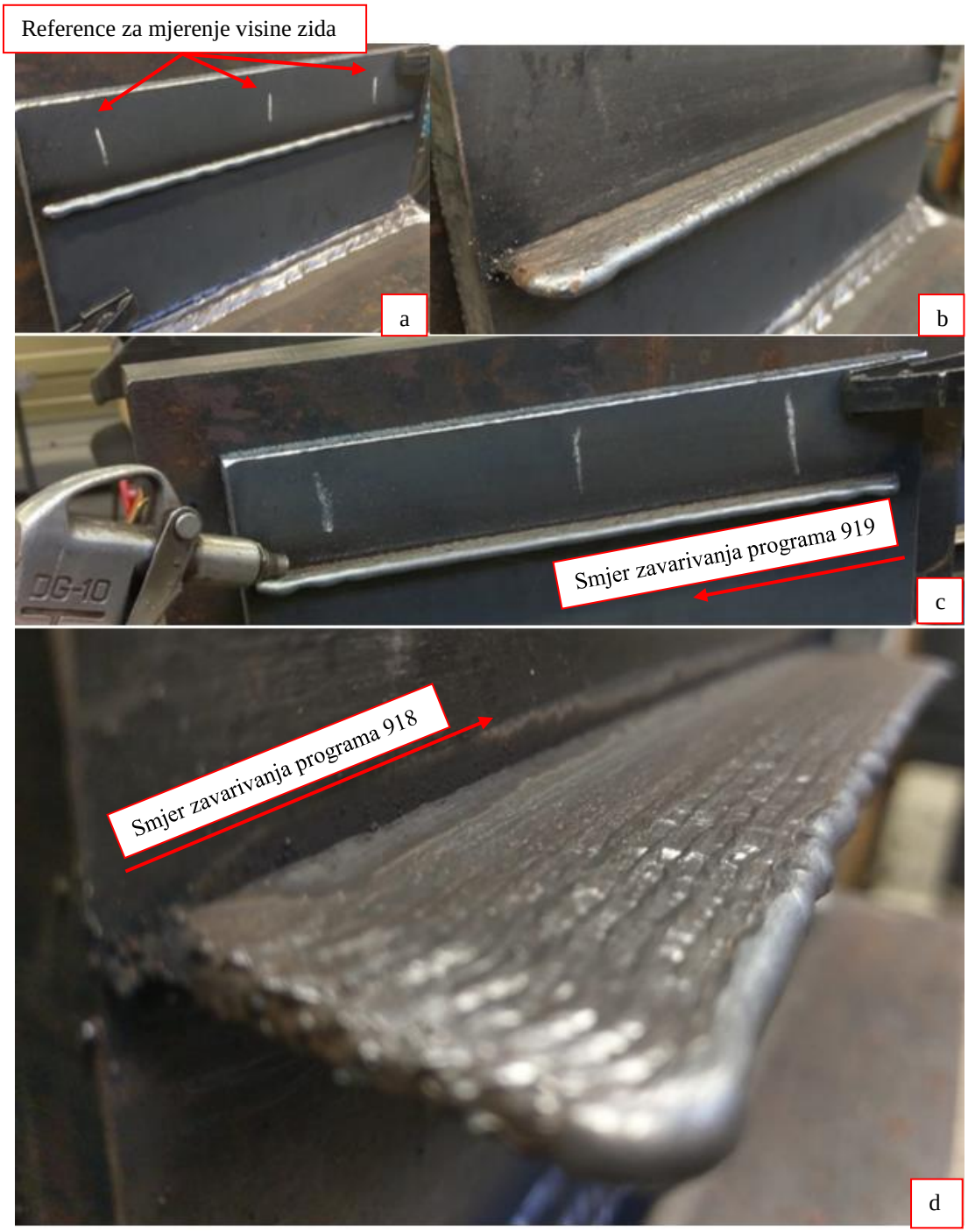
Slika 44. Prikaz konstrukcije prije zavarivanja (a, b), plinski protok (c)

Prije početka samog zavarivanja sastavljena su dva programa koji opisuju putanju gibanja robotske ruke, programi 918 i 919 razlikuju se po smjeru zavarivanja. Prikaz zapovijedi i njihova značenja prikazani su na slici 45.



Slika 45. Programski kod 918 i 919

Proces izrade zida u PC položaju proveden je sa međuprolaznom temperaturom koja iznosi 50 °C. Programi 918 i 919 su kombinirano izvođeni kako bi izbjegli pre veliki unos topline, curenje taline i pojavu brijega koji se može primijetiti na slici 46 (b).

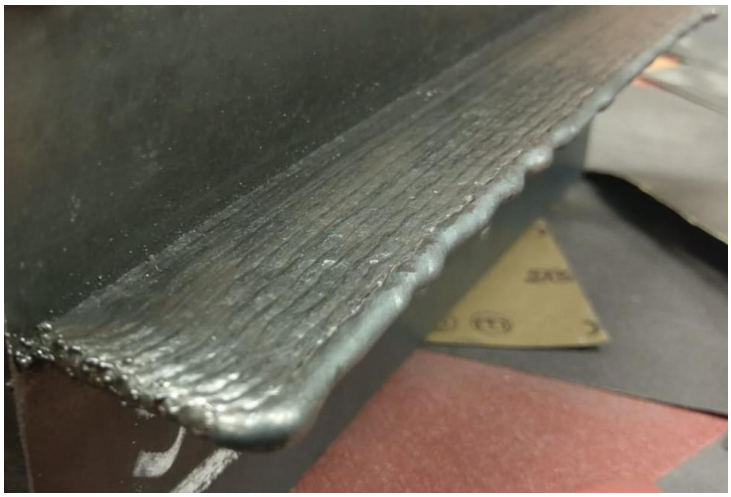


Slika 46. Izgled zida nakon tri (a), deset (c) i dvadeset i pet prolaza (d), prikaz hlađenja između prolaza (c)

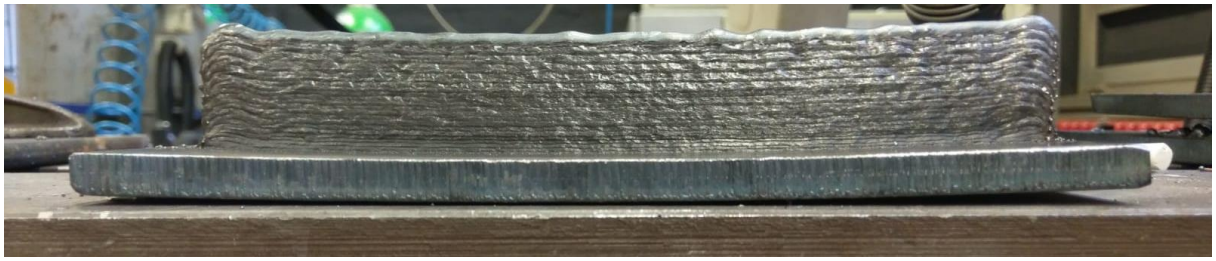
Nakon dvadeset i pet prolaza zid je maknut sa stega, počišćen sa čeličnom četkom i alkoholom te konačni rezultati mogu se vidjeti na slikama 47, 48, 49.



