

Primjena i parametrizacija elektrolučnog senzora kod robotiziranog MAG zavarivanja

Pavlović, Marko

Undergraduate thesis / Završni rad

2023

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:235:441000>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-06-26**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Marko Pavlović

Zagreb, 2023.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Ivica Garašić, dipl. ing.

Student:

Marko Pavlović

Zagreb, 2023.

Izjavljujem da sam ovaj rad radio samostalno koristeći znanja stečena na studiju i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se mentoru izv. prof. dr. sc. Ivica Garašiću na stručnoj pomoći, savjetima i na korisnoj literaturi i podacima koji su mi pomogli pri izradi ovog rada.

Također zahvaljujem svojoj obitelji, djevojci, svim prijateljima i kolegama na pruženoj pomoći tokom studija.

Marko Pavlović



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za završne i diplomske 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 / 23 - 6 / 1 | |
| Ur.broj: 15 - 1703 - 23 - | |

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Marko Pavlović** JMBAG: **0035215286**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Primjena i parametrizacija elektrodučnog senzora kod robotiziranog MAG zavarivanja**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Application and parametrization of through arc sensor at robotized MAG welding**

Opis zadatka:

U teorijskom dijelu potrebno je detaljno proučiti i analizirati vrste senzora koji se primjenjuju za korekciju putanje pri MAG robotiziranom zavarivanju. Posebno opisati senzore električnog luka te definirati sve relevantne parametre koji se moraju kvantificirati prije upotrebe. Na robotskom sustavu Fanuc analizirati opcije funkcije TAST te navesti granična odstupanja radnog komada i pripreme kao i vrste spojeva sa stanovišta primjene u realnoj proizvodnji te eventualne probleme za određena područja prijenosa metala u električnom luku i tehnike rada.

U eksperimentalnom dijelu predložiti zavareni sklop za ispitivanje TAST funkcije te opisati korisničko i upravljačko sučelje. Na realnom komadu provesti probna zavarivanja s različitim geometrijskim odstupanjima te ocijeniti utjecaj na stabilnost procesa i geometriju zavara. Na uzorku provesti potrebna ispitivanja sukladno HRN EN ISO 15614-1 i zaključno odrediti prednosti i nedostatke sustava TAST u industrijskoj primjeni te dati preporuke za daljnja istraživanja.

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

Zadatak zadan:

30. 11. 2022.

Zadatak zadao:

Prof. dr. sc. Ivica Garašić

Datum predaje rada:

1. rok: 20. 2. 2023.
2. rok (izvanredni): 10. 7. 2023.
3. rok: 18. 9. 2023.

Predvideni datumi obrane:

1. rok: 27. 2. - 3. 3. 2023.
2. rok (izvanredni): 14. 7. 2023.
3. rok: 25. 9. - 29. 9. 2023.

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Branko Bauer

SADRŽAJ

| | |
|---|-----|
| POPIS SLIKA..... | I |
| POPIS TABLICA..... | III |
| POPIS OZNAKA..... | IV |
| SAŽETAK..... | V |
| SUMMARY | VI |
| 1. UVOD..... | 1 |
| 1.1. Povijest..... | 2 |
| 1.2. Metode zavarivanja | 3 |
| 2. MIG/MAG ZAVARIVANJE | 5 |
| 2.1. Parametri MIG/MAG zavarivanja | 8 |
| 3. ROBOTIZACIJA..... | 10 |
| 3.1. Povijest robotizacije | 10 |
| 3.2. Robotsko zavarivanje | 11 |
| 4. ROBOTSKA STANICA | 13 |
| 4.1. Izgled robotske stanice za zavarivanje..... | 13 |
| 4.1.1 Robot za zavarivanje | 13 |
| 4.1.2. Izvor struje | 14 |
| 4.1.3. Upravljačka jedinica i teach pendant (kontroler) | 14 |
| 4.1.4. Pozicioner..... | 15 |
| 4.1.5. Stanica za čišćenje | 16 |
| 4.2. Načini programiranja robota | 17 |
| 4.2.1. On-line metoda..... | 17 |
| 4.2.2. Off-line metoda | 18 |
| 4.2.3. Hibridna metoda..... | 19 |
| 4.3. Senzori kod robotskog zavarivanja | 19 |
| 4.3.1. Senzori električnog luka..... | 20 |

| | |
|---|----|
| 5. ZAVARIVANJE NJIHANJEM..... | 21 |
| 5.1. Postavljanje njihanja na robotu | 22 |
| 6. TAST..... | 24 |
| 6.1. Korištenje TAST-a | 25 |
| 6.2. Postavljanje funkcije TAST | 26 |
| 7. ROBOTSKA STANICA ARC MATE 100iD-10L..... | 27 |
| 7.1. Izgled stanice ARC Mate 100iD 10L..... | 27 |
| 7.2 Robot Fanuc ARC mate 100iD-10L | 28 |
| 7.3. Izvor struje | 31 |
| 7.4. Upravljačka jedinica s kontrolerom | 33 |
| 8. EKSPERIMENTALNI DIO..... | 34 |
| 8.1. Priprema uzoraka | 34 |
| 8.2. Programiranje robota i zavari..... | 36 |
| 9. ZAKLJUČAK..... | 47 |
| LITERATURA..... | 48 |

POPIS SLIKA

| | |
|--|----|
| Slika 1. Oprema potrebna za postupak MIG zavarivanja [11] | 6 |
| Slika 2. Pištolj za zavarivanje u MIG – MAG postupku [14]..... | 7 |
| Slika 3. Prvi industrijski robot Unimate[17] | 10 |
| Slika 4. Prvi robot s elektrolučnim zavarivanjem iz 1974.godine[19] | 11 |
| Slika 5. Robot za zavarivanje tvrtke Kuka[20] | 13 |
| Slika 6. Izvor struje za MIG zavarivanje tvrtke Kemppi | 14 |
| Slika 7. Teach pendant(kontroler) za Fanuc robote | 15 |
| Slika 8. Primjer dvoosnog pozicionera | 16 |
| Slika 9. Stanica za čišćenje | 16 |
| Slika 10. On-line programiranje na kontroleru | 17 |
| Slika 11. Primjer kompleksne robotske ćelije u programu Roboguide..... | 18 |
| Slika 12. Prikaz njihanja pištolja[23] | 20 |
| Slika 13. Različiti uzorci zavarivanja njihanjem | 21 |
| Slika 14. Graf konstantne jačine struje[25]..... | 24 |
| Slika 15. Graf odstupanja jačine struje[25]..... | 24 |
| Slika 16. Radni prostor eksperimentalnog rada robotska stanica ARC mate 100iD-10L..... | 27 |
| Slika 17. Fanuc ARC mate 100iD-10L | 28 |
| Slika 18. Radni opseg robota ARC mate 100iD-10L[26] | 29 |
| Slika 19. Specifikacije za A7 MIG izvor struje | 31 |
| Slika 20. A7 MIG izvor struje s ugrađenom jedinicom za robotsko sučelje na vrhu | 32 |
| Slika 21. Izgled sučelja na laptopu..... | 32 |
| Slika 22. Upravljačka jedinica s kontrolerom | 33 |
| Slika 23. Izbrušeni uzorci..... | 34 |
| Slika 24. Priprema kutnog spoja i ukrućivanje ploča | 35 |
| Slika 25. Kutni spoj postavljen na pozicioneru | 36 |
| Slika 26. Izrada novog programa | 37 |
| Slika 27. Prikaz prvih linija programa i TCP-a..... | 38 |
| Slika 28. Pozicija vrha žice i pištolja kod zavara..... | 39 |
| Slika 29. Pozicija pištolja u krajnjoj točki zavara | 39 |
| Slika 30. Skraćeni prikaz parametara za zavarivanje..... | 40 |

| | |
|--|----|
| Slika 31. Detaljni prikaz parametara za zavarivanje | 41 |
| Slika 32. Parametri njihanja | 41 |
| Slika 33. Konačni program ZAVRSNI_RAD | 42 |
| Slika 34. Prvi kutni spoj s prikazom zadane putanje | 43 |
| Slika 35. Prvi zavar i parametri zavarivanja | 43 |
| Slika 36. Drugi kutni spoj s prikazom zadane putanje | 44 |
| Slika 37. Prikaz drugog zavara s naznačenim trenutkom promjene zavara i parametri zavarivanja .. | 45 |
| Slika 38. Treći kutni spoj s prikazom zadane putanje | 45 |
| Slika 39. Prikaz trećeg zavara i parametri zavarivanja | 46 |

POPIS TABLICA

| | |
|---|----|
| Tablica 1. Klasifikacija zavarivanja [2] | 4 |
| Tablica 2. Prijenos metala u električnom luku tijekom zavarivanja [15]..... | 9 |
| Tablica 3. Senzori kod robotskog zavarivanja[15]..... | 19 |
| Tablica 4. Parametri njihanja[25] | 23 |
| Tablica 5. Skraćeni parametri za TAST[25]..... | 26 |
| Tablica 6. Karakteristike Fanuc ARC mate 100iD-10L[26] | 30 |

POPIS OZNAKA

| Oznaka | Jedinica | Opis |
|----------------------|-----------------|---|
| <i>U</i> | V | Napon |
| <i>I</i> | A | Jakost struje |
| <i>l</i> | m | Duljina |
| <i>f</i> | Hz | Frekvencija |
| <i>t</i> | s | Vrijeme |
| <i>v</i> | m/s | Brzina |
| <i>v_ž</i> | m/min | Brzina žice |
| <i>v_c</i> | mm/min | Brzina zavarivanja |
| <i>TAST</i> | - | Funkcija praćenja zavara kroz električni luk |

SAŽETAK

U uvodu teorijskog dijela rada opisana je uloga robotizacije u industriji i implementacija robotizacije kod zavarivanja. Navedene su glavne komponente robota za zavarivanje kao i neke sporedne komponente koje olakšavaju i poboljšavaju sam proces zavarivanja. Također su objašnjeni načini programiranja robota za zavarivanje.

Nakon toga je opisan MAG postupak zavarivanja, njegovi parametri te način prijenosa metala u električnom luku. Objašnjena je TAST funkcija, njena uloga prilikom zavarivanja i prednosti korištenja te funkcije. Nadalje, detaljno je opisana robotska stanica koju koristimo pri izvođenju eksperimentalnog rada.

U eksperimentalnom dijelu rada je izrađen robotski program za MAG zavarivanje kutnih zavara uz pomoć TAST funkcije. Cilj rada je bio prikazat prednost koju nudi TAST funkcija prilikom zavarivanja kako bi dobili optimalni kutni zavar.

Na kraju, nakon izvođenja eksperimenta, zaključena je prednost koju donosi TAST funkcija u odnosu na normalno robotsko zavarivanje kutnih spojeva.

Ključne riječi:

Robotizacija, MAG zavarivanje, programiranje, TAST funkcija

SUMMARY

In the introduction of the theoretical part of the paper, the role of robotization in the industry and the implementation of robotization in welding are described. The main components of welding robots are mentioned, as well as some auxiliary components that facilitate and improve the welding process. The programming of welding robots is also explained.

After that, the MAG welding process is described, its parameters and the metal transfer in the electric arc. The TAST function is explained, its role in welding and the advantages of using this function. Furthermore, the robotic station used in the experimental work is described in detail.

In the experimental part of the paper a robotic program for MAG welding of corner joints was developed using the TAST function. The aim of the work was to demonstrate the advantage offered by the TAST function in welding in order to obtain an optimal corner joint.

Finally, after conducting the experiment, the advantage of the TAST function compared to normal robotic welding of corner joints was concluded.

Key words:

Robotization, MAG welding, programming, TAST function

1. UVOD

Zavarivanje je proces spajanja dva ili više osnovna materijala uz prisutnost topline sa ili bez dodavanja dodatnog materijala. Cilj postupka je dobiti homogeni spoj između materijala. Zavarivanje ima duboku povijest i počeci su se već javljali u srednjem vijeku kod kovača. Kovačko zavarivanje se smatra najstarijim procesom zavarivanja gdje bi kovači spojili dva užarena komada metala različitih svojstava sa čekićem dok ne dobiju željeni oblik mase koju su stvorili. Razvojem industrije tokom ljudske povijesti razvili su se i razni zavarivački postupci s kojima smo upoznati danas. Razvoj današnjih postupaka krenuo je u 19.stoljeću u bivšem SSSR-u kada je znanstvenik Vasilij Petrov krenuo s istraživanjem električnog luka i predložio njegovu primjenu u zavarivanju.

Danas je zavarivanje jedan od najzastupljenijih postupaka u industriji. Razvili su se razni postupci zavarivanja koji se koriste u svakodnevnicima, a najčešće korišteni su ručno elektrolučno zavarivanje obloženim elektrodama (REL), zavarivanje taljivom elektrodom u zaštitnoj atmosferi plina ili plinskih mješavina (MIG/MAG), zavarivanje netaljivom elektrodom od volframa u zaštitnoj atmosferi argona ili helija (TIG), zavarivanje pod praškom (EPP) i elektrootporno zavarivanje (EO). Razvojem svih ovih postupaka i sve učestalijim korištenjem procesa zavarivanja javila se potreba za automatizacijom ovog postupka.

Znajući koliko je mukotrpan i nekad i štetan proces za ljude kao i zahtjeve današnje industrije logičan je slijed događaja bio povezivanje procesa zavarivanja sa robotizacijom. Odmah su izašle na svijetlo prednosti koje dolaze prilikom robotizacije zavarivanja. Postiže se veća produktivnost, ali isto tako se kvaliteta samog zavara povećala jer su se dobivali homogeniji zavari kakve ne bi postizali prilikom ručnog rada.

U nastavku ćemo detaljnije objasniti samu robotizaciju ovog postupka, MAG zavarivanje, primjenu TAST funkcije u robotskom zavarivanju. U eksperimentalnom dijelu ćemo opisati našu robotsku stanicu, način programiranja za zadanu problematiku i objasniti koje su prednosti robotskog zavarivanja na temelju dobivenih rezultata.

1.1. Povijest

Zavarivanje je proces u kojem se spajaju dva ili više materijala kako bi se dobio homogeni, zavareni spoj. Obično se obavlja uz pomoć taljenja ili pritiska, a materijali koji se spajaju mogu biti istorodni ili raznorodni. Zavarivanje se obično smatra tehnikom koja se koristi za spajanje metalnih dijelova primjenom topline [1], ali i metodom spajanja metala u kojem se spojni rubovi zagrijevaju i stapaju zajedno sa ili bez dodatnog metala [2]. Cilj zavarivanja je stvaranje homogene i trajne veze. Također, zavarivanje se razlikuje od lemljenja za čiju je izvedbu potrebna legura nižeg tališta od materijala predmeta [3].

Autori u domaćoj i stranoj literaturi istraživanja ukazuju na činjenicu da najraniji oblici spajanja metala sežu u brončano i željezno doba i to u Europi i Bliskom istoku. Zavarivanje se spominjalo i u doba drevne Grčke kada se smatralo da je ova tehnika potekla upravo iz toga doba [4]. U srednjem vijeku napredak doživjelo kovačko zavarivanje, o kojem će se detaljnije govoriti u nastavku rada, a temeljilo se na udaranju zagrijanog metala sve dok nije došlo do spajanja. Ovakvo zavarivanje u srednjem vijeku obično obavljali kovači, a kasnije je došlo i do opisivanja različitih načina kovanja. U vrijeme renesanse, kovačko zavarivanje oblikuju renesansni obrtnici koji su zavarivanje počeli usavršavati, a ovakva je industrija narednih stoljeća kontinuirano rasla.[5]

U 19. stoljeću dolazi do porasta otkrića u procesu zavarivanja. Na samom početku stoljeća, engleski kemičar i fizičar Humphry Davy je otkrio luk kratkog impulsa, dok je ruski fizičar Vasily Vladimirovich Petrov stvorio kontinuirani električni luk. Početkom 80-ih godina istog stoljeća, ruski izumitelj Nikolay Benardos te poljski izumitelj i inženjer Stanisław Olszewski su stvorili metodu elektrolučnog zavarivanja koje se obavljalo uz pomoć ugljenih elektroda. Elektrolučno zavarivanje je imalo širu primjenu u praksi nakon što su izumljene metalne elektrode te se njegova primjena nastavila i u 20. stoljeću. Na početku 20. stoljeća se razvijaju brojne ideje za nove trendove u zavarivanju, primjerice ruski znanstvenik Vladimir Mitkevič predlaže korištenje trofaznog električnog luka za zavarivanje, dok je C. J. Holslag izumio zavarivanje uz pomoć izmjenične struje [5].

