

# Usporedba konvencionalnog pulsnog i AC MIG zavarivanja aluminijske legure 5083 uz primjenu Ar-He mješavine

---

Nemec, Kristijan

Master's thesis / Diplomski rad

2023

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:785015>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-14**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **DIPLOMSKI RAD**

**Kristijan Nemeč**

Zagreb, 2023.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# DIPLOMSKI RAD

Mentor:

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

Student:

Kristijan Nemeč

Zagreb, 2023.

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

Zahvaljujem se mentoru dr. sc. Ivici Garašiću na ukazanom povjerenju, trudu, vremenu, a posebno znanju koje je podijelio sa mnom tijekom studija.

Isto tako posebno se zahvaljujem asistentici dr.sc. Maji Jurici za izdvojeno vrijeme i strpljenje tijekom izrade ovog diplomskog rada.

Zahvaljujem se svojim roditeljima, bratu, sestri i Ivani na pruženoj potpori tijekom dosadašnjeg života i obrazovanja.

Kristijan Nemeć



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
**FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE**



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:  
Proizvodno inženjerstvo, inženjerstvo materijala, industrijsko inženjerstvo i menadžment,  
mehatronika i robotika, autonomni sustavi i računalna inteligencija

Sveučilište u Zagrebu	
Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 - 04 / 23 - 6 / 1	
Ur.broj: 15 - 23 -	

## DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Kristijan Nemeć** JMBAG: 0035216348

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Usporedba konvencionalnog pulsnoć i AC MIG zavarivanja aluminijске legure 5083 uz primjenu Ar-He mješavine**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Comparison of conventional pulse and AC MIG welding of aluminium alloy 5083 with application of Ar-He mixture**

Opis zadatka:

U teorijskom dijelu potrebno je na temelju literaturnih izvora proućiti problematiku zavarivanja aluminijских legura serije 5000. Navesti osnovne aspekte zavarljivosti i utjecaja zavarivanja na svojstva spoja. Opisati osnovne znaćajke MIG postupka zavarivanja uz primjenu pulsniћ struja te komparativne prednosti primjene izmjenične struje. Analizirati odabir dodatnih materijala i zaštitniћ plinova za MIG zavarivanje legure 5083.

U eksperimentalnom dijelu na osnovnom materijalu 5083 provesti zavarivanje uz primjenu konvencionalnog pulsnoć i AC MIG postupka. Zavarivanje provesti na kutnom zavaru uz mehanizirano ili automatizirano gibanje te zaštitu procesa u mješavini argona i helija. Na zavarenim uzorcima provesti odgovarajuća ispitivanja prema zahtjevima norme HRN EN ISO 15614-2. U konaćnici, na osnovi rezultata ispitivanja donijeti zaključke o mogućoj primjeni AC MIG zavarivanja uz primjenu Ar-He mješavine te posebno naglasiti moguće poboljšanje produktivnosti u odnosu na konvencionalni pulsni MIG postupak.

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

Zadatak zadan:	Datum predaje rada:	Predvićeni datumi obrane:
4. svibnja 2023.	6. srpnja 2023.	17. – 21. srpnja 2023.
Zadatak zadao:		Predsjednik Povjerenstva:
Prof./Izv.prof./Doc.dr.sc. Ime Prezime		Prof. dr. sc. Ivica Garašić