Slika 47. Donja strana zida



Slika 48. Gornja strana zida



Slika 49. Toplinska deformacije osnovne ploče



Slika 50. Bliži prikaz lijevog i desnog ruba

Tijekom zavarivanja bilježeni su parametri zavarivanja: napon i struja dok se nakon svakog prolaza mjerila visina zida u tri točke. Dobivene vrijednosti prikazane su u tablici 6.

Tablica 6. Parametri zavarivanja

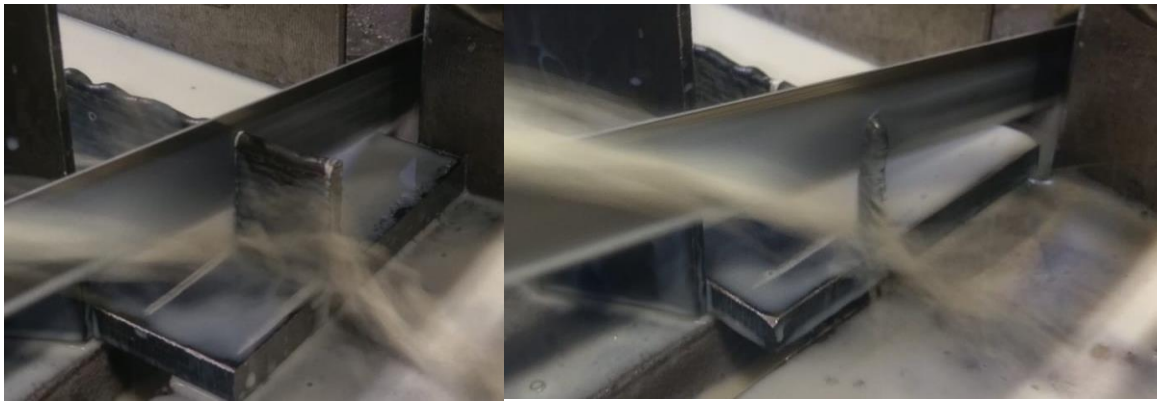
Prolaz	Struja, [A]	Napon, [V]	Temperatura, [°C]	Visina zida [mm]	Prosjek visine zida po prolazu [mm]
1.	81	16,7	23	1,8	1,92
				2,11	
				1,85	
2.	83	16,8	40	3,3	1,32
				3,31	
				3,1	
3.	84	16,8	41	4,8	1,64
				4,8	
				5,02	
4.	83	16,7	42	5,85	0,83
				5,15	
				6,1	
5.	84	16,7	41	7,45	1,68
				7,34	
				7,36	
6.	85	16,8	43	8,63	1,04
				8,2	
				8,43	

7.	86	16,6	48	9,8	1,33
				9,68	
				9,78	
8.	86	16,7	45	11,1	1,28
				11,1	
				10,9	
9.	85	16,6	49	12,38	1,78
				12,8	
				13,25	
10.	84	16,8	49	13,74	0,75
				13,74	
				13,2	
11.	83	16,7	47	15,24	1,51
				15,14	
				14,83	
12.	83	16,8	43	16,64	1,21
				16,23	
				15,98	
13.	83	16,7	43	17,92	1,81
				18,34	
				18,02	
14.	83	16,6	45	19,15	0,94
				19,2	
				18,76	
15.	83	16,7	48	20,5	1,46
				20,6	
				20,4	
16.	84	16,6	48	22,06	1,46
				22,07	
				21,76	
17.	83	16,8	47	23,05	1,18
				23,67	
				22,72	
18.	84	16,7	47	25,06	1,50
				24,22	
				24,65	
19.	83	16,7	47	26,24	1,28
				25,92	
				25,6	

20.	83	16,8	49	27,1 27,11 27,2	1,22
21.	83	16,7	48	28,7 28,57 28,16	1,34
22.	84	16,7	49	29,55 29,76 29,44	1,11
23.	84	16,6	48	31,05 31,36 30,83	1,50
24.	84	16,7	49	32,43 32,64 32,01	1,28
25.	84	16,6	47	33,61 33,48 33,3	1,10

5.3 Rezanje i priprema za analizu

Nakon operacije zavarivanja zid se reže na dva komada, manji komad se brusi i priprema za mikro i makro analizu dok se preostali dio zida miče od osnovne ploče i priprema se za analizu površine.



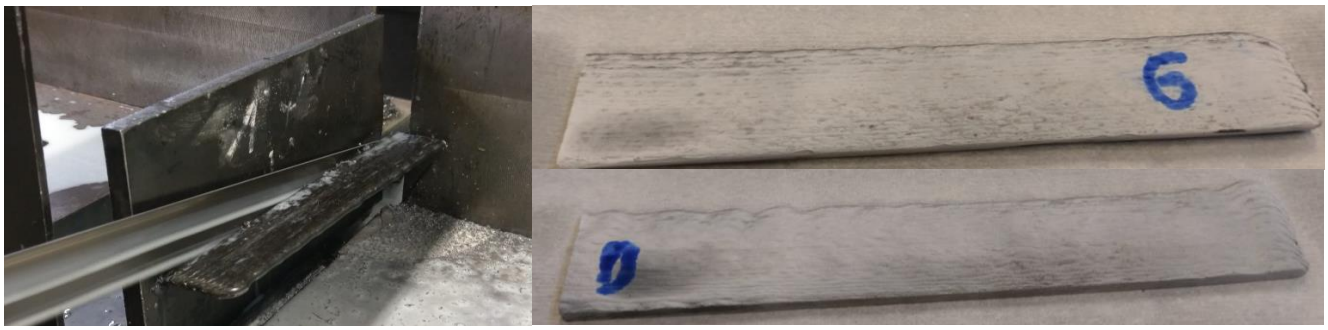
Slika 51. Odrezivanje ruba zida (desno), odrezivanje zida za mikro i makro analizu (lijevo)