Tijekom Prvog svjetskog rata je porastao interes za zavarivanjem, kao i njegova upotreba, posebice u vojne svrhe. Tada je zavarivanje veliku primjenu našlo u konstruiranju brodova, zavarivanju

zrakoplova i aviona, no primjenjivalo se i u izradi mostova [5]. U 20-im godinama 20. stoljeća se uvelo automatsko zavarivanje koje se temeljilo na procesu u kojem se elektrodna žica dovodila kontinuirano. Kasnije je došlo do primjene reaktivnih metala u zavarivanju, poput aluminija i magnezija, što je potaknulo veliki razvoj elektrolučnog zavarivanja. Izumitelji su ponovno tražili nove trendove u zavarivanju pa je tako došlo do zavarivanja klinova, zavarivanja pod praškom, podvodnog elektrolučnog zavarivanja, plinskolučnog zavarivanja volframom, zavarivanja obojenih metala itd. [6]. Sredinom 20. stoljeća je popularno bilo elektrolučno zavarivanje s topljenom jezgrom koje je omogućilo brže spajanje, a primjenjivalo se i zavarivanje elektrotroskom, elektroplinsko zavarivanje te difuzijsko spajanje. Pred kraj 50-ih i tijekom 60-ih godina 20. stoljeća se primjenjivalo zavarivanje elektronskim snopom, a potom i zavarivanje laserskom zrakom, dok se u industrijama koristilo zavarivanje magnetskim pulsom te zavarivanje trenjem. Međutim, upotreba ovakvih načina zavarivanja je bila ograničena zbog skupoće samog procesa i visoke cijene opreme [5].

1.2. Metode zavarivanja

Iz prethodnog dijela rada je vidljivo da su tijekom povijesti izumljeni brojni načini zavarivanja te su izumitelji, specifično ruski i američki, tražili nove trendove u procesu zavarivanja. Norma HRN EN ISO 4063:2001 definira osnovnu nomenklaturu postupaka zavarivanja, rezanja, žlijebljenja i lemljenja. Osnovna podjela se sastoji od 8 područja[2]:

1. Elektrolučno zavarivanje – grupa 1,
2. Elektrootporno zavarivanje – grupa 2,
3. Plinsko zavarivanje – grupa 3,
4. Zavarivanje pritiskom – grupa 4,
5. Zavarivanje snopom – grupa 5,
6. Ostali zavarivački postupci – grupa 7,
7. Rezanje i žlijebljenje – grupa 8,
8. Meko i tvrdo ljepljenje i zavarivačko lemljenje – grupa 9.

Oznaka koja se nalazi pored primjera zavarivanja je osnovno načelo klasifikacije. Prva znamenka predstavlja glavnu grupu, druga znamenka grupu, a treća znamenka podgrupu. [2]

Tablica 1. Klasifikacija zavarivanja [2]

| Područje zavarivanja | Elektrolučno | Elektrootporno | Plinsko | Zavarivanje pritiskom | Zavarivanje snopom |
|----------------------|--|--|--|---|---|
| Primjeri zavarivanja | MIG (131) MAG (135) TIG (141) Plazma zavarivanje (15) | Točkasto zavarivanje (21) Preklopno zavarivanje (22) Bradavičasto zavarivanje (23) | Zavarivanje mješavinom kisika i acetilena (311) Zavarivanje mješavinom kisika i propana (312) | Zavarivanje trenjem (42) Zavarivanje eksplozijom (441) | Zavarivanje elektronskim snopom (51) Lasersko zavarivanje (52) |

Najrasprostranjenije metode zavarivanja su plinsko elektrolučno zavarivanje (GMAW/MIG), zavarivanje s plinskim volframom (GTAW/TIG), zavarivanje zaštićenim metalnim lukom (REL) i elektrolučno zavarivanje punjenom jezgrom (FCAW) [7]. U procesu zavarivanja se primjenjuje i MAG zavarivanje, a detaljnije o MIG i MAG zavarivanju se donosi u nastavku rada.

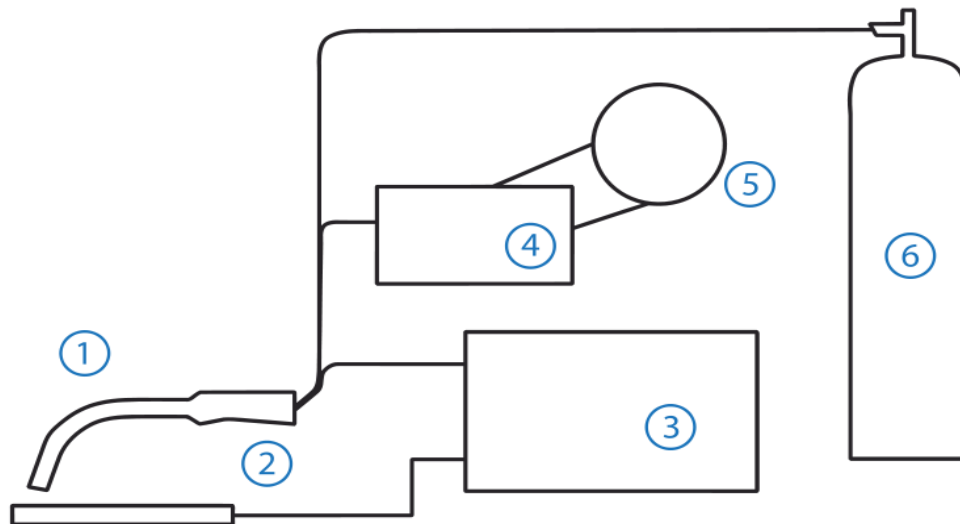
2. MIG/MAG ZAVARIVANJE

MIG zavarivanje (eng. *Metal Inert Gas Welding*) je vrsta elektrolučnog zavarivanja. U stranoj literaturi istraživanja, MIG zavarivanje se još naziva i elektrolučno zavarivanje metala internim plinom [2]. MIG zavarivanje se odvija uz pomoć taljive žice koja je u zaštiti neutralnog plina. U svojoj primjeni koristi gole žice koje su u službi elektroda za zavarivanje, a zavareni spoj je zaštićen internom mješavinom zaštitnih plinova [3]. MIG zavarivanje je patentirano 1949. godine u Sjedinjenim Američkim Državama (SAD) te se koristilo u zavarivanju aluminija, a 1952. godine je postalo popularno u Ujedinjenom Kraljevstvu (UK) također za zavarivanje aluminija, uz korištenje argona kao zaštitnog plina [8]. Uporaba argona ili helija kao internog zaštitnog ili pokrivnog plina štiti područje koje se zavaruje od atmosfere kontaminacije [9]. Dodatno, zaštitni plin određuje kvalitetu zavara pa se danas sve češće koristi mješavina plinova poput kisika, vodika i dušika [10].

Pri MIG zavarivanju se odvija ručno vođenje pištolja koji može biti djelomično automatiziran, mehaniziran ili automatski, s aparatom za zavarivanje. Električni luk se uspostavlja kresanjem između radnog komada i žice za zavarivanje. Pri tome se električni luk odnosi na električni proboj plina, kresanje na uspostavu kratkog spoja, a radni komad na priključak koji je priključen na polove električne ili izmjenične struje. Potom se žica za zavarivanje ravnomjerno dodaje u električni luk i počinje njeno taljenje te u konačnici dolazi do stvaranja zavarenog spoja ili zavara. Parametri MIG zavarivanja su [2]:

1. Napon se kreće između 16 i 26 V.
2. Jačina struje se kreće između 80 do 180 A te ovisi o promjeru žice za zavarivanje.
3. Brzina zavarivanja se kreće između 2 do 4 mm/s te ovisi o promjeru žice za zavarivanje, tehnici zavarivanja i čimbenicima zavarivanja.

Prilikom izvođenja MIG zavarivanja je potrebna određena radna oprema. Oprema za MIG zavarivanje je prikazana na sljedećoj shemi, a na istoj je oprema klasificirana brojevima. Sukladno klasifikaciji na shemi, oprema za MIG zavarivanje uključuje pištolj za zavarivanje (1), radni komad (2), izvor struje za zavarivanje (3), uređaj za dovod žice za zavarivanje (4), kolut sa žicom (5) te bocu sa zaštitnim plinom (6).



Slika 1. Oprema potrebna za postupak MIG zavarivanja [11]

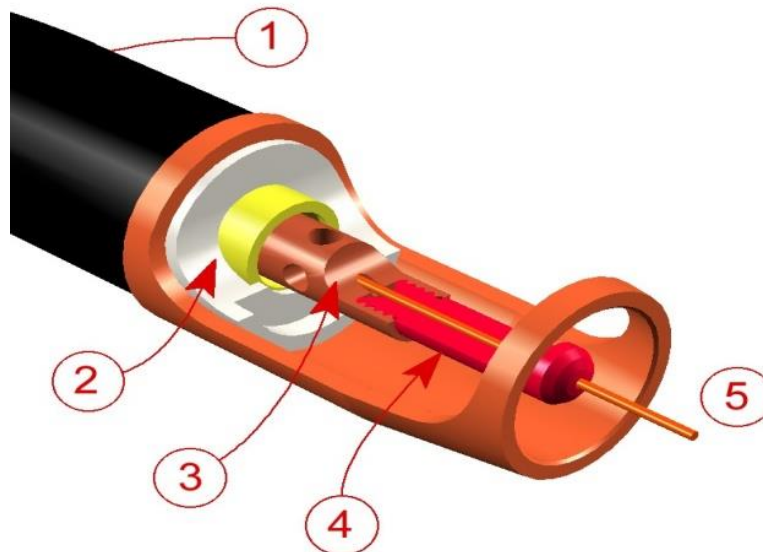
MIG zavarivanje je pogodno za zavarivanje metala debljine do nekoliko milimetara, ovisno o materijalu metala. Obično se koristi kod zavarivanja nehrđajućeg čelika, ventila, cijevi, plovila, tračnih vozila i slično. Nekoliko prednosti MIG zavarivanja su manja cijena za opreme za zavarivanje, učinkovitost, čista površina metala položenog zavara, smanjenje iskrivljenja konstrukcija, pogodan je za masovnu i pojedinačnu proizvodnju itd.. S druge strane, nedostaci MIG zavarivanja su utjecaj na zdravlje zavarivača, slabija kvaliteta zavarenog spoja, kvaliteta zavara ovisi o vještinama zavarivača, jako bljeskanje prilikom zavarivanja itd. [3].

MAG zavarivanje (eng. *Metal Active Gas Welding*) također je vrsta elektrolučnog zavarivanja. U stranoj literaturi istraživanja, MAG zavarivanje se još naziva i elektrolučno zavarivanje metala aktivnim plinom [2]. Ovaj postupak zavarivanja je sličan kao i MIG zavarivanje, s iznimkom u korištenju zaštitnog plina. Inertni plin u postupku MIG zavarivanja je obično argon, prikladan za zavarivanje obojenih metala [12], a kada se isti zamijeni ili miješa s aktivnim plinom, obično CO_2 te mješavinom CO_2 s drugim plinovima, postupak se naziva MAG zavarivanjem ili pojednostavljeno CO_2 elektrolučnim zavarivanjem, odnosno elektrolučnim zavarivanjem s aktivnim plinom [2]. MAG zavarivanje je pogodno za zavarivanje čelika visoke legure i čelika visoke čvrstoće, ali i tankih limova [12].

U MAG postupku zavarivanja se koristi aktivna plinska smjesa kao zaštitni plin. Takva smjesa može biti mješavina CO_2 i O_2 zajedno s drugim stabilnim plinovima kao što su argon, helij, dušik itd. [10]. Plinska smjesa koja sadrži oko 80 % argona i 20 % CO_2 se obično koristi kod zavarivanja u

kojem se preferira lijepi izgled samog zavara, no ista pruža i dobru varljivost [3]. Aktivni plinovi su u službi zaštitnog plina, a njihovo razgrađivanje prilikom zagrijavanja luka oslobađa različite kemijske elemente na zavarenom spoju koji poboljšavaju svojstava spoja [10]. MAG postupak zavarivanja je poluautomatski, no obično se koristi i kao automatski te robotizirani, pri čemu robotizirani ima veliku primjenu u automobilskoj industriji. Parametri MAG zavarivanja ovise o naponu, struji, brzini zavarivanja i promjeru žice za zavarivanje, a vrijednosti su veće nego kod MIG zavarivanja. Primjerice, pri zavarivanju sa žicom promjera 2,5 mm, napon iznosi 40 V, a jačina struje 420 A [13].

Kod opisivanja MIG postupka zavarivanja je opisana radna oprema u koju, između ostalog, spada i pištolj za zavarivanje. Kroz pištolj za zavarivanje prolazi žica za zavarivanje koja je namotana na kolut, a koju potiskuje potisni mehanizam. Potiskivanjem žice dolazi do njezinog taljenja u električnom luku i mjestu taljenja te se ista prenosi u rastaljeni metal [13]. Pištolj za zavarivanje, koji se koristi i kod MIG i MAG postupka zavarivanja, služi za dovod struje i zaštitnog plina do mjesta zavarivanja. Isti je prikazan na sljedećoj slici na kojoj su kategorizirani njegovi dijelovi, odnosno ručica pištolja (1), plastična izolacija (bijelo) i navojni metalni umetak (žuto) (2), raspršivač zaštitnog plina (3), vodilica za žicu (4) te izlaz pištolja (5).



Slika 2. Pištolj za zavarivanje u MIG – MAG postupku [14]

U procesu zavarivanja MIG i MAG postupkom se koriste zavarivački ispravljači. Oni su dostupni u izvorima napajanja konstantne struje (CC tip) i konstantnog napona (CV tip) te u jednofaznim i trofaznim modelima u rasponu od 150 A do 1200 A. Kao MIG ili MAG izvori struje, obično se koriste ispravljači konstantnog napona [2].

2.1. Parametri MIG/MAG zavarivanja

Prilikom zavarivanja je potrebno pravilno odabrati parametre o kojima će ovisiti kvaliteta zavara te su isti utjecajni čimbenici na samu kvalitetu zavara. S obzirom na navedeno, u takve su čimbenike uključeni [15]:

1. Struja zavarivanja – utječe na način na koji se prenosi struja u električnom luku. Promjer žice zavarivanja, vrsta materijala i položaj zavarivanja utječu na jakost struje zavarivanja. Struja zavarivanja utječe na brzinu zavarivanja, stabilnost luka, količinu taline i penetraciju.
2. Napon električnog luka – napon je ovisan o čimbenicima kao što je stabilnost električnog luka, duljina i širina električnog luka te način na koji se prenosi metal u električnom luku.
3. Brzina zavarivanja – utječe na produktivnost te samu ekonomičnost zavarivanja. Brzina se obično usklađuje s jakošću struje zavarivanja i položajem zavarivanja.
4. Slobodni kraj žice – odnosi se na dio od kontaktne vodilice pa sve do početka električnog luka, a utječe na jakost struje zavarivanja.
5. Induktivitet – utječe na pojedine načine prijenosa metala u električnom luku, primjerice prijenos kratkim spojevima. Za MAG postupak zavarivanja, induktivitet se podešava direktno na izvoru struje.
6. Protok zaštitnog plina – služi za zaštitu zavara od atmosferskih utjecaja i reakcija s okolinom. Isti se podešava u skladu s jakosti struje, karakteristikama spoja i uvjetima zavarivanja.
7. Položaj zavarivanja – s obzirom na položaj u kojem se izvodi zavarivanje može biti horizontalni, vertikalni, horizontalno-vertikalni i nadglavni. Najlakše, a ujedno i najkvalitetnije zavarivanje je u horizontalnom položaju, dok je najteže raditi u nadglavnom položaju [16]. O položaju zavarivanja ovisi i prijenos metala pa su tako kod horizontalnog i

vodoravnog položaja prijenosi prijelazni i štrcajući, dok su kod ostalih položaja obično impulsni i kratkim spojevima.

