

# Izradba zavora MIG postupkom

---

**Prokić, Marko**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2024**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Pula / Sveučilište Jurja Dobrile u Puli**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:137:528972>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-10-28**



*Repository / Repozitorij:*

[Digital Repository Juraj Dobrila University of Pula](#)



Sveučilište Jurja Dobrile u Puli

Tehnički fakultet u Puli



MARKO PROKIĆ

## **IZRADBA ZAVARA MIG POSTUPKOM**

Završni rad

Pula, rujan 2024. godine

Sveučilište Jurja Dobrile u Puli

Tehnički fakultet u Puli

MARKO PROKIĆ

## **IZRADBA ZAVARA MIG POSTUPKOM**

Završni rad

**JMB: 0145022891, izvanredni student**

**Studijski smjer: Proizvodno strojarstvo**

**Predmet: Tehnologija III**

**Znanstveno područje: Tehničke znanosti**

**Znanstveno polje: 2.11 Strojarstvo**

**Znanstvena grana: 2.11.03 Proizvodno strojarstvo**

**Mentor: Dario Bognolo, viši predavač**

Pula, rujan 2024. Godine



Tehnički fakultet u Puli

Dario Bognolo, viši predavač

### **Tehnologija III**

**Sveučilište Jurja Dobrile u Puli**

**TEHNIČKI FAKULTET U PULI**

**ZADATAK TEME ZAVRŠNOG RADA**

**Pristupniku** Marku Prokiću

**MBS: 0145022891**

Studentu stručnog studija Tehničkog fakulteta u Puli izdaje se zadatak za završni rad

– tema završnog rada pod nazivom:

#### **IZRADBA ZAVARA MIG POSTUPKOM**

**Sadržaj zadatka:** Osnovna hipoteza ovog istraživanja je da upotreba MIG postupka zavarivanja omogućuje postizanje visoke kvalitete zavara, povećava produktivnost, te smanjuje troškove proizvodnje u usporedbi s drugim metodama zavarivanja. Predmet istraživanja je detaljna analiza i evaluacija MIG (Metal Inert Gas) postupka zavarivanja, s posebnim naglaskom na tehničke parametre, kvalitetu zavara, efikasnost postupka. Problem istraživanja leži u identificiranju ključnih faktora koji utječu na kvalitetu i efikasnost zavara izvedenih MIG postupkom, te u usporedbi s drugim metodama zavarivanja, kao što su TIG (Tungsten Inert Gas) i elektrolučno zavarivanje. Cilj ovog završnog rada je detaljno istražiti i analizirati postupak zavarivanja MIG (Metal Inert Gas) metodom, s naglaskom na praktičnu primjenu i teorijske aspekte.

Rad obraditi sukladno odredbama Pravilnika o diplomskom radu Sveučilišta u Puli.

*Izvanredni, Strojarsvo*

**Datum:** rujan, 2024.

**Potpis nastavnika** \_\_\_\_\_

## IZJAVA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI

Ja, dolje potpisani Marko Prokić, kandidat za prvostupnika Proizvodnog strojarstva ovime izjavljujem da je ovaj Završni rad rezultat isključivo mogega vlastitog rada, da se temelji na mojim istraživanjima te da se oslanja na objavljenu literaturu kao što to pokazuju korištene bilješke i bibliografija. Izjavljujem da niti jedan dio Završnog rada nije napisan na nedozvoljen način, odnosno da je prepisan iz kojega necitiranog rada, te da ikoji dio rada krši bilo čija autorska prava. Izjavljujem, također, da nijedan dio rada nije iskorišten za koji drugi rad pri bilo kojoj drugoj visokoškolskoj, znanstvenoj ili radnoj ustanovi.

Student

---

## IZJAVA

### o korištenju autorskog dijela

Ja, Marko Prokić, dajem odobrenje Sveučilištu Jurja Dobrile u Puli, kao nositelju prava iskorištavanja, da moj završni rad pod nazivom "Izradba zavara MIG postupkom" koristi na način da gore navedeno autorsko djelo, kao cjeloviti tekst trajno objavi u javnoj internetskoj bazi Sveučilišne knjižnice Sveučilišta Jurja Dobrile u Puli te kopira u javnu internetsku bazu završnih radova Nacionalne i sveučilišne knjižnice (stavljanje na raspolaganje javnosti), sve u skladu s Zakonom o autorskom pravu I drugim srodnim pravima i dobrom akademskom praksom, a radi promicanja otvorenoga, slobodnoga pristupa znanstvenim informacijama. Za korištenje autorskog djela na gore navedeni način ne potražujem naknadu.

Marko Prokić

---

## SAŽETAK

Izrada zavara MIG postupkom (Metal Inert Gas) predstavlja ključnu tehniku u zavarivačkoj industriji zbog svoje svestranosti i učinkovitosti. Ovaj postupak koristi inertni plin, poput argona ili mješavine argona i CO<sub>2</sub>, za zaštitu zavarivačkog zrna od atmosferskih utjecaja, čime se osigurava visoka kvaliteta i čvrstoća zavara. Proces uključuje nekoliko ključnih koraka, uključujući pripremu materijala, postavljanje opreme i kontrolu parametara zavarivanja. Prvi korak u izradi zavara MIG postupkom je priprema materijala, koja uključuje čišćenje površina od hrđe, prljavštine i masnoće kako bi se omogućio dobar kontakt između elektroda i materijala. Nakon toga, odabir i podešavanje opreme, uključujući zavarivački aparat, elektroda i plinski sustav, bitni su za uspješno izvođenje zavarivanja.

Postavljanje tehnike zavarivanja zahtijeva pravilno podešavanje napona, brzine dodavanja žice i temperature, uzimajući u obzir vrstu materijala i specifikacije projekta. Kontrola ovih parametara omogućava postizanje željenih rezultata, minimizirajući rizik od defekata kao što su pukotine i pore. Inspekcija i kontrola kvalitete zavara ključni su za osiguranje dugovječnosti i funkcionalnosti zavara. Korištenje metoda poput vizualne inspekcije, ultrazvuka i rendgenskog ispitivanja pomaže u identifikaciji i korekciji eventualnih nedostataka, čime se osigurava da zavar ispunjava sve tehničke i sigurnosne zahtjeve.

**Ključne riječi:** MIG zavarivanje, zavar, plin, aluminijske žice

## **SUMMARY**

The process of creating welds using the MIG (Metal Inert Gas) method is a fundamental technique in the welding industry due to its versatility and efficiency. This method employs an inert gas, such as argon or a mixture of argon and CO<sub>2</sub>, to protect the weld pool from atmospheric contamination, ensuring high quality and strength of the weld. The process involves several critical steps, including material preparation, equipment setup, and control of welding parameters. The first step in MIG welding is material preparation, which includes cleaning surfaces of rust, dirt, and grease to ensure good contact between the electrode and the material. Following this, selecting and configuring the equipment, including the welding machine, electrode, and gas system, is crucial for successful welding.

Setting the welding technique requires proper adjustment of voltage, wire feed speed, and temperature, considering the type of material and project specifications. Controlling these parameters helps achieve the desired results while minimizing the risk of defects such as cracks and porosity. Inspection and quality control of the welds are essential to ensure the durability and functionality of the weld. Utilizing methods like visual inspection, ultrasonic testing, and X-ray examination helps identify and correct any potential defects, ensuring that the weld meets all technical and safety standards.

Key words: MIG welding, weld, gas, aluminum wires



# Sadržaj

SAŽETAK .....	I
SUMMARY .....	II
1. UVOD .....	1
1.1. Hipoteza istraživanja .....	2
1.2. Predmet istraživanja .....	3
1.3. Problem istraživanja .....	3
1.4. Cilj istraživanja.....	4
1.5. Metodologija istraživanja .....	4
2. TEMELJNI PRINCIPI MIG ZAVARIVANJA .....	6
2.1. Povijesni razvoj MIG postupka zavarivanja.....	6
2.2. Osnovni principi MIG zavarivanja .....	8
2.2.1. Funkcioniranje postupka .....	9
2.2.2. Uloga inertnog plina u zaštiti zavarivačkog luka i taline .....	11
2.2.3. Prednosti MIG zavarivanja u odnosu na druge metode zavarivanja .....	12
2.3. Priprema za MIG zavarivanje.....	14
3. OPREMA I TEHNIKE U MIG ZAVARIVANJU .....	19
3.1. Temeljna oprema za MIG zavarivanje.....	19
3.2. Analitički odabir žica i plina za zavarivačke uvjete .....	23
3.3. Priprema za MIG zavarivanje.....	26
3.4. Tehnike i prakse u MIG zavarivanju .....	28
4. SIGURNOST PRI MIG ZAVARIVANJU I KONTROLA KVALITETE ZAVARA .....	34
4.1. Zdravlje i sigurnost pri MIG zavarivanju .....	34
4.2. Inspekcija i kontrola kvalitete zavara.....	36
5. ZAKLJUČAK .....	39
LITERATURA .....	42
POPIS SLIKA .....	43
POPIS TABLICA .....	44

# 1. UVOD

Zavarivanje je proces spajanja materijala, najčešće metala ili termoplastike, pomoću topline ili pritiska. MIG (Metal Inert Gas) zavarivanje, poznato i kao GMAW (Gas Metal Arc Welding), jedan je od najpopularnijih i najčešće korištenih postupaka zavarivanja. Ovaj postupak koristi kontinuiranu žicu kao elektrodu koja se topi kako bi se formirao zavareni spoj, uz pomoć inertnog plina koji štiti zavar od atmosferskih utjecaja. MIG zavarivanje je cijenjeno zbog svoje brzine, učinkovitosti i svestranosti te je primjenjivo u raznim industrijama, uključujući automobilsku, zrakoplovnu i građevinsku industriju. MIG zavarivanje razvijeno je tijekom Drugog svjetskog rata za potrebe brze i učinkovite proizvodnje u ratnim uvjetima. Prvi patenti za ovaj postupak zavarivanja registrirani su krajem 1940-ih godina. Tijekom godina, tehnologija je evoluirala i postala široko prihvaćena u industriji zbog svojih brojnih prednosti u odnosu na tradicionalne metode zavarivanja.

MIG zavarivanje koristi električni luk koji se formira između potrošne žice-elektrode i osnovnog materijala. Inertni plin (najčešće argon ili mješavina argona i CO<sub>2</sub>) koristi se za zaštitu zavarivačkog luka i rastaljenog bazena od atmosferskih utjecaja, kao što su kisik i dušik, koji mogu uzrokovati oksidaciju i kontaminaciju zavara. Proces je poluautomatski ili automatski, što omogućuje preciznu kontrolu i visokokvalitetne zavarene spojeve. Za uspješno MIG zavarivanje potrebna je odgovarajuća oprema: zavarivački aparat koji kontrolira struju i napon potrebne za zavarivanje; kontinuirana žica koja služi kao elektroda i dodani materijal; plinska boca koja sadrži inertni plin; pištolj za zavarivanje kroz koji prolazi žica i plin, te se formira zavarivački luk; te zaštitna oprema, uključujući maske, rukavice i zaštitnu odjeću za sigurnost zavarivača.

Priprema je ključna za postizanje kvalitetnog zavara. Priprema uključuje čišćenje materijala od svih nečistoća, ulja, hrđe i oksida s površine koja će se zavarivati; postavljanje dijelova u ispravan položaj i osiguravanje adekvatnog pritiska i zazora; te postavljanje odgovarajuće struje, napona, brzine žice i protoka plina, prilagođeno materijalu i debljini zavara. MIG zavarivanje zahtijeva praksu i vještinu. Ključni elementi uključuju kretanje pištolja za održavanje stabilnog luka pomoću ravnomjernih i kontroliranih pokreta; kontrolu brzine zavarivanja kako bi se osigurala konzistentna kvaliteta zavara; održavanje ispravnog kuta pištolja prema materijalu za optimalni zavar; te stalno praćenje zavarivačkog bazena i zavara kako bi se pravovremeno uočile nepravilnosti.

Zavarivanje nosi određene rizike, stoga su sigurnosne mjere od ključne važnosti. To uključuje korištenje odgovarajuće zaštitne opreme kako bi se spriječile ozljede od UV zračenja i prskanja rastaljenog metala; osiguranje adekvatne ventilacije kako bi se smanjila izloženost dimovima i plinovima; te redovitu obuku o sigurnosnim postupcima i pravilnom rukovanju opremom. Kvaliteta zavara je ključna za sigurnost i trajnost konstrukcija. Metode inspekcije uključuju vizualnu inspekciju kao prvu liniju obrane gdje se vizualno provjerava izgled zavara; NDT (nedestruktivno testiranje) kao što su ultrazvuk, rendgensko snimanje i penetrantsko ispitivanje za otkrivanje unutarnjih defekata; te mehanička ispitivanja čvrstoće i duktilnosti zavara.

MIG zavarivanje je prilagodljivo i koristi se u raznim industrijama. Neke od naprednih tehnika uključuju pulsni MIG, tehniku koja koristi pulsirajuću struju za smanjenje prskanja i poboljšanje kontrole topline; te robotizirano zavarivanje, korištenje robota za automatsko izvođenje zavara, povećavajući produktivnost i konzistentnost. MIG zavarivanje je svestran i učinkovit postupak zavarivanja koji je postao standard u mnogim industrijama. Razumijevanje principa, opreme, tehnika i sigurnosnih mjera ključ je za postizanje visokokvalitetnih zavara. Kroz kontinuiranu praksu, edukaciju i inovacije, MIG zavarivanje će i dalje igrati ključnu ulogu u proizvodnji i industriji.

## **1.1. Hipoteza istraživanja**

Osnovna hipoteza ovog istraživanja je:

Upotreba MIG postupka zavarivanja omogućuje postizanje visoke kvalitete zavara, povećava produktivnost, te smanjuje troškove proizvodnje u usporedbi s drugim metodama zavarivanja.

MIG postupak zavarivanja koristi kontinuiranu žicu kao elektrodu i inertni plin za zaštitu zavara od kontaminacije. Ovaj postupak omogućuje precizno upravljanje parametrima zavarivanja kao što su struja, napon, brzina zavarivanja i protok zaštitnog plina. Zahvaljujući ovim parametrima, moguće je postići ravnomjerne i čiste zavare s minimalnom količinom defekata kao što su poroznost, pukotine ili neadekvatna penetracija. Osim toga, MIG postupak omogućuje zavarivanje različitih vrsta materijala i legura, pružajući fleksibilnost u primjeni. MIG zavarivanje je poznato po svojoj visokoj produktivnosti zbog upotrebe kontinuirane žice koja se automatski uvlači u područje zavarivanja, što smanjuje potrebu za čestim

zaustavljanjem i ponovnim pokretanjem procesa. Brzina zavarivanja je također veća u usporedbi s drugim metodama poput TIG zavarivanja, što rezultira kraćim vremenom potrebnim za završetak zavarivačkih operacija. Ova karakteristika je posebno važna u industrijama gdje je visoka brzina proizvodnje ključna, kao što su automobilska industrija i brodogradnja.