Uzorak namijenjen za mikro i makro analizu je sa unutrašnje strane (bliže centru zida) suho brušen brusnim papirima grubosti: 80, 150, 180, 240, 280, 320 i 600. Suho brušenje je provedeno na princip gibanja predmeta po jednom pravcu (gore, dolje) te kada se mijenja brusni papir obradak se okreće za 90° i proces se ponavlja. Kada nestanu linije od prethodnog brušenja i na obradku ostanu samo linije u jednom smjeru prelazi se na brusni papir sa finijim zrnom.



Slika 52. Obradak nakon brušenja sa brusnim papirom grubosti 600

Preostali komad zida se reže od podloge, čisti se, skidaju mu se oštri rubovi te se priprema za skeniranje nanošenjem penetranta SKD-S2.



Slika 53. Rezanje zida od osnovne ploče (lijevo), zid sa nanesenim penetrantom (desno)

5.4 Analiza tvrdoće

Analiza tvrdoće provedena je na uređaju za mjerenje tvrdoće *Reicherter* koji koristi dijamantnu piramidu kao indentor. Uređaj je također opremljen sa svjetlosnim mikroskopom koji služi za mjerenje duljine dijagonala otiska. Nakon očitanja duljine dijagonala iz tablica se očitava konačna vrijednost tvrdoće po Vickersu HV 10. Na slici se 54 nalazi se uređaj za mjerenje tvrdoće po Vickersu.

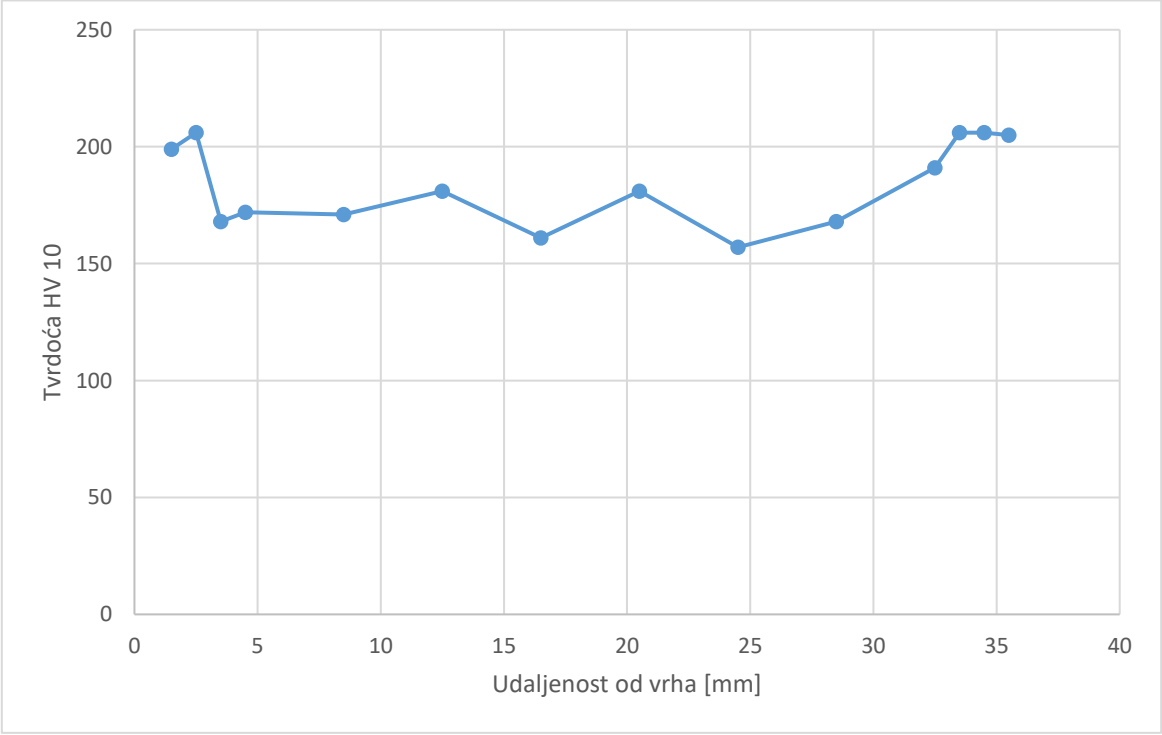


Slika 54. Uređaj za mjerenje tvrdoće po Vickersu

Dobiveni rezultati mjerenja tvrdoće prikazani su u tablici 7 i slici 57. Prije mjerenja pretpostavilo se da će iznos tvrdoće bit znatno veći u prvih nekoliko prolaza zbog intenzivnijeg hlađenja dok nakon zadnjeg prolaza tvrdoća zida bi trebala biti nešto manja. Pretpostavlja se da uzrok povećanja tvrdoće u prvih nekoliko prolaza je ubrzano hlađenje koje bi u izotermnom TTT dijagramu bilo prikazano okomitijom krivuljom koja bi u potpunosti ili dobrim dijelom zalazila u martenzitno područje. Krivulja pretvorbe mikrostrukture za zadnjih nekoliko prolaza izgledala bi polegnutije što bi za uzrok imalo smanjenje tvrdoće.