8. Tehnika rada – tehnike rada kod zavarivanja se dijele na lijeve, desne i okomite tehnike. O istima ovisi širina zavara i penetracija, a njihova primjena ovisi o debljini materijala.

Za kvalitetu i produktivnost zavarivanja je važan prijenos metala. Njegovo dobro poznavanje omogućuje postizanje visoke kvalitete, ali i produktivnosti. Prijenos metala ovisi o vrsti zaštitnog plina, promjeru žice za zavarivanje, naponu električnog luka, jakosti struje i vrsti dodatnog materijala [15]. Kod MAG zavarivanja, prijenos metala u električnom luku može biti kratkim spojevima, štrcajućim lukom, prijelaznim lukom te impulsnim lukom. Njihova su obilježja prikazana u sljedećoj tablici.

Tablica 2. Prijenos metala u električnom luku tijekom zavarivanja [15]

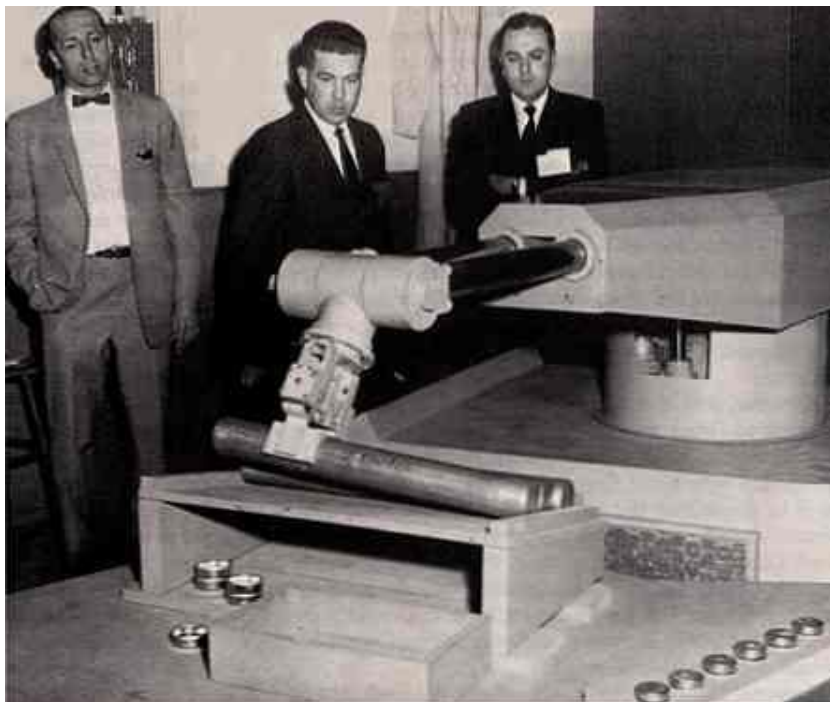
| Prijenos metala | Kratkim spojevima | Štrcajućim lukom | Prijelaznim lukom | Impulsnim lukom |
|------------------|---|---|--|--|
| Obilježje | Taljenjem žice se formira kapljica koja dodiruje materijal i stvara kratki spoj | Taljenjem žice se formiraju kapljice koje ne dodiruju radni komad | Prijenos štrcajućim lukom, s mogućnošću pojave kratkih spojeva | Upravljan je djelovanjem impulsnih električnih sila. Postiže se samo u argonu ili njegovim mješavinama |
| <i>I</i> | 50 – 170 A | 200 – 600 A | 170 – 240 A | - |
| <i>U</i> | 13 – 21 V | 25 – 40 V | 22 – 25 V | - |
| Prednosti | Male deformacije | Visoka iskorištenost elektrode, velik izbor materijala | - | Jednoličan zavar, stabilan električni luk, primjena žica većih promjera, zavarivanje tankih materijala |
| Nedostaci | Nedovoljna penetracija | - | Ograničena debljina zavarivanja, mala iskorištenost elektrode, skupoća | - |

Na kvalitetu zavara će utjecati i drugi čimbenici kao što je debljina žice, zaštitni plinovi, radni materijal te ostale fizikalne karakteristike. Međutim, na samu kvalitetu će utjecati i stručnost zavarivača, njegovo iskustvo te poznavanje strojeva, radne opreme, metoda i tehnika zavarivanja i slično.

3. ROBOTIZACIJA

3.1. Povijest robotizacije

Izraz robot je nastala od čehoslovačke riječi “*Robota*” što u prijevodu znači prisilan rad. Prvi put se pojavila u romanu pod nazivom R.U.R., češkog pisca Karla Capeka objavljenog 1920.godine. Iako se izraz pojavio jako kasno automatizirani uređaji su se pojavljivali puno prije u povijesti. Izumitelj Leonardo da Vinci je još u srednjem vijeku (15.stoljeće) osmislio automatiziranog “vojnika” – Jednostavni oklop koji se uz pomoć žica, opruga i zupčanika mogao sam kretati i sjesti. Roboti kakvi se danas koriste u industriji svoje začetke su imali sredinom 20. stoljeća u SAD-u. George Devol je znanstvenik koji je osmislio i implementirao prvog robota u industrijskom pogonu 1954. godine pod nazivom *Unimate*. Bila je to jednostavna robotska ruka čija je funkcija bila podizanje i skupljanje ogromnih komada vrućeg metala. Ubrzo nakon toga je osnovao i prvu poznatu robotsku tvrtku na svijetu.[17]



Slika 3. Prvi industrijski robot Unimate[17]

Roboti su danas sve zastupljeniji u industrijskim postrojenjima. Razvijenije zemlje prednjače u robotizaciji. U pojedinim zemljama industrijski roboti čine 80% proizvodnog pogona u raznim

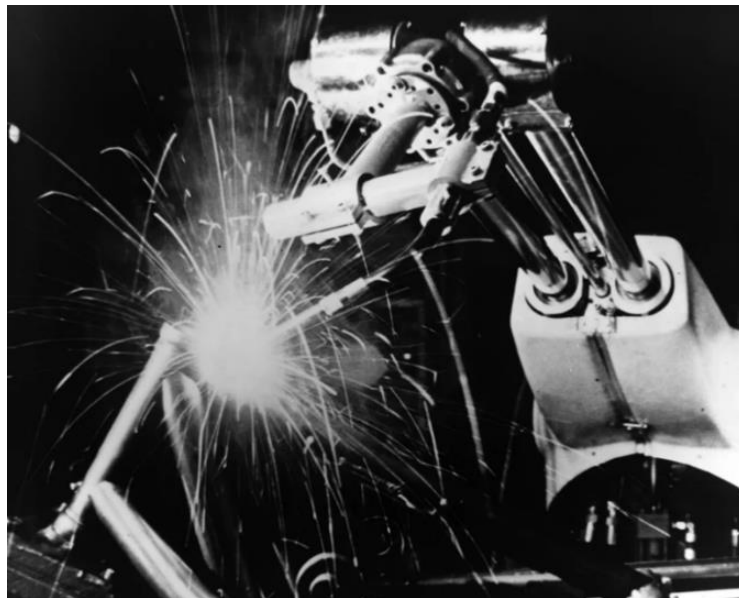
postrojenjima. Povećana potražnja, kraći rokovi isporuke i zahtjevi za sve većom kvalitetom naveli su modernu industriju da se okrene robotizaciji. [18]

3.2. Robotsko zavarivanje

Prema definiciji, roboti za zavarivanje su automatski strojevi za zavarivanje koji imaju više od tri stupnja slobode gibanja, a upravljaju se računalom s mogućnošću programiranja i učenja.

Povijest robotskog zavarivanja seže u sredinu 20. stoljeća kada su prvi industrijski roboti uvedeni u proizvodne okoline. Međutim, tek krajem 1960-ih i početkom 1970-ih godina robotski sustavi za zavarivanje počeli su dobivati na važnosti. Rani sustavi bili su relativno primitivni, sastojali su se od osnovnih programibilnih kontrolera i ograničenih senzorskih tehnologija.

Kako je tehnologija napredovala, robotski sustavi za zavarivanje su se razvijali kako bi uključili sofisticiranije značajke, poput bolje kontrole pokreta, većih kapaciteta tereta i poboljšanih senzorskih mogućnosti. Razvoj preciznijih senzora i boljih algoritama omogućio je robotima da se prilagode varijacijama u materijalima, konfiguracijama spojeva i parametrima zavarivanja. Ovaj razvoj otvorio je put za široko usvajanje robotskog zavarivanja u različitim industrijama.[19]



Slika 4. Prvi robot s elektrolučnim zavarivanjem iz 1974.godine[19]

Odabir robota za zavarivanje će ovisiti o vrsti zavarivanja, ali i poznavanje određenih parametara u koje su uključeni točnost i ponovljivost, doseg i nosivost robota, brzina gibanja i broj osi. Potom, pažnju treba obratiti i na izvor struje jer je sam posao zavarivanja fleksibilan te se ne obavlja uvijek na jednom i istom mjestu. U kontekstu navedenog, obično se govori o transformatorima, ispravljačima i inverterima kao uređajima za izvor struje, od čega inverteri nalaze najveću primjenu kod MAG zavarivanja jer proizvode visokofrekventnu pulsirajuću ili istosmjernu struju. U konačnici, robotizirano zavarivanje zahtjeva primjenu računala i upravljačke ploče jer isti omogućuju nadzor i upravljanje zavarivanjem. Na računalo je spojena upravljačka ploča i privjesak za učenje koji omogućuju podešavanje određenih parametara, operacije i slično. Također, roboti za zavarivanje se mogu programirati kako bi obavljali zadatke. O tome svemu ćemo detaljnije u nastavku.[19]

4. ROBOTSKA STANICA

4.1. Izgled robotske stanice za zavarivanje

Robotska stanica za zavarivanje je specijalizirani proizvodni sustav koji integrira industrijske robote s postupcima zavarivanja kako bi automatizirali i optimizirali operaciju zavarivanja. Sastoji se od različitih komponenti i podsustava koji zajedno rade kako bi osigurali učinkovite i precizne operacije zavarivanja uz održavanje sigurnosti i produktivnosti. Glavni dijelovi stanice za zavarivanje robota mogu se kategorizirati u mehaničke, električne, kontrolne i sigurnosne komponente. Neke od komponenti će se pobliže objasniti.

4.1.1 Robot za zavarivanje

Srce Robotske ćelije je industrijski robot koji obavlja zavarivačke zadatke. Obično je to više osni robot s manipulatorskom rukom opremljenom pištoljem za zavarivanje. Također su vrlo česti i dvostrukoruki roboti u robotskim ćelijama za zavarivanje jer omogućuju obavljanje višestrukih zavara istovremeno i značajno proširuju radni prostor. Različite vrste robota, poput artikuliranih, kartezijskih i SCARA robota, mogu se koristiti ovisno o zahtjevima industrijskog pogona.[20]



Slika 5. Robot za zavarivanje tvrtke Kuka[20]

4.1.2. Izvor struje

Izvori struje za zavarivanje su električni uređaji koji na mjestu zavarivanja osiguravaju električnu energiju s osobinama pogodnim za zavarivanje. Kao izvor struje za MAG zavarivanje najčešće se koristi inverter. Inverteri proizvode istosmjernu struju ili visokofrekventnu pulsirajuću struju. Prednost invertera je što ima visoku električnu učinkovitost, čak do 90%. Isto tako su manji i lakši od transformatora što omogućava lakši transport i zahtijevaju manje prostora u zavarivačkom dijelu pogona. Struja zavarivanja je pulsirajućeg tipa sa rasponom jačine struje od 50A pa sve do 400-600A u nekim slučajevima.[21]



Slika 6. Izvor struje za MIG zavarivanje tvrtke Kempfi

4.1.3. Upravljačka jedinica i teach pendant (kontroler)

Upravljačka jedinica ključna je komponenta koja upravlja i koordinira radnje robota. Ona služi kao središte za obradu informacija, donošenje odluka i usmjeravanje kretanja i zadataka robota. Upravljačka jedinica integrira različite hardverske i softverske elemente kako bi omogućila besprijekornu funkcionalnost. U svojoj srži, jedinica za upravljanje sastoji se od mikroprocesora ili mikro kontrolera koji obrađuje podatke sa različitih senzora. Ti senzori pružaju stvarne podatke o okruženju i statusu robota. Upravljačka jedinica zatim koristi algoritme i programiranje kako bi interpretirala te podatke, omogućavajući robotu da percipira i razumije svoje okruženje.[22]

Na upravljačku jedinicu je spojen teach pendant ili kontroler. On služi za pokretanje napisanih programa, korekciju linija, točaka i funkcija u programu, podešavanje parametara zavarivanja i drugo. Kontroler sadrži i sklopku za prebacivanje iz manualnog u automatski rad te “gljivu” za hitnu obustavu rada robota. Isto tako, putem kontrolera se može uključiti korak po korak simulacija isprogramiranog zavara što nam omogućuje pregled putanje robota i potrebnu korekciju ako je nužna.[22]



Slika 7. Teach pendant(kontroler) za Fanuc robote

4.1.4. Pozicioner

Pozicioneri služe za pridržavanje radnog komada i mogu biti rotacijski ili linearni. Oni olakšavaju pravilno pozicioniranje radnog komada u odnosu na pištolj za zavarivanje, osiguravajući optimalnu kvalitetu i dosljednost zavarivanja.

Postoje različite vrste pozicionera: s jednim stupnjem slobode gibanja, s dva stupnja slobode gibanja, orbitalni i drugi. Izbor ovisi o geometriji sklopa koji se primarno zavaruje i o mogućnostima i izvedbi robota.[20]



Slika 8. Primjer dvoosnog pozicionera

4.1.5. Stanica za čišćenje

Stanica za čišćenje je objekt namijenjen održavanju i čišćenju pištolja koji se koriste u zavarivanju. Stanica uključuje značajke poput sustava za uklanjanje otpada i ostataka sa sapnice pištolja, rezač žice koji svaki put odreže zavarivačku žicu na istu duljinu i tekućinu za zaštitu od prskotina. Stanice imaju za cilj produljiti vijek trajanja pištolja, poboljšati njihovu učinkovitost i poboljšati sigurnost na radnom mjestu promovirajući redovito održavanje.[22]



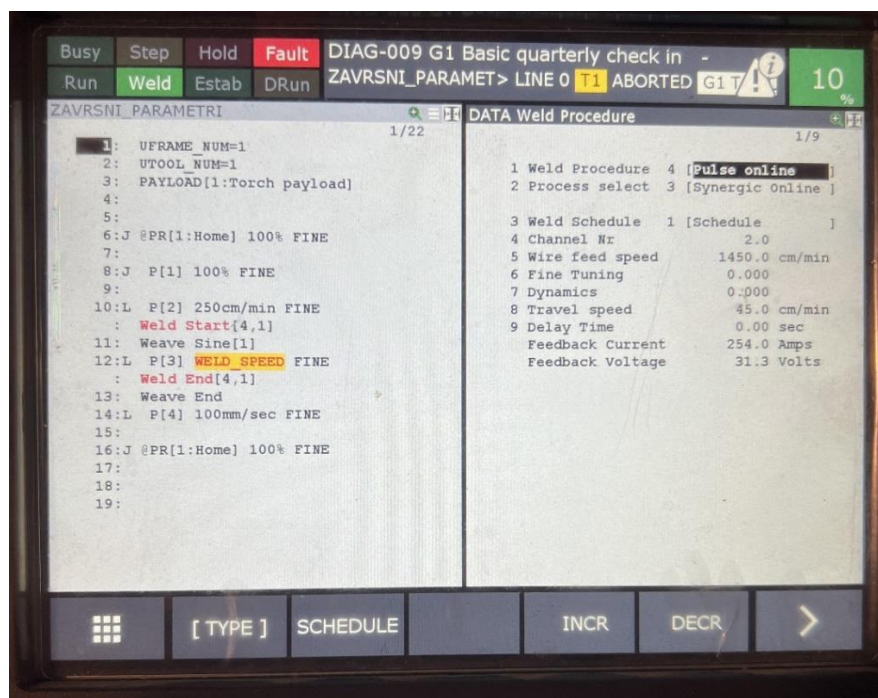
Slika 9. Stanica za čišćenje

4.2. Načini programiranja robota

Razlikuju se dvije vrste programiranja robota, a to su on-line metoda pomoću kontrolera i off-line metoda pomoću programa za programiranje robota preko računala. Također postoje slučajevi hibridnog programiranja gdje se koriste obje metode.

