

Robotizirano zavarivanje metalnim praškom punjenom žicom uz primjenu Ar-CO₂-O₂ plinskih mješavina

Belačić, Bruno

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:235:184810>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-14**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Bruno Belačić

Zagreb, 2023. godina.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Ivica Garašić

Student:

Bruno Belačić

Zagreb, 2023. godina.

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

Prvenstveno se zahvaljujem mentoru prof. dr. sc. Ivici Garašiću na svim stručnim savjetima prilikom izrade ovog rada.

Posebno hvala asistentu Mislavu Štefoku, mag. ing., za svu pomoć tijekom izvođenja eksperimentalnog dijela rada, te na strpljenju i korisnim savjetima prilikom izrade ovog rada.

Također se zahvaljujem laborantima Laboratorija za zavarene konstrukcije za svu pomoć prilikom izvođenja eksperimentalnog dijela rada.

Na kraju bih se htio zahvaliti svojoj obitelji na neizmjernoj podršci i razumijevanju tijekom studiranja i izrade ovog rada.

Bruno Belačić



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: **Bruno Belačić** JMBAG: **0035223050**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Robotizirano zavarivanje metalnim praškom punjenom žicom uz primjenu Ar-CO₂-O₂ plinskih mješavina**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Robotized welding with metal cored wire and application of Ar-CO₂-O₂ gas mixtures**

Opis zadatka:

Na temelju literature detaljno proučiti i opisati specifičnosti zavarivanja metalnim praškom punjenom žicom. Odrediti osnovne zahtjeve za robotizaciju zavarivanja te usporediti područje parametara zavarivanja punom i metalnim praškom punjenom žicom. Analizirati prednosti višekomponentnih Ar-CO₂-O₂ mješavina u odnosu na standardne Ar-CO₂ mješavine.

U eksperimentalnom dijelu osmisliti plan eksperimenta za robotizirano zavarivanje kutnog spoja na čeliku kvalitete S355 uz primjenu metalnim praškom punjene žice. Zavarivanje provesti na rasponu debljina od 5 mm do 30 mm. Na uzorcima provesti analizu geometrije zavara i makrostrukture spoja. Zaključno, odrediti potencijal primjene robotiziranog zavarivanja metalnim praškom punjenom žicom uz primjenu Ar-CO₂-O₂ mješavina u realnim proizvodnim uvjetima.

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

Zadatak zadan:

30. 11. 2022.

Datum predaje rada:

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

Predviđeni datumi obrane:

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

Zadatak zadao:

Prof. dr. sc. Ivica Garašić

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Branko Bauer

SADRŽAJ

| | |
|---|------|
| SADRŽAJ | I |
| POPIS SLIKA | III |
| POPIS TABLICA..... | V |
| POPIS OZNAKA | VI |
| POPIS KRATICA | VII |
| SAŽETAK..... | VIII |
| SUMMARY | IX |
| 1. UVOD..... | 1 |
| 2. MAG POSTUPAK ZAVARIVANJA | 2 |
| 2.1 Oprema za MAG postupak zavarivanja | 3 |
| 2.2 Prijenos metala u električnom luku..... | 6 |
| 2.2.1 Prijenos metala kratkim spojevima..... | 7 |
| 2.2.2 Prijenos metala prijelaznim lukom | 8 |
| 2.2.3 Prijenos metala štrcajućim lukom | 8 |
| 2.2.4 Prijenos metala impulsnim lukom..... | 9 |
| 2.3 Dodatni materijal..... | 10 |
| 2.3.1 Metalnim praškom punjene žice..... | 12 |
| 2.4 Zaštitni plinovi kod MAG zavarivanja | 16 |
| 2.4.1 Utjecaj na električno-fizikalna svojstva električnog luka | 17 |
| 2.4.2 Vrste zaštitnih plinova..... | 21 |
| 2.4.3 Dvokomponentne mješavine zaštitnih plinova | 23 |
| 2.4.4 Trokomponentne mješavine zaštitnih plinova | 25 |
| 2.4.5 Prednosti Ar – CO ₂ – O ₂ mješavina nad standardnim Ar – CO ₂ mješavinama zaštitnih plinova | 27 |
| 2.5 Parametri MAG postupka zavarivanja | 28 |
| 2.5.1 Usporedba parametara zavarivanja punom žicom i metalnim praškom punjenom žicom | 29 |

| | |
|--|----|
| 3. ROBOTIZIRANO MAG ZAVARIVANJE | 30 |
| 3.1 Industrijski roboti | 30 |
| 3.2 Primjena robota u zavarivanju | 31 |
| 3.2.1 Komponente robotiziranih zavarivačkih stanica | 31 |
| 3.2.2 Metode programiranja robota..... | 33 |
| 3.3 Zahtjevi za robotizaciju MAG postupka zavarivanja | 34 |
| 3.4 Nedostatci robotiziranog zavarivanja..... | 35 |
| 4. EKSPERIMENTALNI RAD..... | 36 |
| 4.1 Korištena oprema i materijali..... | 36 |
| 4.1.1 Robotizirana zavarivačka stanica..... | 36 |
| 4.1.2 Zaseban izvor struje i mehanizam za dovođenje žice | 38 |
| 4.1.3 Osnovni materijal..... | 40 |
| 4.1.4 Dodatni materijal | 41 |
| 4.1.5 Zaštitni plinovi | 42 |
| 4.1.6 Mjerenje temperature površine zavara | 43 |
| 4.2 Priprema uzoraka | 44 |
| 4.3 Postupak zavarivanja..... | 44 |
| 4.3.1 Parametri zavarivanja..... | 45 |
| 4.3.2 Programiranje kretanja robota..... | 47 |
| 4.4 Rezultati zavarivanja..... | 48 |
| 4.5 Analiza makroizbrusaka..... | 51 |
| 4.5.1 Analiza geometrije zavara i makrostrukture spoja..... | 52 |
| 5. ZAKLJUČAK..... | 57 |
| 6. LITERATURA | 59 |

POPIS SLIKA

| | | |
|-----------|---|----|
| Slika 1. | Oprema za MAG zavarivanje [7] | 4 |
| Slika 2. | Vrste pogonskih kotačića, s lijeva na desno: nazubljeni utor, V utor i U utor [10] | 5 |
| Slika 3. | Shematski prikaz vrha pištolja tijekom zavarivanja [11] | 6 |
| Slika 4. | Djelovanje „ <i>pinch effecta</i> “ na rastaljenu kapljicu [13] | 7 |
| Slika 5. | Prijenos kapljica prijelaznim lukom [13] | 8 |
| Slika 6. | Prijenos kapljica štrcajućim lukom [13]..... | 9 |
| Slika 7. | Dijagram jakosti struje i vremena tijekom impulsnog zavarivanja [14] | 10 |
| Slika 8. | Presjek praškom punjenih žica [2] | 11 |
| Slika 9. | Shematski prikaz taljenja pune žice (lijevo) i praškom punjene žice (desno) [15] | 12 |
| Slika 10. | Presjek metalnim praškom punjenih žica prema načinu izrade: a) preklopni spoj, b) šavni spoj i c) bešavni spoj [18]..... | 13 |
| Slika 11. | Lijeva tehnika rada kod MCAW postupka, kutni spoj [15] | 15 |
| Slika 12. | Dijagram depozita dodatnog materijala u odnosu na jakost struje zavarivanja za žice promjera 1,2 mm i 1,6 mm [20]..... | 15 |
| Slika 13. | Količina dimnim plinova tijekom zavarivanja punom žicom i metalnim praškom punom žicom [20] | 16 |
| Slika 14. | Shematski prikaz disocijacije i ionizacije plina [22]..... | 18 |
| Slika 15. | Shematski prikaz profila zavara za određene plinove [13] | 19 |
| Slika 16. | Toplinska vodljivost zaštitnih plinova [22]..... | 19 |
| Slika 17. | Profil zavara za određene mješavine Ar i CO ₂ [23] | 24 |
| Slika 18. | Utjecaj dvokomponentnih mješavina plinova i čistog CO ₂ na profil zavara [13]. | 25 |
| Slika 19. | Primjer robota sa šest rotacijskih zglobova [33] | 31 |
| Slika 20. | Robotizirana zavarivačka stanica [34] | 32 |
| Slika 21. | Primjena pozicionera tijekom robotiziranog zavarivanja [35] | 32 |
| Slika 22. | Privjesak za učenje („ <i>on - line</i> “ programiranje) [31]..... | 33 |
| Slika 23. | Robotizirana zavarivačka stanica i uzorak prije zavarivanja | 37 |
| Slika 24. | Privjesak za učenje | 38 |
| Slika 25. | Izvor struje i mehanizam za dovođenje žice | 39 |
| Slika 26. | Tehničke karakteristike izvora struje WB-P500L | 39 |
| Slika 27. | Korisničko sučelje izvora struje WB-P500L..... | 40 |

| | | |
|-----------|--|----|
| Slika 28. | Specifikacije žice KX – 706 M [37]..... | 41 |
| Slika 29. | Kolut sa žicom u mehanizmu za dovođenje žice | 42 |
| Slika 30. | Protok zaštitnih plinova..... | 43 |
| Slika 31. | Infracrveni termometar..... | 43 |
| Slika 32. | Rezanje ploče osnovnog materijala na tračnoj pili..... | 44 |
| Slika 33. | Pozicioniranje uzorka (lijevo) i stezanje na pozicioner (desno)..... | 45 |
| Slika 34. | Program za zavarivanje uzorka 1F3 | 47 |
| Slika 35. | Posljednja točka zavarivanja | 48 |
| Slika 36. | Uzorak 1F4 – prvi prolaz nakon čišćenja..... | 49 |
| Slika 37. | Uzorak 1F4 – drugi prolaz..... | 49 |
| Slika 38. | Uzorak 1F4 – drugi prolaz nakon čišćenja..... | 49 |
| Slika 39. | Uzorak 1F4 – treći prolaz..... | 50 |
| Slika 40. | Uzorak 2F3 – lijeva strana..... | 50 |
| Slika 41. | Uzorak 2F3 – desna strana | 50 |
| Slika 42. | Uzorak 2F5 – lijeva strana..... | 50 |
| Slika 43. | Uzorak 2F5 – desna strana | 50 |
| Slika 44. | Izgled uzorka prije (lijevo) i nakon ručnog brušenja (desno)..... | 51 |
| Slika 45. | Uređaj za brušenje Mecatech 25 | 52 |
| Slika 46. | Analiza geometrije makroizbruska 1F4P | 52 |
| Slika 47. | Analiza geometrije makroizbruska 1F4K..... | 53 |
| Slika 48. | Analiza geometrije makroizbruska 2F3 | 54 |
| Slika 49. | Analiza geometrije makroizbruska 2F5 | 54 |
| Slika 50. | Dijagram visina zavara 2F3 i 2F5 | 55 |
| Slika 51. | Dijagram penetracija zavara 2F3 i 2F5 | 55 |

POPIS TABLICA

| | |
|--|----|
| Tablica 1. Svojstva zaštitnih plinova [21] | 18 |
| Tablica 2. Dvokomponentne mješavine zaštitnih plinova [2] | 23 |
| Tablica 3. Trokomponentne mješavine He, Ar i CO ₂ [13] | 26 |
| Tablica 4. Često korištene trokomponentne mješavine Ar – CO ₂ – O ₂ [24], [25] | 27 |
| Tablica 5. Kemijski sastav čelika S355J2+N [36] | 40 |
| Tablica 6. Mehanička svojstva čelika S355J2+N [36] | 40 |
| Tablica 7. Kemijski sastavi trokomponentnih mješavina plinova [25] | 42 |
| Tablica 8. Parametri zavarivanja | 45 |
| Tablica 9. Stvarni parametri i unos topline u radni komad | 46 |
| Tablica 10. Usporedba dimenzija zavara 2F3 i 2F5 | 55 |

POPIS OZNAKA

| Oznaka | Jedinica | Opis |
|---------------|-----------------|--------------------------------|
| <i>I</i> | A | Jakost struje zavarivanja |
| <i>U</i> | V | Napon zavarivanja |
| η | - | Iskoristivost električnog luka |
| <i>Q</i> | kJ/cm | Unos topline |
| <i>v</i> | cm/min | Brzina zavarivanja |
| <i>a</i> | mm | Visina zavara |

POPIS KRATICA

| Kratika | Opis |
|-----------------|---|
| MAG | Elektrolučno zavarivanje s taljivom elektrodom u atmosferi aktivnog zaštitnog plina |
| Ar | Argon |
| CO ₂ | Ugljikov dioksid |
| O ₂ | Kisik |
| He | Helij |
| MIG | Elektrolučno zavarivanje s taljivom elektrodom u atmosferi inertnog zaštitnog plina |
| REL | Ručno elektrolučno zavarivanje |
| MCAW | Zavarivanje metalnim praškom punjenom žicom |
| H ₂ | Vodik |
| N ₂ | Dušik |
| CAD | Konstruiranje pomoću računala |

SAŽETAK

U ovom završnom radu ukratko je opisana osnovna oprema MAG postupka zavarivanja te načini prijenosa metala. Opisana je uloga dodatnog materijala te su nabrojane različite vrste dodatnih materijala. Detaljno je opisano zavarivanje metalnim praškom punjenom žicom, njegove prednosti i mane, način proizvodnje metalnim praškom punjene žice, te usporedba parametara zavarivanja metalnim praškom punjenom žicom i punom žicom. Nabrojane su i opisane komponente zaštitnih plinova i njihove dvokomponentne i trokomponentne mješavine. Navedene su prednosti zavarivanja Ar - CO₂ - O₂ mješavinama plinova u odnosu na Ar - CO₂ mješavine plinova. Također je opisano robotizirano zavarivanje, načini programiranja robota i zahtjevi za robotizaciju MAG postupka zavarivanja.

U eksperimentalnom dijelu provedeno je robotizirano zavarivanje metalnim praškom punjenom žicom uz primjenu Ar - CO₂ - O₂ zaštitnih mješavina plinova na tri uzorka čelika kvalitete S355J2+N. Debljina stijenke jednog uzorka je 20 mm, a ostala dva uzorka su debljine stijenke 5 mm. Na temelju dobivenih rezultata ispitivanja, analizirana je geometrija zavarenog spoja i makrostruktura spoja.

Ključne riječi: MAG, metalnim praškom punjena žica, Ar - CO₂ - O₂ mješavine plinova, robotizirano zavarivanje

SUMMARY

This bachelor's thesis briefly describes the basic equipment for MAG welding process and the modes of metal transfer. It also covers the role of additional material and different types of additional materials which can be used. Main topic of this thesis is metal core arc welding, its advantages and disadvantages, the production method of metal cored wire, and a comparison of welding parameters for metal cored arc welding and solid wire welding. Shielding gas components and their binary and ternary gas mixtures are listed and described in detail. The advantages of welding with Ar - CO₂ - O₂ gas mixtures compared to Ar - CO₂ mixtures are also covered. In addition, robotic welding, robot programming methods and requirements for MAG welding robotization are also explained.

In the experimental part, robotized welding with metal cored wire and the application of Ar – CO₂ – O₂ shielding gas mixtures was performed on three samples of S355J2+N grade steel. The wall thickness of one sample is 20 mm, while the other two samples have a wall thickness of 5 mm. Based on the obtained test results, welded joint geometry and macrostructure of the welded joint were analyzed.

Key words: MAG, metal cored wire, Ar – CO₂ – O₂ gas mixtures, robotized welding

1. UVOD

Zavarivanje je postupak spajanja osnovnog materijala s ili bez prisustva dodatnog materijala uz primjenu topline s ciljem dobivanja homogenog područja, zavara. Iako zavarivanje kakvo danas poznajemo spada u novije tehnologije metaloprerađivačke industrije, početci zavarivanja sežu u daleku prošlost. Kovačko zavarivanje smatra se jednim od začetnih postupaka zavarivanja, gdje se dva užarena komada udarcima čekića spajaju u jedan. Kovačko je zavarivanje dugi niz godina bio primaran postupak zavarivanja, sve do kraja 19. stoljeća kada je patentirano elektrolučno zavarivanje obloženom elektrodom. Početkom prvog svjetskog rata potrebe za većom proizvodnošću potaknule su razvoj novih postupaka zavarivanja, te se od tog trenutka nadalje razvijaju svi postupci i inačice tih postupaka koje danas poznajemo i koristimo. Jedan od postupaka koji se istaknuo je MAG postupak (engl. *Metal Active Gas*). To je najrašireniji i najsvestraniji postupak današnjice za zavarivanje raznih vrsta čelika. Odlikuje ga ekonomičnost, niska cijena opreme, visoka fleksibilnost i proizvodnost te mogućnost automatizacije. Potreba za postizanjem veće proizvodnosti, smanjenjem troškova proizvodnje, te boljom ponovljivosti kvalitete zavarenog spoja postiže se robotizacijom MAG postupka zavarivanja. Robotizirano MAG zavarivanje iznimno je korisno u velikoserijskim proizvodnim sustavima gdje opasne i fizički zahtjevne operacije odrađuju roboti [1]. U ovom radu opisane su specifičnosti zavarivanja metalnim praškom punjenom žicom i vrste zaštitnih plinova. Također je opisano robotizirano zavarivanje i zahtjevi za robotizaciju MAG postupka zavarivanja. U eksperimentalnom radu robotizirano su zavareni kutni spojevi na konstrukcijskom čeliku metalnim praškom punjenom žicom uz primjenu Ar - CO₂ - O₂ mješavina plinova, dobiveni su zavari potom ispitani.

2. MAG POSTUPAK ZAVARIVANJA

Nakon prvog svjetskog rata započet je ubrzani razvoj postupaka zavarivanja zbog potrebe za većom produktivnošću. Jedan od razvijenih postupaka bio je MIG postupak (engl. *Metal Inert Gas*). Nekoliko godina nakon razvoja MIG postupka, na njegovom temelju, K.V. Lyubavskii i N.M. Novozhilov razvili su MAG postupak 1953. godine. MAG postupak ubrzo je postao jedan od najkorištenijih postupaka za zavarivanje čelika jer se mogla koristiti oprema za zavarivanje od MIG postupka, ali je njegova ekonomičnost i produktivnost bila daleko veća od ostalih postupaka [1].

MAG zavarivanje ili elektrolučno zavarivanje taljivom elektrodom u atmosferi zaštitnog plina je postupak zavarivanja u kojem se električni luk održava u atmosferi aktivnog plina između osnovnog materijala i taljive elektrode u obliku žice. Aktivni plin sadrži ugljikov dioksid (CO_2) te je najčešće mješavina ugljikovog dioksida s drugim plinovima poput argona (Ar), kisika (O_2) i helija (He) [2]. Svrha plinske atmosfere je zaštita taline i žice od okolnih plinova kako ne bi došlo do kontaminacije i pojave grešaka u zavarenom spoju, ali služi i kao ionizacijsko sredstvo koje stvara vodljivi prostor unutar kojeg se održava električni luk. Budući da se ovaj postupak temelji na upotrebi ugljikovog dioksida kao komponente zaštitnog plina često se u praksi naziva i CO_2 zavarivanje. Ovim postupkom zavaruju se nelegirani i niskolegirani čelici. Dodatni materijal su pune ili punjene žice iste ili više kvalitete od osnovnog materijala koji se zavaruje.

MAG postupak zavarivanja prema stupnju mehanizacije može biti poluautomatizirani, automatizirani i robotizirani. Poluautomatiziranim postupkom zavarivanja upravlja zavarivač ručno te se zbog toga također naziva i ručni postupak. Radi svoje prilagodljivosti ovaj postupak je najkorišteniji. Automatizirani postupak ima mehanizirano upravljanje pištoljem za zavarivanje. Radnik mora pripremiti spoj te nadgledati proces zavarivanja. Njime se najčešće zavaruju cilindrični predmeti pomoću okretaljki i pozicionera ili dugački profili u velikoserijskoj proizvodnji pomoću automata. Robotizirani postupak potpuno je autonoman proces, unaprijed isprogramiran za svaki pokret, korišten u velikoserijskoj proizvodnji [3].

Prednosti MAG postupka [4], [5]:

- tijekom zavarivanja smanjeno je rasprskavanje i ne stvara se troska – potrebno je minimalno čišćenje zavarenog spoja
- visokoproduktivan proces – velike brzine zavarivanja
- mogućnost zavarivanja u svim položajima, u radioni i na terenu
- ekonomičan postupak – nema otpadnog dodatnog materijala kao kod REL-a
- velik broj utjecajnih parametara poput vrste plina, vrste dodatnog materijala, načina prijenosa materijala i slično.