## **1.2. Predmet istraživanja**

Predmet ovog završnog rada je izrada zavara pomoću MIG (Metal Inert Gas) postupka, jednog od najraširenijih i najvažnijih postupaka zavarivanja u suvremenoj metaloprerađivačkoj industriji. MIG postupak koristi kontinuiranu žicu kao elektrodu koja se taloži u spoju između dvaju metala, uz korištenje inertnog plina (najčešće argona ili smjese argona i CO<sub>2</sub>) za zaštitu zavara od kontaminacije. Istraživanje će obuhvatiti teorijske osnove MIG zavarivanja, analizu tehnoloških parametara, te praktične aspekte izrade zavara na različitim vrstama metala i legura.

## **1.3. Problem istraživanja**

Problem istraživanja odnosi se na identifikaciju i optimizaciju ključnih faktora koji utječu na kvalitetu zavara izrađenih MIG postupkom. Specifični problemi koje će istraživanje obuhvatiti uključuju:

- Kvaliteta zavara: Utvrđivanje utjecaja različitih parametara zavarivanja (struja, napon, brzina zavarivanja, protok zaštitnog plina) na kvalitetu zavara, uključujući postizanje odgovarajuće penetracije, formiranja zavara i minimalizaciju poroznosti ili drugih nedostataka.
- Odabir materijala: Analiza kako različiti materijali i legure (npr. čelik, aluminij, nehrđajući čelik) reagiraju na MIG zavarivanje, te kako svojstva materijala (kao što su debljina, toplinska vodljivost i površinska obrada) utječu na proces zavarivanja i konačnu kvalitetu zavara.
- Zaštita od kontaminacije: Istraživanje učinkovitosti različitih zaštitnih plinova i njihovih smjesa u zaštiti zavara od kontaminacije (oksidacija, inkluzije) tijekom procesa zavarivanja.
- Produktivnost i ekonomičnost: Procjena produktivnosti MIG postupka u usporedbi s drugim zavarivačkim postupcima (TIG, MAG, elektrolučno zavarivanje), te analiza

ekonomičnosti s obzirom na potrošnju materijala, energetska učinkovitost i troškove rada.

- Primjene i ograničenja: Identifikacija specifičnih primjena gdje je MIG postupak najpogodniji, te utvrđivanje ograničenja ovog postupka u različitim industrijskim kontekstima (automobilska industrija, brodogradnja, građevinarstvo).

#### **1.4. Cilj istraživanja**

Cilj ovog završnog rada je detaljno istražiti i analizirati postupak zavarivanja MIG (Metal Inert Gas) metodom, s naglaskom na praktičnu primjenu i teorijske aspekte. Kroz ovaj rad, nastojat će se obuhvatiti sve ključne komponente MIG zavarivanja, uključujući odabir materijala, pripremu, izvođenje zavarivanja te evaluaciju kvalitete zavara. Poseban naglasak će biti stavljen na razumijevanje fizikalnih i kemijskih procesa koji se odvijaju tijekom MIG zavarivanja, kao i na identifikaciju i rješavanje uobičajenih problema i izazova koji se javljaju u praksi. Svrha ovog završnog rada je pružiti sveobuhvatan i sistematičan pregled MIG zavarivanja, kako bi se unaprijedilo znanje i vještine studenata, ali i stručnjaka u području strojarstva i zavarivanja.

#### **1.5. Metodologija istraživanja**

Korištene metode u ovom radu su metode uspoređivanja, empirijska istraživanja, literaturna analiza, induktivne metode, metoda analize, metoda konkretizacije i metoda generalizacije. Metoda uspoređivanja omogućuje usporedbu različitih pristupa održivom razvoju turističkih destinacija, identificiranje najboljih praksi, te procjenu njihove učinkovitosti u različitim kontekstima. Empirijska istraživanja uključuju prikupljanje podataka izravno s terena putem anketa, intervjua, i promatranja. Korištenje empirijskih istraživanja osigurava relevantnost i aktualnost podataka. Literaturna analiza podrazumijeva pregled postojeće literature kako bi se identificirale postojeće teorije, modeli i istraživanja vezana uz MIG zavarivanje.

Induktivne metode omogućuju zaključivanje općih principa na temelju specifičnih opažanja. Kroz induktivne metode, moguće je formulirati nove uvide i zaključke koji se temelje na stvarnim iskustvima i podacima. Metoda analize uključuje razlaganje složenih problema na

njihove osnovne sastavnice kako bi se detaljno razumjeli pojedini elementi i njihovi međusobni odnosi. Metoda generalizacije omogućava širenje zaključaka donesenih na temelju specifičnih opažanja na širi kontekst. Ove metode zajedno omogućuju sveobuhvatno i temeljito istraživanje MIG zavarivanja.

## **2. TEMELJNI PRINCIPI MIG ZAVARIVANJA**

MIG zavarivanje, poznato i kao GMAW (Gas Metal Arc Welding), jedan je od najraširenijih postupaka zavarivanja zbog svoje svestranosti, brzine i učinkovitosti. Razumijevanje temeljnih principa MIG zavarivanja ključno je za postizanje visokokvalitetnih zavara i sigurnost u procesu rada. Ovi principi obuhvaćaju osnovne mehanizme koji omogućuju zavarivanje, uključujući formiranje električnog luka, zaštitu zavara pomoću inertnog plina, te kontrolu parametara kao što su struja, napon i brzina žice. U drugom poglavlju istražiti će se kako se ovi faktori međusobno povezuju i utječu na konačni rezultat zavarivanja, pružajući čvrst temelj za razumijevanje i primjenu MIG zavarivanja u različitim industrijama i primjenama.

### **2.1. Povijesni razvoj MIG postupka zavarivanja**

MIG (Metal Inert Gas) postupak zavarivanja, također poznat kao GMAW (Gas Metal Arc Welding) (Williams, 2001.), jedan je od najvažnijih i najraširenijih postupaka zavarivanja u modernoj industriji. Razvoj ovog postupka ima bogatu povijest koja se proteže kroz nekoliko desetljeća, obuhvaćajući inovacije u tehnologiji i materijalima, kao i prilagodbe koje su omogućile njegovu široku primjenu u različitim industrijama. Prije nego što se detaljnije osvrnemo na razvoj MIG zavarivanja, važno je spomenuti nekoliko ključnih preteča u području zavarivanja. Zavarivanje je prisutno u različitim oblicima već stoljećima, no tek krajem 19. i početkom 20. stoljeća dolazi do značajnih napredaka. Razvoj elektroda za elektrolučno zavarivanje (SMAW) krajem 19. stoljeća postavio je temelje za buduće tehnologije zavarivanja.

Prvi koraci prema razvoju MIG zavarivanja započeli su u prvoj polovici 20. stoljeća. U 1920-ima i 1930-ima, industrijski stručnjaci i inženjeri počeli su eksperimentirati s različitim vrstama zaštitnih plinova kako bi poboljšali kvalitetu zavara i smanjili oksidaciju (Haynes, 2005.). U ovom razdoblju, ugljični dioksid i argon su identificirani kao potencijalni zaštitni plinovi, koji su mogli zaštititi zavareni spoj od atmosferskih utjecaja. Pravi razvoj MIG postupka zavarivanja započinje tijekom Drugog svjetskog rata (Williams, 2001.). Povećana potreba za brzim i učinkovitim metodama spajanja metala potaknula je istraživanja i inovacije u području zavarivanja. U SAD-u, 1940-ih godina, razvijena je prva prava MIG zavarivačka tehnologija (Williams, 2001.). Najvažniji napredak u ovom razdoblju bio je korištenje argona

kao zaštitnog plina, što je omogućilo stabilan i čist zavareni spoj. Prvi MIG postupci korišteni su za zavarivanje aluminijskih i magnezijevih legura koje su bile ključne za proizvodnju zrakoplova. U 1950-ima, MIG zavarivanje počinje ulaziti u širu industrijsku primjenu (Haynees, 2005.). U ovom razdoblju, tehnologija se usavršava, a postupak postaje sve učinkovitiji i pouzdaniji. Pojava automatskih i poluautomatskih zavarivačkih sustava dodatno je poboljšala produktivnost. Također, tijekom ovog razdoblja razvijene su nove vrste žica za zavarivanje koje su poboljšale kvalitetu zavara.

Tijekom 1960-ih i 1970-ih, MIG postupak zavarivanja doživljava daljnji tehnološki napredak. Razvoj pulsog zavarivanja (GMAW-P) omogućio je zavarivanje tanjih materijala i poboljšanje kontrole prijenosa metala (Haynes, 2005.). Osim toga, korištenje mješavina plinova, poput argona s dodatkom CO<sub>2</sub> ili O<sub>2</sub>, omogućilo je bolje prilagodbe postupka za različite materijale i debljine. U ovom razdoblju, MIG zavarivanje postaje standardna metoda u mnogim industrijama, uključujući automobilsku industriju, brodogradnju, građevinarstvo i proizvodnju cjevovoda. Fleksibilnost i učinkovitost postupka pridonijeli su njegovoj popularnosti. U 1980-ima i 1990-ima, tehnološki napredak u području elektronike i računalstva počeo je utjecati i na zavarivačku industriju. Digitalizacija i razvoj mikroprocesorskih sustava omogućili su precizniju kontrolu parametara zavarivanja, što je dovelo do poboljšanja kvalitete zavara i smanjenja količine otpada. Automatski zavarivački sustavi postali su sofisticiraniji, omogućavajući bržu i točniju proizvodnju.

Pulsni MIG zavarivanje, razvijeno tijekom 1980-ih godina, predstavlja značajnu inovaciju koja je omogućila zavarivanje tanjih materijala uz minimalno prskanje i bolju kontrolu toplinske ulazne energije (Williams, 2001.). Ova tehnika koristi pulsirajuću struju za kontrolu prijenosa metala kroz luk, što smanjuje rizik od pregorijevanja materijala i poboljšava kvalitetu zavara. Pulsni MIG zavarivanje postalo je posebno korisno u industrijama kao što su automobilska i zrakoplovna, gdje su preciznost i kvaliteta zavara od ključne važnosti. Uvođenje robotizacije i automatizacije u MIG zavarivanje tijekom 1990-ih godina i ranih 2000-ih godina donijelo je revolucionarne promjene u proizvodnim procesima (Williams, 2001.). Roboti su preuzeli zavarivačke zadatke, omogućujući dosljednu kvalitetu zavara i povećanje produktivnosti. Automatizirani sustavi također su smanjili potrebu za ručnim radom, čime su poboljšali sigurnost na radnom mjestu i smanjili troškove proizvodnje.

Integracija MIG zavarivanja s CAD (Computer-Aided Design) i CAM (Computer-Aided Manufacturing) tehnologijama omogućila je još veću preciznost i kontrolu u proizvodnim



procesima (Armstrong, 2016.). CAD/CAM sustavi omogućili su dizajniranje i simulaciju zavarivačkih spojeva prije nego što se započne s proizvodnjom, što je rezultiralo smanjenjem grešaka i otpada. Ova integracija također je omogućila bržu prilagodbu proizvodnih procesa novim dizajnima i specifikacijama. Posljednjih godina, inovacije u materijalima i opremi dodatno su unaprijedile MIG zavarivanje. Novi materijali za žice-elektrode, uključujući visoko legirane žice i žice s posebnim premazima, poboljšali su performanse zavara i proširili mogućnosti zavarivanja različitih materijala (Armstrong, 2016.). Napredni zavarivački aparati s digitalnim kontrolama omogućili su još preciznije podešavanje parametara zavarivanja i integraciju s drugim proizvodnim sustavima.

Ključne prekretnice i inovacije u razvoju MIG tehnologije transformirale su ovu metodu zavarivanja od jednostavnog postupka spajanja metala do sofisticiranog i visoko učinkovitog proizvodnog procesa. Kroz povijest, MIG zavarivanje se kontinuirano razvijalo, usvajajući nove tehnologije i prilagođavajući se potrebama industrije. Danas, MIG zavarivanje igra ključnu ulogu u mnogim sektorima, osiguravajući kvalitetne, pouzdane i ekonomski isplative zavarene spojeve. Budućnost MIG zavarivanja vjerojatno će donijeti daljnje inovacije, uključujući napredne materijale, automatizaciju i digitalizaciju, koji će nastaviti unapređivati ovu ključnu tehnologiju.

## **2.2. Osnovni principi MIG zavarivanja**

MIG (Metal Inert Gas) zavarivanje, također poznato kao GMAW (Gas Metal Arc Welding), temelji se na nekoliko osnovnih principa koji omogućuju učinkovito i kvalitetno spajanje metala. Razumijevanje ovih principa ključno je za postizanje optimalnih rezultata u zavarivanju. Srce MIG zavarivanja je električni luk, koji se formira između potrošne žice-elektrode i osnovnog materijala (Yost, 2008.). Električni luk nastaje kada se struja propušta kroz žicu do spoja s osnovnim materijalom, stvarajući visoku temperaturu koja topi žicu i materijal, formirajući zavareni spoj. Temperatura električnog luka može doseći i do 6000 °C, što omogućava brzo i učinkovito spajanje metala (Williams, 2001.). Kontrola električnog luka ključna je za kvalitetu zavara. Stabilan i konzistentan luk osigurava ravnomjerno topljenje žice i materijala, što rezultira čvrstim i homogeno raspoređenim zavarenim spojevima. Promjene u

naponu ili struji mogu utjecati na stabilnost luka, pa je precizno podešavanje zavarivačkog aparata od vitalne važnosti.