Tablica 7. Iznos tvrdoće po presjeku zida

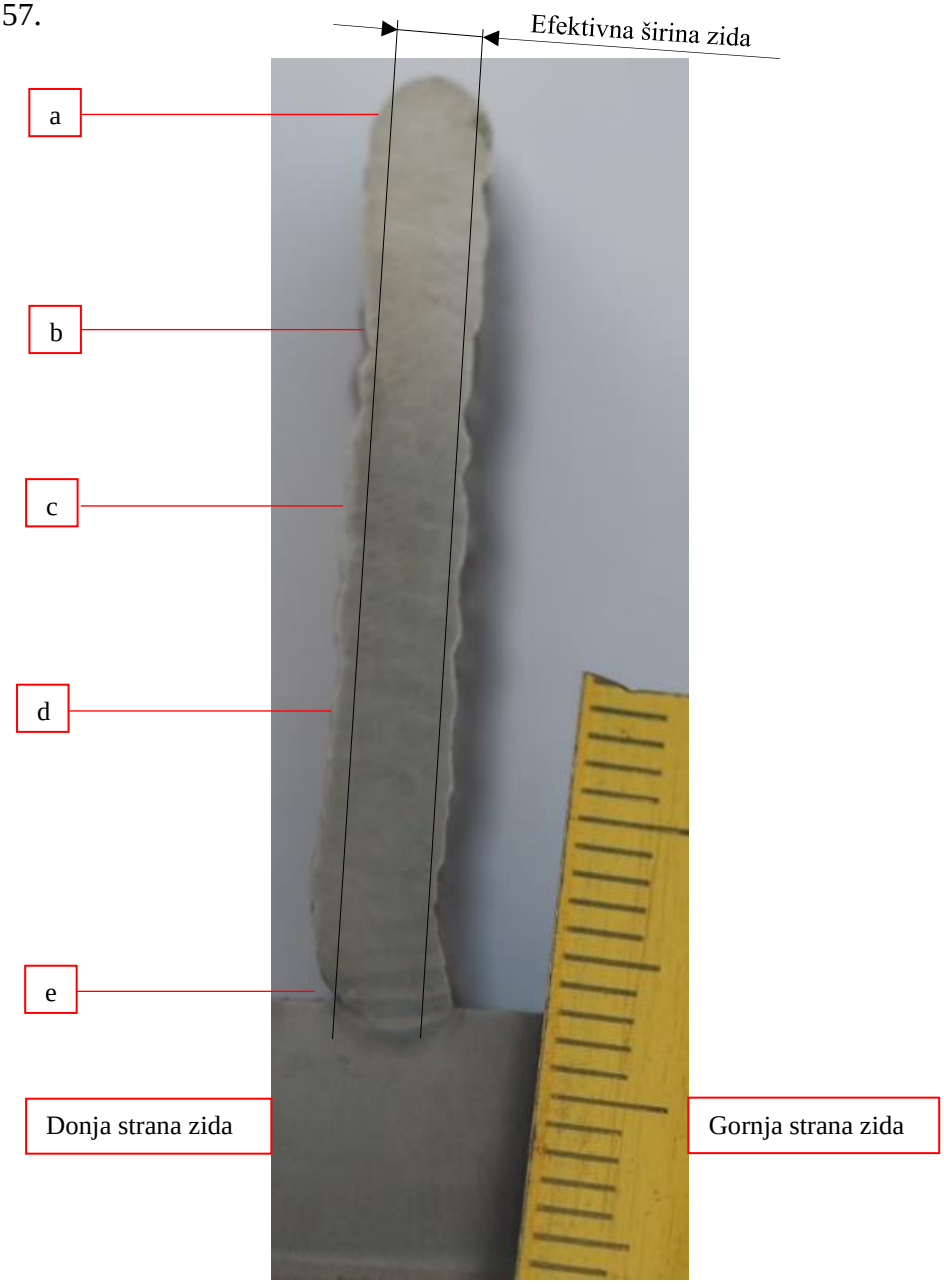
Broj mjerenja	Prosječna duljina dijagonale [mm]	Udaljenost od vrha [mm]	Očitano iz tablice HV 10
1.	0,305	1,50	199
2.	0,300	2,50	206
3.	0,332	3,50	168
4.	0,328	4,50	172
5.	0,329	8,50	171
6.	0,320	12,5	181
7.	0,339	16,5	161
8.	0,320	20,5	181
9.	0,344	24,5	157
10.	0,332	28,5	168
11.	0,312	32,5	191
12.	0,299	33,5	206
13.	0,300	34,5	206
14.	0,301	35,5	205



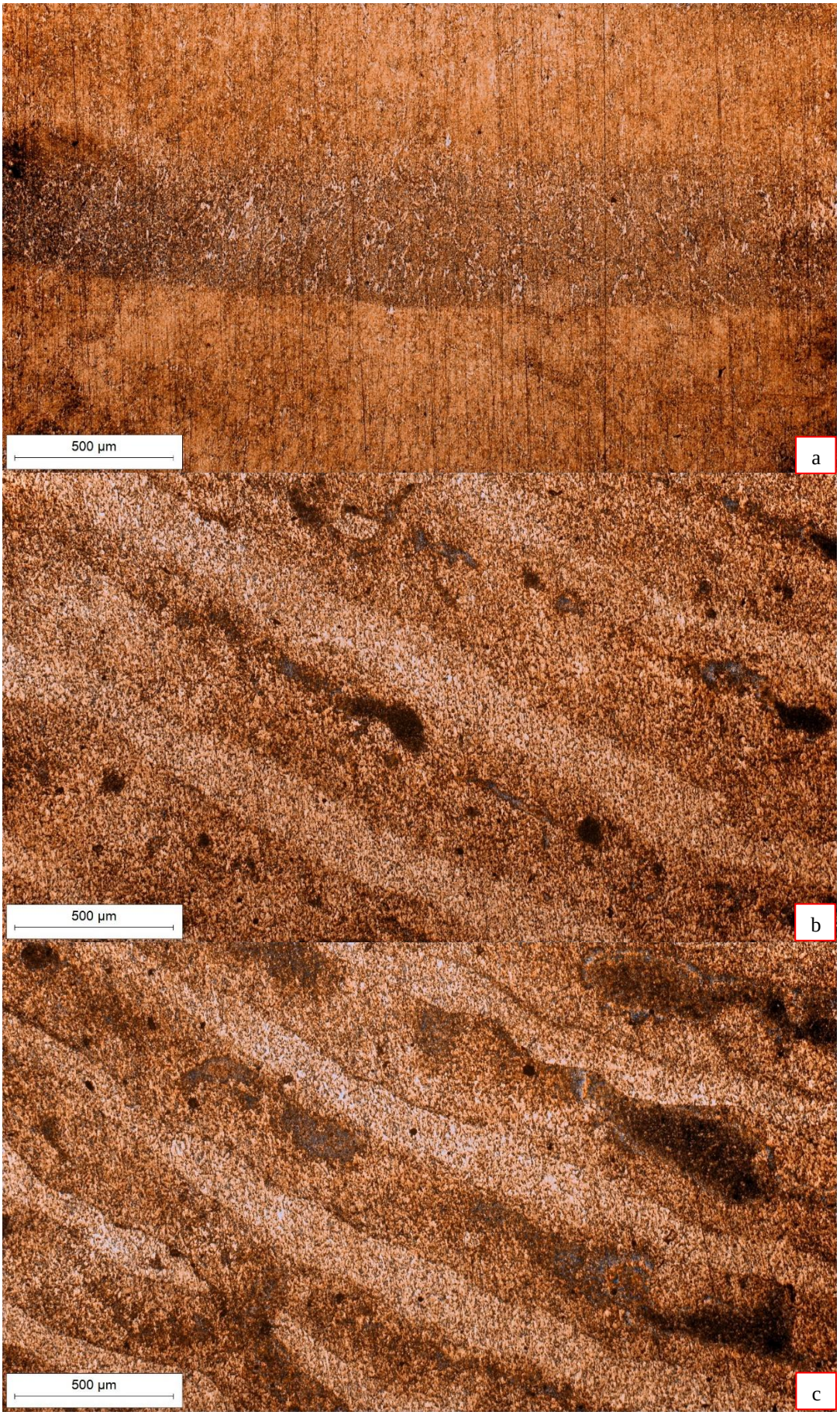
Slika 55 Graf tvrdoće po udaljenosti od vrha zida