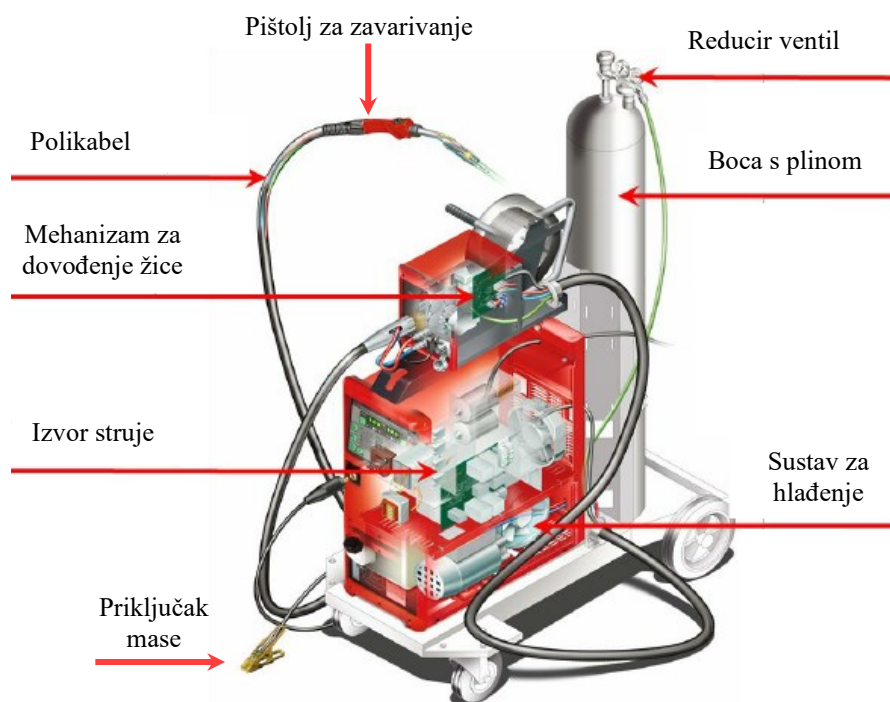
Nedostatci MAG postupka [4], [5]:

- otežano zavarivanje na terenu zbog puhanja vjetra – vjetar otpuhuje zaštitni plin te su talina i žica tada izloženi utjecaju atmosferskog zraka što uzrokuje kontaminaciju
- prije zavarivanja potrebno je očistiti površinu od korozije, masti i ulja kako ne bi došlo do pojave grešaka
- prilikom zavarivanja kratkim spojevima dolazi do rasprskavanja – potrebno je naknadno čišćenje površine
- kvaliteta zavarenog spoja uvelike ovisi o iskustvu zavarivača.

2.1 Oprema za MAG postupak zavarivanja

Osnovna oprema za MAG postupak zavarivanja [Slika 1] sastoji se od: izvora struje, opreme za kontinuirano dovođenje žice, pištolja za zavarivanje, boce zaštitnog plina, reducir ventila, sustava hlađenja, polikabela i priključka mase.

Oprema za MAG postupak skupa je i složena, a najskuplji je izvor struje zbog mnogih dodatnih opcija koje može sadržavati. Neke od dodatnih opcija su: mogućnost impulsnog zavarivanja, izbornik sa preprogramiranim načinima rada ovisno o vrsti i debljini dodatnog materijala, vodeni sustav hlađenja pištolja za zavarivanje te sinergijsko podešavanje parametara. Izvor struje za MAG zavarivanje uređaj je koji proizvodi istosmjernu struju s blagopadajućom statičkom karakteristikom [6].



Slika 1. Oprema za MAG zavarivanje [7]

Izvori struje dijele se na generatore, invertore, transformatore i ispravljače struje. Generatori se generalno koriste na terenu gdje nema priključka na električnu mrežu, oni pretvaraju mehaničku energiju stroja s unutarnjim izgaranjem u električnu energiju [8]. Transformatori su uređaji koji iz struje gradske mreže (220 V ili 400 V) daju izmjeničnu struju visine napona prikladnog za zavarivanje (20 – 40 V). Transformatori su starija tehnologija, veliki su i teški uređaji, ali su pouzdani i često se koriste u ozbiljnim postrojenjima gdje se očekuje zavarivanje tijekom punog radnog vremena. Kako bi se izmjenična struja transformatora pretvorila u istosmjernu koristi se ispravljač struje. Invertor je noviji tip uređaja, manjih je dimenzija i mase, ima visoku iskoristivost. Invertor ulaznu struju gradske mreže pretvara u istosmjernu ili visokofrekventnu pulsirajuću struju [9].

Mehanizam za dovođenje žice kroz polikabel do vrha pištolja kontinuirano dovodi žicu određenom brzinom. Žica je namotana na kolutu smještenom unutar uređaja, a za guranje žice polikabelom odgovorna su četiri (može ih biti i dva ili šest) pogonska kotačića spojena na elektromotor. Kotačići se razlikuju po izgledu i veličini utora, a primjena im ovisi o materijalu i promjeru žice. Određena vrsta kotačića koristi se za određeni tip materijala ili vrstu žice. Upotreba pogrešne vrste kotačića može deformirati žicu što uzrokuje loše vođenje žice kroz

polikabel i gužvanje na izlazu kroz kontaktnu vodilicu. Postoje tri vrste pogonskih kotačića: U utor, V utor i nazubljeni utor [Slika 2]. Kotačić s U utorom koristi se za mekane materijale poput aluminija, V utor koristi se za čelične pune žice, a nazubljeni utor koristi se za tubularne žice odnosno žice punjene praškom [10].

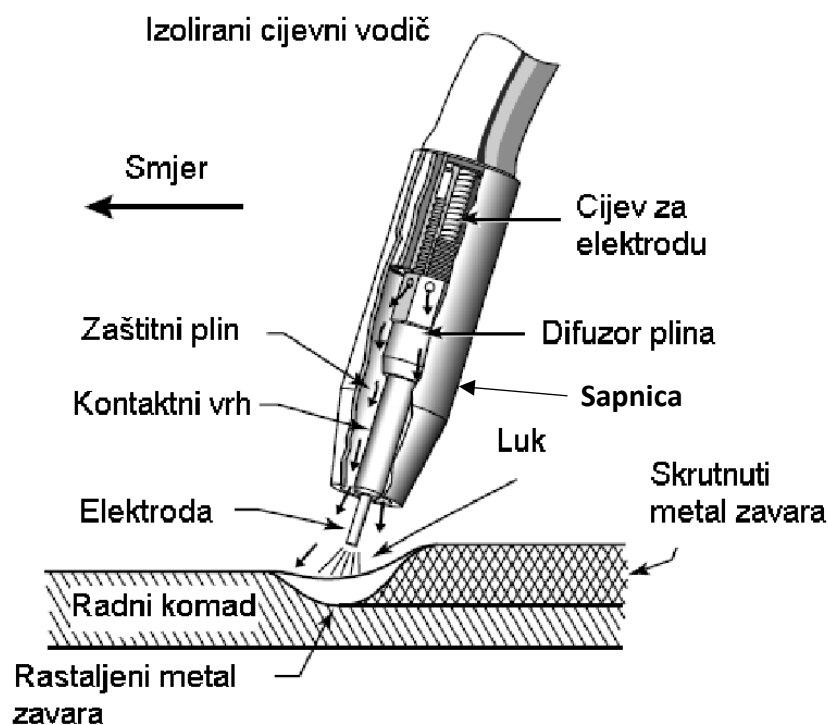


Slika 2. Vrste pogonskih kotačića, s lijeva na desno: nazubljeni utor, V utor i U utor [10]

Polikabel je sustav kablova koji povezuje mehanizam za dovođenje žice i pištolj za zavarivanje. U polikabelu se nalazi kabel za dovođenje žice, električni kabel, kabel za zaštitni plin i crijevo hladne i tople vode (u slučaju da je pištolj za zavarivanje hlađen vodom).

Pritiskom prekidača na pištolju za zavarivanje kreće teći zaštitni plin iz difuzora plina. Sapnica usmjerava taj plin u električni luk. Netom nakon plina kroz kontaktnu vodilicu kreće prolaziti žica. Žica postaje vodič struje tek u trenutku prolaska kroz kontaktnu vodilicu [Slika 3].

Sustav za hlađenje pištolja za zavarivanje odvodi toplinu s vrha pištolja za zavarivanje. Primjenjuje se kada su struje zavarivanja velike jer tada dolazi do oslobađanja velike količine topline. Strujni krug sustava zatvara se spajanjem priključka mase na radni komad. S obzirom na to da je žica kod MAG postupka spojena na pozitivan pol istosmjerne struje, struja protječe od izvora struje, preko žice (elektrode), na radni komad pa natrag u izvor struje preko kabela za masu [12].



Slika 3. Shematski prikaz vrha pištolja tijekom zavarivanja [11]

2.2 Prijenos metala u električnom luku

Prijenos metala u električnom luku ovisi o brojnim parametrima poput jakosti struje, napona, vrste zaštitnog plina, vrste i promjera žice i polaritetu struje na žici. Prijenos metala zapravo je način na koji se kapljica formira na vrhu žice nakon taljenja u električnom luku, te njezino odvajanje i prijelaz prema talini.

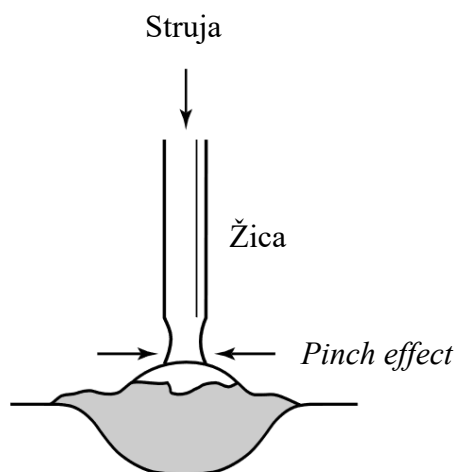
Razlikuju se tri osnovna prirodna načina prijenosa metala [12]:

- prijenos metala kratkim spojevima
- prijenos metala prijelaznim lukom
- prijenos metala štrcajućim lukom.

Često se koristi i prijenos metala impulsnim lukom. To je kontrolirani način prijenosa metala gdje izvor struje upravlja karakteristikama struje kako bi se dobilo savršeno taljenje i odvajanje kapljica [12].

2.2.1 Prijenos metala kratkim spojevima

Ovaj prijenos metala može se podijeliti u dva dijela. Prvi dio je taljenje vrha žice unutar električnog luka gdje nastaje rastaljena kapljica metala. Do taljenja žice dolazi zbog visoke temperature (4000 – 7000 °C) u električnom luku [3]. Drugi dio procesa je nastajanje kratkog spoja između taline na radnom komadu i rastopljene kapljice na vrhu žice. Tijekom kratkog spoja napon strujnog kruga pada na nulu, a jakost struje naglo raste. Zbog porasta jakosti struje dolazi do povećanja magnetskih sila na kraju žice. Te magnetske sile stvaraju takozvani „*pinch effect*“ koji odvaja kapljicu s kraja žice [Slika 4]. Nakon toga se razmak između žice i taline povećava, ponovno se uspostavlja električni luk i ciklus se ponavlja. Taj ciklus ponavlja se do 200 puta u sekundi [13].

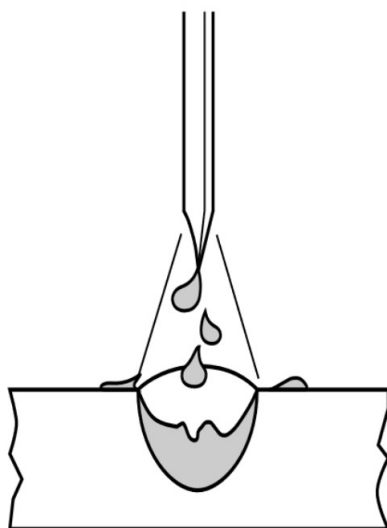


Slika 4. Djelovanje „*pinch effecta*“ na rastaljenu kapljicu [13]

Prijenos metala kratkim spojevima karakteriziraju mali unosi topline što znači da je ovaj prijenos pogodan za zavarivanje tankih predmeta poput limova i zavarivanje korijena zavora. Ovaj prijenos metala također je prikladan za zavarivanje u svim položajima, moguće je zavarivati na većim razmacima jer je lakše upravljati talinom. Nedostaci ovog prijenosa su niska produktivnost, nemogućnost zavarivanja materijala velikih debljina i povećano rasprskavanje [13]. Parametri kojima se uspostavlja ovaj način prijenosa metala su: jakost struje do 190 A, napon 15 – 23 V, žica promjera 0,6 do 1,2 mm i uglavnom se kao zaštitni plin koristi čisti CO₂ ili dvokomponentne i trokomponentne mješavine CO₂, Ar i O₂ [11], [13].

2.2.2 Prijenos metala prijelaznim lukom

Ovaj prijenos metala kombinacija je prijenosa metala kratkim spojevima i prijenosa velikim kapljicama. Kod ovog prijenosa metala nakon taljenja vrha žice u električnom luku na kraju žice stvara se velika kapljica (veća od promjera žice) rastaljenog metala koja se uslijed djelovanja sila u električnom luku i gravitacije odvaja. Odvojena kapljica uglavnom ne prati aksijalan smjer gledanja žice nego leti raznim putanjama prema talini, ili čak izvan taline na radni komad [Slika 5]. Ponekad se kapljica u električnom luku ne odvoji nego dolazi do kratkog spoja. Ovaj prijenos metala teško je upravljiv te se zbog toga i izbjegava. Karakterizira ga jako rasprskavanje i veći unos topline nego kod prijenosa kratkim spojevima. Parametri kojima se uspostavlja ovaj način prijenosa metala su: jakost struje 170 – 230 A i napon 17 – 23 V [13].

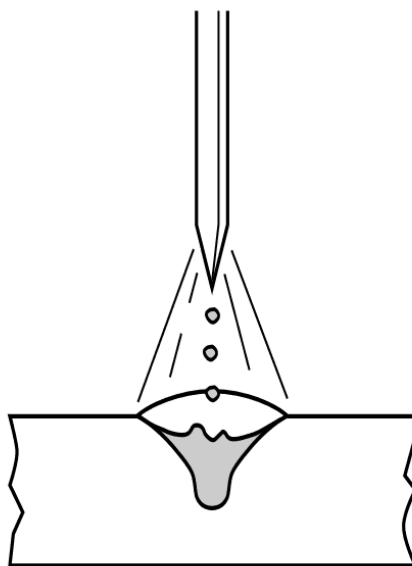


Slika 5. Prijenos kapljica prijelaznim lukom [13]

2.2.3 Prijenos metala štrcajućim lukom

Prijenos metala štrcajućim lukom karakterističan je po tome što se u električnom luku na kraju žice stvaraju rastaljene kapljice promjera manjeg od žice, koje se uslijed djelovanja sila u električnom luku odvajaju i putuju aksijalno prema osnovnom materijalu [Slika 6]. Ovim prijenosom metala u osnovni materijal dovodi se najviše topline, stoga je ovaj način prijenosa najprikladniji za zavarivanje debljih materijala. Zbog velikog unosa topline talina je jako tekuća pa se ovaj prijenos metala najčešće koristi prilikom horizontalnog ili vertikalnog zavarivanja iako ni nadglavno zavarivanje nije nemoguće uz dobro podešene parametre. Tijekom zavarivanja dolazi do male količine rasprskavanja. Izgled zavara je blago konveksan i gladak.

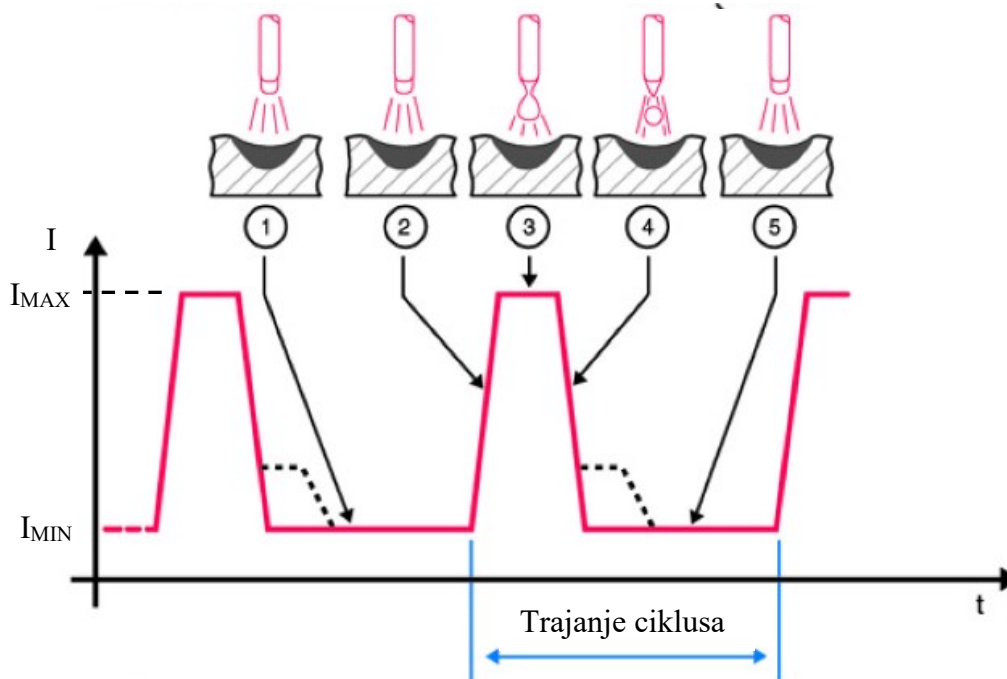
Parametri kojima se uspostavlja ovaj način prijenosa metala su: jakost struje preko 220 A, napon između 25 i 40 V. Ovim prijenosom moguće je koristiti širok spektar vrsta i promjera žica, te mnoge mješavine zaštitnih plinova iako su najčešće korištene dvokomponentne mješavine Ar i CO₂ [11], [13].



Slika 6. Prijenos kapljica štrcajućim lukom [13]

2.2.4 Prijenos metala impulsnim lukom

Prijenos metala impulsnim lukom ili impulsno zavarivanje je kontrolirani način prijenosa metala štrcajućim lukom. Kod ovog prijenosa metala izvor struje zavarivanja mijenja jakost struje ciklički s minimalne vrijednosti na maksimalnu [Slika 7]. Minimalna vrijednost jakosti struje održava električni luk, ta vrijednost jakosti struje niža je od vrijednosti kod prijenosa metala kratkim spojevima. Maksimalna vrijednost struje odgovorna je za odvajanje i prijenos kapljice u talinu. Tijekom jednog ciklusa promjene struje, sa žice se odvoji jedna kapljica. Srednja vrijednost jakosti struje ovog prijenosa metala niža je od prijenosa metala štrcajućim lukom pa je ovaj prijenos primjenjiv za širi spektar debljine materijala od prijenosa materijala štrcajućim lukom. Izgled zavara bolji je nego kod prijenosa štrcajućim lukom, smanjen je depozit vodika i smanjena je pojava puhanja električnog luka [13].



Slika 7. Dijagram jakosti struje i vremena tijekom impulsnog zavarivanja [14]

2.3 Dodatni materijal

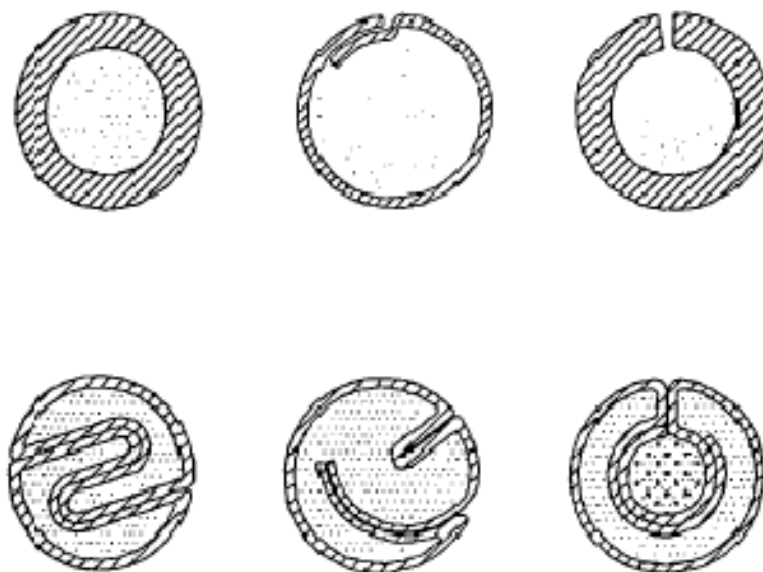
Dodatni materijal kod MAG zavarivanja su žice čija je uloga zatvaranje strujnog kruga i popunjavanje predviđenog žlijeba nakon taljenja. Žice su namotane na kolute. Bitno je da su žice čvrsto i uredno namotane jer sa smanjenjem napetosti žice može doći do zapetljavanja. Radi boljeg električnog kontakta tijekom prolaska kroz kontaktnu vodilicu žice su glatke i uskih tolerancija te su najčešće pobakrene ili poniklane. Prevlačenje žica bakrom ili nikom također sprječava oksidaciju površine žice što može kontaminirati zavar [2].

Postoje dvije osnovne vrste žica, pune žice i praškom punjene žice.

Pune žice danas su i dalje najkorištenije žice, uglavnom zbog svoje niske cijene. Najčešće se koriste žice promjera 0,6 – 2,4 mm, ali postoje i žice većih promjera.