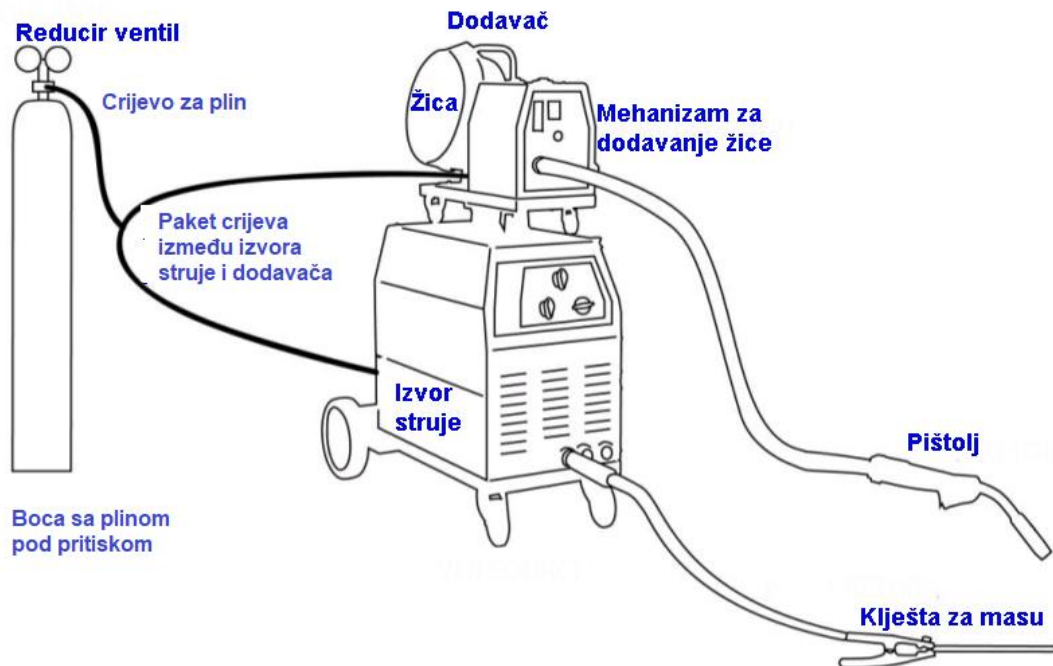
MIG zavarivanje koristi inertni plin kao zaštitu za električni luk i rastaljeni bazen od atmosferskih utjecaja. Inertni plinovi, poput argona ili mješavine argona i ugljičnog dioksida (CO<sub>2</sub>), sprječavaju kontaminaciju zavara kisikom, dušikom i drugim plinovima iz zraka, koji mogu uzrokovati oksidaciju, poroznost i slabljenje zavara (Maughan, 2010.). Odabir zaštitnog plina ovisi o vrsti materijala koji se zavaruju. Na primjer, čisti argon često se koristi za zavarivanje aluminija i drugih obojenih metala, dok se mješavine argona i CO<sub>2</sub> koriste za zavarivanje čelika, pružajući bolju penetraciju i stabilnost luka (maughan, 2010.). Kontinuirani protok plina tijekom zavarivanja osigurava optimalne uvjete za stvaranje kvalitetnog zavara.

MIG zavarivanje koristi kontinuiranu žicu kao elektroda i dodani materijal. Žica se neprekidno dovodi iz zavojnice kroz zavarivački pištolj do zavara, gdje se topi i spaja s osnovnim materijalom (Yost, 2008.). Žice dolaze u različitim promjerima i materijalima, prilagođenim specifičnim potrebama zavarivanja. Brzina dodavanja žice može se prilagoditi ovisno o debljini materijala i željenoj brzini zavarivanja. Optimalna brzina dodavanja žice osigurava ravnomjerno topljenje i stvaranje čvrstog zavara bez praznina ili prekomjernog taljenja. Automatski sustavi za dodavanje žice omogućuju preciznu kontrolu i povećavaju učinkovitost zavarivanja.

### **2.2.1. Funkcioniranje postupka**

MIG zavarivanje temelji se na stvaranju električnog luka između kontinuirane žice elektroda i zavarenog materijala. Žica elektroda se neprekidno dovodi iz koluta kroz zavarivačku pušku i služi kao dodani materijal za stvaranje zavara. Ovaj postupak koristi zaštitni plin, obično inertni plin poput argona ili mješavinu plinova, kako bi se spriječila kontaminacija zavarene zone atmosferom, uključujući kisik i dušik (Hayes, 2005.). Osnovna oprema za MIG zavarivanje uključuje zavarivački stroj, žicu elektroda, zavarivačku pušku, boce s plinom i regulatore protoka plina. Zavarivački stroj generira električni luk potreban za zavarivanje, dok zavarivačka puška omogućuje vođenje žice elektroda i kontrolu luka (Armstrong, 2016.). Boce s plinom sadrže zaštitni plin koji se dovodi do puške kako bi se stvorila zaštitna atmosfera, a regulatori protoka plina reguliraju količinu plina.

Slika 1. Uređaj za MIG zavarivanje



Izvor: obrada autora prema Metron (2024). MIG/MAG postupak zavarivanja, dostupno na <https://metron.ba/mig-mag-postupak-zavarivanja/>, pristupljeno 15.09.2024.

Proces MIG zavarivanja uključuje pripremu materijala, postavljanje parametara na zavarivačkom stroju, započinjanje zavarivanja pritiskom na okidač zavarivačke puške, kontrolu luka tijekom zavarivanja te hlađenje i završnu obradu zavarenog spoja (Yost, 2008.). Priprema materijala zahtijeva čišćenje površina kako bi se uklonili prljavština, hrđa i ulje, dok postavljanje parametara uključuje odabir napona, struje, brzine žice i protoka plina. Tijekom zavarivanja, važno je pažljivo kontrolirati položaj i kretanje puške kako bi se postigao ravnomjeren zavar i izbjegli defekti poput poroznosti i pukotina. Nakon zavarivanja, zavarena zona se hladi i može se obrađivati kako bi se postigao željeni izgled i svojstva. MIG zavarivanje ima brojne prednosti, uključujući visoku produktivnost, kvalitetu zavara, svestranost u zavarivanju različitih metala te mogućnost automatizacije (Maughan, 2010.). Međutim, postoje i izazovi, poput osjetljivosti na vjetar koji može ometati zaštitu zavarene zone, potreba za kvalitetnom opremom te početnih ulaganja koja mogu biti viša u usporedbi s nekim drugim postupcima.

MIG zavarivanje je složen, ali izuzetno učinkovit postupak koji igra ključnu ulogu u suvremenoj industriji. Razumijevanje osnovnih principa, opreme, procesa i izazova povezanih

s MIG zavarivanjem ključno je za postizanje visokokvalitetnih zavara i maksimalne produktivnosti. Kontinuirano usavršavanje tehnike i prilagodba specifičnim uvjetima i zahtjevima osiguravaju da MIG zavarivanje ostane nezamjenjiv alat u mnogim industrijskim primjenama.

### **2.2.2. Uloga inertnog plina u zaštiti zavarivačkog luka i taline**

U MIG (Metal Inert Gas) zavarivanju, inertni plin igra ključnu ulogu u očuvanju kvalitete zavarivačkog luka i taline. U ovom procesu, primjena inertnog plina nije samo dodatak, već osnovni element koji omogućava stvaranje čvrstih, čistih i pouzdanih zavara. Jedna od osnovnih funkcija inertnog plina u MIG zavarivanju je zaštita zavarivačkog luka i rastaljenog metala od atmosferskih utjecaja (Pherson, 2012.). Tijekom zavarivanja, zavarivački luk stvara ekstremnu temperaturu koja može uzrokovati brzu oksidaciju i kontaminaciju rastaljenog metala. Atmosferski plinovi poput kisika i dušika mogu reagirati s rastaljenim metalom, stvarajući neželjene spojeve poput oksida i nitrida, što može negativno utjecati na čvrstoću i kvalitetu zavara. Inertni plinovi, kao što su argon, helij i njihove mješavine, stvaraju zaštitni sloj oko zavarivačkog luka i taline, sprječavajući kontakt s atmosferom (Campbell, 2014.). Ovaj sloj inertnog plina štiti rastaljeni metal od neželjenih kemijskih reakcija i osigurava da se zavarene komponente spoje čisto i bez defekata.

Inertni plin igra ključnu ulogu u stabilnosti zavarivačkog luka. Električni luk u MIG zavarivanju stvara visoku temperaturu koja topi žicu i osnovni materijal. Stabilan luk osigurava ravnomjerno topljenje materijala i stvaranje kvalitetnog zavara (Campbell, 2014.). Ipak, bez odgovarajuće zaštite, plamen može biti nestabilan, uzrokovati prekomjerno prskanje i nepravilnosti u zavaru. Inertni plin pomaže u održavanju stabilnosti luka smanjujući utjecaj vanjskih čimbenika kao što su promjene temperature, vjetar ili zagađenje zraka (Pherson, 2012.). Ova stabilnost omogućava preciznu kontrolu nad procesom zavarivanja, što rezultira uniformnim i visokokvalitetnim zavarenim spojevima.

Kontrola toplinskog utjecaja tijekom zavarivanja je bitna za izbjegavanje prekomjernog taljenja i deformacija materijala. Inertni plin pomaže u reguliranju toplinskog utjecaja na zavar, smanjujući brzinu hlađenja i minimizirajući temperaturne fluktuacije koje mogu uzrokovati napetosti i deformacije. Zaštitni plin pomaže u održavanju optimalne temperature zavarivačkog

luka i taline, osiguravajući ravnomjerno hlađenje i sprječavajući pojavu termičkih pukotina ili drugih nepravilnosti u zavaru (Armstrong, 2016.). U kombinaciji s pravilnim podešavanjem opreme i kontrolom brzine zavarivanja, inertni plin osigurava visoku kvalitetu i dugovječnost zavara. Vrsta inertnog plina koji se koristi u MIG zavarivanju ovisi o vrsti materijala koji se zavaruje i specifičnim zahtjevima zavarivanja. Najčešće korišteni plinovi su argon, helij i mješavine argona s ugljičnim dioksidom (CO<sub>2</sub>). Svaki od ovih plinova ima specifična svojstva koja utječu na kvalitetu zavara (Armstrong 2016.):

- Argon: Često se koristi za zavarivanje nehrđajućeg čelika i aluminija zbog svoje stabilnosti i sposobnosti da stvori čist i glatki zavar. Argon pruža odličnu zaštitu i stabilnost luka, čineći ga idealnim za tanke materijale i precizne aplikacije.
- Helij: Helij je poznat po svojoj visokoj toplinskoj vodljivosti, što ga čini pogodnim za zavarivanje debljih materijala i za brže zavarivanje. Iako je skuplji, koristi se u situacijama gdje je potrebna dodatna toplina i veća brzina zavarivanja.
- Mješavine argona i CO<sub>2</sub>: Ove mješavine koriste se za zavarivanje čelika, gdje CO<sub>2</sub> poboljšava penetraciju i smanjuje prskanje, dok argon doprinosi stabilnosti luka i smanjenju oksidacije.

Inertni plin igra neprocjenjivu ulogu u MIG zavarivanju, pružajući zaštitu zavarivačkog luka i taline od atmosferskih utjecaja, osiguravajući stabilnost luka i kontrolirajući toplinski utjecaj. Odabir odgovarajućeg plina i pravilna primjena ključni su za postizanje visokokvalitetnih zavara i dugotrajnu pouzdanost zavarivačkog procesa. Razumijevanje uloge inertnog plina omogućuje zavarivačima da optimiziraju svoj rad i postižu najbolje rezultate u različitim industrijskim aplikacijama.

### **2.2.3. Prednosti MIG zavarivanja u odnosu na druge metode zavarivanja**

U usporedbi s drugim metodama zavarivanja, MIG zavarivanje nudi niz prednosti koje ga čine popularnim izborom u industriji. U ovom tekstu analizirat ćemo prednosti MIG zavarivanja u odnosu na druge metode, kao što su MMA (Manual Metal Arc), TIG (Tungsten Inert Gas) i MAG (Metal Active Gas) zavarivanje, s naglaskom na učinkovitost, brzinu, svestranost i kvalitetu zavara (Fields, 2017.). Jedna od ključnih prednosti MIG zavarivanja je njegova brzina

i učinkovitost. MIG zavarivanje omogućuje visoku brzinu zavarivanja zahvaljujući kontinuiranoj žici koja se automatski doprema do zavarivačkog luka. Ova metoda omogućuje brzu proizvodnju uz minimalne prekide, što povećava produktivnost i smanjuje vrijeme provedeno na zavarivanju.

U usporedbi s drugim metodama, kao što je MMA zavarivanje, gdje se elektroda stalno mijenja i neprekidno treba pomicanje između elektroda, MIG zavarivanje nudi veću brzinu i manje prekida (Campbell, 2014.). Također, MIG zavarivanje ne zahtijeva dodatno čišćenje između slojeva, što dodatno poboljšava brzinu i učinkovitost procesa. Kvaliteta zavara proizvedenih MIG metodom je vrlo visoka. Kontinuirani protok žice i zaštita inertnim plinom minimiziraju kontaminaciju i oksidaciju taline, što omogućuje postizanje čvrstih i estetski prihvatljivih zavara. MIG zavarivanje proizvodi ravne i uniformne zavare s minimalnim prskanjem i nečistoćama.

Tablica 1. Usporedba MIG i tradicionalnih metoda zavarivanja

Prednost	MIG Zavarivanje	MMA Zavarivanje	TIG Zavarivanje	MAG Zavarivanje
Brzina i učinkovitost	Visoka brzina i učinkovitost	Spora i zahtijeva česte promjene elektroda	Srednja brzina i preciznost	Srednja brzina i učinkovitost
Kvaliteta zavara	Visoka, čista i uniformna	Kvalitetan, ali može zahtijevati dodatno čišćenje	Vrlo visoka, ali sporija	Visoka, ali može imati više prskanja
Svestranost	Široka primjena materijala i debljina	Ograničena primjena materijala	Visoka, ali sporija kod debljih materijala	Slična MIG, ali s aktivnim plinom
Lakša primjena	Jednostavna i pristupačna	Teža primjena, potrebna veća vještina	Složenija, zahtijeva visoku preciznost	Slična MIG, ali s potrebom za kontrolom plina

Izvor: prilagodba autora prema Campbell, 2014.)

U usporedbi s TIG zavarivanjem, koje je poznato po visokoj preciznosti i kvaliteti, MIG zavarivanje također nudi izvrsne rezultate, ali s većom brzinom i manje složenom obradom. TIG zavarivanje, iako pruža visoku kontrolu nad kvalitetom zavara, može biti sporije i zahtijeva veće vještine za postizanje sličnih rezultata u usporedbi s MIG metodom (Fields, 2017.). MIG zavarivanje je vrlo svestrano i može se koristiti za zavarivanje različitih materijala, uključujući čelik, nehrđajući čelik, aluminij i mnoge legure. Ova metoda također omogućuje zavarivanje različitih debljina materijala s lakoćom. Prilagodljivost MIG zavarivanja čini ga pogodnim za razne industrijske aplikacije, od automobilske industrije do brodogradnje.