4.2.1. On-line metoda

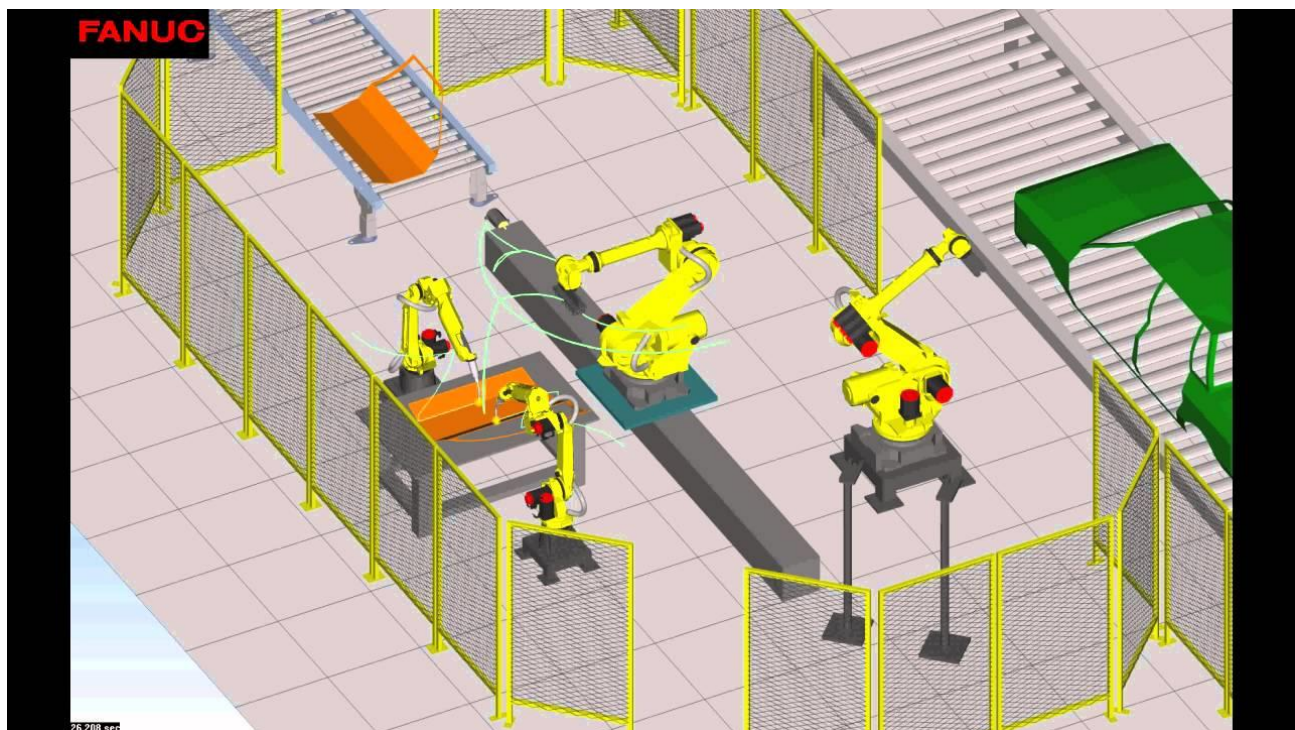
On-line metoda programiranja je ručni način programiranja. Programiranje robota se izvršava u robotskoj ćeliji preko teach pendantsa ili kontrolera. Putem tipki na kontroleru pišu se crte programa, naređuje putanja robota i funkcije koje mora izvršiti (zavarivanje, njihanje, lociranje radnog komada pomoću žice/sapnice, čišćenje sapnice i slično). Kontrolerom je također moguće zadati i korigirati parametre funkcija poput zavarivanja. Ova vrsta programiranja je pogodnija za sklopove jednostavnije geometrije koji se proizvode u velikim serijama i koji imaju lakši pristup spoju koji se treba zavariti. Mana ove metode je manja produktivnost jer robotska ćelija nije u funkciji sve dok se ne završi s programiranjem.



Slika 10. On-line programiranje na kontroleru

4.2.2. Off-line metoda

Off-line metoda najčešće se obavlja putem računala preko programa za simulaciju rada robotske ćelije. Programiranje se obavlja na način da se u program koji prikazuje našu robotsku ćeliju ubacuju CAD modeli radnih komada koji će se zavarivati. Pomoću CAD modela se simuliraju kretnje robota i ubacuju se funkcije koje je potrebno obaviti. Ova vrsta programiranja pogodnija je za sklopove otežane geometrije i za manje serije ili čak pojedinačne izvedbe. Isto tako, pogodna je za programiranje u ćelijama koje imaju robota i pozicioner jer možemo lakše izvesti kompleksnije simultane kretnje između robota, pozicionera i radnog komada. Prednost off-line metode je ta što se programiranje može odvijati neovisno o radu robotske ćelije, smanjuje pogreške i omogućuje simulaciju cijelog procesa rada bez ometanja robota i prekidanja rada.[15]



Slika 11. Primjer kompleksne robotske ćelije u programu Roboguide

4.2.3. Hibridna metoda

Hibridna metoda programiranja kombinira značajke on-line i off-line metoda programiranja. Off-line metodom se preko računala zadaje tok operacija koje se obavljaju na radnom komadu, a zatim se program prebacuje u on-line način rada gdje se putem kontrolera određuju točke u prostoru ili se korigiraju te se određuju parametri funkcija koje su zadane. Ova metoda služi za stvaranje baze podataka robotske ćelije, a prikladna je i za izradu srednjih serija sklopova.

4.3. Senzori kod robotskog zavarivanja

Za robotizirano zavarivanje je potrebna i primjena senzora koji omogućuju mjerenje parametara i njihovo pretvaranje u digitalni oblik, a sve u svrhu zavarivanja po reguliranim parametrima. Glavni zadatak senzora je pružiti sustavu informacije kako bi poduzeo odgovarajuće radnje i proizveo rezultat koji odgovara definiranim specifikacijama.[23] Obično se u tu svrhu koriste dodirni i optički senzori te senzori električnog luka. Njihova su najvažnija obilježja prikazana sljedećom tablicom.

Tablica 3. Senzori kod robotskog zavarivanja[15]

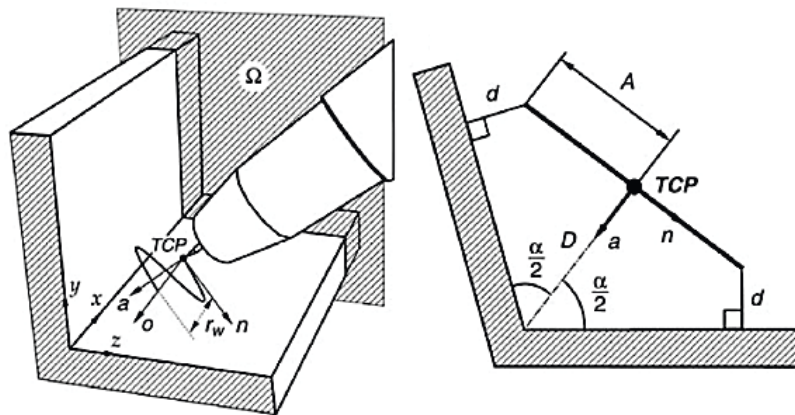
| Senzor | Dodirni / Taktilni | Optički | Električnog luka |
|-----------|--|---|--|
| Opis | Detektiraju položaj mjesta zavara preko žice za zavarivanje Gibanje robota se prilagođava pozicijama zavara, sukladno komandama | Laserske zrake se emitiraju na radni komad i reflektiraju se na CCD kameru tijekom gibanja robota Analogni signali se pretvaraju u digitalne | Pomažu u vršenju kompenzacije putanje zbog neočekivanih promjena Dijeli se na rotirajući i oscilirajući |
| Prednosti | Jednostavna izvedba Niska cijena | Praćenje s malim promjenama uz istu orijentaciju Visoka preciznost i ponovljivost | Izvođenje procesa u realnom vremenu |
| Nedostaci | Trošenje Detektiranje nije u realnom vremenu Toplinske deformacije Duže vrijeme produktivnosti | Postojanje unaprijed definirane putanje Osjetljivost na okolinu Visoka cijena Kompleksnost izvedbe | Koriste se samo u kombinaciji s njihovim |

4.3.1. Senzori električnog luka

Praćenje šava pomoću pokreta njihanja i samog luka kao senzora uvedeno je 1980-ih godina. Princip metode je iskoristiti promjenu struje kada se udaljenost između pištolja i radnog komada mijenja. Osnovni princip je relativno jednostavan i ekonomičan stoga se jako često koristi u svrhe robotskog zavarivanja. Približan odnos između U , I i l može se prikazati jednačinom[23]:

$$U = \beta_1 I + \beta_2 + \frac{\beta_3}{l} + \beta_4 l \quad /1$$

Konstante β_1 , β_2 , β_3 i β_4 ovise o raznim faktorima poput žice, plina i karakteristikama izvora struje koji koristimo. Ukoliko kod zavara nema nikakvih promjena kod putanje, iznos jačine struje na sredini njihanja trebao bi biti jednak referentnoj vrijednosti. Ako dođe do pomaka komada od zadane putanje iznos će u sredini njihanja biti veći ili manji od referentne vrijednosti, ovisno o smjeru pomaka. Sukladno tim informacijama razvit će se nova putanja.[23]



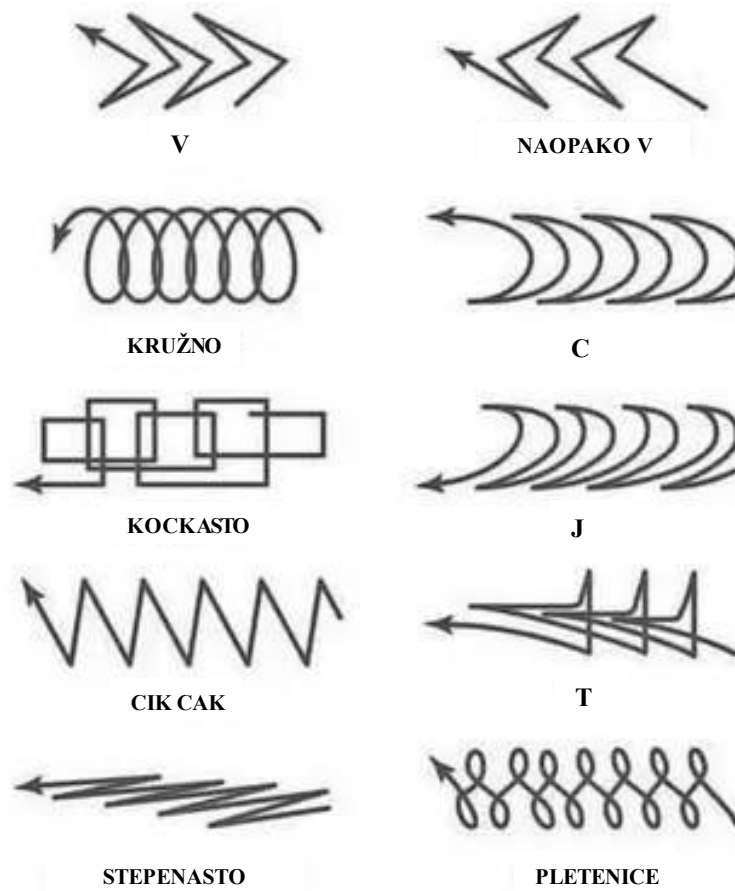
Slika 12. Prikaz njihanja pištolja[23]

Zbog velikog broja prednosti, senzori električnog luka su najčešće korišteni senzori. Za implementaciju tehnologije senzora luka nisu potrebni dodatni senzori što ih čini vrlo jednostavnom i ekonomičnom tehnologijom. Također, tehnologija senzora luka je beskontaktna metoda i stoga ne izaziva smetnje prilikom procesa zavarivanja.[23]

5. ZAVARIVANJE NJIHANJEM

Zavarivanje njihanjem je tehnika koja se koristi kako bi se osiguralo pravilno spajanje i prodiranje metala. Uključuje kontrolirano lateralno kretanje pištolja za zavarivanje ili elektrode tijekom postupka zavarivanja. Pištolj ili elektroda se kreću naprijed i natrag ili u kružnom pokretu, stvarajući uzorak duž spoja. U pravilu širina njihanja ne bi smjela biti veća od trostruke širine žice ili elektrode.

Ova tehnika je posebno korisna u situacijama gdje je spoj širok ili kod debljih materijala. Njihanje pomaže pri ravnomjernijoj raspodjeli topline, sprječavajući prekomjerno nakupljanje topline na jednom području što može dovesti do deformacija ili nepotpunog spajanja. Pomicanjem zone utjecaja topline preko spoja, povećava se vjerojatnost stvaranja snažnih, ujednačenih zavarenih spojeva.[24]



Slika 13. Različiti uzorci zavarivanja njihanjem

Njihanje također pomaže u kontroliranju oblika i veličine zavarenog spoja. U primjenama gdje je estetski izgled važan, postiže se dosljedan i vizualno ugodan zavaren spoj kroz kontrolirano njihanje.

Međutim, prekomjerno njihanje može dovesti do prevelikog proširenja zavarenog spoja, što rezultira korištenjem više dodatnog materijala nego što je potrebno. Također, brzina i širina njihanja moraju se prilagoditi vrsti metala, konfiguraciji spoja i postupku zavarivanja koji se koristi. Sveukupno, savladavanje umijeća zavarivanja njihanjem zahtijeva vještinu i iskustvo kako bi se uskladili faktori poput unosa topline, spajanja i željenih konačnih karakteristika zavarenog spoja.

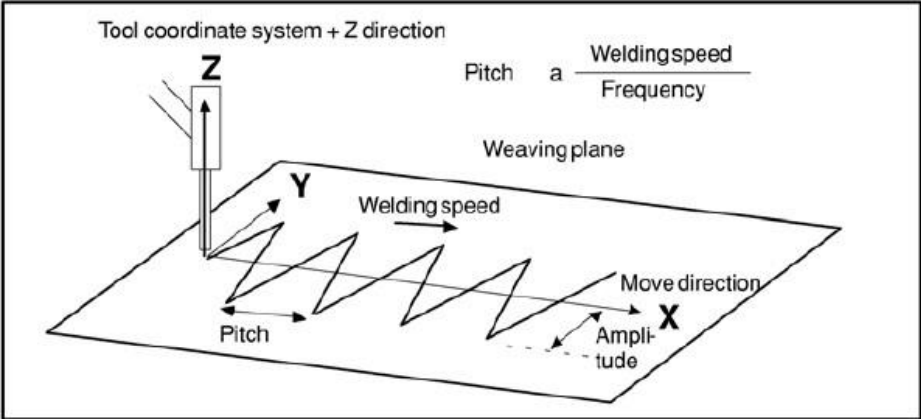
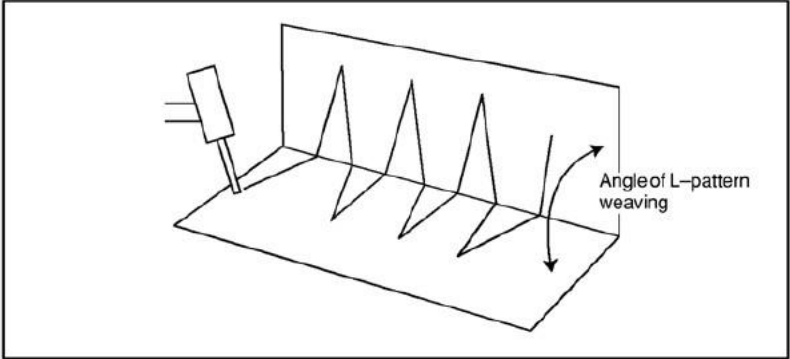
5.1. Postavljanje njihanja na robotu

Prilikom korištenja funkcije njihanja potrebno je paziti na dvije stvari, a to su: u kojoj liniji programa dodati funkciju njihanja i koje parametre postaviti. Funkcija njihanja se u programu zadaje nakon prve točke spoja i prekida nakon zadnje točke spoja kojeg zavarujemo. Prije implementacije funkcije potrebno je odrediti parametre njihanja kako bi se robot imao po nečem voditi.