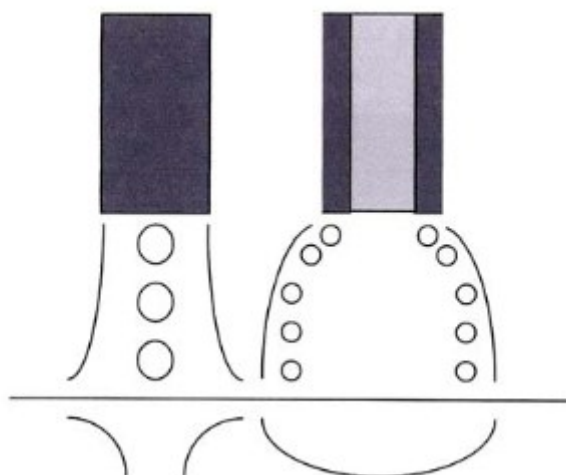
Praškom punjene žice sastoje se od metalnog plašta i punila. Njihov promjer nešto je veći od punih žica (1,2 – 3,2 mm) te im se poprečni presjek razlikuje ovisno o načinu proizvodnje [Slika 8]. Metalni plašt oblikuje žicu i daje osnovni depozit tijekom taljenja. Punila imaju slična svojstva kao obloga elektrode REL postupka zavarivanja, ali je postupak zavarivanja praškom punjenom žicom moguće automatizirati i robotizirati čime MAG postupak ima veliku prednost.

Uloga punjenja je čišćenje zavara, legiranje, povećanje stabilnosti električnog luka, stvaranje troske na površini zavara čime se sprječava oksidacija površine i usporava hlađenje i drugo. Sastav punila može biti metalan, mineralan i na bazi dezoksidanata s raznim dodatcima. MAG zavarivanje bilo kojom vrstom žice vrši se uz primjenu zaštitnog plina, iznimka su praškom punjene žice koje same stvaraju zaštitnu atmosferu raspadom punila [15].



Slika 8. Presjek praškom punjenih žica [2]

Zavarivanje praškom punjenim žicama rezultira boljim razlijevanjem i spajanjem metala zavara s osnovnim materijalom. To je posljedica činjenice da se žica rastaljuje iz plašta, u tom je slučaju električni luk širi što doprinosi smanjenju pojave naljepljivanja [Slika 9]. Rastaljivanjem iz plašta također je povećana produktivnost i smanjeno rasprskavanje. Produktivnost je veća jer je povećana brzina taljenja zbog veće koncentracije struje, a rasprskavanje je smanjeno jer se na plaštu stvaraju manje kapljice tijekom rastaljivanja [15].



Slika 9. Shematski prikaz taljenja pune žice (lijevo) i praškom punjene žice (desno) [15]

Praškom punjene žice prema vrsti punila dijele se na [15]:

- rutilnim praškom punjene žice
- bazičnim praškom punjene žice
- metalnim praškom punjene žice.

2.3.1 Metalnim praškom punjene žice

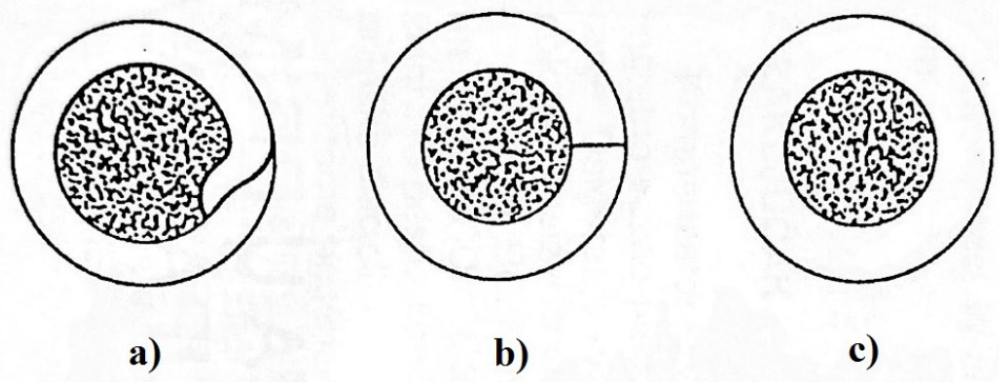
Zavarivanje ovom vrstom žice također je poznato kao MCAW postupak (engl. *Metal Core Arc Welding*). Metalnim praškom punjene žice razvijene su nakon razvoja ostalih vrsta praškom punjenih žica, a njihov je razvoj dodatno potaknuo upotrebu robotiziranog postupka zavarivanja [15]. Sastav punila ovih žica pretežito tvore metalni prah (feromangan, ferotitan i ferossilicij) i u manjoj mjeri stabilizatori električnog luka koji sadrže natrij i kalij. Sastav punila moguće je modificirati za specifičnu primjenu, a žicom u koju su dodani legirni elementi mogu se zavarivati visokolegirani čelici visoke čvrstoće i visokog udarnog rada loma pri niskim temperaturama [16].

Metalnim praškom punjene žice se prema načinu proizvodnje dijele na šavne, bešavne i punjene žice s preklopnim spojem. Najčešće korištene su šavne i bešavne metalnim praškom punjene žice. Šavne žice proizvode se oblikovanjem duge čelične trake u U oblik. Traka U oblika se zatim napuni metalnim prahom, dodatno oblikuje u tubularni oblik te na kraju vuče u određeni

promjer. Šavne žice nisu hermetički zatvorene te su zbog toga osjetljive na visok sadržaj vlage u zraku koji može utjecati na lošija mehanička svojstva zavarenog spoja [17].

Bešavne žice proizvode se od dugih čeličnih traka koje se prvo oblikuju u tubularni oblik, šav nakon oblikovanja se zavari, te se šuplje žice potom žare na temperaturi od 1000 °C do 1200 °C. Nakon žarenja žice se napune metalnim prahom i vuku u određeni promjer uz više međufaznih žarenja [17].

Prije namotavanja obje vrste žica na kolute, one se prevlače bakrom ili niklom kako bi se zaštitile od oksidacije. Bešavne žice skuplje su od šavnih, a posebno su skuplje od punih žica. Bešavne žice imaju prednost nad šavnim žicama jer su zaštićene od ulaska vlage unutar žice i smanjena je mogućnost curenja praha na mjestu šava [17]. Primjena bešavnih žica nad šavnima je prilikom zavarivanja spojeva gdje je propisan nizak udio vodika u depozitu. Šavne, bešavne i punjene žice s preklopnim spojem također se razlikuju po stupnju punjenja. Stupanj punjenja šavnih žica iznosi 18 – 24 %, bešavnih žica 12 – 14 %, a punjenih žica sa preklopnim spojem 30 – 40 %. Na slici 10 mogu se vidjeti presjeci šavnih, bešavnih i punjenih žica sa preklopnim spojem [18].



Slika 10. Presjek metalnim praškom punjenih žica prema načinu izrade: a) preklopni spoj, b) šavni spoj i c) bešavni spoj [18]

Metalnim prahom punjene žice također polako zamjenjuju bazične žice za zavarivanje sitnozrnatih čelika, čelika otpornih na puzanje i čelika visoke čvrstoće. Metalnim praškom punjene žice upotrebljavaju se u raznim područjima zavarivanja poput brodogradnje, kotlogradnje, izgradnje građevinskih i poljoprivrednih strojeva te u željezničkoj industriji.

Mogu se primjenjivati za zavarivanje ili navarivanje, a velika prednost im je mogućnost robotiziranog zavarivanja zbog mogućnosti višeslojnog zavarivanja bez odstranjivanja troske. Na tržištu se pojavljuju različiti tipovi metalnim praškom punjenih žica poput nelegirane metalnim praškom punjene žice, niskolegirane metalnim praškom punjene žice sa dodatkom Ni, Mo i Cr u jezgri, metalnim praškom punjene žice za navarivanje te metalnim praškom punjene žice za zavarivanje austenitnih i martenzitnih čelika [15].

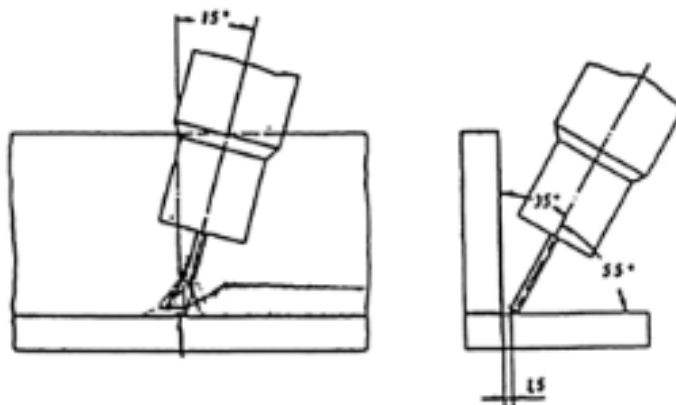
Prednosti zavarivanja metalnim praškom punjenom žicom [15], [17]:

- visoka produktivnost, do 20 % veća u usporedbi s korištenjem punih žica
- povećane brzine taljenja žice
- smanjeno rasprskavanje u odnosu na punu žicu i ostale praškom punjene žice
- olakšano je uspostavljanje i održavanje električnog luka
- odlična iskoristivost ($\eta = 90 - 98 \%$)
- nema stvaranja troske, pa čišćenje zavara između prolaza nije potrebno
- odličan postupak za zavarivanje kutnih zavara zbog dobre penetracije
- povećana penetracija u odnosu na ostale žice
- pogodno za robotizirani postupak zavarivanja zbog mogućnosti višeslojnog zavarivanja bez čišćenja zavara od troske
- moguće je zavarivati razne vrste čelika
- manja osjetljivost na površinske nečistoće i korodiranost materijala koji se zavaruje.

Nedostatci zavarivanja metalnim praškom punjenom žicom [15], [17], [19]:

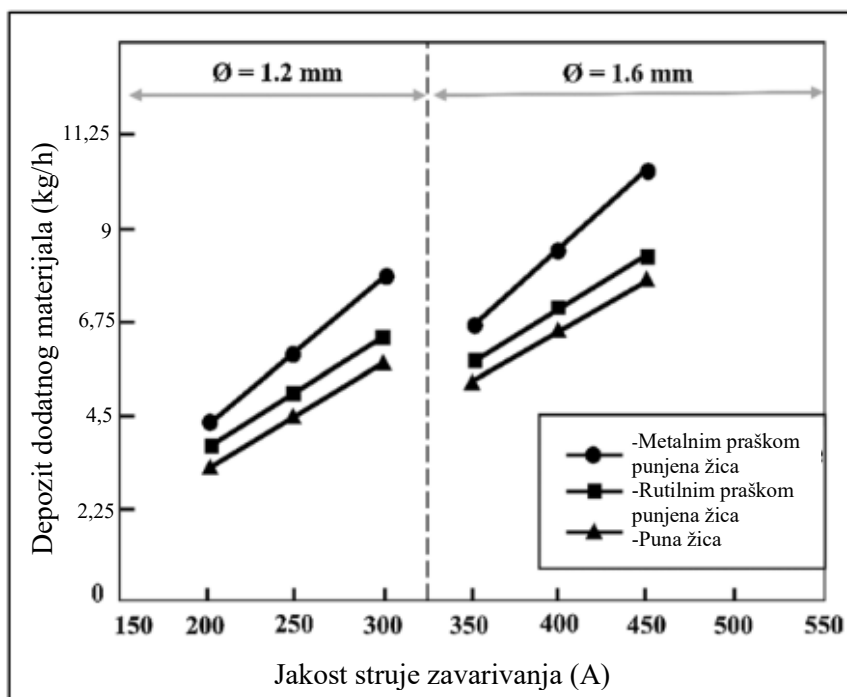
- veći početni troškovi – ova žica je skuplja od pune žice, a također je potrebno i vodeno hlađenje pištolja zbog velike količine oslobođene topline
- velike količine oslobođene topline
- potrebne su velike jakosti struje
- mogućnost pojave malih otoka silicijevog oksida na površini
- prijenos metala u električnom luku moguć je kratkim spojevima, štrcajućim lukom i impulsnim lukom. U slučaju prijenosa metala kratkim spojevima postupak gubi smisao jer je smanjen depozit i povećano rasprskavanje.

Preporučena tehnika rada za MCAW postupak za dobivanje najbolje penetracije kod sučeljenih spojeva je desna (pull metoda), a kod kutnih spojeva lijeva (push metoda) [Slika 11] [15].

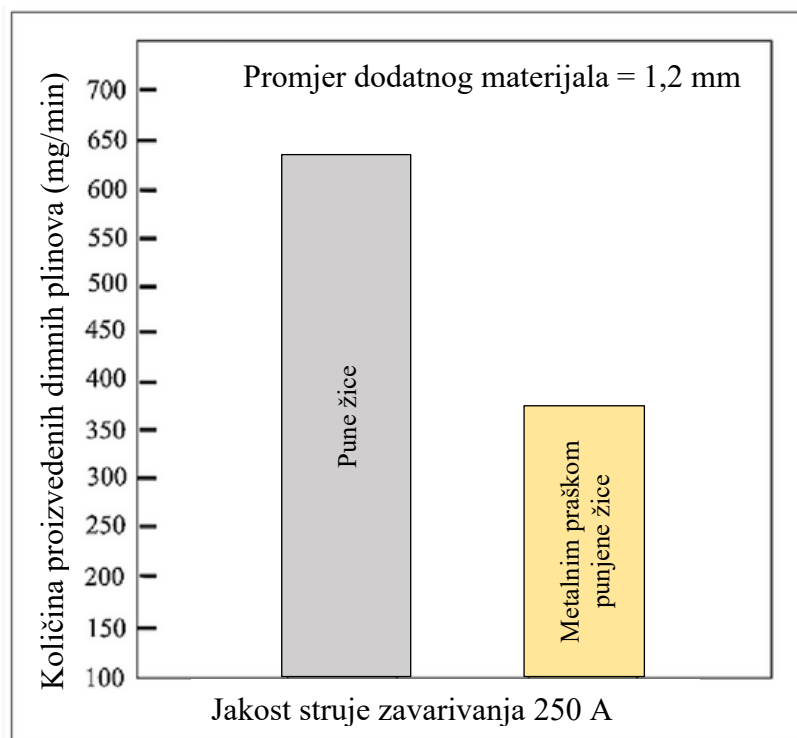


Slika 11. Lijeva tehnika rada kod MCAW postupka, kutni spoj [15]

Sa slike 12 može se uočiti kako zavarivanje metalnim praškom punjenom žicom uvijek prednjači nad ostalim žicama s obzirom na količinu nataljenog materijala. Prosječan depozit metalnim praškom punjenih žica za promjer žice 1,2 mm je 5,4 – 6,4 kg/h, dok je za pune žice istog promjera depozit jednak 3,6 – 4,5 kg/h. Zavarivanje metalnim praškom punjenom žicom daje velik depozit i dobar izgled zavarenog spoja što je odlika rutilnim praškom punjenih žica, ali također daje i dobru kvalitetu zavarenog spoja što je odlika punih žica [20].



Slika 12. Dijagram depozita dodatnog materijala u odnosu na jakost struje zavarivanja za žice promjera 1,2 mm i 1,6 mm [20]



Slika 13. Količina dimnih plinova tijekom zavarivanja punom žicom i metalnim praškom punom žicom [20]

Zavarivanje metalnim praškom punjenom žicom u usporedbi sa zavarivanjem punom žicom također ima manje negativan utjecaj na zavarivača i okoliš s obzirom na količinu proizvedenih dimnih plinova [Slika 13] [20].

2.4 Zaštitni plinovi kod MAG zavarivanja

Svrha zaštitnih plinova u zavarivanju je prvenstveno zaštita kapljica u letu i rastaljenog materijala od okolnih atmosferskih uvjeta, ali zaštitni plinovi također utječu i na prijenos metala u električnom luku, penetraciju i izgled zavarenog spoja, količinu rasprskavanja, količinu stvorenih štetnih plinova te metalurška i mehanička svojstva zavarenog spoja [21]. Utjecaj zaštitnih plinova se stoga reflektira na [2]:

- električno-fizikalna svojstva električnog luka
- metalurške procese u talini
- tehnološke parametre.

2.4.1 Utjecaj na električno-fizikalna svojstva električnog luka

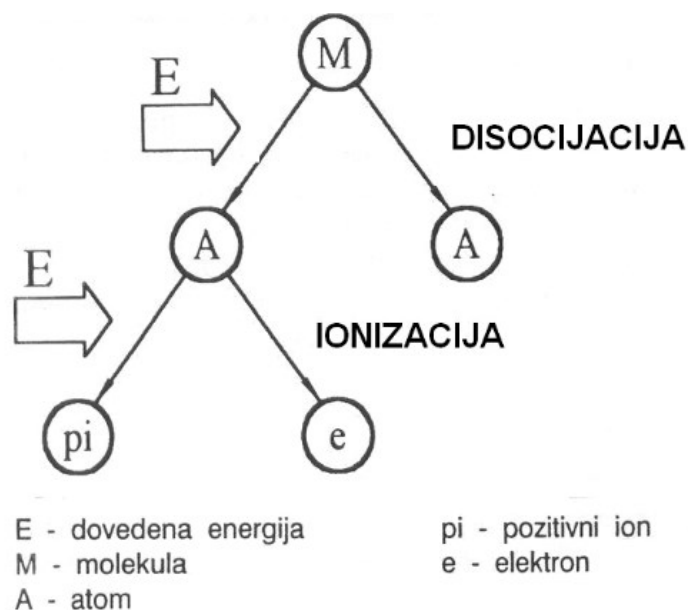
Svaki plin ili mješavina plinova posjeduje određena svojstva koja definiraju proces zavarivanja. Najvažnija svojstva zaštitnih plinova su [22]:

- disocijacija i rekombinacija
- ionizacijski potencijal
- toplinska vodljivost
- čistoća plina
- gustoća plina
- kemijska reaktivnost.

Disocijacija je proces koji se odvija u električnom luku pri visokim temperaturama tijekom kojeg dolazi do odvajanja atoma od molekule plina. Energija disocijacije je količina energije potrebna za odvajanje jednog atoma iz molekule. Tijekom disocijacije također dolazi i do ionizacije atoma čime se poboljšava vodljivost električnog luka. Rekombinacija je proces gdje se ti isti disocirani atomi koji se nalaze u toplijem plinu u kontaktu s hladnijom površinom osnovnog materijala spajaju u molekule. Tijekom rekombinacije dolazi do oslobađanja velike količine energije te je zbog toga kod plinova koji su u prirodnom obliku molekule (ugljikov dioksid, kisik, vodik) zagrijavanje odnosno taljenje osnovnog materijala znatno izraženije nego kod plinova koji su u prirodnom obliku atomi jer oni ne mogu disocirati i rekombinirati [22]. Energije disocijacije za opće zaštitne plinove prikazane su u tablici 1.

Ionizacijski potencijal je količina energije u elektronvoltima (eV) potrebna za izbijanje elektrona iz atoma zaštitnog plina, odnosno pretvaranje atoma u ion. Ionizacijski potencijal mora biti veći od privlačnih sila u elektronskom omotaču atoma kako bi se izbio elektron. Privlačne sile u elektronskom omotaču atoma privlače elektrone prema jezgri i one su obrnuto proporcionalne kvadratu udaljenosti elektrona od jezgre. Elementi odnosno plinovi koji imaju veći broj elektrona u elektronskom omotaču (atomski broj) također imaju i veći broj orbitala u kojima su smješteni ti elektroni. Izbijanje elektrona se radi toga uvijek odvija iz vanjske orbitale koja je najudaljenija od jezgre, te će zbog toga plin s većim atomskim brojem imati niže privlačne sile u toj vanjskoj orbitali, odnosno ionizacijski potencijal će mu biti niži. U usporedbi plinova argon i helij, argon ima 18 elektrona u elektronskom omotaču te mu je ionizacijski potencijal 15,8 eV dok helij ima samo dva elektrona i ionizacijski potencijal mu je 24,6 eV kao što je vidljivo u tablici 1. Ionizacijski potencijal radi toga direktno ovisi o atomskom broju

plina. Niži ionizacijski potencijal omogućuje jednostavniju uspostavu i održavanje električnog luka [21], [22]. Slika 14 prikazuje shematski prikaz disocijacije i ionizacije plina.