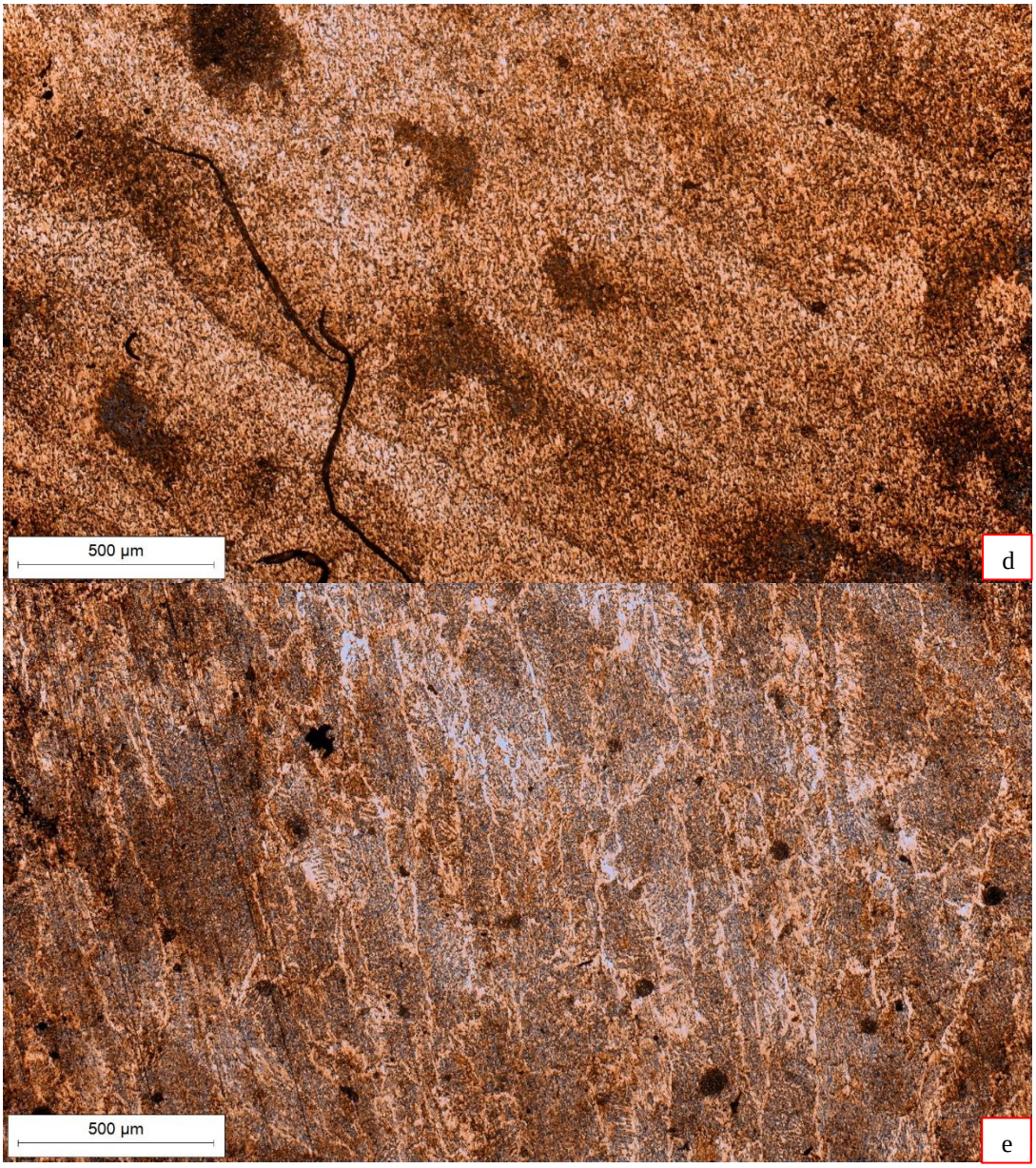
5.5 Analiza mikrostrukture i makrostrukture

Obradak prikazan na slici 52 podvrgnut je procesu kemijskog nagrizanja 3% nitalom u trajanju od 30 sekundi. Rezultati nagrizanja sa prikazom mikro i makro strukture vidljivi su na slikama 56 i 57.