U usporedbi s MMA zavarivanjem, koje je također svestrano, MIG zavarivanje nudi bolju kontrolu nad procesom i veću svestranost u primjeni materijala i debljina. MAG zavarivanje, koje je slična metoda, također nudi visoku svestranost, ali MIG zavarivanje omogućuje precizniju kontrolu nad kvalitetom i bržim postupkom (Campbell, 2014.). MIG zavarivanje je relativno lako za naučiti i primijeniti, što je čini popularnim izborom za mnoge industrije. Automatski proces i jednostavnost rada smanjuju potrebu za visokom razinom vještina i obuke, čineći MIG zavarivanje dostupnim za širok spektar korisnika. U usporedbi s TIG zavarivanjem, koje zahtijeva visoku razinu vještina i preciznosti za postizanje optimalnih rezultata, MIG zavarivanje nudi jednostavniji i pristupačniji način zavarivanja s manje potrebe za dugotrajnim učenjem i usavršavanjem.

### **2.3. Priprema za MIG zavarivanje**

Prije nego što se započne s MIG zavarivanjem, važno je da radno mjesto bude pripremljeno za sigurnu uporabu. Radna površina treba biti čista i slobodna od zapaljivih materijala poput drvenih piljevina, papirnog otpada ili kemikalija. Ove tvari mogu predstavljati ozbiljan rizik od požara zbog visokih temperatura i iskrica koje nastaju tijekom zavarivanja (Armstrong, 2016.). Pravilna ventilacija je ključna jer MIG zavarivanje stvara dimove i plinove koji mogu biti štetni ako se nakupljaju u radnom prostoru. Idealno je koristiti sustave za lokalnu ventilaciju ili ispušne ventilatore koji mogu usmjeriti štetne plinove izvan radnog prostora. Ako se zavarivanje obavlja u zatvorenim prostorima, preporučuje se uporaba respiratora ili maski s filtrima kako bi se smanjila izloženost dimovima i plinovima.

Zaštita od električnih udara također je bitna, budući da MIG zavarivanje koristi visoke napone i struje. Stoga je važno provjeriti da su svi električni kablovi i oprema u dobrom stanju i pravilno izolirani. Radnici trebaju biti obučeni za rad s električnim aparatom i koristiti izolirane alate (Khan, 2018.9e). Također, radno mjesto treba biti suho kako bi se spriječilo kontakt s vodom, što može povećati rizik od električnog udara. Zaštitna oprema je nužna za zavarivače kako bi se zaštitili od UV zračenja, topline, iskrica i rastaljenog metala (Maughan, 2010.). To uključuje zaštitnu masku s automatskim zatamnjenjem, zaštitne rukavice, dugmadi odjeću i čizme otporne na toplinu. Zaštitne naočale i respiratori također mogu biti potrebni u određenim uvjetima. Prva pomoć i hitni izlazi trebaju biti osigurani tako da su svi radnici upoznati s postupcima prve pomoći i znaju kako postupiti u slučaju nesreće (Khan, 2018.). Radno mjesto treba biti opremljeno sa svim potrebnim sredstvima za prvu pomoć, a radnici trebaju znati gdje se nalaze hitni izlazi i kako do njih doći u slučaju nužde.

Ergonomija igra ključnu ulogu u pripremi radnog mjesta. Radna stanica za MIG zavarivanje treba biti postavljena tako da omogućuje radniku rad u udobnom i sigurnom položaju. Radna površina treba biti u visini koja omogućuje radniku da zavaruje bez nepotrebnog naprezanja. Ako je potrebno, treba koristiti prilagodljive radne stolove ili nosače kako bi se omogućilo lakše pristupanje svim dijelovima materijala koji se zavaruju (Fields, 2017.). Organizacija alata i materijala može značajno utjecati na ergonomiju. Alati i materijali trebaju biti lako dostupni i organizirani na način koji minimizira nepotrebne pokrete i napor. Korištenje stalaka za žicu za zavarivanje i spremnika za materijal može pomoći u održavanju radnog mjesta urednim i organiziranim. Udobnost i podrška također su važni, budući da dugotrajno stajanje može uzrokovati umor i nelagodu (Pherson, 2012.). Stoga je važno koristiti antistresne prostirke za stajanje i prilagodljive stolice za sjedenje, ako je potrebno. Pravilna postava tijela i podrška za leđa mogu pomoći u smanjenju fizičkog napora tijekom zavarivanja. Upravljanje kablovima i cijevima povezanim s MIG zavarivačem treba biti pravilno organizirano kako bi se spriječili zapetljaji i nesreće. Korištenje kablinskih nosača i organizatora može pomoći u održavanju radnog prostora čistim i sigurnim. Također, redovito provjeravanje stanja kablova i cijevi osigurava da nisu oštećeni.

Priprema materijala za MIG zavarivanje ključna je faza u procesu zavarivanja koja značajno utječe na kvalitetu i uspješnost zavarenih spojeva. Kvalitetno pripremljeni materijali omogućuju postizanje čvrstih i pouzdanih zavarivačkih spojeva, dok nepravilna priprema može dovesti do različitih defekata i smanjenja integriteta zavara (Yost, 2008.9. Proces pripreme



materijala za MIG zavarivanje uključuje nekoliko ključnih koraka: čišćenje, brušenje i pozicioniranje. Čišćenje materijala je prvi i jedan od najvažnijih koraka u pripremi. Cjelokupna površina materijala mora biti očišćena od svih kontaminanata koji bi mogli utjecati na kvalitetu zavara. Prije početka zavarivanja, površine materijala moraju biti slobodne od masnoća, ulja i drugih kemikalija koje se mogu nalaziti zbog prethodne obrade ili rukovanja (Williams, 2001.). Ove tvari mogu uzrokovati stvaranje plinova tijekom zavarivanja, što može dovesti do poroznosti i slabih spojeva. Čišćenje se obično provodi s odgovarajućim otapalima ili deterdžentima, a površine se mogu obrisati krpom koja ne ostavlja vlakna.

Hrđa i oksidi mogu značajno smanjiti kvalitetu zavara jer ometaju pravilno spajanje metala. Za uklanjanje hrđe i oksida koriste se različite metode, uključujući mehaničko brušenje, upotrebu čistača i kemijskih sredstava koja razgrađuju okside i hrđu (aynes, 2005.). Ako materijali imaju boje ili druge premazne materijale, oni se također moraju ukloniti prije zavarivanja. Boje i premazi mogu uzrokovati stvaranje dima i plinova tijekom zavarivanja, što može negativno utjecati na kvalitetu zavara. Za njihovo uklanjanje koriste se odgovarajući odvijajući, abrazivni materijali ili kemijski čistači. Nakon čišćenja, slijedi brušenje materijala. Brušenje pomaže u stvaranju ravne, čiste površine koja je spremna za zavarivanje (Campbell, 2014.). Ovaj korak je bitan za osiguranje pravilnog prijanjanja zavarenih dijelova i postizanje optimalne čvrstoće spojeva. Brušenje uključuje:

Površine koje se trebaju zavariti moraju biti ravne i slobodne od nepravilnosti koje mogu otežati zavarivanje. Brušenje pomaže u izravnavanju površina i uklanjanju nepravilnosti kao što su udubljenja, izbočine i ogrebotine. Brušenje stvara hrapavu površinu koja poboljšava prijanjanje zavara. Prekomjerno brušenje može uzrokovati stvaranje finih čestica koje se mogu prenijeti na zavarenu površinu, dok nedovoljno brušenje može uzrokovati slabiju adheziju. Ako se zavarivanje vrši na dijelovima sa spojevima, ivice materijala moraju biti pravilno pripremljene kako bi se osiguralo da zavar bude pravilno oblikovan (Fileds, 2017.). To može uključivati stvaranje odgovarajućih kutova i nagiba kako bi se omogućila dobra penetracija zavara. Pozicioniranje materijala je posljednji korak u pripremi koji je ključan za pravilno izvršenje zavarivanja. Ispravno pozicioniranje materijala osigurava stabilnost tijekom zavarivanja i omogućuje precizno postavljanje elektroda i zavarivačke puške. Ovaj korak uključuje:

Dijelovi koji se trebaju zavariti trebaju biti postavljeni u ispravan položaj kako bi se omogućilo pravilno spajanje. To može uključivati korištenje stezaljki, držača ili drugih uređaja

za pričvršćivanje koji pomažu u održavanju stabilnosti materijala tijekom zavarivanja (Khan, 2018.). Dijelovi koji se zavaruju moraju biti pravilno poravnati kako bi se osigurala ravnomjerna raspodjela topline i materijala. To pomaže u postizanju ravnomjernog i kvalitetnog zavara. Razmaci između dijelova i kutovi moraju biti točno postavljeni kako bi se omogućila pravilna penetracija i kvalitetno zavarivanje. Pravilno postavljanje razmaka i kutova osigurava da zavar bude čvrst i pouzdan (Martin, 2020.). Priprema materijala za MIG zavarivanje, koja uključuje čišćenje, brušenje i pozicioniranje, ključna je za postizanje visokokvalitetnih zavara. Temeljita priprema osigurava pravilno spajanje metala, minimizira rizik od defekata i doprinosi dugovječnosti zavarenih spojeva. Kroz pažljivo provođenje svakog koraka pripreme, moguće je postići optimalne rezultate i osigurati uspješno zavarivanje.

Podešavanje zavarivačkog MIG aparata ključno je za postizanje kvalitetnih i stabilnih zavara, a tri glavna parametra koja treba prilagoditi su struja, napon i brzina žice. Svaki od tih parametara igra specifičnu ulogu u procesu zavarivanja i mora biti pravilno podešen kako bi se postigli optimalni rezultati. Struja, ili amperaža, je jedan od ključnih parametara u MIG zavarivanju. Količina struje koja se koristi direktno utječe na toplinsku energiju primjenjenu na materijal, što, pak, utječe na kvalitetu i čvrstoću zavara (Khan, 2018.). Veća struja omogućava veći dotok topline, što može biti korisno za zavarivanje debljih materijala ili za postizanje dublje penetracije. Međutim, previše visoka struja može uzrokovati pretjerano prskanje i pogoršati izgled zavara. S druge strane, niža struja koristi se za tanje materijale ili za finije radove. Premala struja može uzrokovati slabu penetraciju i neadekvatnu vezu između materijala (Fields, 2017.). Optimalna struja određuje se na temelju debljine materijala i vrste žice koja se koristi, a proizvođači žice često daju preporuke za idealni raspon struje za određene debljine materijala.

Napon, ili voltaža, također je ključan za stabilnost zavarivačkog luka i kvalitetu zavara. Napon kontrolira energiju koja se prenosi u zavarivački luk, čime utječe na toplinu koja se razvija u procesu (Armstrong, 2016.). Povećanje napona može uzrokovati širi luk i veći raspon topline, što može pomoći pri zavarivanju većih debljina materijala. Međutim, previše visok napon može uzrokovati prekomjerno prskanje i lošiju kontrolu luka. Niži napon može omogućiti bolju kontrolu i preciznost pri zavarivanju tanjih materijala, ali može rezultirati uskim i nerazmjernim lukom ako nije pravilno usklađen s ostalim parametrima (Khan, 2018.). Podesiti napon potrebno je u skladu s preporukama proizvođača materijala i prema zahtjevima specifičnog zavarivačkog zadatka.

Brzina žice, ili brzina dovoda žice, utječe na količinu materijala koji se dodaje u zavarivački luk, što direktno utječe na veličinu i ravnotežu zavara. Brža brzina dovoda omogućava veći protok materijala, što može povećati brzinu zavarivanja i poboljšati ispunjenje širokih spojeva (Martin, 2020.). Međutim, prekomjerna brzina može uzrokovati neadekvatno fuzioniranje i slabu stabilnost zavara. S druge strane, spora brzina dovoda smanjuje količinu dodanog materijala, što može biti korisno za preciznije zavarivanje ili za rad s tanjim materijalima. Ako je brzina preniska, može doći do prekida u zavaru i problema s kvalitetom spoja (Fileds, 2018.). Podešavanje brzine žice treba biti usklađeno s strujom i naponom kako bi se postigla optimalna ravnoteža i kvaliteta zavara.

Pravilno podešavanje zavarivačkog MIG aparata zahtijeva pažljivo balansiranje između struje, napona i brzine žice. Svaki od tih parametara treba biti prilagođen specifičnim uvjetima zavarivanja, uključujući vrstu materijala, debljinu i vrstu žice. Temeljito razumijevanje i prilagodba ovih parametara ključno je za postizanje kvalitetnih, dugotrajnih i estetski prihvatljivih zavara. Kroz pažljivo podešavanje i usklađivanje svih aspekata zavarivanja, zavarivači mogu poboljšati svoje rezultate i osigurati visoke standarde u procesu zavarivanja.

### 3. OPREMA I TEHNIKE U MIG ZAVARIVANJU

MIG zavarivanje koristi kontinuiranu žičanu elektrodu koja se dovodi iz zavojnice kroz pištolj za zavarivanje, istovremeno emitirajući inertni plin poput argona ili mješavine argona i CO<sub>2</sub> kako bi zaštitio zavar od kontaminacije iz atmosfere. Oprema koja se koristi za MIG zavarivanje ključna je za postizanje kvalitete i pouzdanosti zavora, dok različite tehnike omogućuju prilagodbu procesa specifičnim zahtjevima zavarivanja. U trećem poglavlju detaljno će se razmotriti sve ključne komponente MIG zavarivanja, uključujući (Glicksman, 2014.):

- Izvor napajanja: Tipovi izvora napajanja koji se koriste u MIG zavarivanju, kao što su transformatori, inverterski izvori napajanja i pulsni izvori.
- Žičane elektrode: Materijali i veličine elektroda, te način njihove uporabe i održavanja.
- Plinske boce i regulatori: Uloga zaštitnog plina, tipovi plinova koji se koriste, te oprema za regulaciju i kontrolu protoka plina.
- Pištolj za zavarivanje: Dizajn, funkcionalnost i održavanje pištolja za zavarivanje, uključujući mlaznice, kontaktne vrhove i vođenje žice.
- Tehnike zavarivanja: Različite tehnike koje se koriste u MIG zavarivanju, kao što su zavarivanje kratkim spojevima, globularno zavarivanje, sprej luk i pulsni luk.

Cilj ovog poglavlja je pružiti sveobuhvatan pregled opreme i tehnika koje čine temelj uspješnog MIG zavarivanja, te omogućiti čitateljima razumijevanje kako pravilna uporaba i održavanje opreme, zajedno s odgovarajućim tehnikama, može značajno unaprijediti kvalitetu i produktivnost zavarivanja.

#### 3.1. Temeljna oprema za MIG zavarivanje

MIG zavarivanje, poznato i kao zavarivanje s metalnim inertnim plinom, popularna je metoda zavarivanja zbog svoje učinkovitosti, brzine i svestranosti. Ovo je postupak kojim se spojevi metala spajaju pomoću električnog luka koji topi metal i žicu za zavarivanje dok inertni plin štiti zavar od oksidacije (Callister, 2018.). Da bi ovaj proces bio uspješan, neophodna je odgovarajuća oprema. Ovaj tekst pruža detaljan pregled temeljne opreme potrebne za MIG zavarivanje, uključujući zavarivački aparat, plinsku bocu, žicu za zavarivanje i zaštitnu opremu.