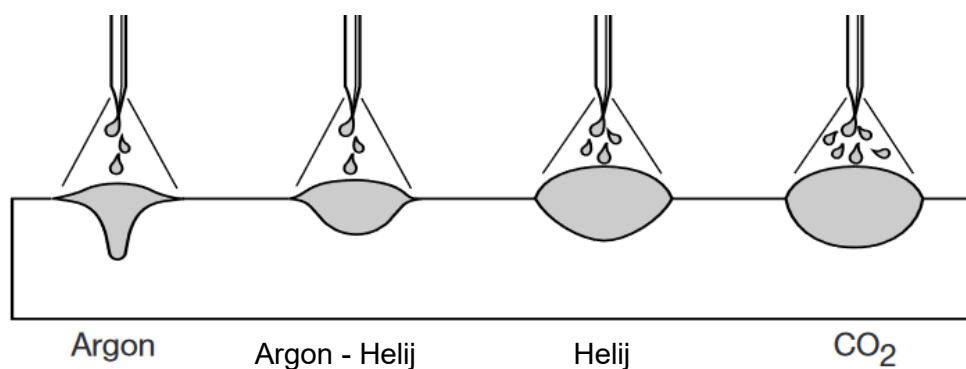
Slika 14. Shematski prikaz disocijacije i ionizacije plina [22]

Tablica 1. Svojstva zaštitnih plinova [21]

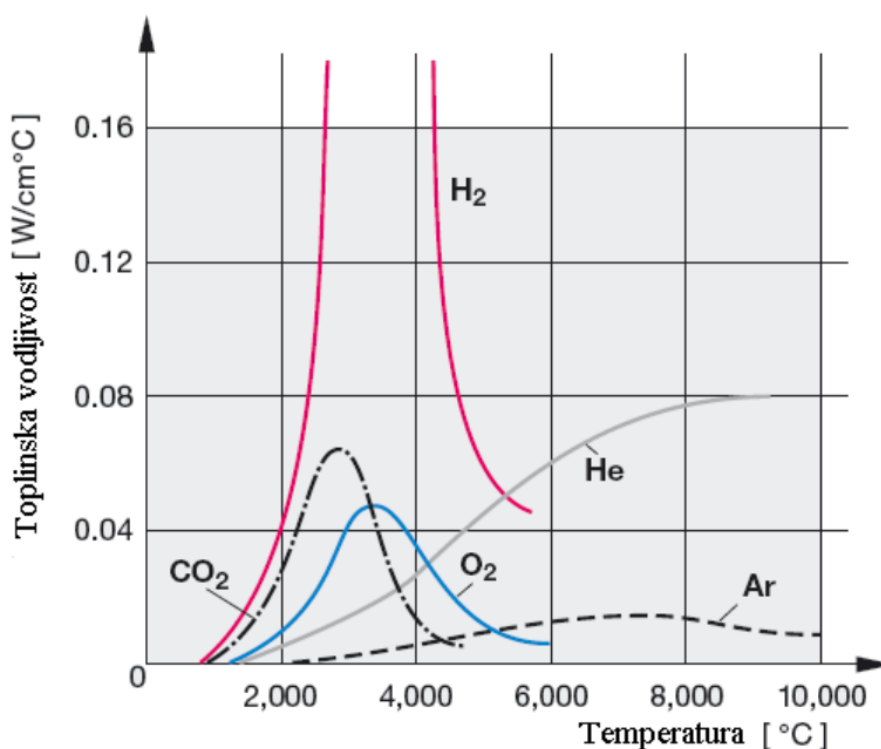
| Vrsta plina | Gustoća pri 15 °C i 1 bar, kg/m ³ | Energija disocijacije, eV/molekuli | Ionizacijski potencijal, eV/atomu | Kemijska aktivnost |
|-------------------------------------|--|------------------------------------|-----------------------------------|--------------------|
| Vodik (H ₂) | 0,085 | 4,5 | 13,6 | Reducens |
| Kisik (O ₂) | 1,337 | 5,1 | 13,6 | Oksidans |
| Ugljikov dioksid (CO ₂) | 1,849 | 4,3 | 14,4 | Oksidans |
| Dušik (N ₂) | 1,170 | 9,8 | 14,5 | Reducens |
| Helij (He) | 0,167 | 0 | 24,6 | Inertan |
| Argon (Ar) | 1,669 | 0 | 15,8 | Inertan |

Toplinska vodljivost svojstvo je plina koje pokazuje koliko dobro plin provodi toplinu. Toplinska vodljivost direktno utječe na širinu odnosno rasipanje električnog luka što zatim utječe na penetraciju i izgled zavarenog spoja. Plinovi sa nižom toplinskom vodljivošću, poput argona, loše provode toplinu kroz električni luk. Zbog toga električni luk ostaje uzak i energija

se na radnom komadu koncentrira na manjoj površini čime se dobiva dublji i uži profil penetracije, takozvani prstasti izgled penetracije [Slika 15]. Plinovi s višom toplinskom vodljivošću, poput helija, prouzročuju širenje električnog luka. Energija se raspoređuje na većoj površini te je izgled zavara širok i plitak [22]. Na slici 16 prikazane su vrijednosti toplinske vodljivost plinova koji se često koriste kao zaštitni plinovi.



Slika 15. Shematski prikaz profila zavara za određene plinove [13]



Slika 16. Toplinska vodljivost zaštitnih plinova [22]

Čistoća plina bitno je svojstvo plina jer i mala količina nečistoća može prouzročiti nastanak grešaka u zavarenom spoju. Čistoća plina također utječe na brzinu zavarivanja, profil zavara, penetraciju i poroznost. Čišći plinovi su skuplji, ali opravdavaju primjenu jer svaki materijal drugačije reagira na prisustvo nečistoća. Radi toga je potrebno koristiti normom propisanu čistoću plina za zavarivanje određenog materijala [22].

Gustoća plina ima velik značaj na efikasnost zaštite taline od atmosferskih uvjeta. Plinovi veće gustoće od zraka, poput argona i ugljikovog dioksida, pravilnije i usmjerenije teku kroz sapnicu, te se dulje zadržavaju u području električnog luka u slučaju horizontalnog zavarivanja. Dulje zadržavanje plina također znači i manju potrošnju plina, čime se smanjuje ukupna cijena zavarivanja. Helij se često koristi prilikom nadglavnog zavarivanja jer je puno lakši od zraka i struji prema gore [2]. Gustoće zaštitnih plinova prikazane su u tablici 1.

Kemijska reaktivnost također je jedno od bitnijih svojstava zaštitnih plinova. Ona pokazuje sklonost reakcije plina s talinom u električnom luku. Kemijska reaktivnost jedino ima značaj kod reaktivnih plinova pošto inertni plinovi poput argona i helija ne reagiraju s talinom. Izuzetak je dušik koji je pri sobnoj temperaturi inertan, ali kada se nalazi na temperaturi električnog luka može nepovoljno reagirati s talinom i poticati nastanak grešaka. Reaktivni plinovi koji reagiraju s talinom dijele se na oksidanse i reducense. Oksidansi su ugljikov dioksid i kisik. Oni reagiraju s talinom i stvaraju okside koji prilikom hlađenja isplivaju na površinu zavara. Reducens je vodik, njegova svrha je sprječavanje nastanka oksida, odnosno on reagira s oksidirajućim sredstvima u talini. Iako je primjena vodika kao zaštitnog plina korisna, treba biti oprezan prilikom njegovog korištenja jer prevelika količina može imati negativne posljedice na zavar poput stvaranja hladnih ili vodikovih pukotina. Zato se vodik koristi u jako malim količinama [22].

2.4.2 Vrste zaštitnih plinova

Postoji šest osnovnih zaštitnih plinova:

- argon
- helij
- ugljikov dioksid
- kisik
- vodik
- dušik.

Od nabrojanih plinova kao samostalni zaštitni plinovi mogu se koristiti argon, helij i ugljikov dioksid. Vodik, kisik i dušik ne mogu se koristiti pojedinačno jer njihova prevelika koncentracija dovodi do pojave grešaka i neželjenih rezultata, zbog toga se oni miješaju u malim udjelima s ostalim plinovima. Mješavine mogu biti dvokomponentne, trokomponentne i četverokomponentne gdje su osnovni plinovi, odnosno plinovi s većim udjelom uvijek argon i ugljikov dioksid, dok se ostali plinovi dodaju u manjem omjeru [22].

Argon (Ar) je jednoatomani inertan plin koji se aktivno koristi pri zavarivanju čelika i obojenih metala poput aluminijskih, titana, magnezijevih legura, nikla i drugo. To je bezbojan, nezapaljiv plin, bez mirisa i okusa, velike je gustoće te zbog toga učinkovito štiti mjesto zavarivanja. Argon se u prirodi nalazi u atmosferi u zraku gdje ga ima ispod 1 %, a iz zraka se dobiva frakcijskom destilacijom. Može se koristiti kao samostalan plin što je često slučaj prilikom zavarivanja titana ili u mješavinama plinova. Zbog svog niskog ionizacijskog potencijala argon se u mješavinama zaštitnih plinova koristi u velikim udjelima jer znatno olakšava uspostavu i održavanje električnog luka. Korištenjem argona dobiva se prstasti izgled profila zavara kao što je vidljivo na slici 15, a zbog svojih svojstava moguće ga je koristiti prilikom svih načina prijenosa metala u električnom luku [22].

Helij (He) je poput argona također inertan jednoatomani plin. Helij se dobiva separacijom iz prirodnih plinova zbog čega mu je cijena jako visoka. Ima nisku gustoću zbog čega je potreban veći protok od argona i visoku toplinsku vodljivost. Primjenjuje se tijekom zavarivanja konstrukcija debljih stijenki gdje su potrebni veliki unosi topline, dobra penetracija i velika brzina zavarivanja. Često se koristi za zavarivanje aluminijskih i magnezijevih koji su osjetljivi na uključke oksida te za zavarivanje korozivno otpornih čelika [22].

Ugljikov dioksid (CO_2) je reaktivan, nezapaljiv i bezbojan plin. Ugljikov dioksid u uvjetima visoke temperature, odnosno kada se nalazi u anodnom području električnog luka podliježe reakciji disocijacije gdje se razdvaja na ugljikov monoksid (CO) i slobodni kisik (O). Elementi disocirane molekule mogu zatim reagirati s talinom ili rekombinirati u katodnom području prilikom dodira s radnim komadom. Rekombinacijom se oslobađa velika količina energije čime se dobiva širi i dublji zavar. Slobodni kisik dobiven disocijacijom također može reagirati s elementima u električnom luku tvoreći okside. Djelovanje oksida na zavar je nepovoljno jer oni mogu ostati zarobljeni u metalu zavaru tvoreći filmove i pore. Dodavanjem dezoksidanata poput silicija (Si) i mangana (Mn) u dodatni materijal sprječava se stvaranje oksida jer se oni vežu s kisikom i izlučuju na površini zavara tijekom hlađenja u obliku troske. Ugljikov dioksid jeftin je plin po jedinici volumena, ali se s povećavanjem njegovog udjela smanjuje stabilnost luka te povećava rasprskavanje i količina troske [22].

Kisik (O_2) je plin koji tvori 21 % zraka u atmosferi, a iz zraka se dobiva ukapljivanjem. To je reaktivan plin, bez boje i mirisa, nezapaljiv je, ali podržava gorenje. Kisik smanjuje površinsku napetost taline i rastaljenog dodatnog materijala, povećava stabilnost električnog luka i daje ljepši izgled zavara. U malim udjelima (1 – 5 %) smanjuje promjer kapljica i povećava brzinu odvajanja kapljica rastaljenog dodatnog materijala zbog smanjene površinske napetosti čime se dobiva kvalitetniji i ujednačeniji prijenos metala [22].

Vodik (H_2) je reaktivan plin, bez boje, okusa i mirisa. To je najlakši plin, vrlo zapaljiv te je zbog toga potrebna posebna pažnja tijekom skladištenja. Ima najveću toplinsku vodljivost od svih navedenih plinova. Primjenjuje se u malim udjelima (1 – 5 %) te služi za stvaranje viskozne taline što poboljšava kvašenje rubova zavara te omogućuje zavarivanje većim brzinama. Prevelik udio vodika u mješavinama zaštitnog plina može dovesti do difuzije vodika u talini što može uzrokovati vodikove pukotine nakon hlađenja zavara [22].

Dušik (N_2) je plin bez boje, okusa i mirisa. Ne gori i ne podržava gorenje. Tvori najveći udio zraka (78 %) te se iz zraka se dobiva ukapljivanjem. Na sobnoj je temperaturi inertan, a pri visokim temperaturama u električnom luku reagira s metalima poput aluminija, titana i magnezija. Primjenjuje se za korijensku zaštitu, prilikom zavarivanja korozijski postojanih čelika (austenitnih i duplex čelika) te u manjim udjelima prilikom zavarivanja ugljičnih čelika [22].

2.4.3 Dvokomponentne mješavine zaštitnih plinova

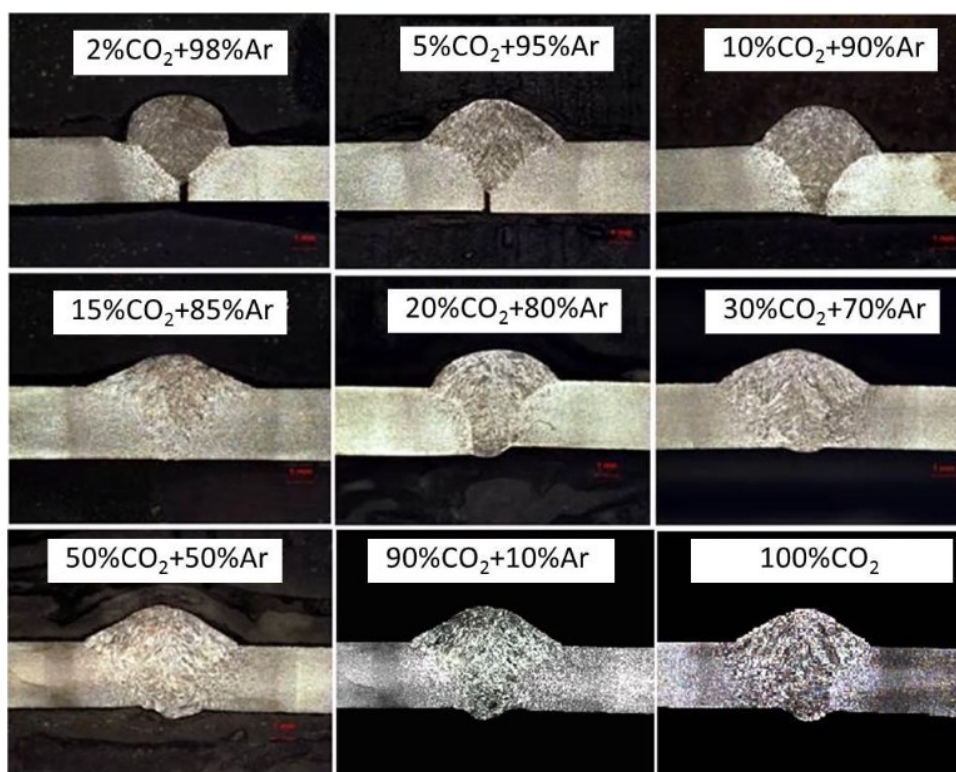
U praksi se rijetko koriste pojedinačni zaštitni plinovi. Najčešće se radi dobivanja pogodnijih svojstava zaštitnog plina koriste gotove mješavine dvaju zaštitnih plinova kako bi se jednostavnije dobio zavareni spoj željenih karakteristika. Kriteriji odabira plinova koji će biti u mješavini i njihov omjer ovisi o željenim svojstvima procesa zavarivanja i zavarenog spoja. Kriteriji mogu biti penetracija zavara, brzina zavarivanja, estetski izgled zavara, jednostavnost čišćenja mjesta zavarivanja i drugo. Najčešće korištene dvokomponentne mješavine su mješavine argona i ugljikovog dioksida te argona i kisika [22]. U tablici 2 prikazane su neke mješavine tih dvokomponentnih zaštitnih plinova.

Tablica 2. Dvokomponentne mješavine zaštitnih plinova [2]

| Vrsta zaštitnog plina | Udio pojedinog plina, vol % |
|-----------------------|--------------------------------|
| Ar – CO ₂ | 98 % Ar + 2 % CO ₂ |
| | 95 % Ar + 5 % CO ₂ |
| | 85 % Ar + 15 % CO ₂ |
| | 82 % Ar + 18 % CO ₂ |
| | 75 % Ar + 25 % CO ₂ |
| Ar – O ₂ | 99 % Ar + 1 % O ₂ |
| | 98 % Ar + 2 % O ₂ |
| | 97 % Ar + 3 % O ₂ |
| | 95 % Ar + 5 % O ₂ |
| | 92 % Ar + 8 % O ₂ |
| | 88 % Ar + 12 % O ₂ |

Dvokomponentne mješavine Ar – CO₂ su najčešće korištene mješavine dvokomponentnih plinova. Upotrebom ovih mješavina moguće je postići sve četiri vrste prijenosa metala nabrojanih u poglavlju 2.2 ovoga rada. Ovisno o udjelu CO₂ moguće je zavarivanje nelegiranih, niskolegiranih i visokolegiranih čelika. Disocijacijom CO₂ dobiva se slobodni kisik koji talini daje gustoću i doprinosi stabilizaciji električnog luka. CO₂ također doprinosi povećanju penetracije i širine zavara zbog svoje visoke toplinske vodljivosti. Povećanjem udjela CO₂ profil zavara gubi prstasti izgled te postaje konveksan. Dvokomponentne mješavine Ar – CO₂ mogu se podijeliti na dvije skupine: mješavine gdje je udio CO₂ ispod 18 % te mješavine gdje je udio CO₂ iznad 18 %. Mješavine gdje je udio CO₂ ispod 18 % podržavaju prijenos metala

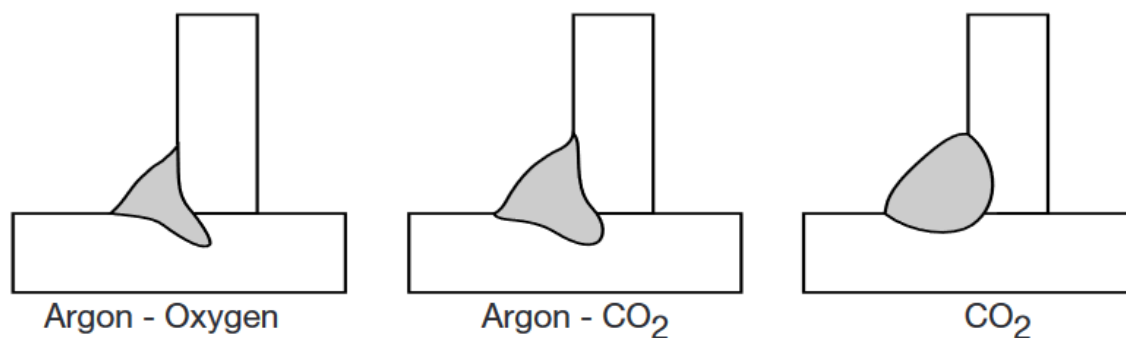
štrcajućim te impulsnim lukom dok su mješavine s udjelom CO₂ jednakim ili većim od 20 % prikladnije za prijenos metala kratkim spojem. Jedna od najčešće korištenih dvokomponentnih mješavina plinova u Europi je upravo 82 % Ar i 18 % CO₂. Ta mješavina je dobila na popularnosti zbog svoje široke primjene za zavarivanje tankih i debelih limova i ploča štrcajućim lukom i kratkim spojevima. S povećanjem udjela CO₂ poboljšava se viskoznost i kvašenje taline, profil penetracije postaje širi i dublji te se poboljšava spajanje rubova zavara [22].



Slika 17. Profil zavara za određene mješavine Ar i CO₂ [23]

Na slici 17 mogu se vidjeti profili zavara za dvokomponentne mješavine Ar – CO₂ sve od mješavine s 2 % CO₂ pa do čistog CO₂. Može se uočiti kako je pri niskim udjelima CO₂ penetracija uska i plitka, prstastog izgleda, što je karakteristično za mješavine s većim udjelom argona. Miješanje osnovnog i dodatnog materijala je u uskoj zoni. S povećanjem udjela CO₂ penetracija se povećava, dobiva se potpuno provarivanje materijala, te je bolje miješanje osnovnog i dodatnog materijala [23].

Dvokomponentne mješavine Ar – O₂ se koriste prilikom zavarivanja ugljičnih i korozijski postojanih čelika. Dodavanjem kisika u mješavinu poboljšava se razlijevanje taline zbog smanjene površinske napetosti. Kisik također povećava stabilnost električnog luka, utječe na prijenos kapljica u električnom luku te povećava unos topline u radni materijal što vodi do povećanja penetracije. Kapljice su zbog smanjene površinske napetosti manjeg promjera te se češće odvajaju. Mali udio kisika (1 – 5%) koristi se prilikom zavarivanja tankostjenih materijala. Veći udio kisika (8 – 12 %) primjenjuju se za zavarivanje u jednom prolazu, ali treba voditi računa o oksidacijskom potencijalu te u dodatni materijal dodati dostatnu količinu dezoksidacijskih elemenata [22]. Slika 18 prikazuje relativan utjecaj dvokomponentnih mješavina Ar – O₂ i Ar – CO₂ te utjecaj čistog CO₂ na profil kutnog zavara. Moguće je vidjeti kako argon djeluje na stvaranje prstastog profila zavara. Uz dodatak kisika taj je prstasti izgled dodatno izdužen, a uz dodatak ugljikovog dioksida profil je širi te je veća količina nataljenog materijala. Čisti ugljikov dioksid prouzrokuje jako širok zavar i manju penetraciju nego što je slučaj prilikom korištenja mješavina.



Slika 18. Utjecaj dvokomponentnih mješavina plinova i čistog CO₂ na profil zavara [13]

2.4.4 Trokomponentne mješavine zaštitnih plinova

Trokomponentne mješavine zaštitnih plinova koriste se prvenstveno za zavarivanje ugljičnih čelika, korozijski postojanih čelika i legura nikla. Ove mješavine mogu se koristiti za sva četiri načina prijenosa metala opisane u poglavlju 2.2 ovoga rada. Najčešće korištene trokomponentne mješavine su Ar – CO₂ – O₂, Ar – He – CO₂ i He – Ar – CO₂.

Pri prijenosu materijala kratkim spojevima dodavanjem velikog udjela helija (40 %) u mješavinu argona i ugljikovog dioksida postiže se širi profil penetracije zbog visoke toplinske

vodljivosti helija. Širi profil penetracije omogućuje bolje miješanje materijala te smanjenje naljepljivanja dodatnog na osnovni materijal. Dodatkom helija također je moguće postići do 20 % veću brzinu zavarivanja, smanjenje deformacije prilikom zavarivanja tanjih materijala i kvalitetniji profil zavora. Mješavine He – Ar – CO₂ smanjuju rasprskavanje kapljica iz električnog luka, povećavaju razlijevanje taljevine, povećavaju stabilnost električnog luka i poboljšavaju estetski izgled zavora (položniji je) [22], [24]. U tablici 3 navedene su često korištene trokomponentne mješavine He – Ar – CO₂ i njihova primjena.