Slika 56. Prikaz makrostrukture sa označenim mjestima promatranja mikrostrukture


500 µm
a
500 µm
b
500 µm
c

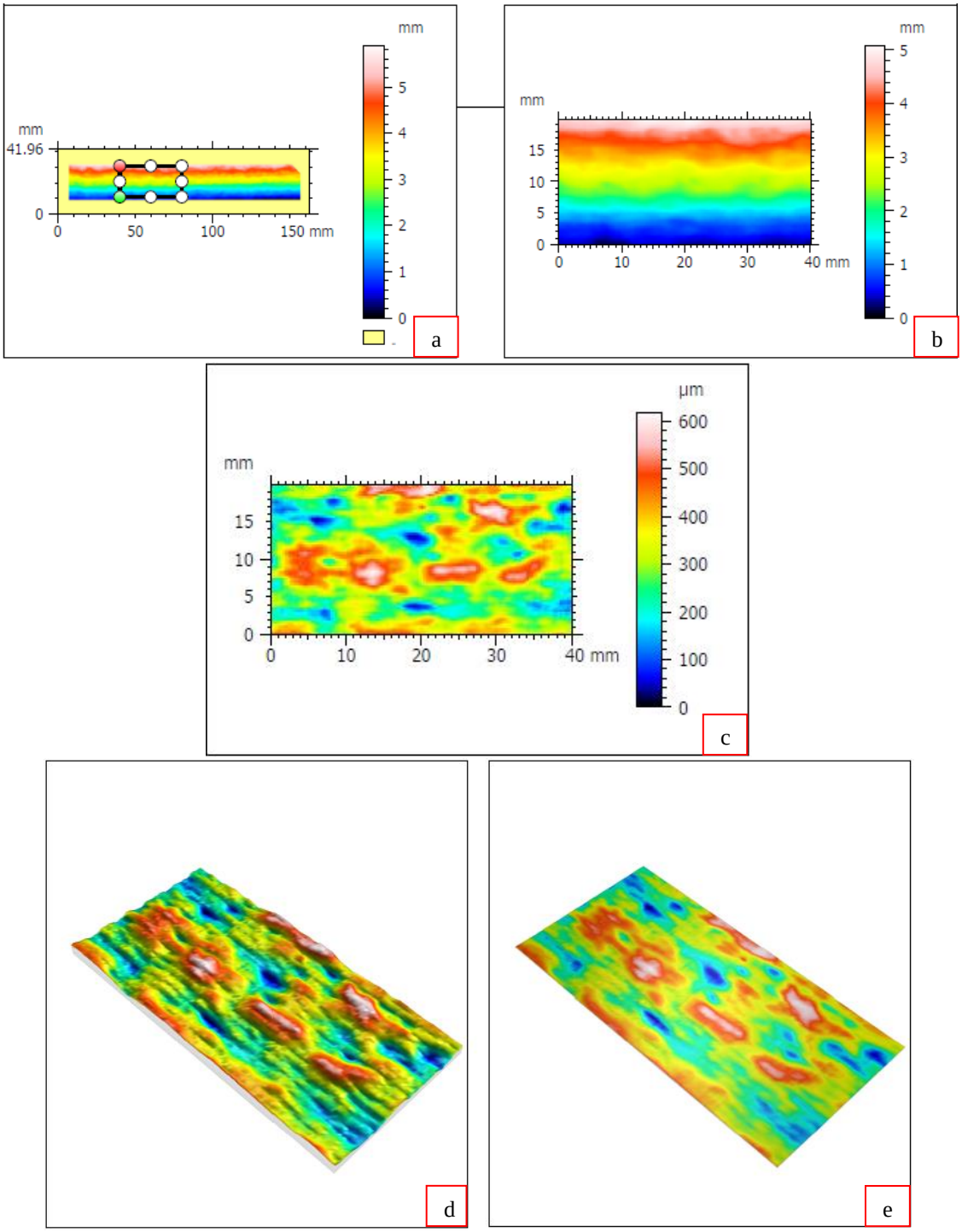


Slika 57. Prikaz mikrostrukture presjeka zavara po mjestima

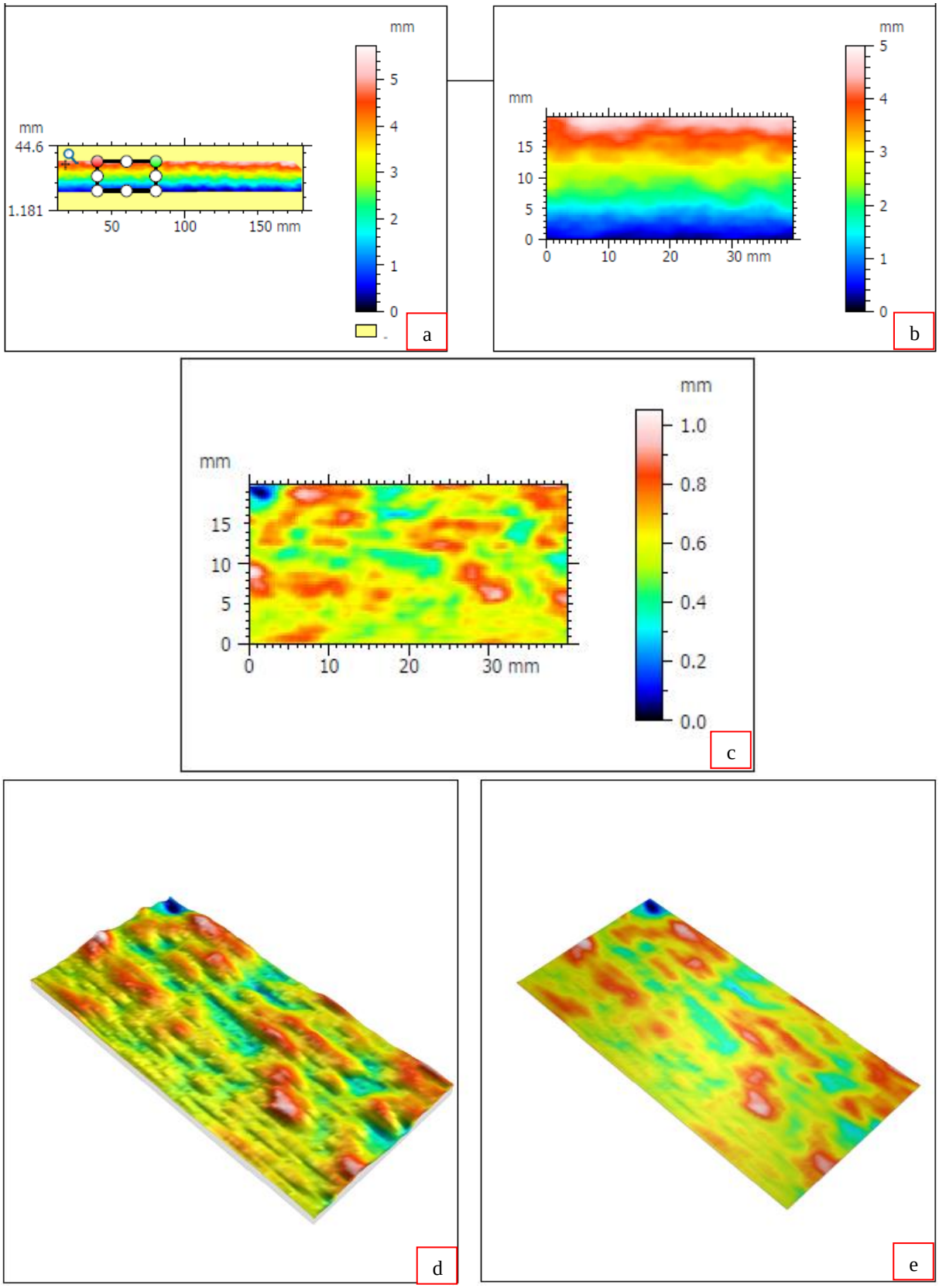
Na slici 56 mogu se raspoznati granice između svakog prolaza, ne mogu se uočiti ravne tanke linije između prolaza što upućuje na pravilno zavarivanje međuslojeva bez naljepljivanja. Pri samom dnu zida može se uočiti blagi nagib prema dolje koji se kasnije ispravlja. Pretpostavlja se da je uzrok nagibu greška prilikom programiranja. Zbog postavljanja slobodnog kraja žice iznad 10 mm dolazi do blagog curenja taline uzrokovano silom težom. Na slici 57 (d) može se primijetit oštećenje koje nalikuje na pukotinu koja nije vidljiva na makroizbrusku, slika 57 (b, c, d) posjeduju tamnija područja koja mogu predstavljati određene uključine u materijalu sa različitim svojstvima od osnovnog. Potrebno je provesti daljnja ispitivanja na području analize mikrostrukture kako bi točnije zaključili sastav dijelova zida.