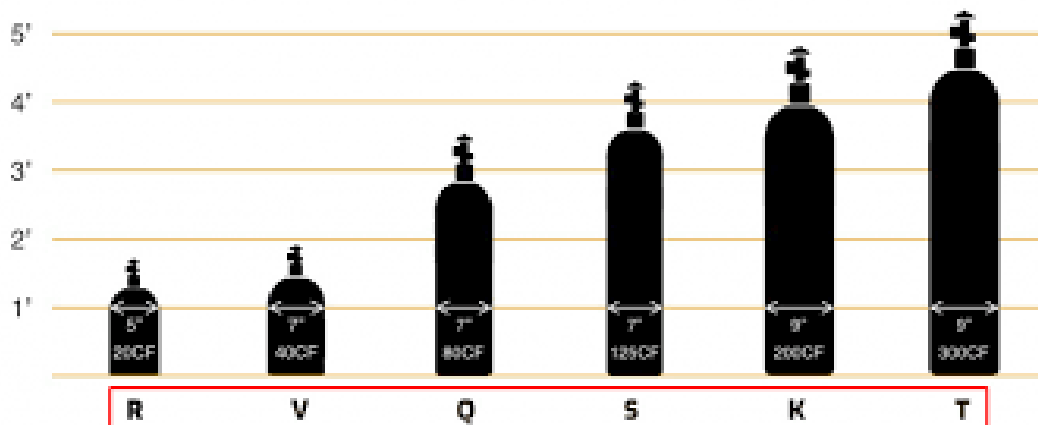
Slika 2. MIG – 160ER zavarivački aparat



Izvor: IPOTOLS (2024). IPOTOLS MIG-160ER aparat za zavarivanje, dostupno na <https://ipo-tools.hr/proizvod/ipotools-mig-160er-aparat-za-zavarivanje/>, prisutpljeno 17.09.2024.

Zavarivački aparat je srce svakog MIG zavarivanja. Postoji mnogo različitih modela, ali svi dijele osnovne komponente i funkcije. Aparat se sastoji od izvora struje, upravljačkog panela, pištolja za zavarivanje i kablova. Izvor struje može biti jednosmjernan (DC) ili izmjeničan (AC), pri čemu se DC češće koristi za MIG zavarivanje zbog stabilnijeg luka (Glicksman, 2018.). Izvor struje pruža električnu energiju potrebnu za stvaranje luka. Većina modernih aparata nudi mogućnost podešavanja struje i napona, što omogućava precizno podešavanje zavarivanja prema vrsti i debljini materijala. Pištolj za zavarivanje prenosi struju do žice za zavarivanje i omogućava kontrolu luka. Pištolj također ima prekidač za regulaciju dovoda žice i plina (Callister, 2014.). Kontrolni panel omogućava korisniku podešavanje parametara zavarivanja, uključujući brzinu dovoda žice, napona i struje. Kablovi povezuju pištolj za zavarivanje s izvorom struje i plinskom bocom, omogućavajući protok struje i plina.

Slika 3. Veličina plinskih boca za MIG zavarivanje



Izvor: Vatrozaštita (2024). Veličine CO<sub>2</sub> boca za varenje, dostupno na <https://vatrozastita.com/velicine-co2-boca-za-varenje-koju-izabrati/>, pristupljeno 17.09.2024.

Plinska boca je ključna komponenta u MIG zavarivanju jer osigurava inertni plin koji štiti zavar od oksidacije. Najčešće korišteni plinovi su argon i mješavine argona s ugljikovim dioksidom (CO<sub>2</sub>) (Dutton, 2017.). Čist argon se koristi za zavarivanje aluminija i drugih obojenih metala. Pruža stabilan luk i smanjuje prskanje. Najčešća mješavina je 75% argona i 25% CO<sub>2</sub>, koja se koristi za zavarivanje čelika. Ova mješavina pruža dobar balans između stabilnosti luka i penetracije zavara. Čisti CO<sub>2</sub> povremeno se koristi zbog niže cijene, ali može proizvesti više prskanja i manje kvalitetan zavar u usporedbi s mješavinom argona i CO<sub>2</sub> (Dutton 2017.).

Slika 4. Žice i elektrode za MIG zavarivanje



Izvor: Comet (2024). Žice za MIG zavarivanje dostupno na <https://www.comet.hr/zica-za-zavarivanje-ez-mig-307-si-proizvod-5455/>, pristupljeno 17.09.2024.

Žica za zavarivanje je potrošni materijal koji se tali tijekom zavarivanja kako bi se stvorio zavar. Kvaliteta i vrsta žice imaju značajan utjecaj na kvalitetu zavora. Čelična žica je najčešće korištena žica za zavarivanje niskougličnih čelika. Dolazi u različitim promjerima, obično od 0,6 mm do 1,6 mm (Callister, 2018.). Aluminijska žica koristi se za zavarivanje aluminija. Zbog niže točke taljenja aluminija, potrebna je posebna pažnja pri odabiru parametara zavarivanja. Žica od nehrđajućeg čelika koristi se za zavarivanje nehrđajućih čelika, pružajući visoku otpornost na koroziju.

Zaštitna oprema je neophodna za sigurnost zavarivača. Zavarivanje može proizvesti intenzivno svjetlo, toplinu i iskre koje mogu uzrokovati ozljede. Ključni elementi zaštitne opreme uključuju zavarivačku masku, rukavice, zaštitnu odjeću i zaštitu za uši (Lippold, 2015.). Zavarivačka maska štiti oči i lice od intenzivnog svjetla i iskrica. Moderne maske često dolaze s automatskim zatamnivanjem koje se prilagođava intenzitetu luka. Rukavice pružaju zaštitu od topline i iskrica. Trebaju biti izrađene od vatrootpornog materijala, kao što je koža. Zaštitna odjeća obuhvaća vatrootporna jaknu, hlače i cipele. Pruža zaštitu od iskrica i vrućine. Zaštita za uši može biti potrebna u bučnim radnim okruženjima kako bi se zaštitio sluh.

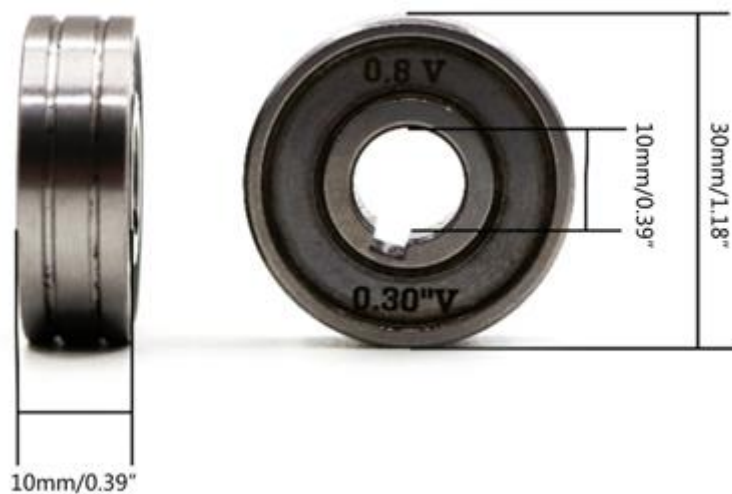
MIG zavarivanje je kompleksan proces koji zahtijeva preciznost i odgovarajuću opremu. Zavarivački aparat, plinska boca, žica za zavarivanje i zaštitna oprema čine temeljnu opremu potrebnu za kvalitetno i sigurno zavarivanje (Lippold, 2015.). Svaki element ima specifične funkcije i zahtijeva pažljivo odabiranje i održavanje kako bi se osigurali optimalni rezultati. Pravilan izbor i korištenje ove opreme ne samo da poboljšava kvalitetu zavara, već i povećava sigurnost i učinkovitost zavarivača.

### **3.2. Analitički odabir žica i plina za zavarivačke uvjete**

Analitički odabir žica i plina za zavarivačke uvjete ključan je za postizanje optimalne kvalitete zavara i učinkovitosti zavarivanja. U ovom procesu važno je uzeti u obzir nekoliko čimbenika, uključujući vrstu materijala koji se zavaruje, debljinu materijala, radne uvjete i specifične zahtjeve zavara. Slijedi detaljna analiza odabira žica i plina za različite zavarivačke uvjete. Za zavarivanje niskougličnih i niskolegiranih čelika najčešće se koriste žice od ugljičnog čelika, poput ER70S-6 (Huges, 2013.). Ove žice pružaju dobru otpornost na pucanje i visoku čvrstoću zavara. Za visokolegirane čelike, kao što su nehrđajući čelici, koriste se žice od nehrđajućeg čelika, primjerice ER308L, koje pružaju visoku otpornost na koroziju. Za zavarivanje aluminija koriste se aluminijske žice, poput ER4043 ili ER5356. ER4043 žica ima dobru otpornost na pucanje i koristi se za opće zavarivanje aluminija, dok ER5356 pruža veću čvrstoću i otpornost na koroziju, često se koristi u pomorskoj i automobilskoj industriji (Lippold, 2015.). Za zavarivanje bakra i njegovih legura koriste se bakrene žice, poput ERCu, koje pružaju dobru vodljivost i otpornost na koroziju.



Slika 5. ER4043 žica za MIG zavarivanje od 10 mm



Izvor: IPOTOOLS (2024). MIG žica za zavarivanje ER4043, dostupno na [https://ipotoools.hr/proizvod/mig-mag-zica-za-zavarivanje-er4043-si5-alsi-5-d100-08-mm-aluminij-05-kg/#:~:text=%EF%84%85-.MIG%20MAG%20%C5%BEica%20za%20zavarivanje%20ER4043%20Si5,-\(ALSI%2D5\)%20D100](https://ipotoools.hr/proizvod/mig-mag-zica-za-zavarivanje-er4043-si5-alsi-5-d100-08-mm-aluminij-05-kg/#:~:text=%EF%84%85-.MIG%20MAG%20%C5%BEica%20za%20zavarivanje%20ER4043%20Si5,-(ALSI%2D5)%20D100), pristupljeno 17.09.2024.

Kod tankih materijala, preporučuje se korištenje tanje žice, obično promjera 0,6 mm do 0,8 mm. Tanja žica omogućava bolju kontrolu topline i smanjuje rizik od probijanja materijala. Za deblje materijale koriste se deblje žice, promjera 1,0 mm do 1,6 mm (Callister, 2018.). Deblja žica omogućava dublju penetraciju i bolju čvrstoću zavara. U uvjetima visoke proizvodnje potrebne su žice koje pružaju stabilan luk i minimalno prskanje. Žice s visokim sadržajem silicija i mangana, kao što je ER70S-6, često se koriste jer poboljšavaju kvalitetu zavara i smanjuju potrebu za čišćenjem nakon zavarivanja (Ippold, 2015.). Za specijalizirane uvjete, poput zavarivanja u položaju, preporučuju se žice s kontroliranim taljenjem koje omogućavaju bolju kontrolu luka i lakše rukovanje.

Čisti argon se koristi za zavarivanje aluminija i drugih obojenih metala, pružajući stabilan luk i smanjujući prskanje, što rezultira glatkim i čistim zavarima. Mješavine argona i CO<sub>2</sub>, poput 75% argona i 25% CO<sub>2</sub>, najčešće se koriste za zavarivanje čelika, pružajući dobar balans između stabilnosti luka, penetracije i kvalitete zavara (Spitzer, 2016.). CO<sub>2</sub> u mješavini povećava toplinsku energiju i penetraciju, dok argon smanjuje prskanje. Čisti CO<sub>2</sub> koristi se za

zavarivanje čelika zbog svoje niske cijene i duboke penetracije zavara, no proizvodi više prskanja i može rezultirati manje estetskim zavarima.

Slika 6. Regulator argona kod MIG zavarivanja



Izvor: Proinstal (2024). Mini CO<sub>2</sub> regulator plina za MIG zavarivanje, dostupno na [www.proinstal.com/manometri](http://www.proinstal.com/manometri), pristupljeno 17.09.2024.

Helij se koristi u mješavinama s argonom za zavarivanje aluminija i bakra, pružajući dublju penetraciju i veći toplinski unos, što je korisno za deblje materijale. Za zavarivanje tankih materijala, argon ili mješavine s većim udjelom argona su preferirane jer pružaju stabilniji luk i smanjuju rizik od probijanja materijala (Spitzer, 2016.). Za zavarivanje debljih materijala, mješavine argona i CO<sub>2</sub> ili mješavine s helijem pružaju bolju penetraciju i veću toplinsku energiju, što omogućava bolje spajanje materijala. U uvjetima visoke proizvodnje, mješavine argona i CO<sub>2</sub> su preferirane zbog njihove učinkovitosti i kvalitete zavara (Hickey, 2019.). Za zavarivanje u različitim položajima, poput vertikalnog ili iznad glave, mješavine s većim udjelom argona omogućavaju bolju kontrolu luka i smanjuju prskanje.

Analitički odabir žica i plina za zavarivačke uvjete ključan je za postizanje optimalne kvalitete zavara i učinkovitosti zavarivanja. Prilikom odabira žice važno je uzeti u obzir vrstu materijala, debljinu materijala i specifične radne uvjete. Za odabir plina treba uzeti u obzir vrstu

plina, debljinu materijala i specifične uvjete zavarivanja. Pravilnim odabirom žice i plina zavarivači mogu postići visokokvalitetne zavare, smanjiti vrijeme obrade i povećati produktivnost.

### **3.3. Priprema za MIG zavarivanje**

Priprema za MIG zavarivanje je kritični korak koji direktno utječe na kvalitetu i uspješnost zavora. Pažljiva i metodična priprema osigurava da se zavarivanje izvodi efikasno, uz minimalne greške i defekte. Ovaj proces uključuje nekoliko ključnih faza (Huges, 2013.): priprema radnog prostora, izbor i priprema materijala, podešavanje opreme, te sigurnosne mjere. Detaljno ćemo razmotriti svaki od ovih aspekata kako bismo osigurali temeljito razumijevanje potrebnih koraka za optimalnu pripremu za MIG zavarivanje. Prvi korak u pripremi za MIG zavarivanje je osiguranje odgovarajućeg radnog prostora (Glicksman, 2014.). Prostor mora biti čist, dobro osvijetljen i adekvatno ventiliran kako bi se smanjila izloženost dimu i plinovima nastalim tijekom zavarivanja. Uklanjanje zapaljivih materijala iz blizine radnog prostora također je ključno za sprečavanje požara.