Parametri koji se zadaju prilikom postavljanja funkcije njihanja su frekvencija, amplituda, vrijeme zadržavanja na krajevima zavara i kut njihanja odnosno tip spoja kao što je prikazano u tablici 4.

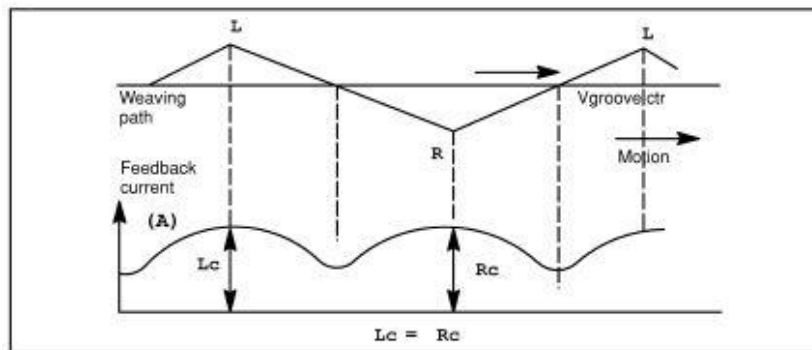
Prednost robotskog zavarivanja njihanjem je ta što se robot striktno drži zadane putanje i parametara. Kod ručnog rada može doći do grešaka u frekvenciji njihanja, amplitudi i zadržavanju na krajevima zavara što utječe na sam izgled i kvalitetu zavara. Isto tako možemo koristiti različite parametre za razne spojeve na istom sklopu kojeg zavarujemo.

Tablica 4. Parametri njihanja[25]

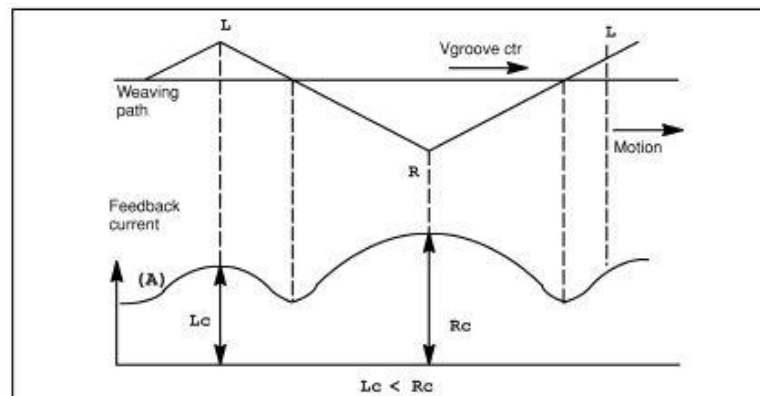
| Parametri | Opis |
|---------------------------------|---|
| Frekvencija | <p>Specificira broj ciklusa njihanja u sekundi Raspon: 0.0 – 15.0 Hz</p> |
| Amplituda | <p>Specificira udaljenost od linije zavarivanja do krajnje točke Raspon: 0.0 – 25.0 mm</p>  <p>The diagram illustrates the weaving plane in a 3D coordinate system. The Z-axis is vertical, representing the tool coordinate system. The X and Y axes are horizontal. A zigzag line represents the weaving pattern. Labels include: 'Tool coordinate system + Z direction' with an upward arrow; 'Pitch' with a horizontal double-headed arrow; 'Welding speed' with a horizontal arrow; 'Move direction' with a diagonal arrow; 'Amplitude' with a dashed line indicating the height of the zigzag; and 'Weaving plane' with a label for the surface. A formula is shown: $\text{Pitch} = a \frac{\text{Weldingspeed}}{\text{Frequency}}$</p> |
| Vrijeme zadržke – desno | <p>Označava vrijeme zadržke na krajnjim točkama njihanja desno od linije zavarivanja. Raspon: 0.00 – 1.00 s</p> |
| Vrijeme zadržke – lijevo | <p>Označava vrijeme zadržke na krajnjim točkama njihanja lijevo od linije zavarivanja. Raspon: 0.00 – 1.00 s</p> |
| Kut njihanja | <p>Specificira kut koji čine lijeva i desna ravnina njihanja kod zavarivanja kutnih spojeva. Raspon: 0° - 360°</p>  <p>The diagram shows a 3D perspective of an L-pattern weaving. A zigzag line is drawn on a rectangular plane. An arrow indicates the 'Angle of L-pattern weaving' between the two legs of the L-shape.</p> |

6. TAST

TAST je skraćenica za Through-arc seam welding odnosno praćenje zavora kroz električni luk. Ova funkcija pomaže robotu održavati konstantnu struju između žice i rada. TAST se isključivo može koristiti prilikom zavarivanja njihanjem. Prilikom zavarivanja robot putem senzora dobiva povrate informacije o jačini struje i naponu u krajnjim točkama amplitude njihanja. Preko tih informacija na početku zavora uzme referentne vrijednosti. U daljnjem tijeku zavarivanja svaki pad/rast u jačini struje ili naponu od referentne vrijednosti zabilježi i sukladno tome korigira putanju. Stoga, ako je sklop postavljen na malo drugačiju poziciju, robot može automatski ispraviti pravilnu putanju zavarivanja i izvršiti odgovarajući zavar na sklopu. TAST omogućuje robotu praćenje zavora kako vertikalno tako i lateralno. Funkcija se može koristiti u linearnoj putanji i kružnoj putanji.[25]



Slika 14. Graf konstantne jačine struje[25]



Slika 15. Graf odstupanja jačine struje[25]

U slikama iznad može se grafički vidjeti na koji način robot dobiva informacije o struji zavarivanja i kako uočava greške i radi korekcije. Robot u svakom prolazu računa površinu ispod krivulje grafa jačine struje. U prvom grafu se vidi pravilno i ujednačeno kretanje krivulje što robotu daje do znanja da zavaruje po pravilnoj putanji. U drugom grafu se vidi odstupanje kod drugog prolaza robota i povećanje krivulje jačine struje tj. povećanje površine ispod krivulje grafa. Robot evidentira to povećanje i sukladno tome će u idućem prolazu korigirati putanju kako bi se krivulja vratila na svoju referentnu vrijednost. [25]

6.1. Korištenje TAST-a

Prilikom korištenja funkcije TAST potrebno se pridržavati određenih smjernica. Najbitnija stavka kod ove funkcije je da se može isključivo koristiti prilikom zavarivanja njihanjem. Samo njihanje ima određen raspon u svojim parametrima koji se mogu koristiti:

- TAST se može koristiti samo uz sinusoidno njihanje,
- Amplituda njihanja mora biti 1,5 mm ili veća,
- Frekvencija njihanja (f) mora biti 4 Hz ili manja,
- Zadržavanje na krajevima (t) mora trajat 0,05 sek ili duže,
- Plinovi koji se smiju koristiti su Ar-O₂ 98%/2%, 95%/5% ili Ar-CO₂ 90%/10%, 82%/18%.

Ostale smjernice po kojima se treba voditi vezane su uz značajke spoja koji se zavaruje, a neki od njih su:

- Debljina materijala ne smije biti manja od 2 mm,
- Sapnica i žica moraju biti pozicionirani u središtu spoja kojeg zavarujemo,
- Pomak zavara ne smije biti veći od 15°,
- Kutni zavari moraju imati duljinu stranica od minimalno 5 mm.

Ukoliko se ne pridržava navedenih smjernica funkcija TAST neće biti uspješna, ali postoji mogućnost da zavar bude dobar iako smjernice nisu ispoštovane.

Postoje razni čimbenici koji utječu na TAST u već postojećim programima koji su napravljeni i koji mogu utjecati na uspješnost izvođenja funkcije kao što su:

- Mijenjanje materijala i promjera žice,
- Ekstremne promjene u veličini zavara,
- Promjena načina prijenosa metala u električnom luku,
- Vrsta plina i udjeli u plinu,
- Promjene parametara njihanja,
- Stanje površine materijala kojeg zavarujemo,
- Velike promjene temperature u radnom okruženju ili postrojenju.[25]

6.2. Postavljanje funkcije TAST

Kao i kod njihanja TAST funkcija se zadaje nakon prve i zadnje točke spoja zavara, što robotu označava početak i kraj praćenja jačine struje i korekcije sukladno promjenama. Prije programiranja potrebno je odrediti parametre funkcije TAST-a.[25]

Tablica 5. Skraćeni parametri za TAST[25]

| Parametri | Opis |
|--------------------|---|
| V-Gain-L | Prikazuje i omogućuje vam promjenu vertikalnog i lateralnog pojačanja nezavisno. |
| V_Curr(A) | Omogućuje promjenu referentne vrijednosti jačine struje. |
| V-Bias(%)-L | Prikazuje i omogućuje vam promjenu vertikalne i lateralne pristranosti nezavisno. |

U prvom prozoru mogu se korigirati skraćeni i najbitniji parametri za TAST. Može se postaviti željena referentna vrijednost jačine struje koju robot održava tokom zavara. Također se određuje u kojem smjeru će raditi korekciju po vertikalnoj i horizontalnoj osi. Nakon postavljanja željenih parametara funkcija TAST-a se implementira u linije programa.

7. ROBOTSKA STANICA ARC MATE 100ID-10L

Robotska stanica u sklopu koje se radi eksperiment završnog rada nalazi se u postrojenju firme Brkić izumi. Sastoji se od više različitih komponenti koje su neophodne za pravilan rad robota. Raspored komponenti je optimiziran prema potrebama sklopova koji se zavaruju i dosegu robota.

7.1. Izgled stanice ARC Mate 100iD 10L

Na slici ispod može se vidjeti izgled stanice i raspored svih komponenti. Raspored je određen prema radnim sklopovima koji su predviđeni za zavarivanje i dosegu robota.



Slika 16. Radni prostor eksperimentalnog rada robotska stanica ARC mate 100iD-10L

Komponente koje su uključene u stanici su:

- Robot ARC mate 100iD-10L,
- Dvoosni Fanuc pozicioner,
- A7 MIG Kemppi izvor struje,
- A7 MIG Kemppi dodavač žice,
- Binzel stanica za čišćenje pištolja,
- Tekka sustav za odsis,
- Držać koluta žice.

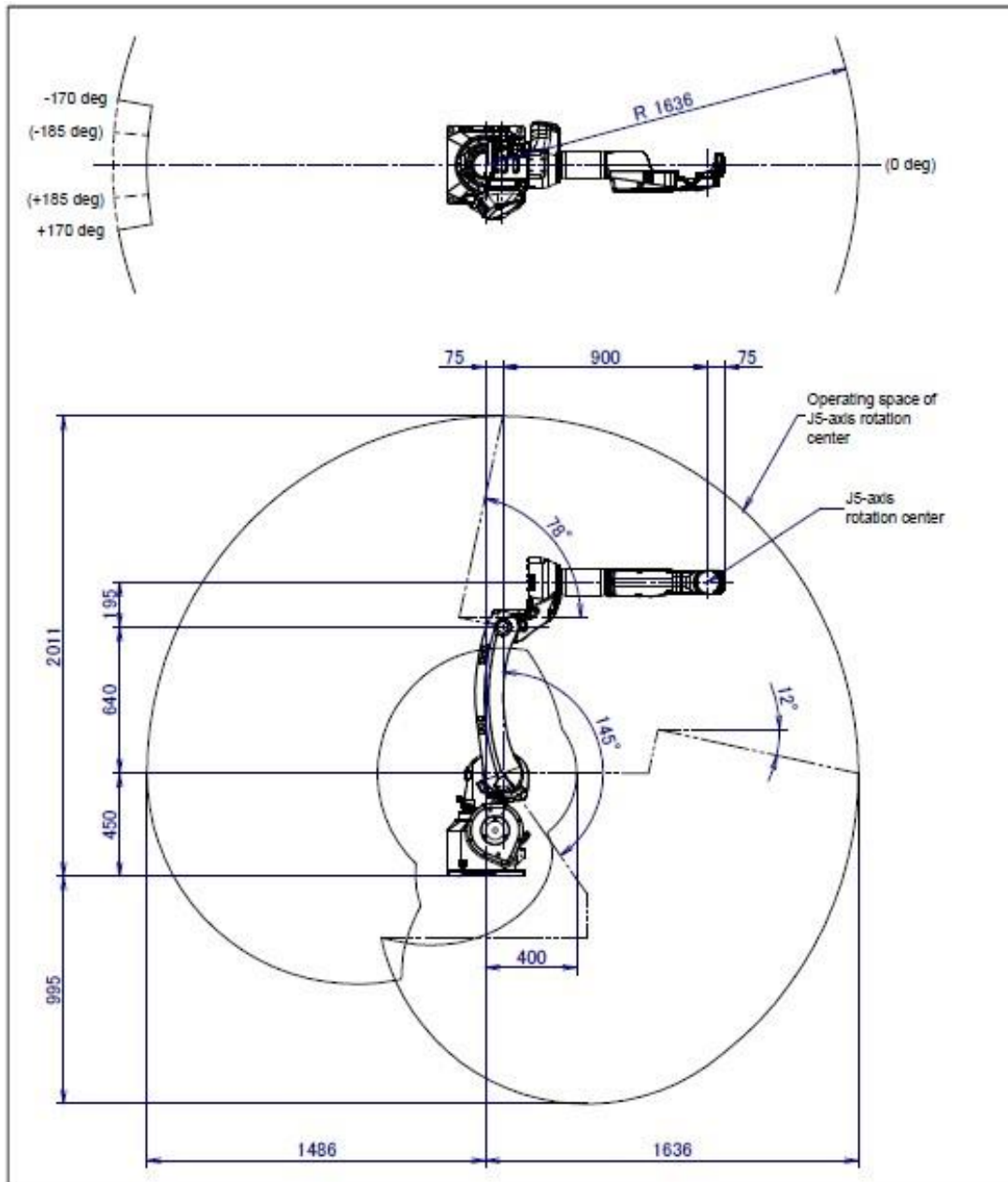
U sklopu robota je uključena i upravljačka jedinica sa teach pendant-om (kontrolerom) pomoću kojeg se kontroliraju kretnje robota. Putem kontrolera preko *on-line* načina programiranja se izrađuju programi za zavarivanje.

7.2 Robot Fanuc ARC mate 100iD-10L



Slika 17. Fanuc ARC mate 100iD-10L

Kinematička kompozicija robota se sastoji od 6 stupnjeva slobode gibanja. Takva kompozicija pomaže pri pozicioniranju robota za svakakve vrste zavora i pri orijentaciji pištolja za zavarivanje. Na glavu robota je namontiran Binzelov pištolj Abirob 500W s vratom pod kutem od 22° .