**SADRŽAJ**

1. UVOD.....	1
2. KONVENCIONALNI MIG POSTUPAK ZAVARIVANJA .....	3
2.1. Prijenos metala u električnom luku pri konvencionalnom MIG zavarivanju.....	4
2.1.1. Impulsni način prijenosa metala .....	6
3. AC MIG .....	8
3.1. Uloga polariteta u zavarivanju.....	8
3.2. Parametri AC MIG zavarivanja .....	9
3.2.1. EN omjer i njegov utjecaj na geometriju zavara .....	9
3.2.1.1. Tanki materijali .....	9
3.2.1.2. Debeli materijali.....	13
3.2.2. Frekvencija i njezin utjecaj na geometriju zavara.....	14
4. ALUMINIJ .....	15
4.1. Karakteristike aluminija i aluminijskih legura .....	15
4.2. Zavarljivost aluminija i aluminijskih legura.....	18
4.3. Aluminijska legura 5083.....	20
5. ZAŠTITNI PLINOVI .....	22
5.1. Fizikalna svojstva zaštitnih plinova.....	22
5.2. Klasifikacija zaštitnih plinova .....	24
5.2.1. Argon .....	25
5.2.2. Helij.....	25
5.2.3. Najčešće korištene mješavine argona i helija za zavarivanje aluminija .....	26
6. EKSPERIMENTALNI DIO .....	27
6.1. Priprema spoja .....	27
6.2. Dodatni materijal .....	28
6.3. Oprema za zavarivanje .....	28
6.4. Zavarivanje uzoraka i priprema makroizbruska .....	31
6.5. Analiza rezultata .....	37
6.6. Utjecaj postupka na zavar .....	38
6.7. Utjecaj zaštitnog plina na zavar .....	41
ZAKLJUČAK .....	44

**POPIS SLIKA**

Slika 1. Sustav za konvencionalno MIG zavarivanje [6] .....	3
Slika 2. Prijenos metala [6] .....	5
Slika 3. Proces MIG-P [9] .....	6
Slika 4. Jedan impuls [7] .....	7
Slika 5. Utjecaj polariteta na profil zavara [6] .....	9
Slika 6. Primjer izgleda struje prilikom AC MIG zavarivanja [12] .....	10
Slika 7. Utjecaj EN omjera na penetraciju [13] .....	10
Slika 8. Utjecaj visokog EN omjera na geometriju zavara [11] .....	11
Slika 9. Ponašanje brzine taljenja žice u ovisnosti o EN omjeru [4] .....	12
Slika 10. Utjecaj EN omjera na popunjavanje razmaka [12] .....	13
Slika 11. Utjecaj EN omjera i struje na zavarivanje debelih materijala [32] .....	13
Slika 12. Utjecaj frekvencije na profil zavara [11] .....	14
Slika 13. Utjecaj frekvencije na izgled zavara [15] .....	14
Slika 14. Mikrostruktura zavarene aluminijske legure [20] .....	16
Slika 15. Vlačna čvrstoća aluminijske legure prikazana u vremenu [20] .....	17
Slika 16. Primjer utjecaja vodika na mikrostrukturu aluminijske legure [21] .....	18
Slika 17. Definicija zavarljivosti [22] .....	19
Slika 18. Disocijacija i ionizacija [24] .....	23
Slika 19. Utjecaj argona, helija i njihove mješavine na profil penetracije [7] .....	26
Slika 20. Pripojni zavari .....	27
Slika 21. Postava za zavarivanje .....	28
Slika 22. Welbee Inverter W400 .....	29
Slika 23. Welbee Inverter W400 s dodatnim materijalom .....	30
Slika 24. Karakteristike izvora struje Welbee Inverter W400 .....	30
Slika 25. Mecatech 250, stroj za poliranje .....	32
Slika 26. Izgled zavara uzorka 1A nakon čišćenja .....	33
Slika 27. Makroizbrusak uzorka 1A .....	33
Slika 28. Izgled zavara uzorka 1B nakon čišćenja .....	34
Slika 29. Makroizbrusak uzorka 1B .....	34
Slika 30. Izgled zavara uzorka 2A nakon čišćenja .....	35
Slika 31. Makroizbrusak uzorka 2A .....	35
Slika 32. Izgled zavara uzorka 2B nakon čišćenja .....	36
Slika 33. Makroizbrusak uzorka 2B .....	36
Slika 34. "Sučelje i kalibracija programa ImageJ" .....	37