5.6 Analiza parametara teksture površine

Zid prikazan na slici 53 podvrgnut je analizi parametara teksture površine. Za skeniranje površine korišten je DAVID 3D skener u kombinaciji sa programom MountainsLab. Dobiveni rezultati prikazani su na slikama 58,59 i 60 kao i tablicama 8 i 9.



Slika 58. Prikaz dobivenih rezultata gornje strane zida



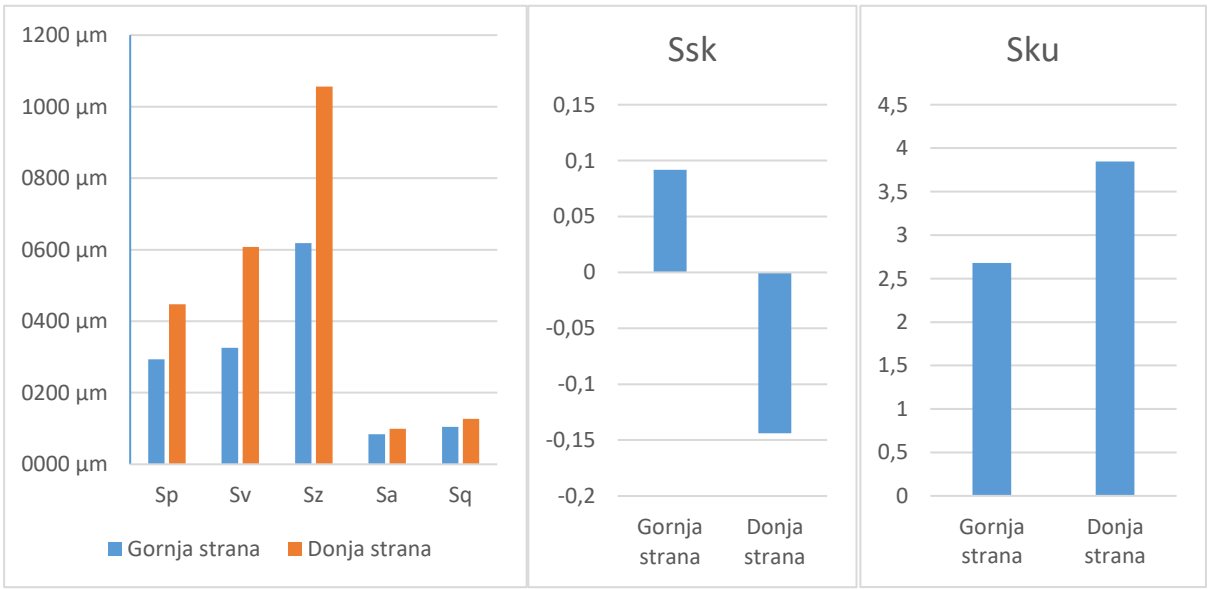
Slika 59. Prikaz dobivenih rezultata donje strane zida

Tablica 8. Prikaz parametara ravnoće površine gornje strane zida

Sq	104,7 µm
Ssk	0,09189
Sku	2,679
Sp	293,4 µm
Sv	325,3 µm
Sz	618,8 µm
Sa	84,47 µm

Tablica 9. Prikaz parametara ravnoće površine donje strane zida

Sq	0,1274 mm
Ssk	-0,1438
Sku	3,847
Sp	0,4479 mm
Sv	0,6078 mm
Sz	1,056 mm
Sa	0,09907 mm



Slika 60. Usporedba parametara gornje i donje strane zida

Objašnjenje pojedinih parametara:

*S*q-srednje kvadratno odstupanje

*S*sk - koeficijent asimetrije površine

*S*ku- koeficijent oštrine površine

*S*p-najveća visina vrha površine

*S*v-najveća udubina površine

*S*z-najveća visina neravnine površine

*S*a-srednje aritmetičko odstupanje površine.

Iz tablica 9 može sa primijetiti da dolazi do nešto većih iznosa parametara površine zbog većeg utjecaja sile teže na donju stranu zida, te zbog toga su parametri površine u tablici 9 izraženi u mm. Slike 57 (d) i 58 (d) su uvećani oblici stvarnog prikaza radi lakše preglednosti obradaka. Postupak pronalaženja rezultata neravnina je slijedeći. Nakon skeniranja obradak je orijentiran te pretvoren u *stl* format, potom je uzet isječak zida dimenzija 40 x 20 mm vidljiv na slikama 57 (a, b) i 58 (a, b) te na njima je provedena analiza parametar teksture površine. Obzirom na iznos srednjeg kvadratnog odstupanja koji u oba slučaja iznosi oko stotinjak mikrona može se zaključiti da ukoliko postoji potreba za ravnom površinom naknadna strojna obrada bila bi vrlo brzo i jeftino izvedena.