Tablica 3. Trokomponentne mješavine He, Ar i CO₂ [13]

| Volumni udio, vol % | | | Primjena |
|---------------------|------|-----------------|---|
| He | Ar | CO ₂ | |
| 90 | 7,5 | 2,5 | Zavarivanje korozijski postojanih čelika kratkim spojevima te zavarivanje korozijski postojanih čelika i legura nikla debljih od 1,6 mm impulsnim lukom |
| 55 | 42,5 | 2,5 | Zavarivanje impulsnim lukom, smanjen unos topline u materijal, primjena na korozijski postojane materijale i legure nikla |
| 38 | 65 | 7 | Zavarivanje nelegiranih i niskolegiranih čelika kratkim spojevima, zavarivanje korijena zavora na cjevovodima. Zbog visoke toplinske vodljivosti smanjena je mogućnost naljepljivanja. |

Trokomponentne mješavine Ar – CO₂ – O₂ koriste se prvenstveno za zavarivanje ugljičnih i niskolegiranih čelika, ali je moguće zavarivanje i visokolegiranih čelika i legura nikla. Često korištene trokomponentne mješavine Ar – CO₂ – O₂ s udjelima plinova i primjenom prikazane su u tablici 4. Na tankostjenim materijalima nizak udio kisika povećava stabilnost električnog luka te smanjuje potrebnu jakost struje što daje kraći električni luk, manji unos topline i manje deformacije radnog komada dok istovremeno povećava penetraciju [22]. Prilikom primjene štrcajućeg luka, kisik također smanjuje promjer rastaljenih kapljica te povećava njihovu učestalost odvajanja. To doprinosi lakšem upravljanju luka te ljepšem estetskom izgledu zavora.

Zbog visokog udjela argona u ovim mješavinama smanjeno je rasprskavanje kapljica što dodatno olakšava čišćenje mjesta zavarivanja i sapnice pištolja [2], [22].

Tablica 4. Često korištene trokomponentne mješavine Ar – CO₂ – O₂ [24], [25]

| Grupa po HRN EN ISO 14175:2008 | Volumni udio, vol % | | | Primjena |
|--------------------------------------|---------------------|-----------------|----------------|--|
| | Ar | CO ₂ | O ₂ | |
| M14 | 96 | 3 | 1 | Visokolegirani čelici, legure nikla |
| M23 | 90 | 5 | 5 | Nelegirani i niskolegirani čelici |
| M24 | 93 | 6 | 1 | Nelegirani i niskolegirani čelici |
| M24 | 86 | 12 | 2 | Nelegirani i niskolegirani čelici |

2.4.5 Prednosti Ar – CO₂ – O₂ mješavina nad standardnim Ar – CO₂ mješavinama zaštitnih plinova

Trokomponentne mješavine zaštitnih plinova Ar – CO₂ – O₂ slične su dvokomponentnim mješavinama Ar – CO₂. Za obje mješavine dolazi do disocijacije ugljikovog dioksida na ugljikov monoksid i slobodni kisik u električnom luku. Slobodni kisik zatim može reagirati s talinom i tvoriti okside, odnosno čistiti talinu od nečistoća, ili može ponovno rekombinirati s ugljikovim monoksidom te osloboditi veliku količinu energije. Prilikom oslobađanja velike količine energije dolazi do šireg djelovanja električnog luka odnosno dobiva se širi i dublji profil penetracije. Dodatak kisika u trokomponentnim mješavinama dodatno povećava stvaranje troske na površini zavara. Dodatan kisik također djeluje pozitivno na smanjenje površinske napetosti taline kako na radnom komadu tako i na vrhu elektrode. Talina se na radnom komadu lakše razlijeva što daje bolji estetski izgled zavara (zavar je položeniji). Smanjenje površinske napetosti na vrhu elektrode znači da će se formirati manje kapljice i zbog toga brže i odvajati. Prilikom zavarivanja štrcajućim lukom dobiti će se ljepši prijenos metala, te će bit manje rasprskavanja. Dodatak kisika također povećava stabilnost električnog luka.

Ovisno o pojedinom udjelu plinova u svakoj od mješavina moguće je zavarivati širok raspon materijala uz primjenu svih načina prijenosa metala [22], [26].

2.5 Parametri MAG postupka zavarivanja

Kvaliteta zavarenog spoja direktno ovisi o parametrima zavarivanja. Boljom optimizacijom parametara moguće je dobiti zavareni spoj boljih mehaničkih svojstava te boljeg izgleda, uz smanjene troškove i brži rad. Parametri zavarivanja određuju se eksperimentalno [24]. Najvažniji parametri zavarivanja su :

- jakost struje zavarivanja – najvažniji parametar, povezana je s brzinom dobave žice. S povećanjem jakosti struje povećava se brzina dovođenja žice što znači da se dobiva veća količina nataljenog materijala. S povišenjem jakosti struje također se dobiva veća penetracija te je veći unos topline. Jakost struje određuje se ovisno o željenom načinu prijenosa metala i debljini osnovnog i dodatnog materijala [27]
- napon zavarivanja – uz jakost struje je drugi najvažniji parametar. Napon direktno ovisi o visini električnog luka, s povećanjem električnog luka raste i napon. Prekomjernim povećanjem napona električni luk postaje previsok zbog čega je smanjena zaštita taline i pogoršavaju se mehanička svojstva zavara. Radi toga je potrebno napon održavati što manjim. Napon utječe i na izgled zavara. S povećanjem napona smanjuje se penetracija, a zavar postaje širok te nadvišen [27], [28]
- brzina zavarivanja – mjerilo je kojom se brzinom pištolj za zavarivanje kreće u odnosu na radni komad ili kojom se brzinom okreće radni komad ako je pištolj stacionaran. Brzina zavarivanja nije parametar koji se namješta na uređaju za zavarivanje nego je proizvoljan parametar koji ovisi o vrsti i načinu popune koji se želi postići. Brzina zavarivanja ovisi o jakosti struje, što je veća jakost struje bit će veća količina nataljenog materijala što znači da se pištolj za zavarivanje mora pomicati većom brzinom kako bi se dobio lijep estetski izgled i kvalitetan profil zavara [28]
- slobodni kraj žice – udaljenost od kontaktnog vrha u pištolju do radnog komada tijekom zavarivanja. S povećanjem slobodnog kraja žice dolazi do povećanja otpora zbog čega se žica više zagrijava. Povećano zagrijavanje žice znači da je moguće postići veću količinu nataljenog materijala, ali se time poveća duljina električnog luka što uzrokuje nestabilnost i rasprskavanje [27]

- vrsta i protok plina – vrsta plina određuje se ovisno o vrsti materijala koji se zavaruje. Protok plina ovisi o uvjetima rada. Zavarivanje na terenu zahtjeva znatno veći protok plina zbog mogućnosti otpuhivanja zaštitnog plina s mjesta zavarivanja. Povećan protok plina također povećava rasprskavanje i izaziva pojavu poroznosti. Protok plina također ovisi o promjeru sapnice, veće sapnice su ekonomičnije, treba im duže vremena da se zapune kapljicama metala [28]
- induktivitet – definira brzinu porasta jakosti struje zavarivanja u vremenu nakon ostvarivanja kratkog spoja. Induktivitet je parametar koji se koristi samo prilikom načina prijenosa metala kratkim spojevima. Njegovom optimizacijom postiže se efikasniji prijenos metala, te također utječe na izgled zavara [11].

2.5.1 Usporedba parametara zavarivanja punom žicom i metalnim praškom punjenom žicom

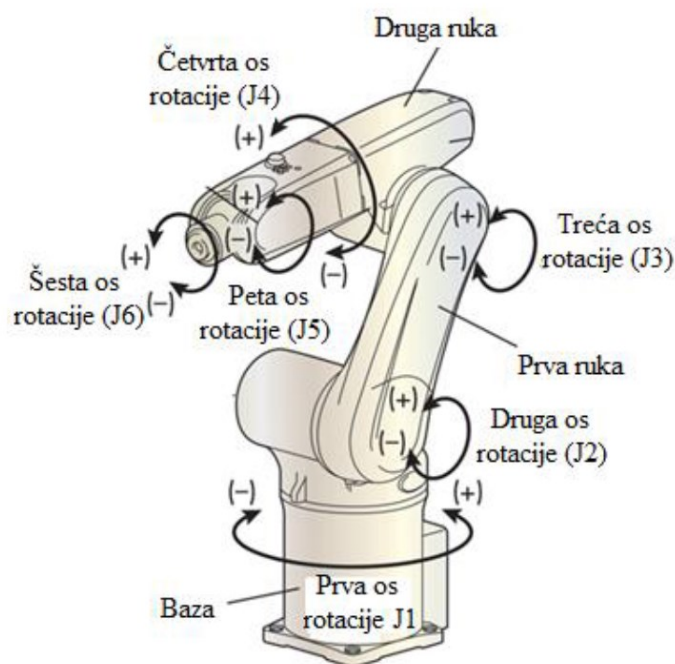
Prilikom zavarivanja punom žicom i metalnim praškom punjenom žicom stvarni parametri zavarivanja u vremenu različiti su od onih namještenih na izvoru struje. Na sveučilištu u Indiji, na Studiju tehnologije u Gandhinagaru provedeno je istraživanje utjecaja različitih vrsta dodatnih materijala na kvalitetu zavara. U istraživanju su među ostalima također korištene metalnim praškom punjene žice i pune žice promjera 1,2 mm. Korišten izvor struje održavao je konstantan napon. Parametri zavarivanja jednaki su tijekom zavarivanja za obje vrste žice i slijede: jakost struje = 200 A, brzina zavarivanja = 20 cm/min, napon = 28 V, protok plina = 25 l/min, vrsta plina = dvokomponentna mješavina 90 % Ar i 10 % CO₂ te slobodni kraj žice = 8 – 10 mm. Debljina osnovnog materijala je 10 mm. Tijekom zavarivanja punom žicom, očitana vrijednost jakosti struje prilikom zavarivanja korijena zavara je 260 A, a prilikom popune 242 A. Iz tih vrijednost izračunata je prosječna očitana vrijednost jakosti struje tijekom zavarivanja punom žicom koja iznosi 251 A. Tijekom zavarivanja metalnim praškom punjenom žicom, očitana vrijednost jakosti struje prilikom zavarivanja korijena zavara je 226 A, a prilikom popune 231 A. Prosječna očitana vrijednost jakosti struje za zavarivanje metalnim praškom punjenom žicom jednaka je 229 A. Iz dobivenih rezultata zaključeno je da je prilikom zavarivanja metalnim praškom punjenom žicom potrebna manja vrijednost jakosti struje što ima za posljedicu manjeg unosa topline u radni komad [29].

3. ROBOTIZIRANO MAG ZAVARIVANJE

Sredinom 20. stoljeća počeli su se pojavljivati prvi suvremeni roboti kakve poznajemo danas. Sam razvoj robota odvijao se u tri generacije. Roboti prve generacije ili takozvani primitivni roboti unaprijed su programirani roboti koji su mogli obavljati samo unaprijed definirane zadatke i zahtijevali su visokoorganiziranu okolinu. Osim izostanka inteligencije, također su bili ograničeni pokretljivošću u odnosu na ljudsku ruku. Roboti druge generacije koji se također nazivaju i senzitivnim robotima, opremljeni su velikim brojem senzora (vizualnim, taktilnim, sensorima sile i drugo). Oni su predstavljali velik napredak jer su pomoću povratnih veza mogli donositi odluke. Treća generacija robota (pametni roboti) opremljena je sustavima za raspoznavanje te računalima nove generacije u koje je implementirana umjetna inteligencija. Pametni roboti analiziraju proces zavarivanja te iz njega uče i adaptiraju se u budućim nepoznatim uvjetima [8], [30].

3.1 Industrijski roboti

Industrijski roboti su automatski upravljivi, reprogramabilni, višenamjenski manipulatori koji su programirani za obavljanje nekog zadatka uz mogućnost pomicanja tri ili više osi. Jedan od prvih suvremenih industrijskih robota bio je robot tvrtke Unimation koji je služio za prijenos odljevaka s pokretne trake u autoindustriji. Industrijski roboti se također nazivaju i manipulatori odnosno robotske ruke. Mogu biti stacionarni ili mobilni. Industrijski se roboti najčešće dijele prema geometriji radnog prostora odnosno vrsti zglobova (translacijski ili rotacijski). Roboti s translacijskim zglobovima najčešće se koriste u montažnim sustavima zbog svoje preciznosti, dok se roboti s rotacijskim zglobovima češće mogu pronaći u zavarivačkim sustavima [Slika 19]. Industrijski roboti se također mogu dijeliti po vrsti pogona na robote s električnim, hidrauličkim i pneumatskim pogonom. Električni pogon najzastupljeniji je danas jer je jeftin i zauzima malo prostora [8], [31], [32].



Slika 19. Primjer robota sa šest rotacijskih zglobova [33]

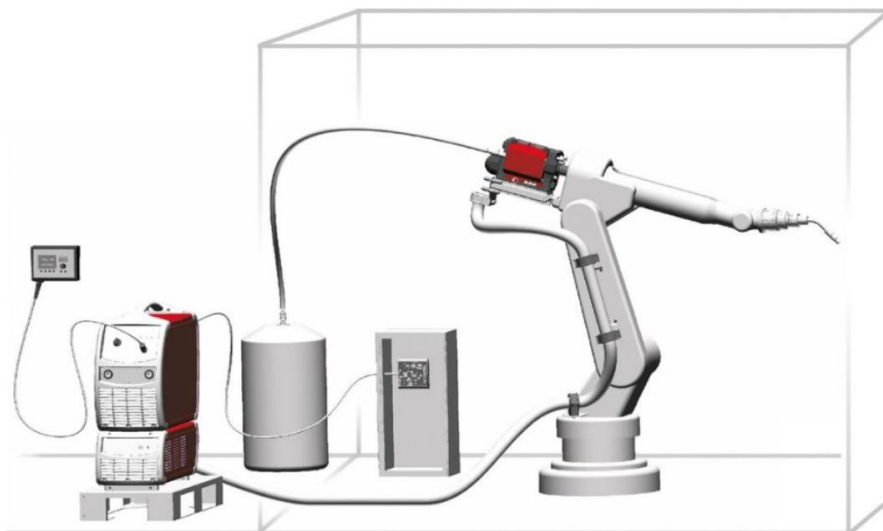
3.2 Primjena robota u zavarivanju

Krajem 70 – ih godina prošlog stoljeća došlo je do naglog razvoja računala što je omogućilo izradu prvih robotiziranih zavarivačkih stanica. Procesom zavarivanja upravlja upravljačka jedinica koja je povezana sa svim komponentama robotizirane zavarivačke stanice. Zavarivanje se u današnjem vremenu smatra sastavnim dijelom industrijske proizvodnje, a robotizirano zavarivanje je temelj takvog sustava. Sustavi kakve danas poznajemo se prilagođavaju uvjetima rada, djeluju u realnom vremenu i uče prema onome što senzori uočavaju [8], [30].

3.2.1 Komponente robotiziranih zavarivačkih stanica

Robotizirane zavarivačke stanice sastoje se od četiri osnovne komponente [Slika 20] [12]:

- robot za zavarivanje (manipulator)
- upravljačka jedinica
- privjesak za učenje („on – line“ programiranje robota)
- izvor struje.



Slika 20. Robotizirana zavarivačka stanica [34]

Robot za zavarivanje najčešće je šestosni manipulator. Na vrhu robotske ruke pričvršćen je pištolj za zavarivanje. Pored robota ili na robotu također je smješten izvor struje za zavarivanje. Čitav proces zavarivanja vodi upravljačka jedinica robotizirane zavarivačke stanice u kojoj su zabilježene putanje gibanja robota te parametri zavarivanja. Osim osnovne opreme često se još koristi i dodatna oprema poput pozicionera čiji je cilj namještanje radnog komada u povoljniji položaj kako bi mu robotska ruka s pištoljem za zavarivanje lakše pristupila. Pištolju za zavarivanje je također potrebno vodeno hlađenje jer se nakon dugog vremena zavarivanja na pištolju akumulira velika količina topline [8], [35]. Slika 21 prikazuje primjenu pozicionera tijekom zavarivanja cilindričnog predmeta.



Slika 21. Primjena pozicionera tijekom robotiziranog zavarivanja [35]

„Off – line“ programiranje koristi se kada je potrebno programirati složen projekt s velikim brojem točaka. Ovaj način programiranja provodi se u jednom od računalnih programskih jezika namijenjenim za tu svrhu, a programirati se može bez zaustavljanja rada robotske stanice. „Off – line“ programiranje odlikuje visoka točnost i brzina programiranja te mogućnost istovremenog gibanja više robotskih mehanizama unutar istog robotskog sustava. Današnji CAD programi imaju mogućnost povezivanja s programskim jezicima što omogućuje izravan grafički prikaz putanja gibanja robotske ruke te interakcije s drugim dijelovima sustava [30].

3.3 Zahtjevi za robotizaciju MAG postupka zavarivanja

Robotizirano MAG zavarivanje slično je poluautomatskom MAG zavarivanju u smislu funkcioniranja postupka, ali zbog same primjene (kontinuiran rad bez prestanka) od robotiziranog sustava se očekuje veći stupanj robusnosti i autonomnost. Osnovni zahtjevi za robotizaciju MAG postupka zavarivanja su:

- stabilan električni luk i kvalitetan prijenos metala – u robotiziranim MAG sustavima najčešće se vrši prijenos metala štrcajućim ili impulsnim lukom. Optimizacijom tog procesa postiže se maksimalna količina nataljenog materijala uz zadovoljavajuće karakteristike zavarenih spojeva [2], [8], [32]
- intermitencija – potreban je visok stupanj intermitencije izvora struje (100 %) kako bi se postupak mogao izvoditi kontinuirano sa što manje prekida rada [8]
- hlađenje pištolja za zavarivanje – zavarivačke stanice rade konstantno bez prestanka (zavarivanje se jedino ne odvija tijekom promjene radnog komada i čišćenja sapnice) što znači da se tijekom cijelog vremena zavarivanja na pištolju za zavarivanje akumulira velika količina topline. Kako ne bi došlo do taljenja pištolja potrebno je adekvatno vodeno hlađenje pištolja [2], [8], [32]
- robustan i pouzdan sustav dovođenja žice – dovođenje žice odvija se kontinuirano, želi se izbjeći mogućnost prekida rada zbog kojeg se čitav sustav mora zaustavljati što uzrokuje velike financijske gubitke [8], [32]
- dobra regulacija i kontrola električnog luka – pravilnim upravljanjem postiže se zavareni spoj propisanih i zadovoljavajućih karakteristika [8], [32]

- adekvatna priprema spoja – iako moderni robotizirani sustavi imaju mogućnost djelovanja u realnom vremenu odnosno mogu kompenzirati nedostatke pripreme spoja, priprema spoja i dalje mora biti u granicama propisanih tolerancija što povisuje cijenu samog postupka zavarivanja [2], [8]
- organizirana radna okolina – roboti funkcioniraju na principu preprogramiranih putanja i funkcija rada. Robotizirane stanice su velike i teške, potrebno je mnogo prostora za okretanje robotske ruke. Radna okolina stoga mora biti visoko organizirana kako bi robot znao gdje se što nalazi i kako bi se što više smanjili zastoji u radu koji vode do financijskih gubitaka poduzeća [8], [12], [30]
- roboti – roboti moraju biti opremljeni sensorima kako bi se proces što više automatizirao i kako bi se osigurala dobra kvaliteta zavarenog spoja [8], [30].

3.4 Nedostatci robotiziranog zavarivanja

Iako robotizirano zavarivanje donosi mnoge prednosti u industrijskim uvjetima zavarivanja, također ima i neke nedostatke [30]:

- nedostatak konzistentnosti u kvaliteti izrade uslijed nepravilnog stezanja radnog komada ili uslijed loše pripreme spoja
- dugo vrijeme programiranja u odnosu na opseg proizvodnje kod maloserijskih i srednje serijskih proizvodnih procesa
- visok početni kapital, potrebno je izračunati vrijeme povrata investicije
- roboti se u odnosu na ljude moraju oslanjati na senzore i razne sustave kontrole kako bi se prilagodili promjenama u okolini i donosili odgovarajuće odluke
- robotizirano se zavarivanje ne može jednostavno provesti prilikom zavarivanja jako malih ili jako velikih konstrukcija poput brodskih tijela.

4. EKSPERIMENTALNI RAD

U eksperimentalnom dijelu završnog rada provedeno je robotizirano zavarivanje kutnih spojeva praškom punjenom žicom uz primjenu Ar – CO₂ – O₂ zaštitnog plina. Zavarivanje je provedeno na kutnim spojevima na tri uzorka konstrukcijskog čelika S355J2+N. Prvi uzorak debljine materijala 20 mm zavaren je jednostrano u tri prolaza. Ostala dva uzorka, debljine materijala 5 mm zavarena su obostrano u jednom prolazu. Tijekom zavarivanja prvog i drugog uzorka korištena je trokomponentna mješavina Ar – CO₂ – O₂ sa 6 % CO₂ te 1 % O₂, a tijekom zavarivanja trećeg uzorka korištena je trokomponentna mješavina Ar – CO₂ – O₂ sa 12 % CO₂ i 2 % O₂. Iz zavarenih uzoraka napravljeni su makroizbrusci za koje je napravljena analiza geometrije zavara i makrostrukture spoja.