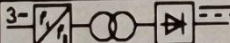





Slika 18. Radni opseg robota ARC mate 100iD-10L[26]

Tablica 6. Karakteristike Fanuc ARC mate 100iD-10L[26]

| Fanuc ARC mate 100iD-10L | | |
|---------------------------|----|-------------------------------------|
| Struktura | | Zglobna |
| Broj osi | | 6 |
| Masa | | 150 kg |
| Točnost | | ±0,03 mm |
| Opseg gibanja | J1 | 170 °/-170 ° |
| | J2 | 145 °/-90 ° |
| | J3 | 275 °/-180 ° |
| | J4 | 140°/-140 ° |
| | J5 | 120 °/-120 ° |
| | J6 | 270 °/-270 ° |
| Maksimalna brzina gibanja | J1 | 260 °/s |
| | J2 | 240 °/s |
| | J3 | 260 °/s |
| | J4 | 430 °/s |
| | J5 | 450 °/s |
| | J6 | 720 °/s |
| Nosivost | | 12 kg |
| Radna temperature | | 0-45 °C |
| Vlažnost zraka | | 0-75 % |
| Način izvedbe | | Podno, stropno, zidno ili pod kutem |
| Nadmorska visina | | Do 1000 m |

7.3. Izvor struje

Kao izvor struje za ovu robotsku stanicu odabran je A7 MIG welder od tvrtke Kemppi. Pošto će se na robotu zavarivati sklopovi od čelika te je kompleksna izvedba robota za TIG postupak, nije bilo potrebe za drugim izvorom struje. Raspon jačine struje je od 20A do 450A, dok se napon kreće od 12V do 46V kao što je prikazano na slici ispod.

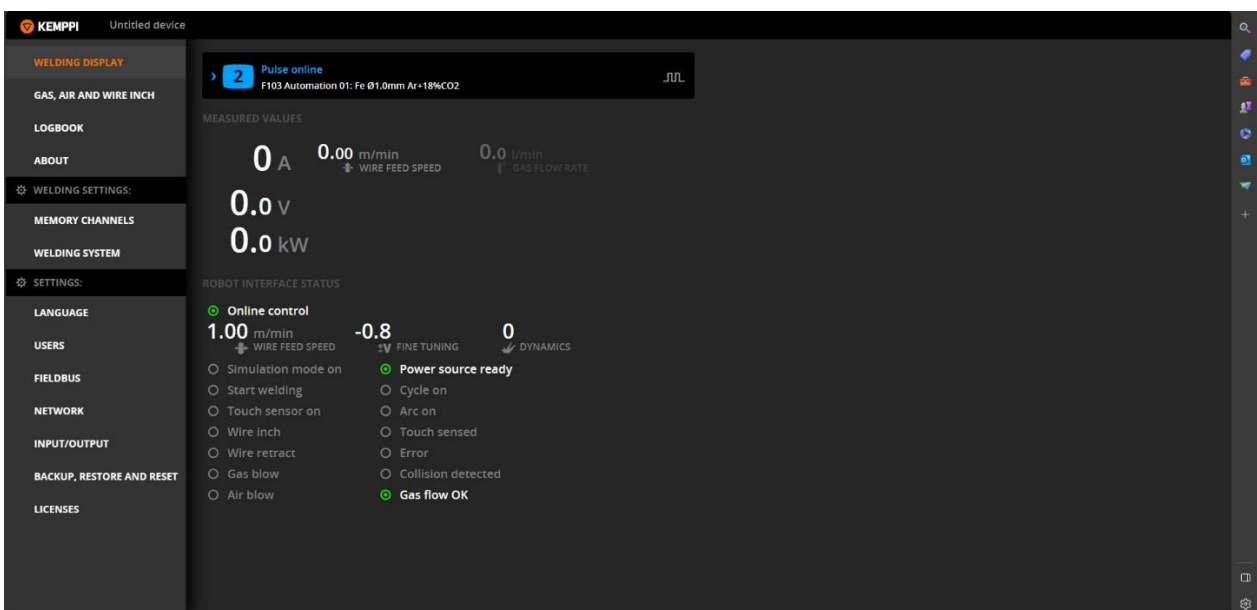
| | | | | | |
|---|-------------|--------------------------------|---------------------|---|------|
|  | | Made in Finland 芬兰 | | 4481 | |
| Kempinkatu 1, 15810 Lahti, Finland | | | | | |
| A7 MIG Power Source 450 | | | S/N: 3003164 | | |
|  | | IEC 60974-1,-10 GB15579.1-2013 | | 6201450 | |
| 20 A/12 V - 450 A/46 V | | | | | |
|  | | X | 60 | 100 | % |
| S | U0 = 85-95V | I2 | 450 | 350 | A |
| | | U2 | 36,5 | 31,5 | V |
|  | 3-50/60 Hz | U1 = 380-400 V | I1max = 32A | I1eff = 25A | 35 A |
| IP23S / WP | EMC Class A | S1max = 22 kVA | $\lambda = 0,88$ | | |
|  | | Conforms to UL STD 60974-1 | |  | |
| C LISTED US | | Cert. to CSA Std. E60974-1 | |  | |
| Intertek | | | | UK CA | |
| 5020793 | | | | 2022 | |

Slika 19. Specifikacije za A7 MIG izvor struje

Izvor struje je opremljen i sa jedinicom za robotsko sučelje koja u sebi sadrži module preko kojih se spajaju robot i izvor struje kao i izvor struje i računalo ili laptop. Putem te jedinice robot ostvaruje komunikaciju s izvorom struje. Također se može spojiti putem laptopa na izvor struje i otvoriti sučelje preko kojeg se korigiraju specifikacije samog izvora. Isto tako putem laptopa mogu se korigirati parametri zavarivanja i stvarati kanali na kojima su spremljeni procesi zavarivanja i parametri za taj proces. [27]



Slika 20. A7 MIG izvor struje s ugrađenom jedinicom za robotsko sučelje na vrhu



Slika 21. Izgled sučelja na laptopu

7.4. Upravljačka jedinica s kontrolerom

U upravljačkoj jedinici se nalaze svi signali potrebni za komunikaciju s robotom, a na prednjem djelu je sklopka za paljenje, prekidač za mijenjanje između automatskog i manualnog načina rada i "gljiva" za hitno zaustavljanje. Kontroler je jedna od bitnijih stavki i služi za programiranje robota. Putem kontrolera zadaje se putanja robota i pozicija u kojoj će zavarivati. Isto tako putem kontrolera se korigiraju različiti parametre poput parametara zavarivanja, njihanja, TAST-a i slično. Preko kontrolera se može odraditi cijeli program koji je potreban za eksperimentalni dio rada.



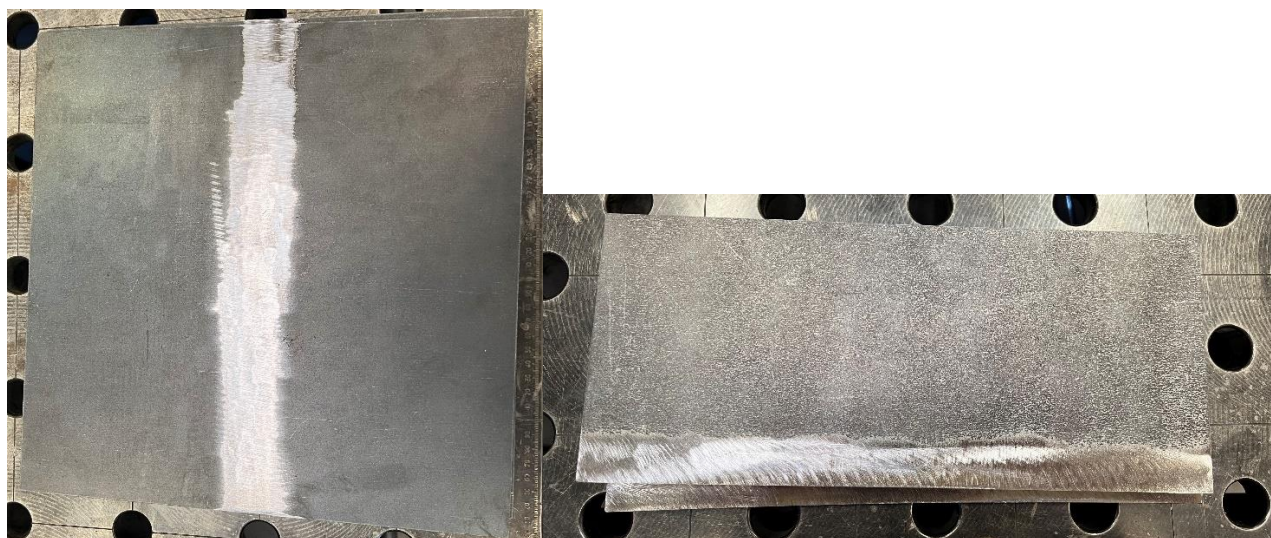
Slika 22. Upravljačka jedinica s kontrolerom

8. EKSPERIMENTALNI DIO

Eksperimentalni dio završnog rada proveden je u radnom postrojenju firme Brkić izumi u Kerestincu na njihovoj robotskoj stanici Fanuc ARC mate 100iD-10L koja je prethodno opisana. Provjeravana je korisnost funkcije TAST kod kutnih zavora debljih materijala. Provedena su tri zavora na tri različita uzorka. Zaključno, opisane su prednosti korištenja funkcije TAST i naznačeni su određeni problemi koji bi se mogli pojaviti i na koje treba obratiti pažnju.

8.1. Priprema uzoraka

Materijal korišten za testne uzorke bio je čelik S355JR, debljine 10mm. Na stroju za lasersko rezanje koji se također nalazi u radnom postrojenju, izrezane su tri pločevine dužine i širine 350 mm i tri pločevine dužine 350 mm i širine 150 mm. Šire ploče su izbrušene po sredini, a uže ploče pri dnu s obje da se spriječi utjecaj prljavština s materijala na kvalitetu zavora i učinkovitost eksperimenta. Također je i jedna uža ploča blago savijena na valjcima kako bi se dobila blaga zakrivljenost u svrhu provedbe eksperimenta.



Slika 23. Izbrušeni uzorci

Nakon toga su rađeni kutni spojevi od pripremljenih ploča. Šire ploče su bile baza, a uže ploče su zavarene na njih. Napravljena su tri različita kutna spoja. Na prvom spoju je gornja ploča pozicionirana točno na sredini bazne ploče, na drugom spoju je jedan kraj pozicioniran na sredinu dok je drugi kraj primaknut 10 mm bliže jednom kraju i treći koji je zavaren također na sredini, ali je gornja ploča zakrivljenog oblika.



Slika 24. Priprema kutnog spoja i ukrućivanje ploča

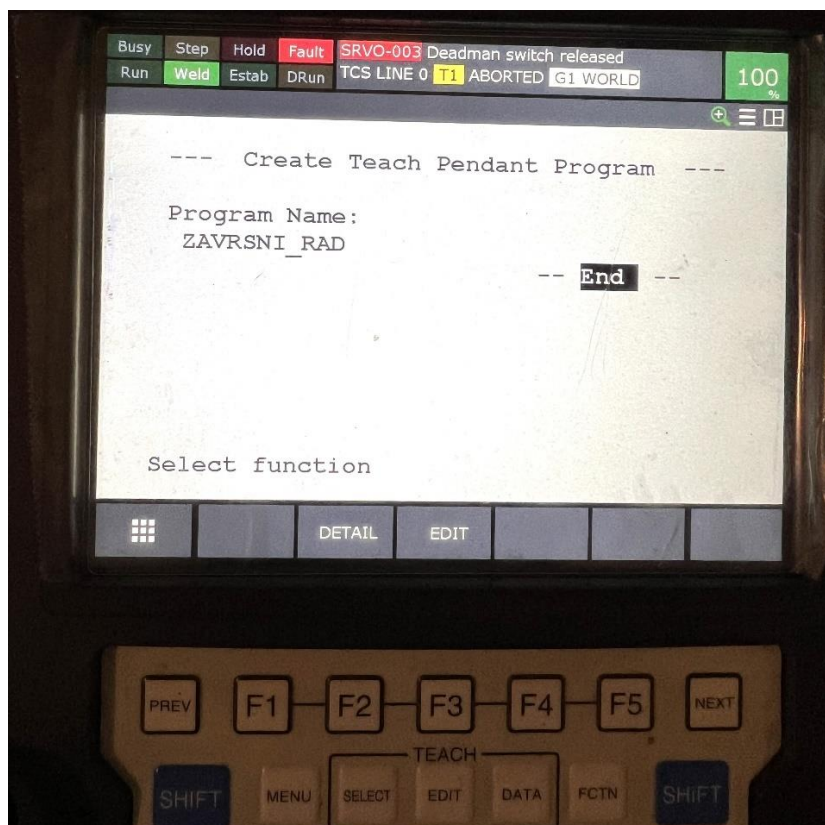
Pripremljeni kutni spojevi su zatim postavljeni na pozicioner. Za ovaj eksperiment nije bio potreban pomak pozicionera pa je stavljen u neutralan položaj i na njegovu gornju ploču je stavljen kutni spoj. Pošto su kutni spojevi bili dosta teški nije bilo potrebe da se stežu direktno nego su samo postavljena i stegnuta dva graničnika okomito jedan na drugi. Tako je osigurano da sva tri uzorka budu pozicionirana na istom mjestu i nije bilo potrebe za korekcijom točaka programa za svaki kutni spoj. Nakon pripreme spoja i njegovog postavljanja na pozicioneru prelazi se na izradu programa za zavarivanje.



Slika 25. Kutni spoj postavljen na pozicioneru

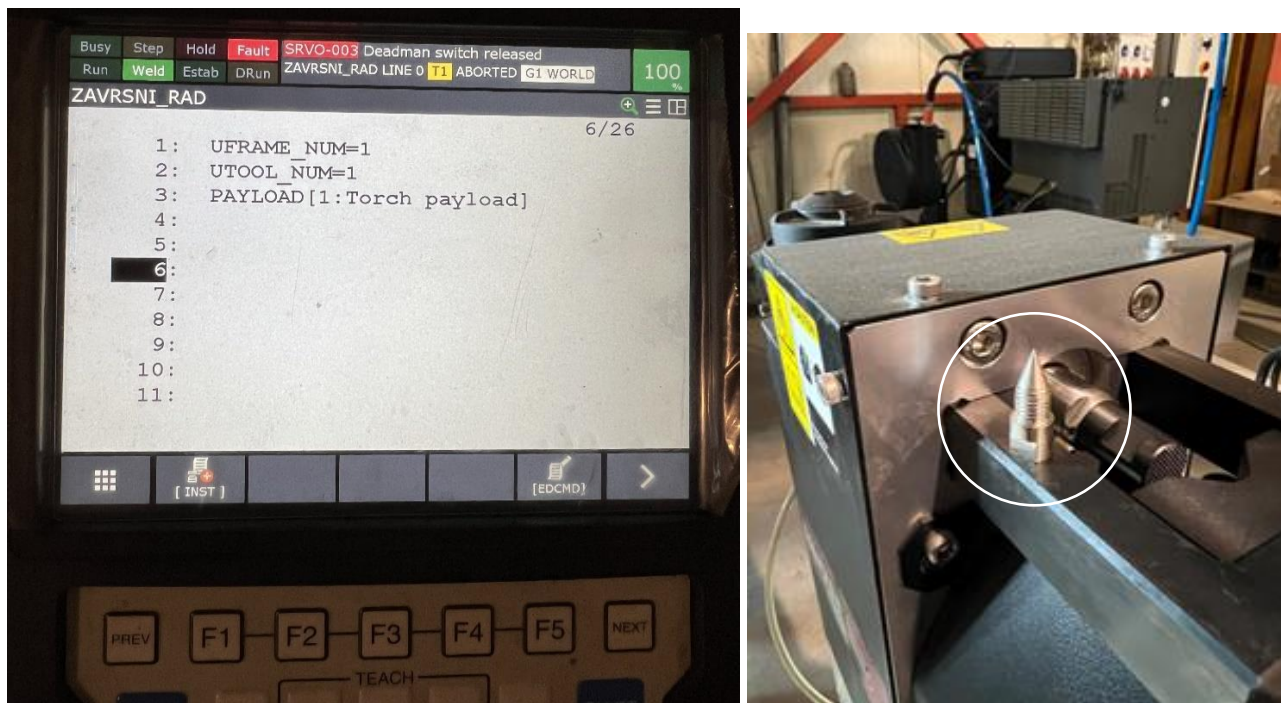
8.2. Programiranje robota i zavari

Prvo se robot uključio preko glavne sklopke na upravljačkoj jedinici, a zatim je uzet teach pendant (kontroler) i započeto je *on-line* programiranje robota za zadani sklop. Prvi korak je izrada novog programa. Novi program se izrađuje tako što se pritiskanjem tipke *select* (odaberi) na kojoj se nalaze svi programi koji su se prije radili i odabirom *new* (novo) imenuje novi program, u ovom slučaju ZAVRSNI_RAD.