6. ZAKLJUČAK

WAAM tehnologija zavarivanja postala je popularna devedesetih godina dvadesetog stoljeća zbog potrebe za redukcijom u cijeni obrade skupocjenih materijala kao što su titanij, inkonel čelici i razni visokolegirani čelici. Korištenjem principa slaganja materijala sloj po sloj koji je omogućen upotrebom robotskog manipulatora i već dobro poznate tehnologije zavarivanja korištenjem električnog luka i žice u atmosferi zaštitnog plina (MIG/MAG), moguće je izraditi konstrukcije različitih oblika. Zbog ograničenja u veličini robotske ruke i debljini žice WAAM tehnologija je ograničena na izradu većih dijelova jednostavnije geometrije, dok se manji komadi složene geometrije mogu relativno jednostavno konstruirati putem sinteriranja metala u prahu. Problematika zaostalih naprezanja i deformacija uslijed velikog unosa topline je neizbježna za oba postupka aditivne proizvodnje metalnih konstrukcija.

Nakon provedbe zavarivanja zida u PC položaju WAAM tehnologijom možemo zaključiti da je početni izbor parametara zavarivanja bio adekvatan. Prije primjene na konstrukcijama potrebno je provesti normalizacijsko žarenje kako bi ujednačili izgled zrna kroz cijeli presjek i ujednačili razliku tvrdoće u početnim i krajnjim prolazima. Zbog mogućnosti javljanja pora i pukotina potrebno je voditi računa o kemijskom sastavu osnovnog metala, dodatnog metala kao i smjesi korištenog zaštitnih plinova. Iz analize parametara teksture površine može se zaključiti da će u pravilu na donjoj strani zida doći do većeg iznosa parametara površine zbog utjecaja sile teže. To dovodi do smanjivanja efektivne debljine zida. Ukoliko je potrebno postići određenu toleranciju nekog dijela strojna obrada je moguća. Jedan od načina povećanja efektivne debljine zida je optimiziranjem parametara zavarivanja kako bi neravnine nastale uslijed prolaza sveli na minimum.

Zbog male količine vremena koja je bila dostupna za provedbu ovog eksperimenta, područje istraživanja je bilo vrlo usko. U budućnosti potrebno je provesti više eksperimenata varirajući korištene parametre ovog eksperimenta te pronaći optimalno područje parametara zavarivanja koje bi rezultiralo sa optimalnim iznosom rezultata teksture površine. Također je potrebno provesti detaljniju mikroanalizu strukture zida zavara. Osim mikroanalize potrebno je pronaći skupinu parametara vezanih uz toplinsku obradu koja bi nam davala najpoželjnija mehanička svojstva zida.

LITERATURA

[1] https://www.sfsb.hr/kth/zavar/tii/vr_spo.pdf Strana 8/10, dostupno: 17.1.2021

[2] ADITIVNA PROIZVODNJA UZ POMOĆ ELEKTRIČNOG LUKA I ŽICE KAO DODATNOG MATERIJALA (WAAM)- TRENUTNO STANJE I POTENCIJAL Nikola Knezović, časopis: Zavarivanje 61 (2018) 73-78

[3] M. Karamarko.: Analiza mikrostrukture pri aditivnoj proizvodnji duplex čelika električnim lukom i žicom, Završni rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2018.

[4] F. Dominković.: Primjena MIG postupka za aditivnu proizvodnju električnim lukom i žicom, Diplomski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2016.

[5] https://waammat.com/about/waam, Posjećeno 18.1.2021

[6] Xiangfang Xua, Supriyo Gangulya , Jialuo Dinga, Shun Guob, Stewart Williams, Filomeno Martinaa. Microstructural evolution and mechanical properties of maraging steel produced by wire + arc additive manufacture process. School of Materials Science and Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China. Materials Characterization, ELSEVIER 2017

[7] D. Ilić.: optimizacija prijenosa metala za aditivnu proizvodnju električnim lukom u žicom, Diplomski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2016.

[8] K. Matej.: Teorijske i praktične osnove MIG/MAG postupka zavarivanja, Završni rad, Sveučilište Sjever, Varaždin, 2016.

[9] S. Kralj, Š. Andrić: Osnove zavarivačkih i srodnih postupaka, Sveučilište u Zagrebu, FSB, Zagreb, 1992.

[10] Josip Brezetić: Tehnologija II- Zavarivanje, Veleučilište u Karlovcu, Podloge za učenje.

[11] Lincoln Electric Company: Gas Metal Arc Welding Guidelines, Cleveland, Ohio, 2006.

[12] G. Brumec: Zavarivanje cjevovoda MAG postupcima, Završni rad, FSB, 2010.

[13] M. Horvat, V. Kondić, D. Brezovečki: Opravdanost primjene MAG forceArc postupka zavarivanja u izradi čeličnih konstrukcija, Tehnički glasnik, br. 8, ožujak 2014., str. 288-294

[14] I. Herak: Primjena i specifičnosti MAG-STT postupka zavarivanja, Završni rad, FSB, Zagreb, 2008.

[15] Lincoln Electric Company: Gas Metal Arc Welding Guidelines, Cleveland, Ohio, 2006.

[16] D. Kantolić.: Robotizirano MAG zavarivanje, Završni rad, FSB, Zagreb, 2018.

[17] Crneković M.: INDUSTRIJSKI I MOBILNI ROBOTI, Robotika – struktura, Fakultet strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu, 2016.

[18] M. Živčić; Časopis zavarivanje 1/2/3/ 85g. - TIG zavarivanje; Društvo za tehniku

[19] Web katalog materijala za zavarivanje,https://www.ezg.hr/proizvodi/wire/EZSG2.html, Dostupno: 4.2.2021.

[20] Panagiotis Kazanas, Preetam Deherkar, Pedro Almedia, Helen Lockett, Stewart Williams: Fabrication of geometrical features using wire and arc additive manufacture, SAGE, IMechE 2012.