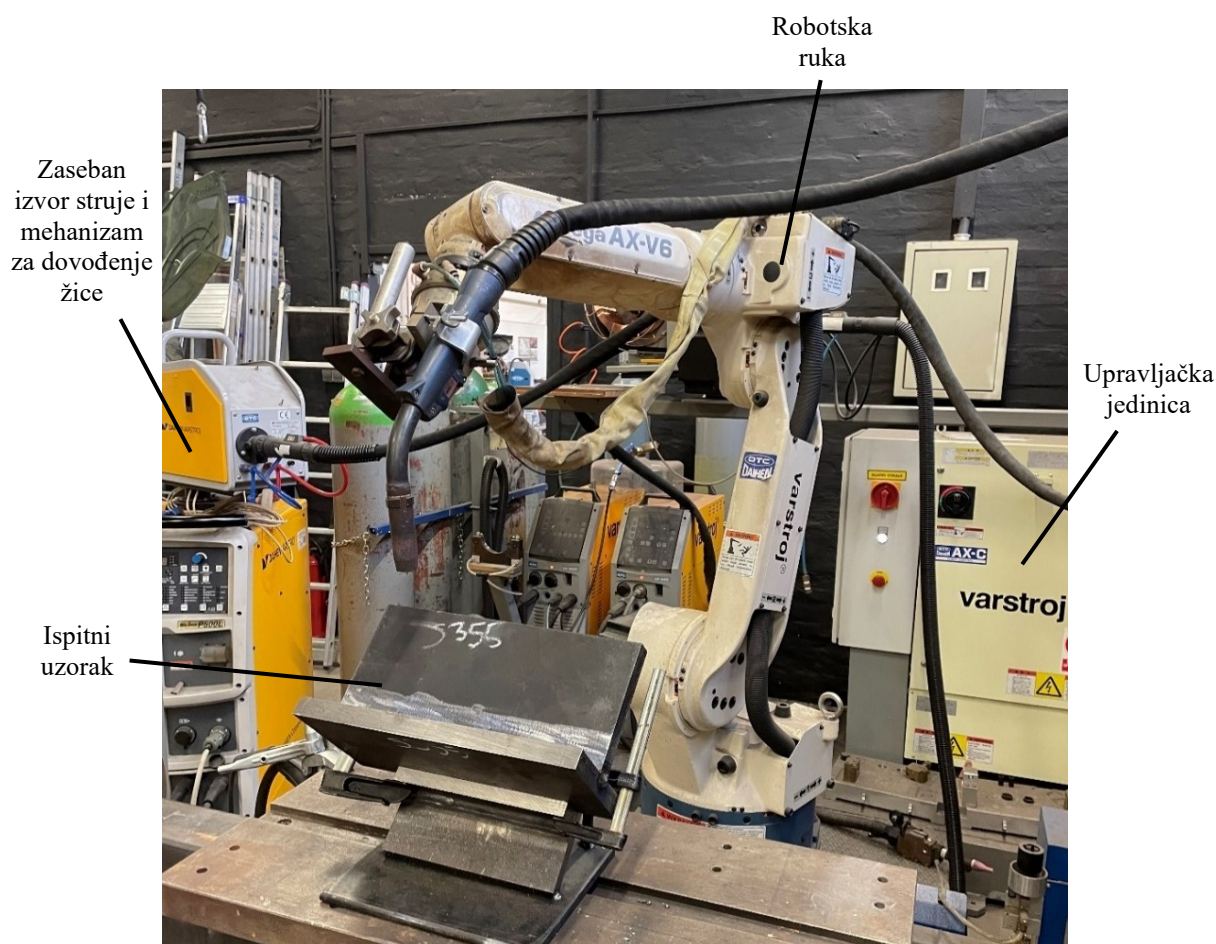
4.1 Korištena oprema i materijali

Svu korištenu opremu omogućio je Fakultet strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. Od osnovne opreme korištena je robotizirana zavarivačka stanica, odnosno robotska ruka, njegova upravljačka jedinica i privjesak za učenje. Korišten izvor struje za zavarivanje i mehanizam za dovođenje žice bio je zaseban. Također je korištena tračna pila za izrezivanje ploča od kojih su napravljeni uzorci. Korišten dodatni materijal bila je metalnim praškom punjena žica, a zaštitni plinovi bili su dvije vrste Ar - CO₂ – O₂ plina. Od zaštitne opreme korištena su radna odijela, zaštitne rukavice, te ručni štiti za zavarivanje. Od pomoćne opreme korišten je infracrveni termometar, žičana četka za čišćenje površine zavarenog spoja te ručne stege.

4.1.1 Robotizirana zavarivačka stanica

Zavarivanje je provedeno na robotiziranoj zavarivačkoj stanici u Laboratoriju za zavarivanje Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. Ova robotizirana zavarivačka stanica sastoji se od robota, izvora struje, pozicionera s podrškom, upravljačke jedinice te privjeska za učenje. Zbog nemogućnosti zavarivanja praškom punjenom žicom na izvoru struje i mehanizmu za dovođenje žice robotizirane zavarivačke stanice, kao izvor struje korišten je zaseban uređaj koji je naveden u točki 4.1.2 ovoga rada. Od navedenih elemenata robotizirane zavarivačke stanice korišteni su samo robot, pripadajuća upravljačka jedinica i privjesak za učenje te pozicioner koji je služio kao stol za stezanje uzoraka. Proizvođač robota je OTC Daihen, a model robota

je Almega AX-V6. To je šestosni manipulator konstruiran specifično za zavarivanje velikim brzinama, podržava zavarivanje MIG/MAG postupcima, TIG postupkom, tandem postupcima i plazma rezanje. Na slici 23 prikazana je robotizirana zavarivačka stanica. U prvom planu nalazi se uzorak prije zavarivanja, nad njim i iza njega je robotska ruka. Na pozicioneru su uzorci stegnuti pomoću ručnih stega. Na vrhu robotske ruke pričvršćen je pištolj za zavarivanje. Pomoću privjeska za učenje [Slika 24] napravljen je program kretanja pištolja za zavarivanje „lead – through“ načinom „on – line“ programiranja. To znači da su osim putanje vrha pištolja za zavarivanje u programu sadržani i parametri kretanja poput dostavne brzine, brzine zavarivanja te razna stajanja.



Slika 23. Robotizirana zavarivačka stanica i uzorak prije zavarivanja



Slika 24. Privjesak za učenje

4.1.2 Zaseban izvor struje i mehanizam za dovođenje žice

Zbog navedenih iznimaka rada robotizirane zavarivačke stanice, korišten je zaseban izvor struje i pripadajući mehanizam za dovođenje žice. Na slici 25 prikazan je izvor struje proizvođača Daihen Varstroj, model uređaja je WB – P500L. To je inverterski tip izvora struje kojim je moguće zavarivati razne materijale poput ugljičnog čelika, korozijski postojanog čelika, bronce, aluminija, titana i drugo. Navedeni izvor struje također ima razne izlazne karakteristike istosmjerne struje. Jedna od tih karakteristika je impulsna istosmjerna struja koja je korištena prilikom zavarivanja u ovom eksperimentalnom radu. Na slici 26 prikazane su tehničke karakteristike izvora struje WB – P500L. Na slici 27 prikazano je korisničko sučelje za izbor parametara zavarivanja. Za ovaj eksperimentalan rad na korisničkom sučelju namještena je debljina žice 1,2 mm, za materijal žice odabran je mild steel cored, također je odabran impulsni način prijenosa metala. Na uređaju je namještena jakost struje 313 A, što odgovara brzini dobave žice od 14,5 m/min, a uređaj je samostalno prilagodio napon na određenu vrijednost.



Slika 25. Izvor struje i mehanizam za dovođenje žice

| | | | | |
|-------------------------------------|----------------------------|--------------------------------|----------------------------|--------|
| DAIHEN VARSTROJ d.d., SLO - Lendava | | DAIHEN VARSTROJ | | |
| WB-P500L | | N° 1039231 | | |
| 3~ | | EN 60974-1 | | |
| | ----- | 30 A / 15.5 V - 500 A / 39.0 V | | |
| | | X | 60% | 100% |
| S | U ₀ 80 V | I ₂ | 500 A | 388 A |
| | | U ₂ | 39.0 V | 33.4 V |
| 3 - 50Hz | U ₁ = 3 x 400 V | I _{1max} = 36.0 A | I _{1eff} = 27.9 A | |
| IP23S | | | | |

Slika 26. Tehničke karakteristike izvora struje WB-P500L



Slika 27. Korisničko sučelje izvora struje WB-P500L

4.1.3 Osnovni materijal

Kao osnovni materijal svih uzoraka korišten u eksperimentu je čelik kvalitete S355J2+N prema normi EN 10025 – 2. To je nelegirani niskouglični konstrukcijski čelik koji posjeduje izvrsna zavarivačka svojstva. U tablici 5 naveden je kemijski sastav čelika S355J2+N. U tablici 6 navedena su mehanička svojstva čelika S355J2+N.

Tablica 5. Kemijski sastav čelika S355J2+N [36]



| Čelik | C, % | Mn, % | P, % | S, % | Si, % |
|----------|------------|------------|------------|------------|------------|
| S355J2+N | maks. 0,23 | maks. 1,60 | maks. 0,05 | maks. 0,05 | maks. 0,05 |

Tablica 6. Mehanička svojstva čelika S355J2+N [36]

| Čelik | Granica razvlačenja R_e , Mpa | Vlačna čvrstoća R_m , Mpa | Udarni rad loma, J |
|----------|------------------------------------|--------------------------------|--------------------|
| S355J2+N | 355 | 470 – 630 | 27 pri -20 °C |

4.1.4 Dodatni materijal

Za zavarivanje sva 3 uzorka korištena je metalnim praškom punjena žica promjera 1,2 mm proizvođača Elektroda Zagreb, komercijalnog naziva KX – 706 M. Na slici 28 prikazane su specifikacije žice KX – 706 M. Na slici 29 može se vidjeti kako je postavljen kolot sa žicom u mehanizam za dovođenje žice. Srebrna boja površine žice ukazuje da je žica prevučena niklom.

| KX - 706M | | | | |
|--|-------------------------------------|---------------------|-----------------|---------|
| NORME | | | | |
| HRN EN ISO 17632-A | AWS / ASME SFA-5.18 | | | |
| T46 2 M M 4 H5 | E70C-6M | | | |
| SVOJSTVA I PODRUČJE PRIMJENE | | | | |
| Metalom punjena žica za zavarivanje nelegiranih i niskolegiranih čelika čvrstoće do 490 N/mm ² . Značajka ove žice jest dobra penetracija, visoka otpornost nastanku poroziteta, dobro razljevanje taline metala zavara te nizak udio vodika u metalu zavara. Žica se primjenjuje za zavarivanje u jednom i više prolaza. | | | | |
| MEHANIČKA SVOJSTVA ČISTOG METALA ZAVARA | | | | |
| R _{eL} N/mm ² | R _m N/mm ² | A ₅ % | KV (-20°C) J | |
| 480 | 540 | 29 | 70 | |
| ORIJENTACIJSKI KEMIJSKI SASTAV ČISTOG METALA ZAVARA | | | | |
| C | Si | Mn | P | S |
| % | 0,04 | 0,60 | 1,50 | ≤ 0,014 |
| ZAŠITNI PLIN | | | | |
| M21 (Ar + 18%CO ₂) protok 15 - 25 l/min | | | | |
| PARAMETRI ZAVARIVANJA | | | | |
| Promjer žice mm | Jakost struje A | Napon el. luka V | Polaritet | |
| 1,2 | 160 - 340 | 24 - 32 | DCEP (DC+) | |
| PAKIRANJE | | | | |
| Promjer žice mm | Namotaj | Težina kg | | |
| 1,2 | Žica do žice (S-S) | 5; 15 | | |
| ODOBRENJA | | | | |
| ABS (3YSA); BV (3S3YS); DNV (III YMS); GL (3YS); LR (3YS) | | | | |
|   | | | | |

Slika 28. Specifikacije žice KX – 706 M [37]



Slika 29. Kolut sa žicom u mehanizmu za dovođenje žice

4.1.5 Zaštitni plinovi

U eksperimentalnom radu korištene su dvije vrste trokomponentnog zaštitnog plina. Oba plina su od proizvođača Messer. Plin korišten tijekom zavarivanja prvog i drugog uzorka je Ferroline C6X1. To je trokomponentna mješavina zaštitnih plinova Ar – CO₂ – O₂, volumni udio ugljikovog dioksida je 6 %, kisika 1 %, a ostatak je argon. Plin korišten tijekom zavarivanja trećeg uzorka je Ferroline C12X2, to je također trokomponentna mješavina zaštitnih plinova Ar – CO₂ – O₂ koja osim argona ima volumni udio ugljikovog dioksida 12 % i kisika 2 %. Prema normi HRN EN ISO 14175 obje vrste plinova spadaju grupi plinova M24. Obje mješavine plinova prikladne su za zavarivanje nelegiranih čelika kao što je čelik S355. U tablici 7 prikazani su kemijski sastavi trokomponentnim mješavinama plinova. Protok zaštitnog plina i tlak plina u boci moguće je očitati s reducir ventila. Protok plina podešen je na 20 l/min što se može očitati sa slike 30.

Tablica 7. Kemijski sastavi trokomponentnih mješavina plinova [25]

| Vrsta plina | Grupa po HRN EN ISO 14175:2008 | Volumni udio, % | | |
|-----------------|-----------------------------------|-----------------|-----------------|----------------|
| | | Ar | CO ₂ | O ₂ |
| Ferroline C6X1 | M24 | 93 | 6 | 1 |
| Ferroline C12X2 | M24 | 86 | 12 | 2 |



Slika 30. Protok zaštitnih plinova

4.1.6 Mjerenje temperature površine zavara

Temperatura površine zavara mjerena je pomoću infracrvenog termometra. Tijekom zavarivanja uzoraka međuprolazna temperatura bila je oko 60 °C. Na slici 31 prikazan je infracrveni termometar tijekom mjerenja temperature drugog prolaza prvog uzorka.



Slika 31. Infracrveni termometar

4.2 Priprema uzoraka

Na tračnoj pili izrezane su ploče dimenzija 150 x 350 mm (širina x duljina) debljine 5 i 20 mm. Na slici 32 može se vidjeti postupak rezanja ploča debljine 5 mm na tračnoj pili. Nakon izrezivanja, ploče su izbrušene na površinama gdje će se zavarivati, namještene u kutni spoj te pripojene na suprotnim stranama.

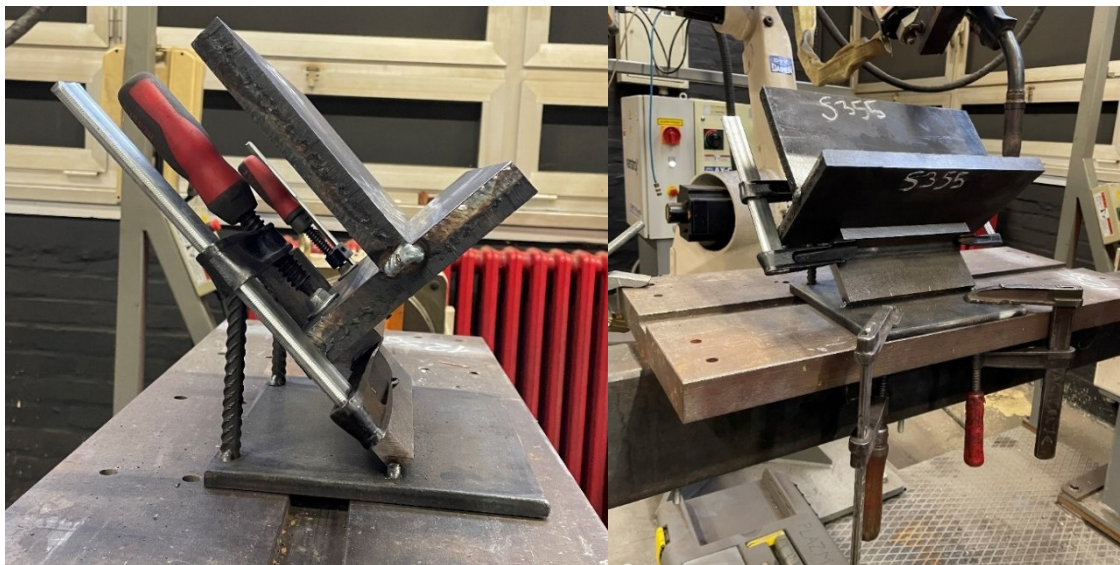


Slika 32. Rezanje ploče osnovnog materijala na tračnoj pili

4.3 Postupak zavarivanja

Prije samog postupka zavarivanja, uzorci su stegnuti te su podešeni parametri zavarivanja. Uzorci su na pozicioneru stegnuti pomoću ručnih stega na način da se zavarivanje odvija u horizontalnom položaju (PA položaj prema HRN EN ISO 6947:2011). Svi uzorci zavareni su lijevom (push) tehnikom zavarivanja. Prvi uzorak nazvan je 1F4, drugi uzorak nazvan je 1F3, a treći uzorak nazvan je 1F5. Na slici 33 lijevo prikazan je način namještanja kutnog spoja u PA položaj pomoću dodatne konstrukcije, a desno je prikazano stezanje uzorka 1F4 na pozicioner pomoću ručnih stega. Uzorak 1F4 debljine 20 mm zavaren je u 3 prolaza. Nakon svakog prolaza, nakon što se temperatura površine zavara spustila na međuprolaznu temperaturu, zavar

je očišćen od troske pomoću žičane četke. Hlađenje zavara na međuprolaznu temperaturu trajalo je nekoliko minuta. Tijekom vremena hlađenja zavara, robotska je ruka programirana za zavarivanje sljedećeg prolaza. Uzorci 1F3 i 1F5 zavarani su obostrano. Prvi zavar nazvan je lijeva strana, a drugi zavar nazvana je desna strana. Za uzorke 1F3 i 1F5 također je prije zavarivanja desne strane pričekano da se temperatura zavara spusti na međuprolaznu temperaturu.



Slika 33. Pozicioniranje uzorka (lijevo) i stezanje na pozicioner (desno)

4.3.1 Parametri zavarivanja

Parametri zavarivanja, osim vrste zaštitnog plina, držani su jednaki za sva 3 uzorka kao što je i prikazano u tablici 8.

Tablica 8. Parametri zavarivanja

| Naziv uzorka | Debljina uzorka, mm | Nominalan napon, V | Nominalna jakost struje, A | Brzina dobave žice, m/min | Brzina zavarivanja, cm/min | Protok plina, l/min | Vrsta plina | Slobodni kraj žice, mm |
|--------------|---------------------|--------------------|----------------------------|---------------------------|----------------------------|---------------------|-------------|------------------------|
| 1F4 | 20 | 35,7 | 313 | 14,5 | 65 | 20 | C6X1 | 20 |
| 2F3 | 5 | 35,7 | 313 | 14,5 | 65 | 20 | C6X1 | 20 |
| 2F5 | 5 | 35,7 | 313 | 14,5 | 65 | 20 | C12X2 | 20 |

Tijekom postupka zavarivanja promatrani su stvarni parametri zavarivanja poput jakosti struje i napona koji su se mijenjali u vremenu. Pomoću stvarnih parametara očitanih s izvora struje za zavarivanje može se izračunati unesena toplina u radni komad za svaki prolaz u slučaju uzorka 1F4 odnosno za svaki zavar uzoraka 2F3 i 2F5.

Unos topline izračunat je prema jednadžbi:

$$Q = \frac{U \cdot I \cdot 60 \cdot \eta}{v \cdot 1000}, \text{ kJ/cm} \quad (1)$$

gdje je:

- Q – unos topline, kJ/cm
- U – napon električnog luka, V
- I – jakost struje zavarivanja, A
- η – iskoristivost električnog luka ($\eta = 0,8$ prema HRN EN ISO 1011-1:2009)
- v – brzina zavarivanja, cm/min.

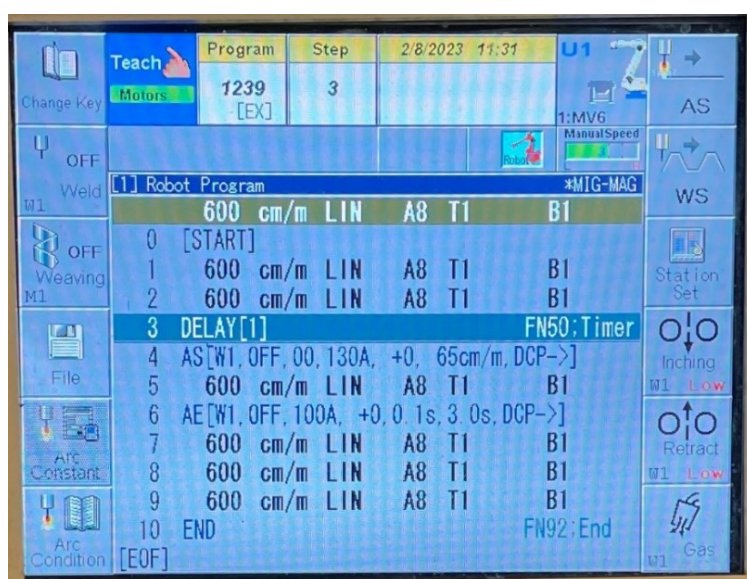
Za uzorke 1F4 i 2F3 u jednadžbu (1) unesene su srednje vrijednosti očitano napona i jakosti struje zavarivanja. U tablici 9 prikazani su očitani napon električnog luka, očitana jakost struje zavarivanja i unesena toplina. Očitani napon zavarivanja za sva tri uzorka sličnih je vrijednosti. Vrijednost očitane jakosti struje za uzorak 2F5 niža je za 20 A u odnosu na uzorke 1F4 i 2F3 čiji je raspon očitane jakosti struje identičan. Zbog niže očitane jakosti struje zavarivanja za uzorak 2F5, također je unesena toplina niža za 0,9 kJ/cm u odnosu na unesenu toplinu za uzorak 1F4, te niža za otprilike 0,6 kJ/cm u odnosu na uzorak 2F3.