Slika 26. Izrada novog programa

Prvo što se radi u programu je dodavanje koordinatnih sustava radnog prostora pozicionera i alata tj. u ovom slučaju pištolja za zavarivanje. Oba koordinatna su ranije postavljena. Koordinatni sustav radnog prostora je postavljen preko opcije tri točke. Prvo se odabere točka ishodišta na pozicioneru te se snimi. Zatim se određuje u kojem smjeru će se kretati x i y osi tako da se pomakne glava robota u željeni smjer i snimi točke za x-os i y-os. Kod određivanja koordinatnog sustava alata je sličan postupak kao putem opcije tri točke, ali je potrebna pomoć metalnog šiljka koji se naziva *Tool center point* (TCP). Kako bi se odredio koordinatni sustav potrebno je što bliže prići vrhom žice na vrh TCP-a i ponoviti taj postupak tri puta. Prilikom svakog prilaza mora se promijeniti kut i rotacija alata kako bi se dobila što točnija kalibracija. Kako bi se postavili koordinatni sustavi u program, pritisne se [INST] i *Frames* i tamo se odaberu željene koordinatne (*User frame* i *Tool frame*). Uz koordinatne sustave u program se dodaje i opterećenje alata kako bi robot to uzeo u obzir prilikom kretanja i zaustavljanja. Opterećenje je također prethodno određeno prilikom instalacije alata na glavu robota. Postavljanje opterećenja je slično kao i koordinatnih. Pritisne se [INST] i odabere funkciju *Payload*.



Slika 27. Prikaz prvih linija programa i TCP-a

Nakon postavljanja koordinatnih sustava počinje se sa zadavanjem točaka programa. Prva točka u većini programa je *Home* pozicija koja je spremljena u registar pozicija. Na taj način se ne mora svaki put navoditi robot do te pozicije, nego se samo pozove iz registra pozicija. Kao *Home* poziciju stavljena je pozicija gdje su svi zglobovi u neutralnoj poziciji osim J5 zgloba koji je na -90° , kao što je prikazano na slici 17. Određivanjem prve pozicije prelazi se na točke zavarava: točka prilaza, prva točka zavarava, zadnja točka zavarava i točka izlaza. Prilikom postavljanja točaka bira se između dvije opcije. Krivuljna interpolacija (JOINT) gdje se robot kreće zakrivljenom putanjom i brzina se određuje u postocima od 0% do 100% i linearna interpolacija (LIN) gdje se robot kreće linearno i brzina se određuje brojačano. Također se kod linearne interpolacije bira između različitih mjernih jedinica za brzinu, a zadano je cm/min. Kod postavljanja točaka za zavarivanje uvijek se preferira postaviti linearnu interpolaciju jer ne dolazi do neželjenih rotacija pištolja. To je osobito bitno kod točaka zavarava jer pozicija pištolja igra veliku ulogu u kvaliteti i ujednačenosti zavarava. Kod zadavanja prve točke zavarava obraća se pažnja na poziciju pištolja. Vrh žice je postavljen na sredinu spoja pod kutom od 45° , a sam pištolj je u blagom *pushu* (lijeva tehnika) oko 10° od neutralne pozicije. Slobodni kraj žice je 12 mm. Nakon postavljanja snimljena je prva točka zavarava i točka prilaza.



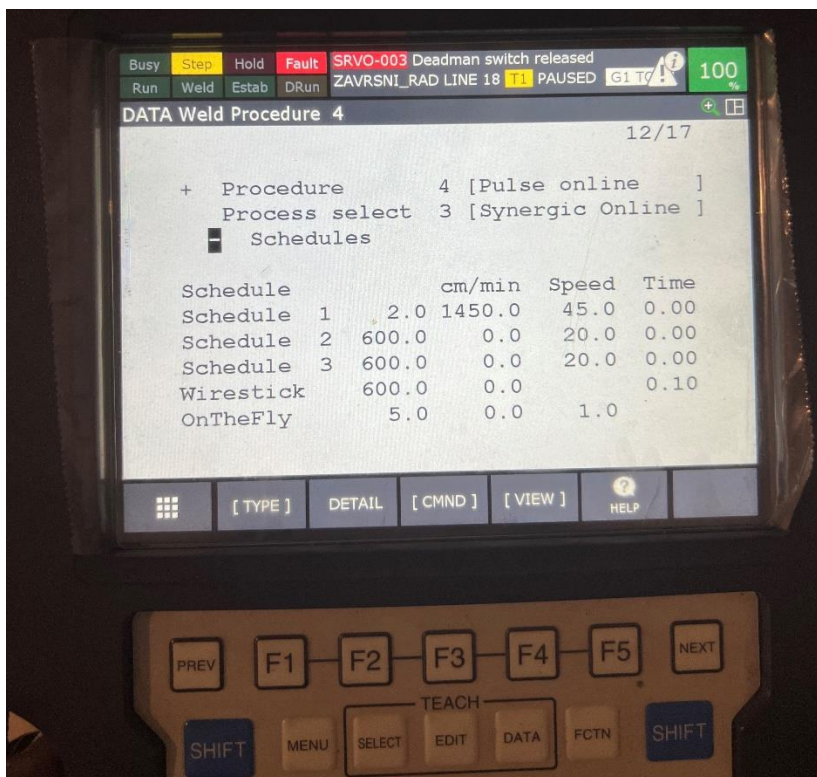
Slika 28. Pozicija vrha žice i pištolja kod zavora

Nakon postavljanja prve točke zavora robot je linearno pomaknut u krajnju točku zavora kako bi pozicija pištolja ostala ista. Postavljena je linearna interpolacija i za tu točku te je postavljena brzina točke *Weld speed* (brzina zavarivanja). To je opcija koja se može postaviti kod točaka unutar zavora gdje se podatak od brzini kretanja do te točke vuče iz parametara zavarivanja koje se postavlja kasnije. Poslije toga se postavlja točka izlaska i povratak u *Home* poziciju. Time se završava postavljanje putanje robota i prelazi na zadavanje parametara za zavarivanje i njihanje i implementaciju TAST-a u program.



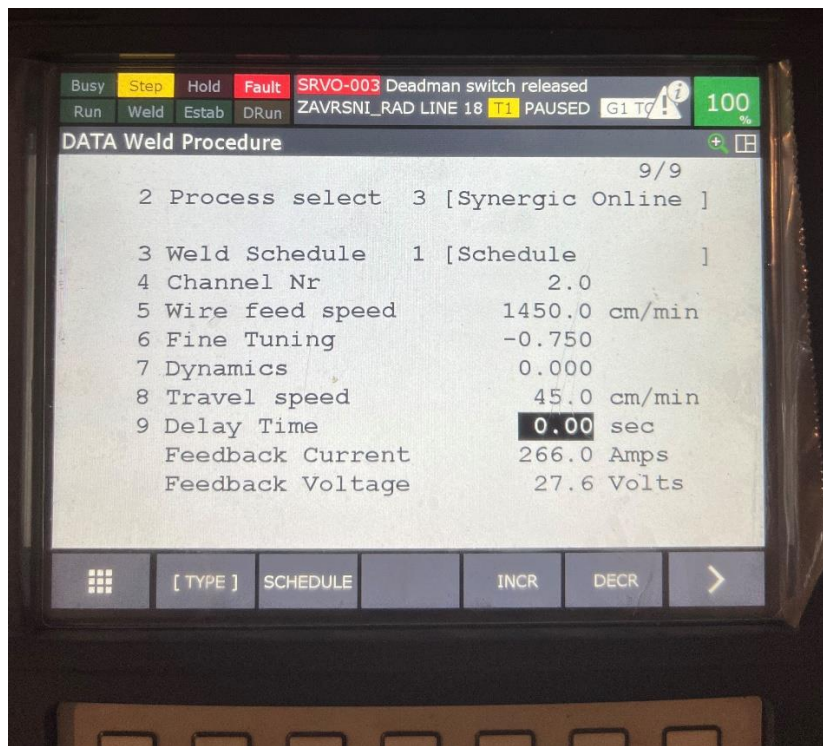
Slika 29. Pozicija pištolja u krajnjoj točki zavora

Parametri se zadaju tako da se stisne tipka *Data* i zatim odabere tip parametara koji se korigira. Prvo su namješteni parametri za zavarivanje. Metoda zavarivanja koja se koristi bila je pulsno zavarivanje i ona se nalazi pod *Weld procedure 4*. U početnom izborniku je skraćena lista parametara: izbor kanala, brzina žice, brzina zavarivanja i vrijeme zadržke. Informacije o kanalu robot vuče s izvora struje. Na njemu su se prethodno zadale različite metode zavarivanja na različitim kanalima i ovisno o potrebi stavio broj kanala koji se koristio. Na taj način izvor struje ima informaciju koja se metoda zavarivanja koristi.



Slika 30. Skraćeni prikaz parametara za zavarivanje

Pomakom na prvu liniju gdje se nalazi *Schedule 1* i pritiskom na *Detail* ulazi se u detaljan prikaz parametara za zavarivanje. Tu se, uz navedene parametre, još nalaze opcije dinamika i fino podešavanje te se na dnu nalaze podaci o jačini struje i naponu zavara koje robot povratno dobiva putem senzora tokom zavarivanja. Kod brzine žice i brzine zavarivanja zadana je mjerna jedinica cm/min i na to se mora paziti prilikom zadavanja parametara. U eksperimentalnom radu korišteni su parametri s donje slike za sva tri zavara. Koristio se kanal broj 2 (pulsno zavarivanje), $v_z = 14,5$ m/min, $v_c = 450$ mm/min i fino podešavanje napona je -0,75.



Slika 31. Detaljni prikaz parametara za zavarivanje

Nakon postavljanja parametara za zavarivanje prelazi se na parametre za njihanje. U slučaju njihanja skoro svi bitni parametri se nalaze na skraćenom prikazu. To su frekvencija, amplituda i vrijeme zadržke na krajevima. U detaljnom prikazu jedina bitna stavka za promatrani slučaj je kut njihanja koji je 90° jer se zavaruju kutni spojevi. Ostali parametri koji su se koristili prikazani su na slici ispod. Amplituda je 2,5 mm, frekvencija je 3 Hz, a vrijeme zadržke na rubovima njihanja je 0,05 sek.

| | FREQ (Hz) | AMP (mm) | R_DW (sec) | L_DW (sec) |
|----|-----------|----------|------------|------------|
| 1 | 3.0 | 2.5 | .050 | .050 |
| 2 | 1.0 | 4.0 | .100 | .100 |
| 3 | 1.0 | 4.0 | .100 | .100 |
| 4 | 1.0 | 4.0 | .100 | .100 |
| 5 | 1.0 | 4.0 | .100 | .100 |
| 6 | 1.0 | 4.0 | .100 | .100 |
| 7 | 1.0 | 4.0 | .100 | .100 |
| 8 | 1.0 | 4.0 | .100 | .100 |
| 9 | 1.0 | 4.0 | .100 | .100 |
| 10 | 1.0 | 4.0 | .100 | .100 |

Slika 32. Parametri njihanja

Završenim postavljanjem parametara prelazi se na implementaciju svih funkcija u program zavara. Prvo se mora postaviti odgovarajući proces zavarivanja. Na prvu točku zavara odabire se funkcija *Weld Start* koja se nalazi na početnom zaslonu kod programiranja te se upisuje dva broja u uglatu zagradu koja se pojavi pored. Prvi broj označava *Procedure* koji se bira, u ovom slučaju je to 4 jer se tamo nalazi pulsno zavarivanje (slika 30), a drugi broj označava *Schedule* koji se bira, u ovom slučaju to je broj 1 jer se tamo nalaze željeni parametri za zavarivanje (slika 30). Zatim se zadaje funkcija njihanja u idućoj liniji programa. Pritiskom na [INST] otvara se prozor sa različitim funkcijama. Odabire se funkcija *Weave* i zatim *Weave sine*. U uglatu zagradu koja se pojavi pored funkcije upisuje se broj 1 koji odgovara postavljenim parametrima (slika 32). Zadnje što se dodaje je funkcija *Track TAST*. Ona se također nalazi pritiskom na tipku [INST] i odabirom na *Track*. Iduća točka u programu je i zadnja točka zavara. Tu se mora naznačiti kraj svake funkcije istim redoslijedom kojim su se postavljale funkcije. Prvo se odabire *Weld end* i u uglatu zagradu se opet upisuju isti brojevi [4, 1]. Zatim se odabire funkcija *Weave* i pritisne se *Weave end* što označava kraj kretanja njihanjem za robota. Za kraj se odabire funkcija *Track* i pritisne se *Track end* što označava kraj praćenja električnog luka i korigiranja putanje.

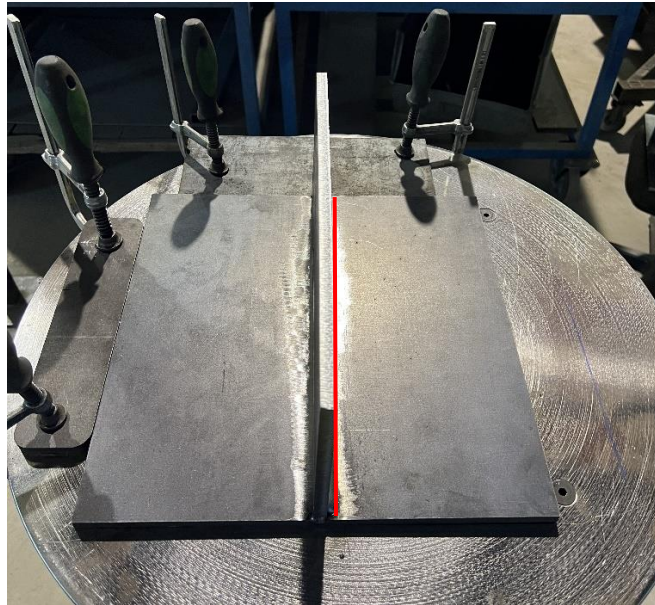
```

ZAVRSNI RAD
PAUSED 9/26
1: UFRAME_NUM=1
2: UTOOL_NUM=1
3: PAYLOAD[1:Torch payload]
4:
5:
6: J @PR[1:Home] 100% FINE
7:
8: J P[1] 100% FINE
9: L P[2] 2000mm/sec FINE
   : Weld Start[4,1]
10: Weave Sine{1}
11: //Track TAST[1]
12:
13: L P[3] WELD_SPEED FINE
   : Weld End[4,1]
14: Weave End
15: //Track End
16: L P[4] 2000mm/sec FINE
17:
18: J @PR[1:Home] 100% FINE
19:

```

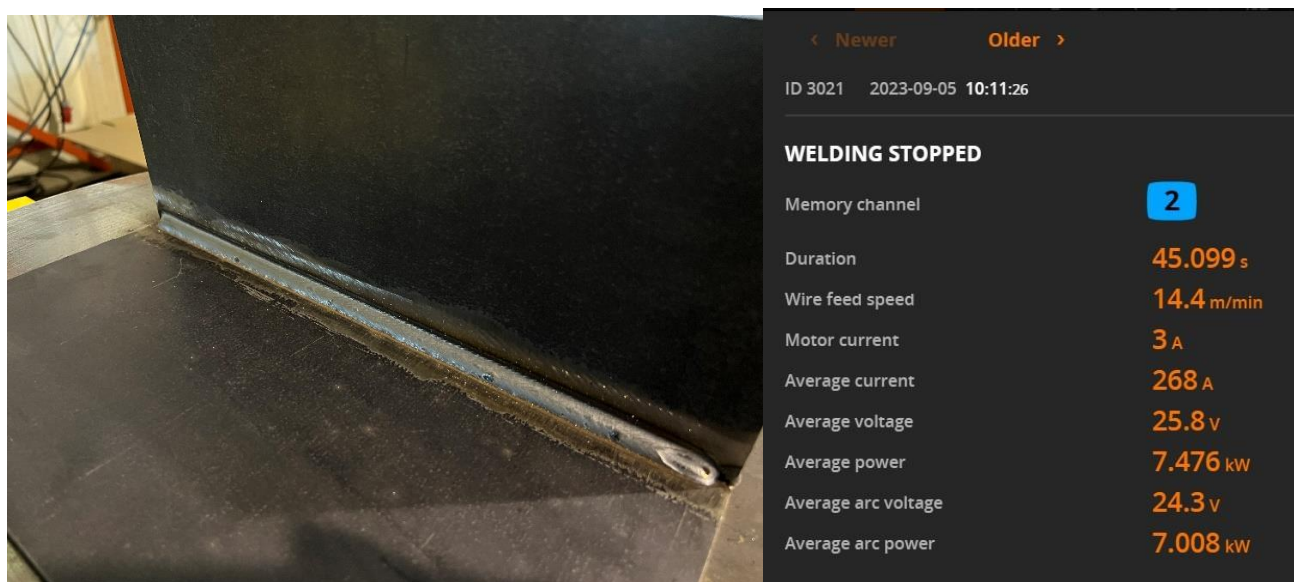
Slika 33. Konačni program ZAVRSNI_RAD

Prvi zavar je rađen na kutnom spoju kojem se gornja ploča nalazila točno na sredini bazne ploče. Putanja zavora je linearna. S crvenom linijom je naznačena putanja zavora koja je postavljena.