Stabilna radna površina, kao što je metalni stol za zavarivanje, osigurava sigurno postavljanje materijala koji se zavaruje. Površina treba biti električki provodna kako bi se omogućilo pravilno uzemljenje, čime se sprječava opasnost od električnog udara (Klas, 2012.). Dodatno, radni prostor treba biti opremljen s osnovnim alatima i zaštitnom opremom, uključujući zavarivačke šljemove, rukavice, zaštitne naočale i pregače.

Slika 7. Metalni stol za implementaciju MIG zavarivanja



Izvor: Proinstal (2024). Stol za MIG zavarivanje, dostupno na <https://proinstal.hr/stolovi-za-zavarivanje/>, pristupljeno 17.09.2024.

Izbor materijala za zavarivanje ovisi o specifičnim zahtjevima projekta. Najčešće korišteni materijali u MIG zavarivanju su čelik, aluminij i nehrđajući čelik. Svaki materijal zahtijeva odgovarajuću žičanu elektrodu i zaštitni plin. Prije početka zavarivanja, materijali moraju biti temeljito očišćeni kako bi se uklonile nečistoće poput ulja, masti, hrđe i boje. Ove nečistoće mogu izazvati defekte u zavarima, smanjujući njihovu čvrstoću i trajnost (Hickey, 2019.9. Mehaničko čišćenje, poput brušenja ili pjeskarenja, može se koristiti za uklanjanje tvrdokornih kontaminanata. Također je bitno osigurati da su svi dijelovi koji se zavaruju pravilno postavljeni i fiksirani kako bi se spriječilo pomicanje tijekom zavarivanja.

Pravilno podešavanje opreme za MIG zavarivanje ključno je za postizanje kvalitetnih zavara. Izbor ispravnog izvora napajanja, postavljanje napona i brzine napajanja žice, te odabir odgovarajućeg zaštitnog plina su kritični koraci. MIG zavarivanje obično koristi DC (jednosmjernu struju) s pozitivnim polaritetom (DCEP), koji omogućuje stabilan luk i duboko prodiranje (Spitzer, 2016.). Inverterski izvori napajanja su popularni zbog svoje energetske efikasnosti i mogućnosti preciznog podešavanja. Optimalan napon i brzina napajanja žice ovise o debljini i vrsti materijala. Previsok napon može uzrokovati pretjerano prskanje, dok prenizak napon može rezultirati slabim prodiranjem. Brzina napajanja žice mora biti usklađena s naponom kako bi se održao stabilan luk (Campbell, 2017.). Izbor zaštitnog plina ovisi o

materijalu koji se zavaruje. Čisti argon ili mješavina argona i CO<sub>2</sub> često se koristi za zavarivanje čelika, dok je čisti argon preferiran za aluminij (Dutton, 2017.). Ispravan protok plina je ključan za zaštitu zavara od kontaminacije; preporučeni protok je obično između 10 i 20 litara po minuti (Dutton, 2017.)

Sigurnost je uvijek na prvom mjestu u zavarivanju. Pravilna zaštitna oprema je obavezna kako bi se zaštitili zavarivači od iskre, vrućine, UV zračenja i štetnih plinova. Zavarivački šljemovi s automatskim zatamnjenjem, rukavice otporne na toplinu, kožne pregače i zaštitne naočale su osnovni dijelovi opreme (Lippold, 2015.). Treba osigurati adekvatnu ventilaciju ili koristiti lokalne izvlakače dima kako bi se smanjila izloženost štetnim plinovima i česticama. Zavarivači trebaju biti svjesni potencijalnih opasnosti od električnog udara i osigurati pravilno uzemljenje opreme. Redovita provjera opreme za zavarivanje i pridržavanje sigurnosnih procedura su ključni za sprječavanje nesreća.

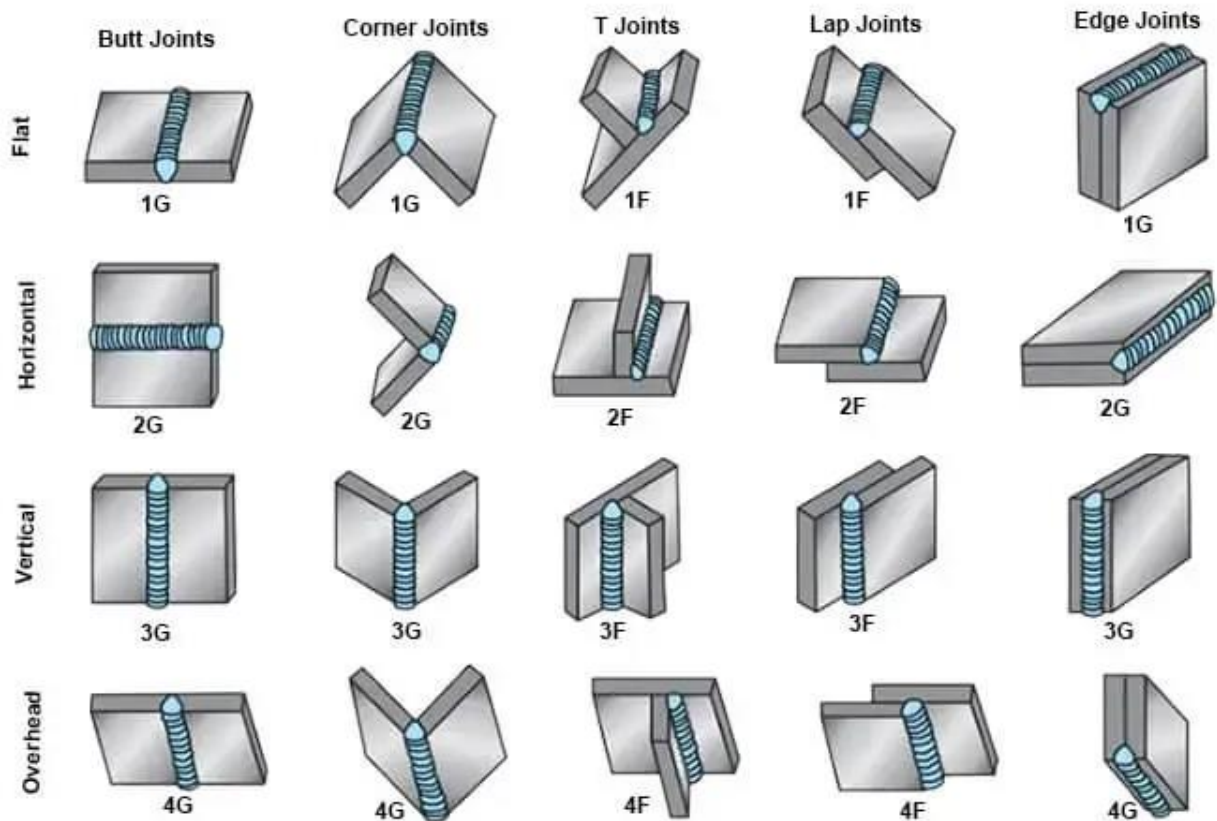
Priprema za MIG zavarivanje zahtijeva pažnju na detalje i temeljit pristup. Pravilno pripremljen radni prostor, pažljiv izbor i priprema materijala, precizno podešavanje opreme, te strogo pridržavanje sigurnosnih mjera, svi zajedno čine osnovu za postizanje visokokvalitetnih i pouzdanih zavara. Investiranje vremena i truda u ovu pripremnu fazu ne samo da povećava efikasnost zavarivanja, već i značajno smanjuje mogućnost grešaka i nesreća, osiguravajući dugotrajne i čvrste spojeve.

### **3.4. Tehnike i prakse u MIG zavarivanju**

U MIG zavarivanju, različite tehnike omogućavaju postizanje optimalnih rezultata u različitim situacijama. Tri ključne tehnike su ravni zavar, kutni zavar i preklopni zavar, a svaka od njih nosi svoje specifične prednosti i izazove (Davies, 2021.). Ravni zavar, poznat i kao "flat position" zavar, koristi se kada se zavarivanje izvodi na horizontalnim ravninama. Ova metoda je najjednostavnija i najčešće korištena, jer omogućava najbolju kontrolu nad zavarivanjem i smanjuje probleme s curenjem materijala. Idealna je za dugotrajne i kontinuirane spojeve na ravnim površinama, gdje gravitacija ne utječe na otopljeni materijal, što doprinosi stabilnosti i ravnoteži zavarivanja. Prednosti ravnog zavarivanja uključuju jednostavnost izvođenja, visoku kvalitetu zavarivanja i minimalnu potrebu za korekcijama (Davies, 2021.). Međutim,

ograničena je na ravne ili horizontalne površine, što može predstavljati izazov u određenim primjenama.

Slika 8. Vrste zavarar kod MIG zavarivanja – ravni, kutni i prekloplni zavar



Izvor: Proinstal (2024). Naučite različite položaje zavarivanja ploča i cijevi, dostupno na <https://proinstal.hr/naucite-razlicite-polozaje-zavarivanja-ploca-i-cijevi/>, pristupljeno 17.09.2024.

Kutni zavar, ili "vertical position" zavar, primjenjuje se za zavarivanje na uspravnim ili nagnutim površinama, gdje zavarivač mora raditi u kutu (Dutton, 2017.). Ova tehnika je korisna za spojeve između okomitih i horizontalnih elemenata. Prednosti kutnog zavarivanja uključuju svestranost u različitim kutovima i položajima te prilagodljivost u situacijama gdje ravni zavar nije moguć. Međutim, kutni zavar zahtijeva veće vještine zbog težih uvjeta, dok otopljeni materijal može biti sklon pomicanju zbog gravitacije (Dutton, 2017.). Da bi se izbjegli problemi s curenjem, često je potrebno primijeniti specijalne tehnike, kao što su zavarivanje u nekoliko prolaza ili prilagodba brzine dodavanja žice.

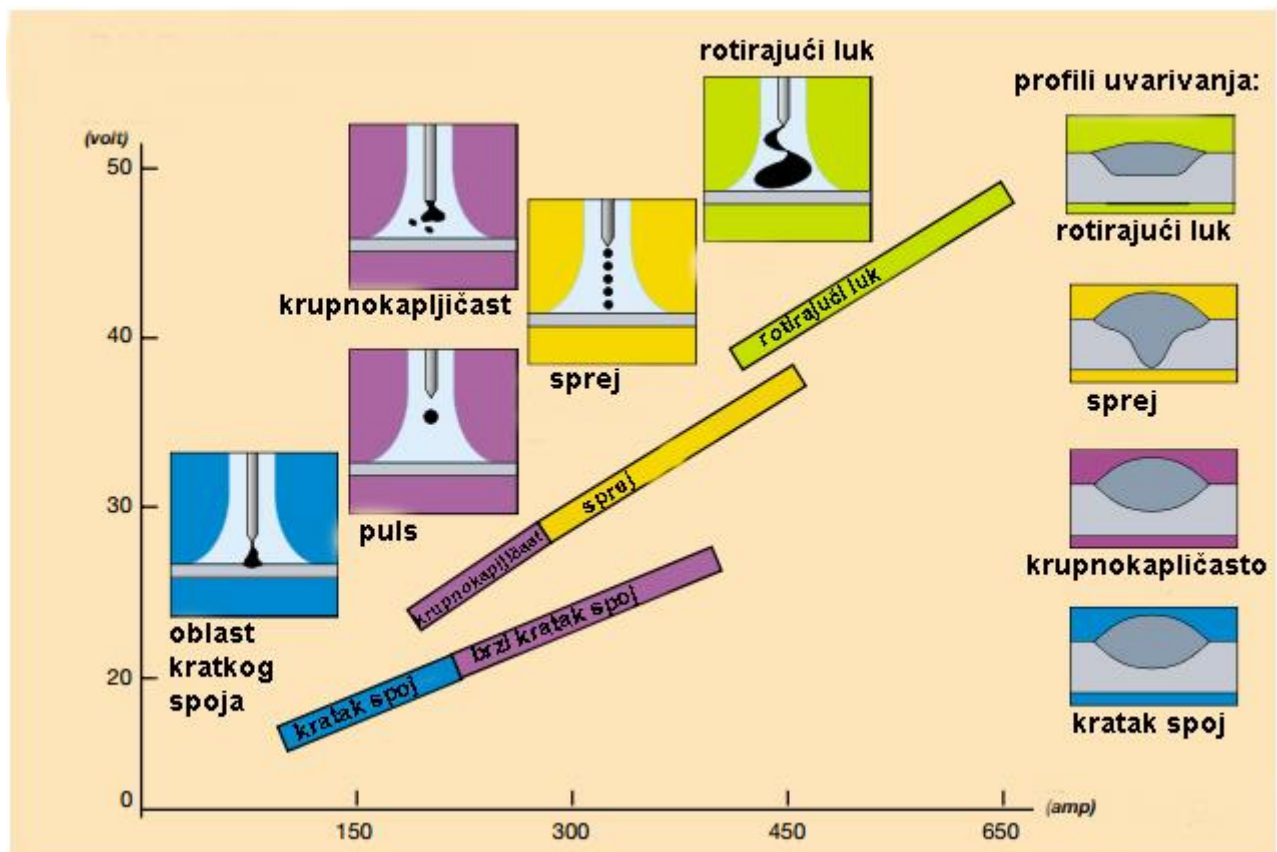
Prekloplni zavar, ili "overhead position" zavar, koristi se kada zavarivanje treba izvesti iznad glave (Davies, 2021.). Ova tehnika je posebno izazovna zbog položaja u kojem se radnik nalazi

i utjecaja gravitacije na otopljeni materijal. Korisna je za rad na stropovima, podovima ili u drugim situacijama gdje se zavarivanje obavlja iznad radnika. Prednosti preklopnog zavarivanja uključuju fleksibilnost u teže dostupnim pozicijama i mogućnost postizanja specifičnih rezultata koji su neophodni u određenim primjenama (Spitzer, 2016.). No, rad u ovakvom položaju može uzrokovati brži umor kod zavarivača i zahtijevati dodatnu pažnju zbog mogućeg curenja materijala.

Sve tri tehnike - ravni, kutni i preklopni zavar - imaju svoje specifične primjene i zahtjeve. Odabir odgovarajuće tehnike zavisi od vrste materijala, položaja zavarivanja i specifičnih zahtjeva projekta. Razumijevanje karakteristika svake tehnike pomaže u postizanju visokokvalitetnih i dugotrajnih zavarivačkih spojeva, te omogućava zavarivačima da optimiziraju svoje radne rezultate i uspješno izvrše složene zavarivačke zadatke.