Tablica 9. Stvarni parametri i unos topline u radni komad

| Naziv uzorka | Očitani napon, V | Očitana jakost struje, A | Unesena toplina u jednom prolazu, kJ/cm |
|--------------|------------------|--------------------------|---|
| 1F4 | 34 – 36 V | 350 – 360 A | 9,18 |
| 2F3 | 33 - 35 V | 350 – 360 A | 8,91 |
| 2F5 | oko 34 V | oko 330 A | 8,29 |

4.3.2 Programiranje kretanja robota

Programiranje putanje kretanja robota, odnosno izrada programa, napravljena je pomoću privjeska za učenje koji se može vidjeti na slici 24. Za svaki uzorak izrađen je novi program, a za svaki novi prolaz kod uzorka 1F4 odnosno drugi zavar kod uzorka 2F3 i 2F5 napravljene su modifikacije postojećeg programa za taj uzorak. Uzorci 2F3 i 2F5 programirani su na način da su lijeva i desna strana uzorka zavarene u istom smjeru. Početna točka robota odabrana je iznad radnog komada proizvoljno, jedini je uvjet dovoljna količina prostora za skidanje uzorka s pozicionera kako ne bi došlo do oštećivanja pištolja za zavarivanje. Točka uspostave električnog luka odabrana je mjerenjem udaljenosti slobodnog kraja žice (20 mm) od kontaktne vodilice do mjesta spoja ploča. Radi činjenice da je izvor struje bio odvojen od robotizirane zavarivačke stanice, odnosno upravljačka jedinica stanice nije upravljala uspostavljanjem i prekidanjem električnog luka, to se radilo ručno. Također, u programu je korištena funkcija „delay“ kako bi se električni luk uspostavio na vrijeme. Za kretanje vrha pištolja tijekom zavarivanja korištena je funkcija „arc start“. Unutar opcije „arc start“ definirana je brzina zavarivanja koja je podešena na 65 cm/min. Posljednja točka zavarivanja definirana je kao udaljenost kontaktne vodilice i radnog komada u iznosu od 20 mm, te kao točka završetka osnovnog materijala. Završetak zavarivanja definiran je opcijom „arc end“ u kojoj se i sam robot prestaje gibati brzinom zavarivanja. Nakon zavarivanja, robot je od posljednje točke zavarivanja usmjeren od radnog komada prema gore. Nakon toga robot je ponovno vraćen u početnu točku koja mu je i posljednja točka.



Slika 34. Program za zavarivanje uzorka 1F3

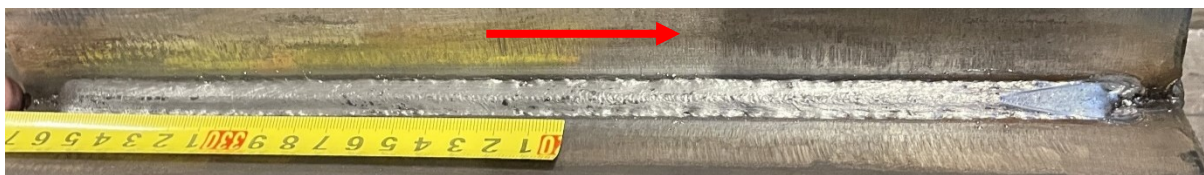
Slika 34 prikazuje zaslon privjeska za učenje te program korišten za zavarivanje lijeve strane uzorka 1F3. Na slici 35 vidi se pozicija pištolja za zavarivanje u posljednjoj točki zavarivanja prvog prolaza na uzorku 1F4, pištolj je usmjeren okomito prema dolje. Žica je usmjerena okomito iznad spoja dviju ploča.



Slika 35. Posljednja točka zavarivanja

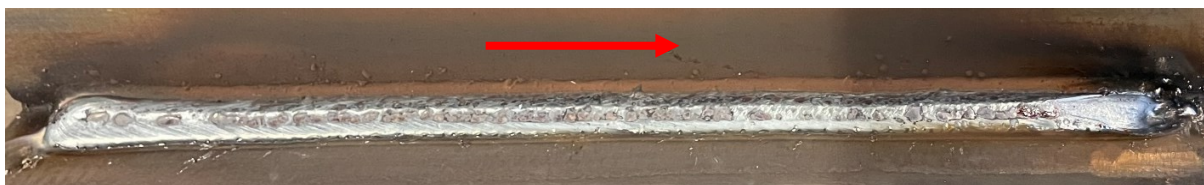
4.4 Rezultati zavarivanja

Zavareni spojevi dobiveni robotiziranim zavarivanjem mogu se vidjeti na slikama ispod. Na svim slikama smjer zavarivanja prikazan je crvenom strelicom. Na slici 36 može se vidjeti izgled očišćenog zavara uzorka 1F4 nakon prvog prolaza. Tijekom zavarivanja bila je prisutna mala količina rasprskavanja kapljica. Na površini su prisutni manji otoci troske koji su naknadno odstranjeni.



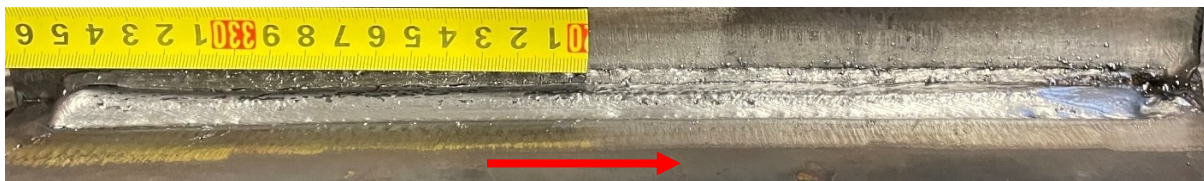
Slika 36. Uzorak 1F4 – prvi prolaz nakon čišćenja

Slika 37 prikazuje zavareni spoj nakon drugog prolaza na uzorku 1F4. S slike se može uočiti veća količina rasprskanih kapljica nego tijekom prvog prolaza. Također su na površini vidljivi veći otoci troske.



Slika 37. Uzorak 1F4 – drugi prolaz

Slika 38 prikazuje izgled zavarenog spoja na uzorku 1F4 nakon čišćenja drugog prolaza. Može se vidjeti da je većina troske uspješno odstranjena.



Slika 38. Uzorak 1F4 – drugi prolaz nakon čišćenja

Na slici 39 može se vidjeti izgled zavarenog spoja na uzorku 1F4 nakon trećeg prolaza. Tijekom zavarivanja trećeg prolaza, na polovici uzorka došlo je do nekontroliranog ponašanja električnog luka, visina električnog luka naglo je rasla zbog čega je proces zavarivanja prekinut. To je posljedica lošeg vođenja žice u polikabelu, polikabel je bio nekoliko puta oštro savijen zbog čega žica nije mogla slobodno, kontinuirano prolaziti. Nakon otklanjanja problema, zavarivanje je nastavljeno od mjesta gdje je prekinuto. Zato se izgled zavarenog spoja na prvoj i drugoj polovici uzorka razlikuje. Na površini zavara moguće je vidjeti veliku količinu troske. Oko zavara je prisutna manja količina kapljica malog promjera.



Slika 39. Uzorak 1F4 – treći prolaz

Na slikama 40 i 41 prikazani su zavari za uzorak 2F3, a na slikama 42 i 43 prikazani su zavari za uzorak 2F5. Može se primijetiti kako je tijekom zavarivanja uzorka 2F3 zbog veće količine nalijepljenih kapljica bila prisutna veća količina rasprskavanja.



Slika 40. Uzorak 2F3 – lijeva strana



Slika 41. Uzorak 2F3 – desna strana



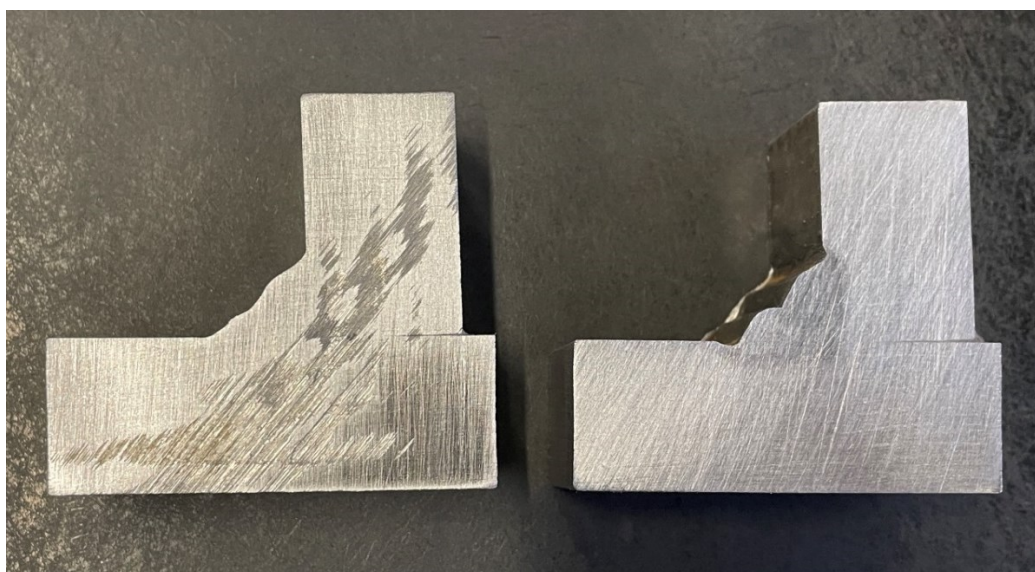
Slika 42. Uzorak 2F5 – lijeva strana



Slika 43. Uzorak 2F5 – desna strana

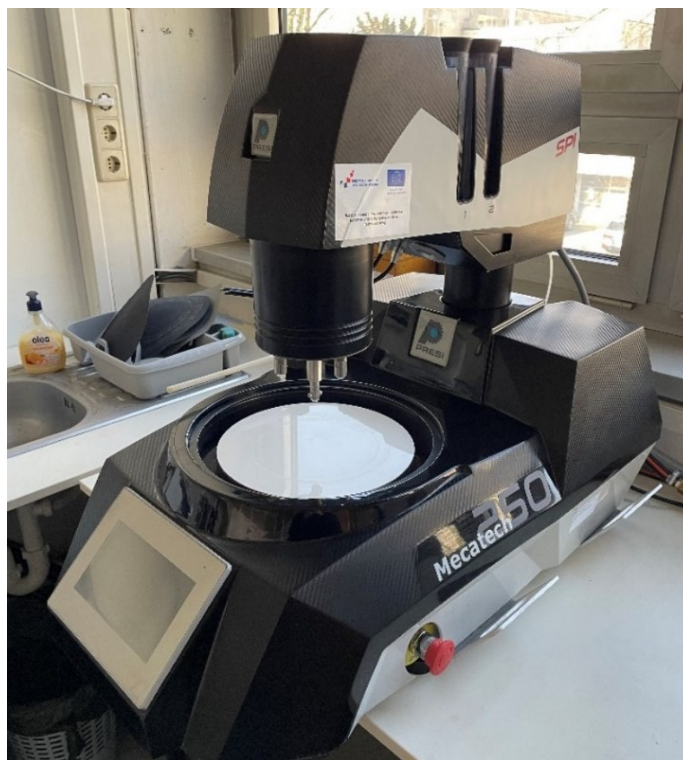
4.5 Analiza makroizbrusaka

U svrhu provedbe analize geometrije zavara i makrostrukture spoja iz uzoraka su izrezani makroizbrusci na tračnoj pili. Iz uzorka 1F4 napravljena su 2 makroizbruska, jedan na početku i jedan na kraju zavarenog spoja. Makroizbrusak na početku nazvan je 1F4P, a na kraju 1F4K. Iz uzoraka 2F3 i 2F5 napravljen je po 1 makroizbrusak na početku zavarenog spoja. Makroizbrusci su nakon rezanja prvo ručno brušeni brusnim papirom granulacije od 80 do 400. Na slici 44 može se vidjeti uzorak 1F4P prije ručnog brušenja i uzorak 1F4K nakon ručnog brušenja.



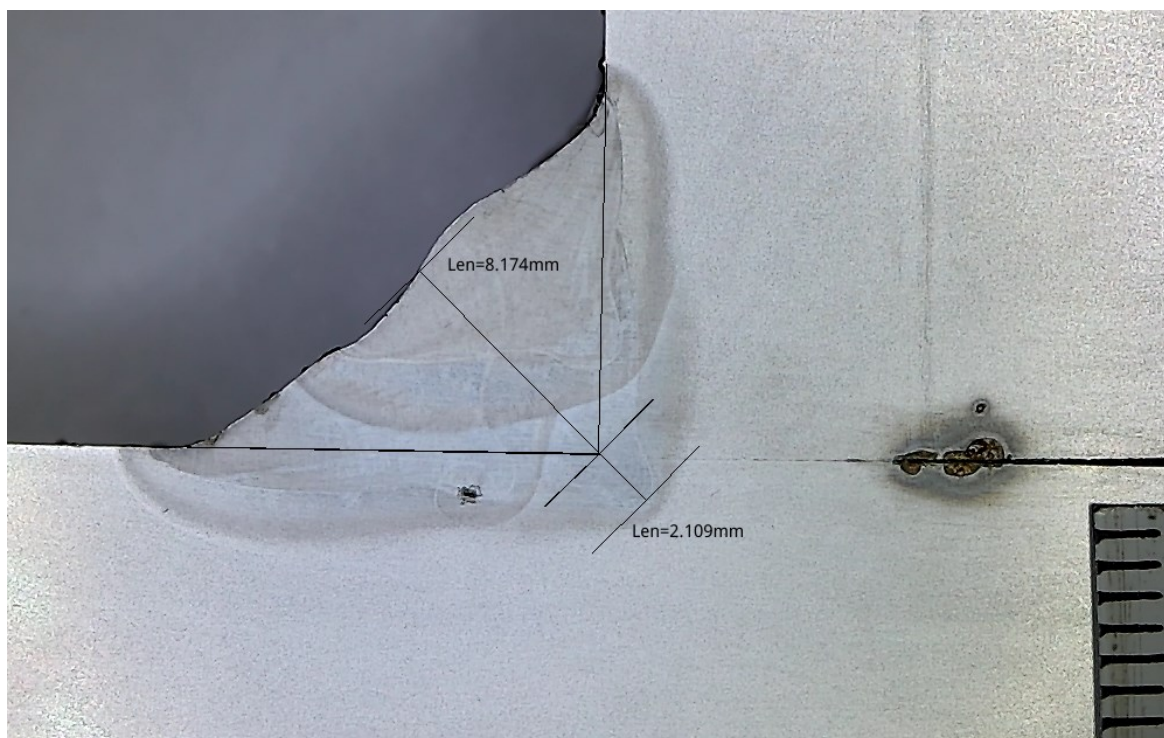
Slika 44. Izgled uzoraka prije (lijevo) i nakon ručnog brušenja (desno)

Nakon ručnog brušenja makroizbrusci su u Laboratoriju za materijalografiju dodatno polirani brusnim papirom granulacije 2400 na automatskom uređaju Mecatech 250 sa slike 45. Nakon toga uzorci su nagriženi nitalom (3 %) kako bi se istaknula područja osnovnog i dodatnog materijala, zone utjecaja topline kao i linije staljivanja. Uzorci su nakon nagrizanja izbliza slikani kamerom visoke rezolucije.



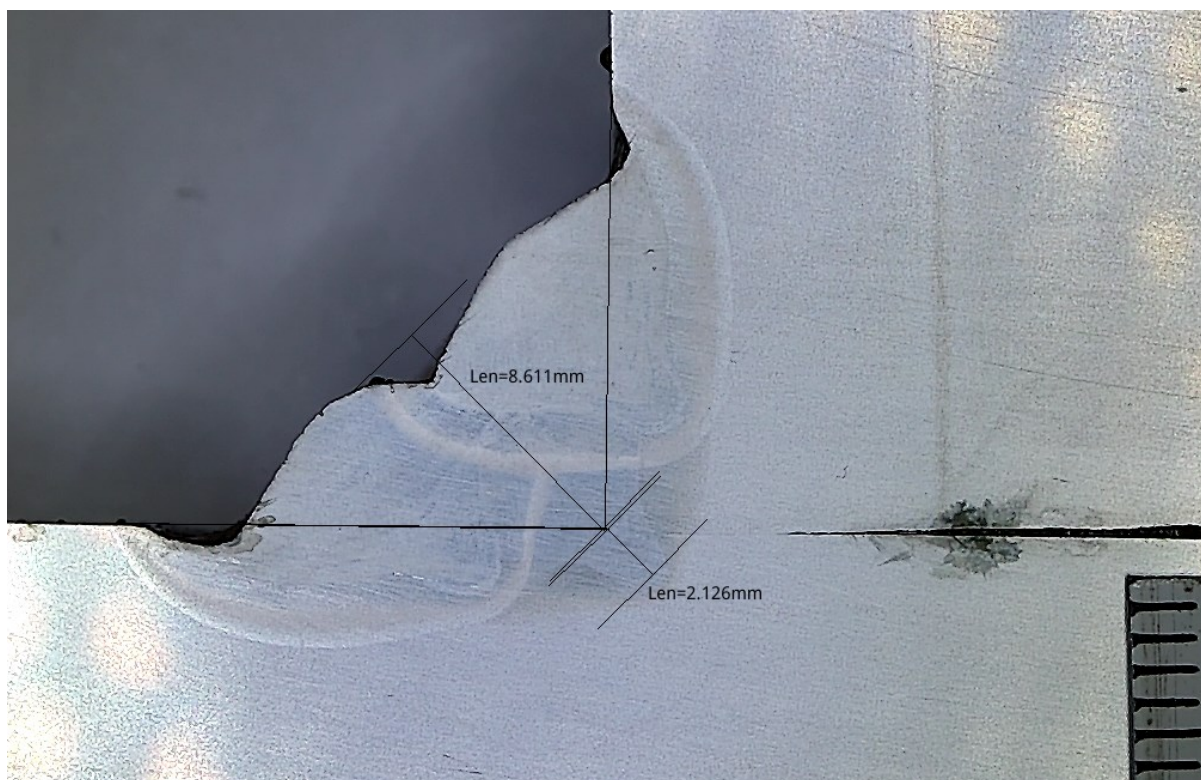
Slika 45. Uređaj za brušenje Mecatech 25

4.5.1 Analiza geometrije zavara i makrostrukture spoja



Slika 46. Analiza geometrije makroizbruska 1F4P

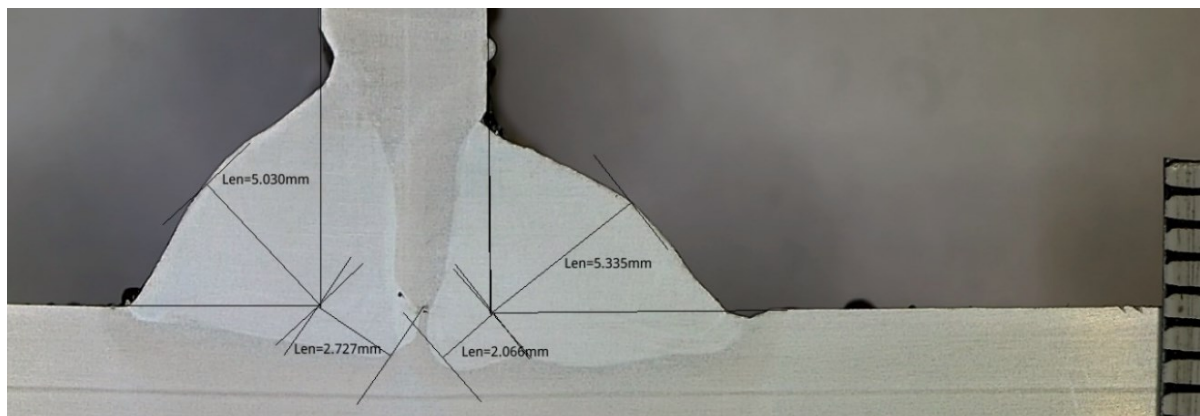
Na slici 46 prikazan je makroizbrusak 1F4P. Na njemu su ucrtane dimenzije visine zavora (a) te dubina penetracije. Visina zavora je 8,17 mm, dubina penetracije je 2,11 mm. Na makroizbrusku su jasno vidljiva sva tri prolaza te zona utjecaja topline.