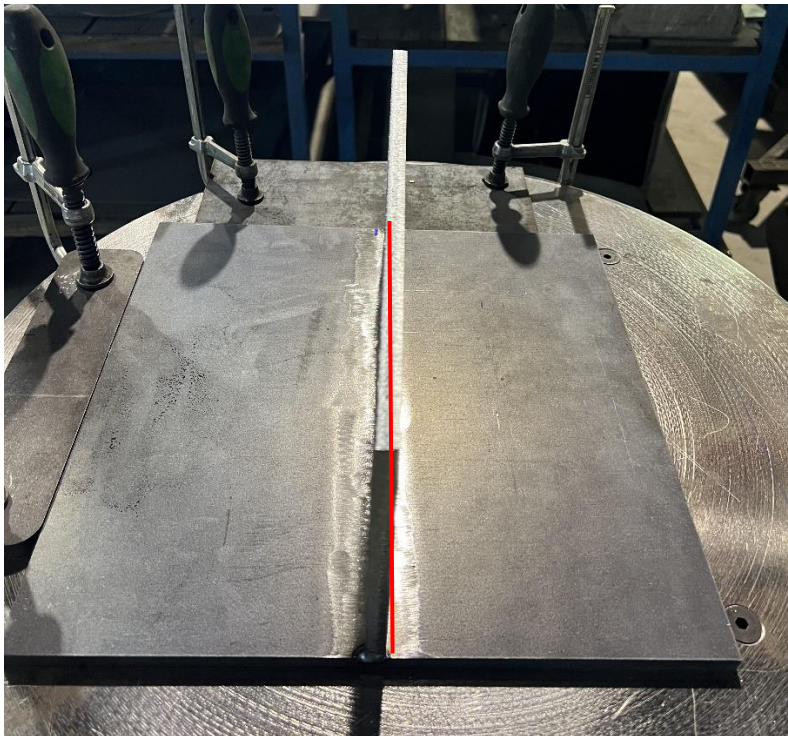
Slika 34. Prvi kutni spoj s prikazom zadane putanje

Postignut je ujednačen i kvalitetan zavar. Nije bilo nikakvih zajeda na krajevima zavora. Prskotine su bile minimalne, a geometrija zavora bila je zadovoljavajuća.



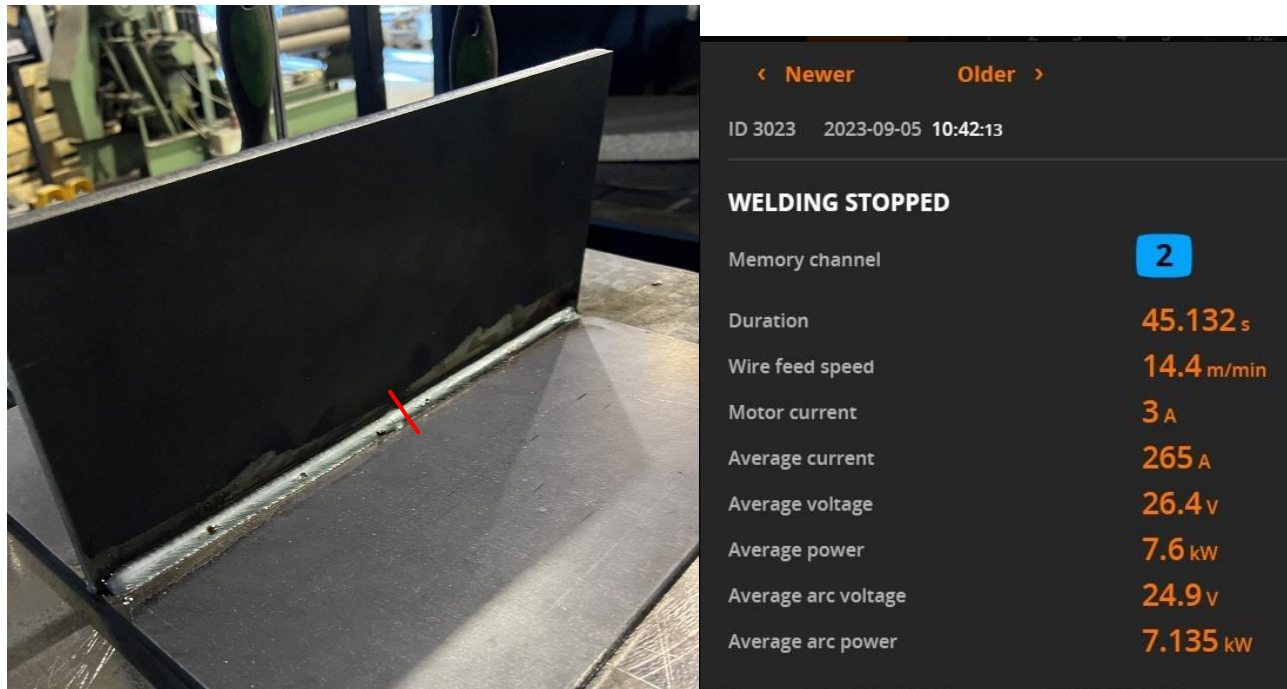
Slika 35. Prvi zavar i parametri zavarivanja

Drugi zavar je rađen na kutnom spoju kojem je gornja ploča bila na sredini s jedne strane bazne ploče, a na drugoj strani je bila pomaknuta 10 mm prema robotu. Putanja robota je ostavljena ista kao i kod prvog zavara te bi se pomoću funkcije TAST trebala dobiti ista geometrija kao i kod prvog zavara.



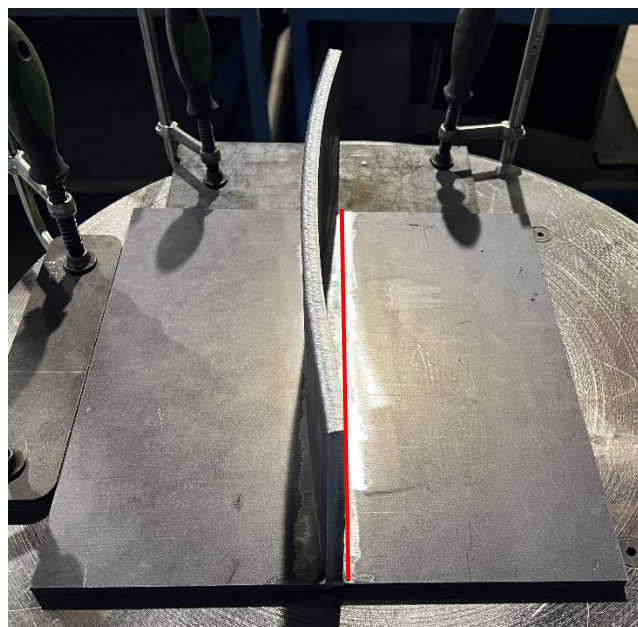
Slika 36. Drugi kutni spoj s prikazom zadane putanje

Postignut zavar je samo jednim djelom bio zadovoljavajući. Od 0 mm do 200 mm TAST je uspješno korigirao putanju robota i postignut zavar je bio zadovoljavajući. Geometrija zavara je izgledala dobro i nije bilo zajeda. Od 200 mm do 350 mm zavar je ispao puno lošije. TAST nije uspješno korigirao putanju i zavar je pretežno bio na gornjoj ploči i jako ispupčen. Pretpostavka je da je kombinacija inicijalnog pomaka gornje ploče i naginjanje ploče prema robotu zbog unosa topline prilikom zavarivanja bila prevelika da bi TAST mogao pravilno korigirati putanju. U budućnosti treba obratiti posebnu pozornost na takve sklopove. Jedno od rješenja je implementacija dodirnih senzora u program za bolju korekciju putanje u startu. Kombinacija tih senzora bi povećala šansu za dobivanjem kvalitetnog zavara. Isto tako se mogu podesiti parametri kako bi se smanjio unos topline prilikom zavarivanja.



Slika 37. Prikaz drugog zavora s naznačenim trenutkom promjene zavora i parametri zavarivanja

Treći zavar je rađen na kutnom spoju kojem je gornja ploča bila savijena na valjcima kako bi se dobio blago zakrivljen oblik. Putanja zavora je ostala ista kao i na prvom spoju. Pomoću TAST-a bi trebali dobiti željenu korekciju putanje zavora iz linearnog oblika u zakrivljeni.



Slika 38. Treći kutni spoj s prikazom zadane putanje

Korekcija TAST-a iz zadanog linearnog u zakrivljenu putanju kod trećeg spoja je bila uspješna. Geometrija zavora je zadovoljavajuća. Zavar nema vidljivih zajeda niti je bilo prisutno nekih većih prskotina.



Slika 39. Prikaz trećeg zavora i parametri zavarivanja

9. ZAKLJUČAK

Svake godine se pojavljuje sve više robota za zavarivanje u radnim postrojenjima. Robotizirano zavarivanje predstavlja naprednu tehnologiju koja ima potencijal za transformaciju proizvodnih procesa u mnogim industrijama. Postupak uvođenja automatizirane ili robotizirane proizvodnje je još uvijek skupa početna investicija, ali u tvornicama velikih serija je uvelike isplativa. Prednosti u smislu kvalitete, sigurnosti i produktivnosti čine ovu tehnologiju izuzetno privlačnom. S obzirom na kontinuirani razvoj tehnologije, očekuje se da će se robotizirano zavarivanje i dalje širiti i poboljšavati, pružajući sve više mogućnosti za unapređenje industrijskih operacija.

U eksperimentalnom dijelu rada provedeno je testiranje funkcije TAST kod robotiziranog MAG zavarivanja kutnih spojeva. Objasnjeno je *on-line* programiranje robota i implementacija funkcija potrebnih za izvođenje testiranja. Također je prikazano podešavanje parametara zavarivanja i njihanja preko kontrolera. Funkcija TAST pomoću senzora električnog luka korigira putanju tokom zavarivanja ukoliko je došlo do pomaka sklopa, što je jako korisno prilikom zavarivanja većih serija. Također se postiže veća kvaliteta zavara jer je ujednačen po cijeloj dužini spoja. Jedini nedostatak kod TAST-a su ograničenja za normalan rad funkcije na koja treba obratiti posebnu pozornost.

Predviđa se u skoroj budućnosti kako će roboti preuzeti veliku većinu zavarivačkih poslova u postrojenjima. Stoga veliku ulogu prilikom robotskog zavarivanja igraju funkcije koje se razvijaju, poput TAST-a, jer optimiziraju rad robota i sam zavar. Također umanjuju potrebu za stalnim korekcijama od strane operatera i ubrzavaju proces proizvodnje.

LITERATURA

- [1] <https://www.britannica.com/technology/welding>, pristupljeno 20.08.2023.
- [2] Hrvatsko društvo za tehniku zavarivanja: *Nomenklatura postupaka i referentni brojevi prema HRN ISO 4063:2001*, 2006.
- [3] Kraut, B: *Strojarski priručnik*, Tehnička knjiga, Zagreb, 2009.
- [4] Waterfield, R: *The Histories*, Oxford World's Classics, Oxford, 2008.
- [5] Lincoln Electric: *The Procedure Handbook of Arc Welding*, Lincoln Electric, Cleveland, 1994.
- [6] Cary, H. B.; Helzer, S. C.: *Modern Welding Technology*, Pearson Education, New Jersey 2005.
- [7] <https://www.lincolntech.edu/news/skilled-trades/welding-technology/types-of-welding-procedures>, pristupljeno 20.08.2023.
- [8] <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/job-knowledge/mig-welding-004>, pristupljeno 21.08.2023.
- [9] <https://amadaweldtech.com/technical-glossary/mig-welding/>, pristupljeno 17.08.2023.
- [10] <https://www.gz-supplies.com/news/the-difference-between-metal-inert-gas-and-metal-active-gas-welding/>, pristupljeno 21.08.2023.
- [11] https://commons.wikimedia.org/wiki/File:GMAW_Circuit.png, pristupljeno 22.08.2023.
- [12] <http://hr.fanucilaser.com/news/comparison-of-tig-mig-and-mag-welding/>, pristupljeno 23.08.2023.
- [13] <https://web.archive.org/web/20120409084438/http://www.ramrijeka.com/c/931/Osno-vni-postupci-zavarivanja---Ram-Rijeka.wshhtml>, pristupljeno 27.08.2023.
- [14] https://commons.wikimedia.org/wiki/File:MIG_cut-away.jpg, pristupljeno 28.08.2023
- [15] Kantolić, D: *Robotizirano MAG zavarivanje*, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, 2018.
- [16] Domazet, Ž.; Krstulović-Opara, L.: *Skripta iz osnova strojarstva*, Sveučilište u Splitu, Split, 2006.
- [17] *Povijest robota od prve do danas*, <https://hr.thpanorama.com/articles/cultural-general/historia-de-los-robots-desde-el-primero-hasta-la-actualidad.html>, 31.08.2023.

- [18] Ciglar I., Botak Z.: *Upravljanje i primjena robota za zavarivanje "REIS ROBOTICS RV6L"*, Veleučilište u Varaždinu, Varaždin, 2011.
- [19] Thomas R. Kurfess: *Robotics and Automation Handbook*, CRC press, New York, 2015.
- [20] *Robots done right*, <https://robotsoneright.com/Articles/whats-inside-a-robotic-weld-cell.html>, 04.09.2023.
- [21] S. Arungalai Vendan, Liang Gao, Akhil Garg, P. Kavitha, G. Dhivyasri, Rahul SG: *Interdisciplinary treatment to arc welding power sources*, Springer Nature Singapore, 2018.
- [22] *Robotic welding cell: What it is*, <https://www.evsint.com/robotic-welding-cell/>, 04.09.2023.
- [23] I. Garašić, Z. Kožuh, M. Remenar: *Senzori i njihova podjela u tehnologiji zavarivanja*, Tehnički vjesnik 22, 2015.
- [24] *Weaving in the welding operation*, <https://theweldings.com/weaving/>, 05.09.2023.
- [25] *R30iB Arctool operators manual*, Fanuc robot series – priručnik
- [26] *Fanuc robot ARC mate 100iD operators manual*, Fanuc robot series – priručnik
- [27] *A7 MIG welder operating manual*, Kemppi – priručnik, 2018.