Za postizanje kvalitetnog zavara potrebna je preciznost u pokretima zavarivača i održavanje stabilnosti zavarivačkog luka. Pokreti zavarivača ključni su za kvalitetu zavarivanja. Precizna kontrola oružja i kontrola brzine kretanja igraju ključnu ulogu (Davies, 2021.). Zavarivač mora održavati ravnomjernu putanju tijekom zavarivanja, što znači da se pištolj mora kretati ravnomjerno bez pretjeranog pomicanja u stranu. Ovaj pristup pomaže u postizanju jednolike debljine zavara i sprječava nepravilnosti kao što su prekomjerno taloženje materijala ili nedostaci. Brzina kretanja pištolja treba biti usklađena s brzinom dodavanja elektrode; prebrzo kretanje može dovesti do lošeg taljenja materijala i lošeg prijanjanja, dok presporo kretanje može uzrokovati prekomjerno taloženje materijala i stvoriti stres na materijalu (Dutton, 2017.). Također, kut pod kojim se drži pištolj u odnosu na površinu materijala važan je za održavanje stabilnog luka i ravnomjernu raspodjelu topline, a preporučeni kut za MIG zavarivanje obično je između 10 i 15 stupnjeva. Pokreti u obliku slova U ili C, ovisno o vrsti zavarivanja i obliku zavara, pomažu u ravnomjernoj raspodjeli topline i materijala, što doprinosi boljoj kvaliteti zavarivanja.

Slika 9. Pokreti zavarivača i održavanje stabilnog luka



Izvor: Var.rs (2024). MIG/MAG zavarivanje – CO<sub>2</sub> zavarivanje, dostupno na <https://var.rs/sve-o-zavarivanju/migmag-zavarivanje-co2-zavarivanje/>, pristupljeno 17.09.2024.

Stabilnost zavarivačkog luka ključna je za postizanje visokokvalitetnog zavara. Luk bi trebao biti stalan i stabilan kako bi se osigurala stalna temperatura i ravnomjerno taljenje materijala. Bitno je pravilno postaviti parametre zavarivanja, uključujući napon luka, brzinu dodavanja žice i protok zaštitnog plina (Spitzer, 2016.). Netočno postavljene parametre mogu uzrokovati nestabilan luk i lošu kvalitetu zavarivanja. Udaljenost između elektroda i materijala također treba biti stabilna; prevelika udaljenost može uzrokovati gašenje luka, dok premala udaljenost može dovesti do prekomjernog taljenja i oštećenja materijala. Upotreba kvalitetnog zaštitnog plina ključna je za održavanje stabilnosti luka; plin mora biti čist i pravilno doveden kako bi se spriječilo stvaranje oksida i drugih kontaminanata koji mogu utjecati na kvalitetu zavara.

Redovito održavanje i čišćenje opreme za zavarivanje također je važno za održavanje stabilnosti luka; začepljeni otvori za plin, oštećene elektrode ili kabeli neodgovarajućeg napona



moгу uzrokovati probleme sa stabilnošću električnog luka (Huges, 2013.). Uspješno MIG zavarivanje zahtijeva preciznu kontrolu pokreta zavarivača i pažljivo održavanje stabilnosti luka. Razumijevanje i primjena ovih tehnika može značajno poboljšati kvalitetu zavarivanja i osigurati dugotrajne i pouzdane rezultate.

Kvalitetno zavarivanje zahtijeva pažljivu kontrolu ključnih faktora kako bi se osigurali čvrsti i dugotrajni spojevi. Ključne komponente ovog procesa uključuju izbjegavanje defekata, preciznu kontrolu brzine zavarivanja i održavanje odgovarajuće temperature (Callister, 2018.). Svaki od ovih aspekata igra vitalnu ulogu u postizanju optimalnih rezultata i osiguravanju dugovječnosti zavarivačkih spojeva.

Defekti u zavarivanju, kao što su pukotine, poroznost i nepravilnosti u strukturi zavarivačkog zrna, mogu značajno utjecati na snagu i trajnost spoja (Callister, 2018.). Kako bi se izbjegli ovi problemi, ključno je temeljito pripremiti površinu materijala. Uklanjanje hrđe, prljavštine i masnoće osigurava dobar kontakt između elektroda i materijala, smanjujući rizik od nastanka pora i slabih spojeva. Također, materijali koji se spajaju trebaju biti kompatibilni i pravilno usklađeni, a odgovarajući materijali za zavarivanje trebaju biti odabrani uz analizu kemijskog sastava kako bi se spriječila pojava defekata. Korištenje ispravnog plina za zaštitu, zajedno s pravilnim podešavanjem plamenog iznosa i tlaka, može značajno smanjiti rizik od pora i oksidacije (Dsvies, 2021.). Osim toga, pravilna tehnika zavarivanja, uključujući ispravno držanje elektroda i precizno kretanje, pomaže u minimiziranju defekata.

Brzina zavarivanja također igra ključnu ulogu u kvaliteti zavarivačkog zrna. Prebrza brzina može uzrokovati neadekvatno ispunjavanje spoja i stvaranje praznina, dok prespora brzina može rezultirati prekomjernim taljenjem i nepravilnim slojevima (Spitzer, 2016.). Optimalna brzina ovisi o vrsti materijala, debljini i vrsti zavarivanja. Pravilan odabir brzine dodavanja žice i brzine zavarivanja mora biti usklađen s materijalima i vrstom zavarivanja kako bi se postigao ujednačen i čvrst spoj. Kontinuirano praćenje brzine tijekom zavarivanja može pomoći u prepoznavanju i ispravljanju problema prije nego postanu ozbiljniji. Temperatura zavarivanja je također ključna za postizanje željenih mehaničkih svojstava i izbjegavanje defekata. Svaki materijal zahtijeva određenu temperaturu za optimalno zavarivanje. Previsoka temperatura može uzrokovati prekomjerno taljenje i deformacije, dok preniska temperatura može rezultirati slabim vezivanjem i neadekvatnom penetracijom (Spitzer, 2016.). Korištenje temperaturnih instrumenata i kontrola postavki zavarivanja mogu pomoći u održavanju stabilne temperature tijekom cijelog procesa. Redovno održavanje zavarivačke opreme i kalibracija

temperatura osigurava točne i pouzdane rezultate, smanjujući mogućnost nastanka grešaka uzrokovanih neispravnom opremom.

Postizanje kvalitetnih zavara zahtijeva pažljivo razmatranje i kontrolu ključnih aspekata kao što su izbjegavanje defekata, kontrola brzine zavarivanja i održavanje pravilne temperature. Kroz temeljitu pripremu, pravilnu tehniku i stalno praćenje, zavarivači mogu osigurati dugotrajne i čvrste spojeve koji zadovoljavaju visoke standarde kvalitete, čime se omogućava postizanje optimalnih rezultata i minimiziranje problema tijekom i nakon zavarivanja.

## **4. SIGURNOST PRI MIG ZAVARIVANJU I KONTROLA KVALITETE ZAVARA**

Sigurnost MIG zavarivanja uključuje niz preventivnih mjera i korištenje odgovarajuće zaštitne opreme kako bi se smanjili rizici povezani s radom s visokim temperaturama, strujom i potencijalno štetnim kemijskim tvarima. Ispravno rukovanje opremom, pravilna uporaba zaštitne opreme kao što su sigurnosne naočale, rukavice i zaštitna odijela, kao i osiguravanje odgovarajuće ventilacije u radnom prostoru, ključni su za očuvanje zdravlja i sigurnosti zavarivača (Carleton., 2016.). S druge strane, kontrola kvalitete zavarivanja obuhvaća sve faze zavarivanja, od pripreme materijala i podešavanja parametara zavarivanja, do završne kontrole i ocjene zavarenih spojeva. Precizno praćenje i procjena čimbenika kao što su penetracija, ravnomjernost zavara i prisutnost nedostataka kao što su poroznost ili pukotine ključni su za osiguranje funkcionalnosti i dugovječnosti zavara (Hall, 2018.). Korištenje tehnika poput ultrazvučnog ispitivanja, vizualnog pregleda i ispitivanja bez razaranja omogućuje prepoznavanje i ispravljanje potencijalnih problema prije nego što zavareni elementi uđu u rad.

Četvrto poglavlje istražuje ključne aspekte sigurnosti MIG zavarivanja i metode za preciznu kontrolu kvalitete, pružajući sveobuhvatan pregled i smjernice za poboljšanje prakse u tim područjima. Razumijevanje i primjena preporuka iz ovog poglavlja omogućuje ne samo zaštitu zdravlja i sigurnosti radnika, već i osiguranje kvalitetnih i pouzdanih zavarenih spojeva, što je ključno za uspjeh i dugovječnost svakog projekta zavarivanja.

### **4.1. Zdravlje i sigurnost pri MIG zavarivanju**

MIG zavarivanje, ili Metal Inert Gas zavarivanje, predstavlja jednu od najčešće korištenih metoda zavarivanja zbog svoje efikasnosti i svestranosti. Međutim, kao i svaka industrijska aktivnost, zavarivanje nosi određene zdravstvene i sigurnosne rizike. Stoga je izuzetno važno razumjeti potencijalne opasnosti te primijeniti odgovarajuće sigurnosne mjere kako bi se zaštitili radnici i održala sigurnost radnog okruženja. Ključni aspekti uključuju zdravstvene rizike povezane sa zavarivanjem, sigurnosne mjere koje treba poduzeti, te važnost redovite provjere opreme i radnog prostora (Zhang, 2015.). Tijekom MIG zavarivanja, proces otapanja i spaljivanja materijala oslobađa dimove koji sadrže čestice metala i kemijske spojeve. Ovi

dimovi mogu izazvati respiratorne probleme, iritaciju dišnih puteva i, dugoročno, ozbiljnije bolesti pluća. Mnogi od ovih dimova uključuju teške metale kao što su krom, nikal i mangan, koji mogu imati štetne učinke na zdravlje ako se dugotrajno udišu.

MIG zavarivanje generira intenzivno UV zračenje koje može uzrokovati opekline kože i oštećenje očiju, poznato kao "zavarivačka oftalmija" ili "zavarivački sunčani udar" (Thompson, 2017.). UV zračenje može izazvati bolne opekline i dugoročna oštećenja oka, kao što su katarakte. Osim toga, UV zračenje može uzrokovati opekline na koži, povećavajući rizik od raka kože ako se izloženost ne kontrolira. Proces zavarivanja stvara visoke temperature koje mogu uzrokovati opekline ili toplinske povrede ako se s njima ne postupa s oprezom (Thompson, 2017.). Radnici su izloženi riziku od opekline od vrućeg metalnog materijala i isijane topline iz zavarivačkog područja, što može uzrokovati ozbiljne povrede ako zaštitna oprema nije pravilno korištena.

Korištenje odgovarajuće zaštitne odjeće ključna je za smanjenje rizika od ozljeda i zdravstvenih problema. Radnici bi trebali nositi dugotrajne i vatrostalne materijale poput kože ili specijaliziranih tkanina koje štite od visokih temperatura i isijane svjetlosti. Zaštitne rukavice, čizme i pokrivači za vrat također su bitni za zaštitu od mogućih opekline i drugih fizičkih povreda (Krut, 2020.). Osiguranje adekvatne ventilacije u radnom prostoru pomaže u smanjenju koncentracije štetnih dimova i plinova. Korištenje ventilacijskih sustava, kao što su usisivači dima i prozračivanje radnog prostora, pomaže u održavanju kvalitete zraka i smanjuje rizik od respiratornih problema. U nekim slučajevima, korištenje respiratora može biti nužno kako bi se dodatno zaštitio radnik od štetnih čestica. Nošenje zaštitnih naočala ili vizira s odgovarajućim UV filtrima ključan je korak za zaštitu očiju od UV zračenja i isijane svjetlosti. (Thompson, 2017.) Viziri trebaju biti izrađeni od materijala otpornog na udarce i visokih temperatura te imati odgovarajući stupanj tamnjenja kako bi se spriječila oštećenja očiju i kože.

Kontrola i održavanje zavarivačke opreme ključni su za osiguranje sigurnosti na radnom mjestu. Redovito provjeravanje stanja zavarivačkog aparata, plinske opreme i zaštitnih uređaja pomaže u sprečavanju kvarova i nesreća (Krut, 2020.). Svaka oprema koja pokazuje znakove habanja ili oštećenja treba biti odmah popravljena ili zamijenjena kako bi se izbjegle opasnosti. Čistoća i organiziranost radnog prostora doprinose sigurnosti i učinkovitosti zavarivanja. Uklanjanje nepotrebnih materijala, pravilno skladištenje opreme i redovito čišćenje područja zavarivanja pomaže u smanjenju rizika od nesreća, kao što su požari ili spoticanja (Zhang, 2015.). Osim toga, osiguranje odgovarajuće rasvjete omogućava radnicima bolju vidljivost, smanjujući mogućnost nesreća uzrokovanih lošim vidom.

Osiguranje zdravlja i sigurnosti pri MIG zavarivanju zahtijeva pažljivu pripremu i primjenu sigurnosnih mjera. Prepoznavanje i minimiziranje zdravstvenih rizika poput izloženosti dimovima, UV zračenju i toplini ključno je za zaštitu radnika (Thompson, 2017.). Korištenje zaštitne odjeće, adekvatna ventilacija i zaštita očiju igraju ključnu ulogu u smanjenju opasnosti. Također, redovita provjera opreme i održavanje radnog prostora osiguravaju sigurno radno okruženje i dugoročnu zaštitu. Pridržavanje ovih smjernica omogućava sigurno i učinkovito izvođenje MIG zavarivanja, čime se povećava sigurnost i zdravlje radnika te doprinosi dugoročnoj održivosti radnog procesa.

## **4.2. Inspekcija i kontrola kvalitete zavara**

Osiguranje kvalitete zavara ključan je korak u svakom zavarivačkom procesu kako bi se osiguralo da spojevi ispunjavaju tehničke zahtjeve i standarde sigurnosti. Inspekcija i kontrola kvalitete zavara uključuju različite metode i kriterije koji omogućavaju identifikaciju potencijalnih problema i osiguranje da završni proizvodi ispunjavaju očekivane norme (Smith, 2019.). Ovaj proces također obuhvaća postupke za popravak i poboljšanje neispravnih zavara kako bi se osigurala njihova dugovječnost i funkcionalnost. Vizualna inspekcija je osnovna metoda koja se koristi za brzo otkrivanje površinskih nedostataka poput pukotina, nepravilnosti, i nepravilnih prijelaza između zavarivačkog materijala i osnovnog materijala (Brown, 2018.). Ova metoda omogućava detekciju očitih problema, ali nije uvijek dovoljna za otkrivanje unutarnjih defekata. Upotreba povećala ili mikroskopa može poboljšati preciznost vizualne inspekcije.