Slika 47. Analiza geometrije makroizbruska 1F4K

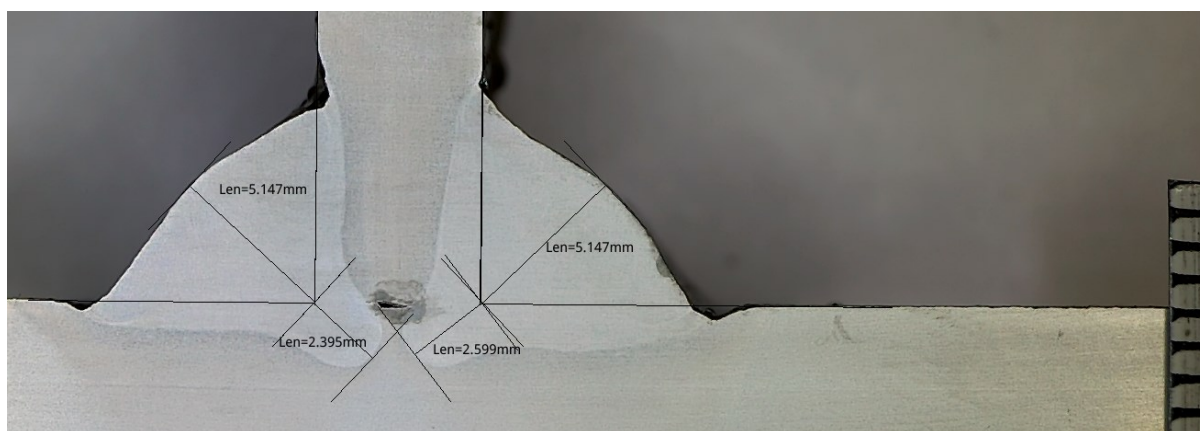
Slika 47 prikazuje makroizbrusak 1F4K. Visina zavora (a) očitana sa slike je 8,61 mm, a dubina penetracije je 2,13 mm. Izgled zavora nije pravilan radi čega je visina zavora odabrana kao prosječna udaljenost do središta između dva vrha drugog i trećeg prolaza. Zona utjecaja topline i sva tri prolaza jasno se mogu razaznati. Na slici 47 se također mogu vidjeti ugorine na granici spajanja osnovnog i dodatnog materijala. Ugorine mogu nastati zbog više čimbenika. Neki od njih su prevelika jakost struje, loše vođenje električnog luka, prevelika duljina električnog luka, oksidiranost površine koja se zavaruje i nedovoljna čistoća mjesta zavarivanja. U ovom slučaju teško je točno definirati što je uzročnik ugorina.

Usporedbom penetracije na početku i kraju uzorka 1F4 vidljivo je da su one podjednake. Visina zavora (a) različita je prvenstveno zbog naknadnog zavarivanja na drugoj polovici uzorka 1F4.



Slika 48. Analiza geometrije makroizbruska 2F3

Slika 48 prikazuje makroizbrusak 2F3. Na slici su označene dimenzije visina zavara i dubina penetracije. Visina zavara (a) lijeve strane je 5,03 mm, a dubina penetracije je 2,73 mm. Visina zavara (a) desne strane je 5,34 mm, a dubina penetracije 2,07 mm. Na obje strane mogu se uočiti ugorine. Visina zavara lijeve strane manja je od desne strane, ali je dubina penetracije lijeve strane veća od dubine penetracije desne strane.

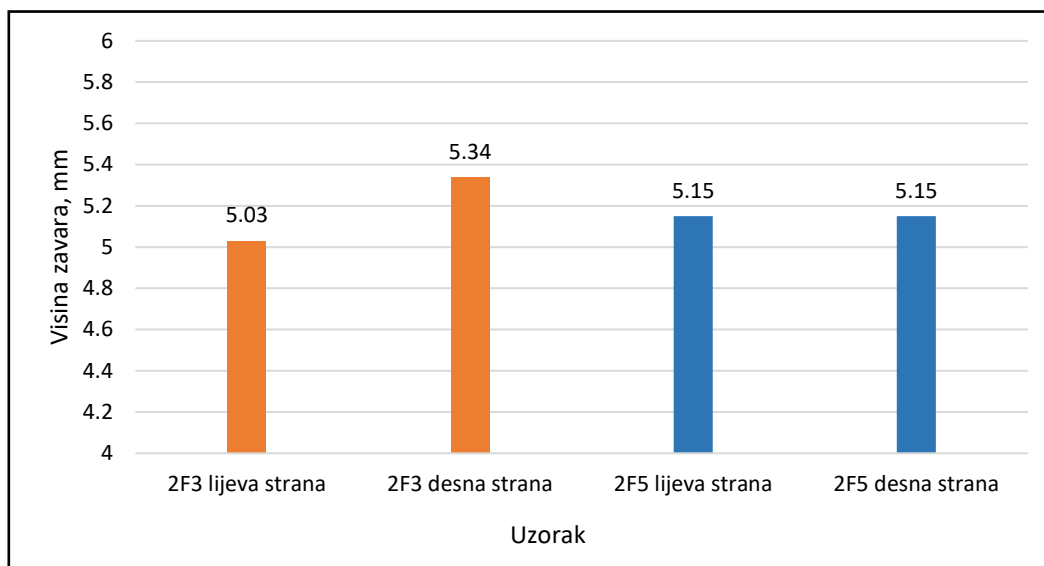


Slika 49. Analiza geometrije makroizbruska 2F5

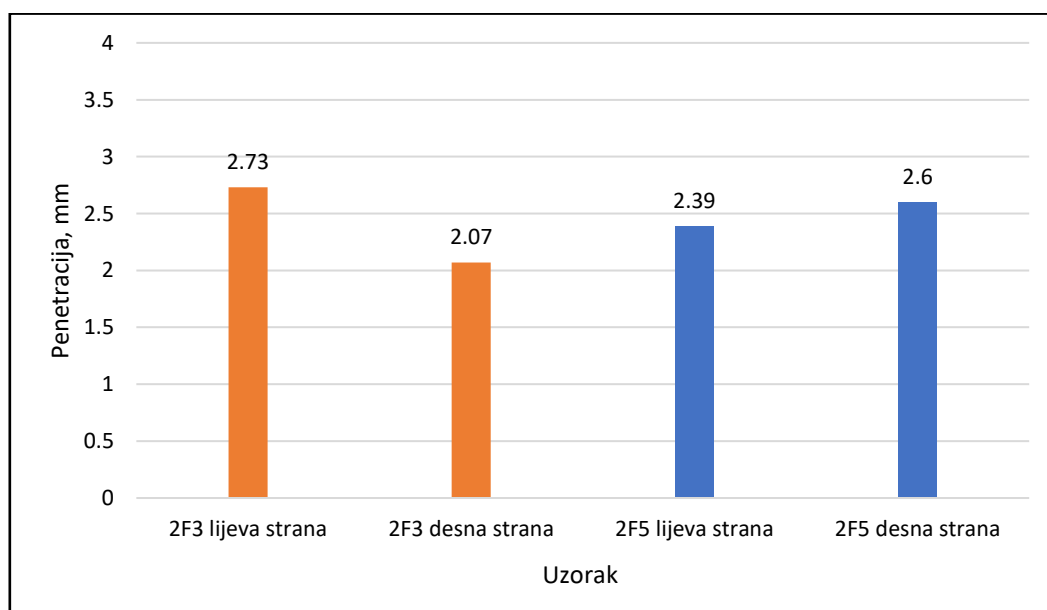
Slika 49 prikazuje makroizbrusak 2F5. Na slici su označene dimenzije visina zavara i dubina penetracije. Visina zavara (a) lijeve strane je 5,15 mm, a dubina penetracije mu je 2,39 mm. Visina zavara (a) desne strane je 5,15 mm, a dubina penetracije je 2,6 mm. Na obje strane mogu se uočiti ugorine. Također se u središtu zavara može primijetiti nepotpuna protaljenost spoja. Visina obje strane zavara je jednaka, penetracija desne strane veća je od penetracije lijeve strane. U tablici 10 prikazane su vrijednosti visina i penetracija uzoraka 2F3 i 2F5.

Tablica 10. Usporedba dimenzija zavora 2F3 i 2F5

| Uzorak | Visina zavora, mm | | Penetracija, mm | |
|--------|-------------------|--------------|-----------------|--------------|
| | Lijeva strana | Desna strana | Lijeva strana | Desna strana |
| 2F3 | 5,03 | 5,34 | 2,73 | 2,07 |
| 2F5 | 5,15 | 5,15 | 2,39 | 2,60 |



Slika 50. Dijagram visina zavora 2F3 i 2F5



Slika 51. Dijagram penetracija zavora 2F3 i 2F5

Rezultati analize makroizbrusaka 2F3 i 2F5 mogu se direktno usporediti pošto su iste debljine osnovnog materijala, ali su zavareni uz različitu plinsku atmosferu. Na slici 50 prikazan je dijagram visina zavara za uzorke 2F3 i 2F5. Visine zavara lijeve i desne strane uzorka 2F5 jednake su zbog čega zavareni spoj sa slike 49 izgleda simetrično, što nije slučaj za uzorak 2F3 na slici 48. Najveća vrijednost visine zavara dobivena je na lijevoj strani uzorka 2F3. Na slici 51 prikazane su vrijednost penetracija uzoraka 2F3 i 2F5. Može se vidjeti kako je najveća penetracija postignuta s lijeve strane uzorka 2F3. Srednja vrijednost penetracija uzorka 2F5 veća je od srednje vrijednosti penetracija uzorka 2F3. Sa slika 48 i 49 može se vidjeti kako je penetracija kod uzorka 2F3 široka, pokriva sredinu spoja te omogućuje potpuno protaljivanje spoja što nije slučaj kod uzorka 2F5 kod kojeg je penetracija prstastog izgleda.

5. ZAKLJUČAK

Analizom makroizbrusaka dobivenih zavarivanjem može se zaključiti kako robotizirano zavarivanje metalnim praškom punjenom žicom uz primjenu trokomponentne mješavine zaštitnog plina sa većim udjelom CO₂ i O₂ daje ljepši izgled zavara te ujednačenije vrijednosti visine zavara i penetracije. Iako su vrijednosti visine zavara i penetracije veće, prilikom zavarivanja sa zaštitnim plinom većeg udjela CO₂ i O₂ postoji mogućnost nepotpunog protaljivanja spoja zbog užeg djelovanja električnog luka. Za obje korištene vrste trokomponentnih zaštitnih plinova (*Ferroline C6X1* i *Ferroline C12X2*) nastale su ugorine koje imaju nepoželjan utjecaj na mehanička svojstva zavarenog spoja. Zavarivanje metalnim praškom punjenom žicom definira se kao „*spatter free*“ postupak zavarivanja, odnosno zavarivanje bez rasprskavanja kapljica. Za obje korištene vrste trokomponentnih zaštitnih plinova (*Ferroline C6X1* i *Ferroline C12X2*) rasprskavanje kapljica je bilo prisutno, ali je prilikom korištenja zaštitnog plina *Ferroline C12X2* količina nalijepljenih kapljica nakon zavarivanja bila manja te im je također bio manji i promjer.

MAG postupak zavarivanja najčešće je korišten postupak za zavarivanje čelika. Iako je proizvodnost MAG postupka veća u odnosu na druge elektrolučne postupke, tržište zahtijeva dodatno povećanje proizvodnosti uz smanjenje troškova. Jedna od tehnologija koja ispunjava te uvjete je robotizirano MAG zavarivanje. Za robotizaciju MAG postupka potrebna su velika ulaganja, ali je investicija isplativa s obzirom na to da jedan robot za zavarivanje može zamijeniti nekoliko osoba s gledišta proizvodnosti. Robotiziranim zavarivanjem također je moguće postići kontinuirano visoku kvalitetu zavarenih spojeva, roboti mogu raditi bez prestanka u fizički teškim položajima i upotrebom robota smanjena je količina otpada. Veliki nedostatak robotiziranog zavarivanja je niska fleksibilnost zbog potrebe programiranja robota i nemogućnost kompenzacije nedostataka pripreme spoja. Upotrebom metalnim praškom punjenih žica i Ar – CO₂ – O₂ plinskih mješavina u robotiziranom MAG zavarivanju dodatno je povećana proizvodnost, te su također uklonjeni neki nedostaci konvencionalnog robotiziranog MAG zavarivanja. Metalnim praškom punjene žice i Ar – CO₂ – O₂ plinske mješavine doprinose povećanoj penetraciji, ujednačenijem prijenosu metala i smanjenom rasprskavanju što je za robotizirano zavarivanje bitno jer skraćuje vrijeme potrebno za čišćenje sapnice od nalijepljenih kapljica. Metalnim praškom punjene žice također povećavaju količinu

nataljenog materijala do 20 % što znatno smanjuje vrijeme zavarivanja i smanjuju količinu troske što omogućuje zavarivanje u više prolaza bez čišćenja. Nedostatak primjene metalnim praškom punjene žice i Ar – CO₂ – O₂ mješavina je njihova visoka cijena u odnosu na standardne pune žice i često korištene dvokomponentne mješavine Ar – CO₂. Primjena robotiziranog zavarivanja metalnim praškom punjenom žicom uz primjenu Ar – CO₂ - O₂ plinskih mješavina moguća je u velikoserijskim proizvodnim sustavima gdje se zavaruju konstrukcije debelih stijenki u više prolaza ili gdje se navaruje velika količina dodatnog materijala, odnosno gdje se primjena metalnim praškom punjene žice i Ar – CO₂ – O₂ mješavina isplati.

6. LITERATURA

- [1] <https://www.millerwelds.com/resources/article-library/the-history-of-welding> preuzeto 09.01.2023.
- [2] S.Kralj, Z.Kožuh, Š.Andrić, Zavarivački i srodni postupci, Zagreb, 2015., p. 104-128
- [3] Levačić L.: Trokomponentne plinske mješavine za MAG zavarivanje, diplomski rad, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2015.
http://repositorij.fsb.hr/4930/1/Levacic_Lidija_diplomski_rad.pdf preuzeto 09.01.2023.
- [4] <https://www.uti.edu/blog/welding/gmaw-mag-welding> preuzeto 10.01.2023.
- [5] <https://rime.de/en/welding/mag-welding/> preuzeto 10.01.2023.
- [6] Grd D.: Optimiranje parametara D – arc zavarivanja limova većih debljina, diplomski rad, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2021.,
<https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:489238> preuzeto 12.01.2023.
- [7] Posch G., Ferdinand K., Heinz H., Harald C. Metal Additive Manufacturing Conference. Manufacturing of turbine blades by shape giving CMT – welding. Vienna. 20.11.2014.
https://www.researchgate.net/publication/268778936_MANUFACTURING_OF_TURBINE_BLADES_BY_SHAPE_GIVING_CMT-WELDING preuzeto 12.01.2023.
- [8] Garašić I.; Kožuh.Z.: Priručnik iz kolegija Strojevi i oprema za zavarivanje, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2015.
- [9] Bartolović J.: Transformator uređaja za zavarivanje, diplomski rad, Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek, Osijek, 2016. <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:200:022031> preuzeto 12.01.2023.
- [10] <https://www.hobartbrothers.com/resources/technical-articles/choosing-the-right-drive-roll-is-key-for-smooth-wire-feeding/> preuzeto 12.01.2023.
- [11] Garašić, I.: Autorizirana predavanja iz kolegija „Postupci zavarivanja“, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb
- [12] Gojić M.: Tehnike spajanja i razdvajanja materijala, Sisak, 2003.
- [13] https://www.lincolnelectric.com/assets/global/Products/Consumable_MIGGMAWire-s-SuperArc-SuperArcL-56/c4200.pdf preuzeto 15.01.2023.
- [14] <https://www.telwin.com/en/telwin-academy/saldatura/tig-welding/pulse-easy-pulse/> preuzeto 15.01.2023.

- [15] I. Lakota, M. Bregant, M. Šolar: Welding with metallic flux cored wires. 4. Međunarodno znanstveno-stručno savjetovanje. Tehnolička primjena postupaka zavarivanja i zavarivanju srodnih tehnika u izradi zavarenih konstrukcija i proizvoda, Slavonski Brod, 14. – 16. studeni 2007.
https://dtzsb.unisb.hr/wpcontent/uploads/radovi_2007/023-030.pdf
preuzeto 13.01.2023.
- [16] Radiković M.: Zavarivanje duplex čelika praškom punjenom žicom, diplomski rad, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2018.
<https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:037665> preuzeto 17.02.2023.
- [17] Tušek, J.: Punjene žice: Znanstveno-stručni časopis Zavarivanje 37, 1994., 3/4, str. 87 - 94
- [18] Despotović, B.; Brechelmacher, B.; Marsenić, T.: Neka gledišta u primjeni punjenih žica za MAG postupak zavarivanja: Znanstveno-stručni časopis Zavarivanje 42, 1999., 1-2, str. 25-29
- [19] Kuzmikova L.: An Investigation of the weldability of high hardness armour steels, doktorski rad, Faculty of Engineering, University of Wollongong, 2013.
<https://ro.uow.edu.au/theses/3853> preuzeto 13.01.2023.
- [20] Bandhu, D.; Djavanroodi, F.; Shaikshavali, G.; Vora, J.J.; Abhishek, K.; Thakur, A.; Kumari, S.; Saxena, K.K.; Ebrahimi, M.; Attarilar, S. Effect of Metal-Cored Filler Wire on Surface Morphology and Micro-Hardness of Regulated Metal Deposition Welded ASTM A387-Gr.11-Cl.2 Steel Plates. *Materials* 2022, 15, 6661.
<https://doi.org/10.3390/ma15196661> preuzeto 03.02.2023.
- [21] Mvola, B., Kah, P. Effects of shielding gas control: welded joint properties in GMAW process optimization. *Int J Adv Manuf Technol* 88, 2369–2387 (2017).
<https://doi.org/10.1007/s00170-016-8936-2> preuzeto 03.02.2023.
- [22] Bilić L.: Utjecaj zaštitnih plinova na svojstva zavarenog spoja pri MAG zavarivanju nelegiranog konstrukcijskog čelika, završni rad, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2009. <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:047476>
preuzeto 04.02.2023.

- [23] Liskevych, Olga & Scotti, Americo. (2014). Submission (draft) copy: Welding in the World, Influence of the CO₂ Content on Operational Performance of Short-Circuit GMAW. Welding in the World, Le Soudage Dans Le Monde.
https://www.researchgate.net/figure/Cross-sectional-areas-of-the-weld-beads-obtained-using-different-contents-of-CO-2-in-the_fig9_267142611 preuzeto 04.02.2023.
- [24] Štavalj S.: Stabilnost procesa MAG zavarivanja s trokomponentnim plinskim mješavinama, završni rad, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2017. <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:560035> preuzeto 05.02.2023.
- [25] Wolters M., Salopek Z.: Značenje i važnost norme ISO 14175 – dodatni materijali za zavarivanje – plinovi i mješavine plinova za zavarivanje taljenjem i srodne postupke, 5. međunarodno znanstveno – stručno savjetovanje, Slavonski Brod, 11. – 13. studeni 2009., https://dtzsb.unisb.hr/wp-content/uploads/radovi_2009/161-168-sbz09.pdf preuzeto 18.02.2023.
- [26] Inês da Fonseca Pestana Ascenso Pires, Tobias Manuel Vilas Boas , Maria Alexandra Sousa , L. Quintino: Influence of GMAW Shielding Gas in Productivity and Gaseous Emissions, konferencija u Aachenu, Njemačka, 2007.
<https://scholar.tecnico.ulisboa.pt/records/5ed19120-87ff-4f29-b87f-4836e36958af> preuzeto 18.02.2023.
- [27] Lončar D.: Priručnik za zavarivanje; Elektroda zagreb, Zagreb, 1987
- [28] Živčić M.; Remenar, I.: Zavarivanje – Tehnološke podloge i unapređenje; Zagreb, 1972.
- [29] Pritesh J. Prajapati, Vishvesh J. Badheka: Investigation on three different weldments on performance of SA516 Gr70 steel material, Alexandria Engineering Journal, Volume 58, Issue 2,2019, Pages 637-646, ISSN 1110-0168,
<https://doi.org/10.1016/j.aej.2019.05.012>. preuzeto 18.02.2023.
- [30] Kah P., Shrestha M., Hiltunen E., Martikainen J.: Robotic arc welding sensors and programming in industrial applications, International Journal of Mechanical and Materials Engineering volume 10, Article number: 13, 2015
<https://link.springer.com/article/10.1186/s40712-015-0042-y> preuzeto 18.02.2023.
- [31] Kantolić D.: Robotizirano MAG zavarivanje, završni rad, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2018.
<https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:371221> preuzeto 18.02.2023.

- [32] <https://blog.hirebotics.com/guide-to-welding-robots> preuzeto 18.02.2023.
- [33] <https://medium.com/precoil/the-business-model-for-robot-food-136d461fbfb0> preuzeto 18.02.2023.
- [34] http://www.selcoweld.com/images/prodotti/robot/ROB_BC.jpg preuzeto 18.02.2023.
- [35] <https://www.virs.si/hr/komponente-robotskih-stanica-za-zavarivanje/pozicioneri> preuzeto 08.02.2023.
- [36] <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=15176> preuzeto 08.02.2023.
- [37] <https://www.ezg.hr/proizvodi/kiswel/KX706.html> preuzeto 18.02.2023.