Ultrazvučna inspekcija koristi visoko frekventne zvučne valove za otkrivanje unutarnjih defekata unutar zavarivačkog spoja (Smith, 2019.). Ova metoda omogućava detekciju praznina, pukotina i drugih nepravilnosti koje se ne mogu vidjeti golim okom. Ultrazvuk je posebno koristan za procjenu dubine i veličine defekata, te je često korišten u industrijskim primjenama gdje su zahtjevi za kvalitetom visoki. Rendgenska inspekcija koristi rendgenske zrake za stvaranje slika unutarnje strukture zavarivačkog spoja. Ova metoda omogućava detaljno ispitivanje unutarnjih defekata kao što su praznine, pukotine i nepravilnosti u strukturi. Rendgenska ispitivanja pružaju visoku razlučivost slika i često se koriste za inspekciju kritičnih i složenih zavarivačkih spojeva. Penetrantsko testiranje koristi tekuće kontrastne materijale (penetrare) koji se primjenjuju na površinu zavarivačkog spoja (Zhang, 2015.). Ove tekućine

prodire u male pukotine i nepravilnosti na površini, a nakon što se primjeni odgovarajući razvijatelj, rezultati se mogu vidjeti kroz kontrast između penetranta i površine. Ova metoda je posebno korisna za otkrivanje površinskih defekata kao što su pukotine i pore.

Izgled zavarivačkog spoja uključuje analizu površinskih karakteristika kao što su ravnoteža, kontinuitet i ujednačenost zavarivanja. Nepravilnosti u izgledu, kao što su nepravilne visine zavarivačkog materijala, pore, i nepravilni prijelazi, mogu ukazivati na probleme s kvalitetom (Thompson, 2017.). Čvrstoća zavara odnosi se na njegovu sposobnost da izdrži mehaničke opterećenja bez deformacija ili loma. Testiranje čvrstoće može uključivati različite metode kao što su ispitivanja napetosti, čvrstoće na savijanje ili udarne testove kako bi se osigurala strukturalna integritet zavara. Integritet zavara uključuje procjenu njegovih unutarnjih i vanjskih karakteristika kako bi se osiguralo da su svi spojevi čvrsti i da nema unutarnjih defekata koji bi mogli kompromitirati njegovu funkcionalnost (Zhang, 2015.). Ocjena integriteta često uključuje korištenje naprednih inspekcijskih metoda poput ultrazvuka ili rendgenskog ispitivanja.

Prvi korak u popravku neispravnih zavara je precizna identifikacija vrsta i uzroka defekata. Ovo može uključivati analizu inspekcijskih rezultata i provođenje dodatnih testova kako bi se razumjeli specifični problemi. U mnogim slučajevima, neispravan zavar se mora ukloniti kako bi se pripremila površina za novi zavar (Smith, 2019.). Ovo može uključivati brušenje, rezanje ili skidanje dijela zavarivačkog materijala. Nakon uklanjanja neispravnih dijelova, potrebno je provesti novi zavar koji zadovoljava sve zahtjeve kvalitete. Ovo može uključivati podešavanje tehnike zavarivanja, brzine i temperature kako bi se osiguralo da novi zavar ispunjava sve standarde. Nakon popravka, važno je ponovno provesti inspekciju kako bi se osiguralo da su svi problemi otklonjeni i da novi zavar ispunjava sve kriterije kvalitete. Ova faza može uključivati ponovnu vizualnu inspekciju, ultrazvučna testiranja ili rendgenske preglede (Brown, 2018.). Svaki postupak popravka treba biti dokumentiran i praćen kako bi se osigurala usklađenost sa standardima i kako bi se omogućila analiza eventualnih problema u budućnosti.

Inspekcija i kontrola kvalitete zavara ključni su za osiguranje da zavarivački spojevi ispunjavaju visoke standarde sigurnosti i funkcionalnosti. Korištenje različitih metoda inspekcije, kao što su vizualna inspekcija, ultrazvuk, rendgen i penetrantsko testiranje, omogućava detaljno ispitivanje zavarivačkih spojeva i identifikaciju potencijalnih problema. Ocjenjivanje kvalitete zavara temelji se na kriterijima kao što su izgled, čvrstoća i integritet, dok pravilni postupci za popravak i poboljšanje neispravnih zavara osiguravaju dugotrajnost i

pouzdanost završnih proizvoda. Pravilna primjena ovih tehnika i procedura doprinosi održavanju visokih standarda kvalitete i sigurnosti u zavarivačkom procesu.

## 5. ZAKLJUČAK

Izrada zavora MIG postupkom (Metal Inert Gas) je sofisticiran i precizan proces koji zahtijeva pažljivu pripremu i pravilnu upotrebu specijalizirane opreme kako bi se osigurala visoka kvaliteta i dugovječnost zavora. MIG zavarivanje, koje se ističe svojom brzinom i svestranošću, koristi inertni plin za zaštitu zavarivačkog zrna od atmosferskih utjecaja, omogućavajući izradu čvrstih i pouzdanih spojeva. Kako bi se maksimizirali rezultati i minimizirali rizici, ključni su kvalitetna oprema i temeljita priprema postupka.

Oprema je osnovni kamen-temelj uspješnog MIG zavarivanja. Zavarivački aparat, koji predstavlja srce MIG postupka, mora biti pravilno odabran i konfiguriran prema specifičnostima zavarivačkog materijala i vrste zavarivanja. Uz pravilno podešavanje napona i struje, ključan je izbor pravih elektroda i žica koje odgovaraju materijalima koji se spajaju. Također, plinski sustav za zaštitu mora biti točno podešen kako bi se osigurala pravilna kvaliteta plinova i tlak, što direktno utječe na kvalitetu zavora.

Priprema postupka uključuje nekoliko važnih koraka koji omogućavaju uspješno izvođenje MIG zavarivanja. Prvo, priprema površine materijala je presudna za postizanje optimalnog spoja. Površine moraju biti čiste, bez hrđe, prljavštine i masnoće, kako bi se omogućio dobar kontakt između elektroda i materijala te spriječilo stvaranje defekata poput pora i slabih spojeva. Usklađivanje materijala, uključujući provjeru njihovih kemijskih i mehaničkih svojstava, osigurava da su materijali kompatibilni i spremni za zavarivanje. Drugi ključni korak u pripremi je određivanje i podešavanje tehnike zavarivanja. Ovisno o vrsti spoja i položaju zavarivanja, odabir odgovarajuće tehnike (ravni, kutni ili preklopni zavar) i pravilno podešavanje brzine zavarivanja, temperature i napona igra ključnu ulogu u osiguravanju kvalitetnih rezultata. Pravilna primjena tehnike omogućava kontrolu nad otopljenim materijalom, smanjuje rizik od curenja i omogućava postizanje željenog izgleda i čvrstoće spoja.

Ovaj proces koristi kontinuiranu žičanu elektrodu, zaštitni plin i električni luk za stvaranje snažnog i dugotrajnog zavora. Uspješna primjena MIG zavarivanja zahtijeva detaljno razumijevanje cjelokupnog procesa, rigorozno pridržavanje sigurnosnih mjera i preciznu kontrolu kvalitete zavora. Postupak MIG zavarivanja započinje pripremom materijala i opreme. Pravilna priprema površina koje se spajaju, uključujući čišćenje od oksida, hrđe i drugih onečišćenja, ključna je za postizanje kvalitetnog zavora. Odabir odgovarajuće elektrode i



zaštitnog plina, kao i podešavanje parametara zavarivanja kao što su napon luka, brzina dodavanja žice i protok plina, izravno utječu na kvalitetu zavara. Tijekom samog procesa važno je održavati stabilan i ravnomjerman luk, kao i pravilno rukovati pištoljem za zavarivanje kako bi se postiglo optimalno prodiranje i ravnomjerna raspodjela materijala.

Sigurnosne mjere tijekom MIG zavarivanja od presudne su važnosti za zaštitu zavarivača i očuvanje radne okoline. Rad s visokim temperaturama, strujom i potencijalno štetnim plinovima zahtijeva korištenje odgovarajuće zaštitne opreme. To uključuje sigurnosne naočale, rukavice, odijela i zaštitu za disanje kako bi se spriječile opekline, ozljede strujnim udarom i udisanje opasnih plinova. Također, osiguravanje odgovarajuće ventilacije i održavanje čistoće radnog prostora značajno doprinosi smanjenju rizika od nezgoda i zdravstvenih problema. Redovito održavanje i pregled opreme, te obuka zavarivača dodatno osiguravaju sigurno radno okruženje.

Kontrola kvalitete zavarivanja ključna je za osiguravanje dugotrajnog i pouzdanog zavarivanja. Ovaj proces uključuje praćenje svih aspekata zavarivanja, od pripreme materijala do završne kontrole zavara. Korištenje metoda kao što su vizualni pregled, ultrazvučno ispitivanje i ispitivanje bez razaranja omogućuje prepoznavanje nedostataka poput poroznosti, pukotina i nepravilnosti u penetraciji. Precizna kontrola kvalitete jamči ne samo funkcionalnost zavarenih spojeva, već doprinosi sigurnosti i dugovječnosti konstrukcija MIG zavarivanjem.

Na temelju provedenog istraživanja, rezultati su pokazali da se osnovna hipoteza može prihvatiti. Upotreba MIG postupka zavarivanja doista omogućuje postizanje visoke kvalitete zavara, povećava produktivnost i smanjuje troškove proizvodnje u usporedbi s drugim metodama zavarivanja. Kroz detaljnu analizu tehničkih parametara MIG postupka, kao što su struja, napon, brzina žice i protok plina, utvrđeno je da se optimalnim podešavanjem ovih parametara može postići izuzetno visokokvalitetan zavar. Mehanička ispitivanja zavara, uključujući testove čvrstoće, žilavosti i savijanja, kao i vizualne i rendgenske inspekcije, pokazala su da zavari izvedeni MIG postupkom zadovoljavaju ili nadmašuju standarde kvalitete u industriji. Usporedba MIG postupka s drugim metodama zavarivanja, kao što su TIG i elektrolučno zavarivanje, pokazala je da MIG postupak nudi značajne prednosti u pogledu efikasnosti i produktivnosti. Zbog bržeg procesa zavarivanja i manje potrebne pripreme, MIG postupak omogućuje veći broj zavara u kraćem vremenskom periodu, što direktno povećava produktivnost proizvodnih procesa.

S obzirom na sve navedene rezultate i analize, može se zaključiti da je osnovna hipoteza ovog istraživanja prihvaćena. Upotreba MIG postupka zavarivanja predstavlja superiornu metodu koja nudi visoku kvalitetu zavara, povećanu produktivnost i smanjene troškove proizvodnje, što je čini optimalnim izborom u mnogim industrijskim okruženjima.

Uspješno MIG zavarivanje zahtijeva holistički pristup koji obuhvaća sve aspekte procesa zavarivanja. Od pravilne pripreme materijala i opreme, preko strogog pridržavanja sigurnosnih mjera, do pomne kontrole kvalitete zavara, svaki korak u ovom procesu je bitan. Razumijevanje i primjena ovih načela osigurava ne samo visoku učinkovitost i pouzdanost u zavarivanju, već i zaštitu zdravlja i sigurnosti radnika, čime se pridonosi ukupnom uspjehu i dugoročnom uspjehu projekata zavarivanja.

## LITERATURA

1. Armstrong, T., 2016, MIG Welding for Beginners, Taylor & Francis
2. Brown, M., 2018. Inspection Techniques for MIG Welding. Wiley
3. Callister, W.D., 2018. Materials Science and Engineering: An Introduction. Wiley.
4. Campbell, G., 2014, Advanced MIG Welding Techniques, Elsevier
5. Campbell, J., 2017. Weld Quality Control and Inspection. CRC Press.
6. Carleton, M., 2016. Welding Safety and Health. Wiley.
7. Davies, G., 2021. Industrial Welding Engineering. Butterworth-Heinemann.
8. Dutton, C., 2017. Advanced Welding Technology. Springer.
9. Fields, J., 2017, MIG Welding Essentials, Industrial Press
10. Glicksman, M. 2014. Welding: Principles and Applications. Delmar Cengage Learning.
11. Hall, K., 2018. Practical Welding Safety: Managing Risks in Welding Operations. CRC Press.
12. Haynes, S., 2005, MIG Welding: Principles and Practice, CRC Press
13. Hickey, R., 2019. The Basics of MIG Welding. Elsevier.
14. Hughes, R., 2013. Welding: A Comprehensive Guide to MIG, TIG, ARC, and Oxyacetylene Welding. McGraw-Hill Education.
15. Khan, H., 2018, Introduction to MIG Welding, Routledge
16. Klas, D., 2012. MIG and TIG Welding: A Complete Guide to Modern Techniques. Routledge.
17. Krut, L, 2020. Welding Quality Assurance and Control. McGraw-Hill Education.
18. Lippold, J.C., 2015. Welding Metallurgy and Weldability of Stainless Steels. Wiley.
19. Martin, P., 2020, MIG Welding: A Comprehensive Guide, Pearson
20. Maughan, D., 2010, Fundamentals of MIG Welding, Wiley
21. Metron (2024). MIG/MAG postupak zavarivanja, dostupno na <https://metron.ba/mig-mag-postupak-zavarivanja/>, pristupljeno 15.09.2024.
22. Pherson, R., 2012, Understanding MIG Welding, Springer
23. Smith, H., 2019. Welding Health and Safety. American Welding Society.
24. Spitzer, D.A., 2016. The Welding Handbook. American Welding Society.
25. Thompson, S., 2017. Welding Safety: Guidelines and Best Practices. Elsevier.
26. Williams, C., 2001, The Principles of MIG Welding, Cambridge University Press
27. Yost, L., 2008, Metal Inert Gas (MIG) Welding Handbook, McGraw-Hill
28. Zhang, Z., 2015. Occupational Health and Safety in Welding. Springer.

## POPIS SLIKA

Slika 1. Uređaj za MIG zavarivanje.....	7
Slika 2. MIG – 160ER zavarivački aparat.....	16
Slika 3. Veličina plinskih boca za MIG zavarivanje.....	17
Slika 4. Žice i elektrode za MIG zavarivanje.....	19
Slika 5. ER4043 žica za MIG zavarivanje od 10 mm.....	21
Slika 6. Regulator argona kod MIG zavarivanja.....	22
Slika 7. Metalni stol za implementaciju MIG zavarivanja.....	24
Slika 8. Vrste zavora kod MIG zavarivanja – ravni, kutni i prekloplni zavar.....	25
Slika 9. Pokreti zavarivača i održavanje stabilnog luka.....	27

## **POPIS TABLICA**

Tablica 1. Usporedba MIG i tradicionalnih metoda zavarivanja.....	10
---	----