---

**POPIS TABLICA**

Tablica 1. Fizikalna svojstva aluminijske legure 5083 H111 [33].....	20
Tablica 2. Kemijski sastav aluminijske legure 5083 H111 [33] .....	20
Tablica 3. Mehanička svojstva aluminijske legure 5083 H111 [33].....	21
Tablica 4. Kemijski sastav dodatnog materijala 5183 [34].....	28
Tablica 5. Mehanička svojstva dodatnog materijala 5183 u zavarenom spoju [34] .....	28
Tablica 6. Parametri zavarivanja .....	31
Tablica 7. Analizirani makroizbrusci uzorka 1A i uzorka 1B.....	38
Tablica 8. Geometrija zavara uzorka 1A i uzorka 1B. ....	38
Tablica 9. Unos topline u uzorak 1A i uzorak 1B.....	39
Tablica 10. Analizirani makroizbrusci uzorka 2A i uzorka 2B.....	40
Tablica 11. Geometrija zavara uzorka 2A i uzorka 2B. ....	40
Tablica 12. Analizirani makroizbrusci uzorka 1B i uzorka 2B.....	41
Tablica 13. Geometrija zavara uzorka 1B i uzorka 2B. ....	41
Tablica 14. Analizirani makroizbrusci uzorka 1A i uzorka 2A. ....	42
Tablica 15. Geometrija zavara uzorka 1A i uzorka 2A.....	42



---

**POPIS OZNAKA**

<b>Oznaka</b>	<b>Jedinica</b>	<b>Opis</b>
AC MIG	-	MIG zavarivanje izmjeničnom strujom
Ar	-	Argon
DCEN	-	<i>Direct Current Electrode Positive</i>
DCEP	-	<i>Direct Current Electrode Negative</i>
He	-	Helij
I	A	Jakost struje zavarivanja
I <sub>EN</sub>	A	Jačina prosječne struje na negativnom polu
I <sub>EP</sub>	A	Jačina prosječne struje na pozitivnom polu
ISO	-	<i>International organization for standardization</i> - Međunarodna organizacija za standardizaciju
k	-	Stupanj iskorištenja postupka zavarivanja
MIG	-	<i>Metal Inert Gas</i> - Elektrolučno zavarivanje taljivom elektrodom u zaštiti neutralnog plina
MIG – P	-	Impulsno MIG zavarivanje istosmjernom strujom
M <sub>2</sub>	-	Nagib pravca
REL	-	Ručno elektrolučno zavarivanje
T <sub>EN</sub>	s	Vrijeme trajanja negativnog impulsa
T <sub>EP</sub>	s	Vrijeme trajanja pozitivnog impulsa
TIG	-	<i>Tungsten Inert Gas</i> - Elektrolučno zavarivanje netaljivom elektrodom u zaštiti neutralnog plina
U	V	Napon zavarivanja
v <sub>z</sub>	cm/min	Brzina zavarivanja
Q	kJ/cm	Unos topline

**SAŽETAK**

Diplomski rad sastoji se od teorijskog i eksperimentalnog dijela. U teorijskom dijelu objašnjena je problematika zavarivanja aluminijskih legura te su navedeni postupci kojima je moguće zavariti aluminijske legure. Poblje su objašnjena dva postupka, MIG – P i AC MIG zavarivanje. Uz postupke zavarivanja, objašnjena je uloga zaštitnih plinova u procesu zavarivanja. Uspoređene su razlike između dva plina koja se koriste za zavarivanje aluminijskih legura, argona i helija.

U eksperimentalnom dijelu rada napravljena je usporedba između MIG – P i AC MIG postupka zavarivanja te usporedba između zaštitnog plina argona i zaštitne smjese argon + helij. Usporedba je napravljena analizom površine zavara te profila zavara. Na temelju analize uzoraka, dokazano je kako se AC MIG postupak postavlja kao bolji izbor za zavarivanje aluminijskih legura zbog svoje penetracije, povećane brzine i smanjenog unosa topline. Osim toga, analizom utjecaja zaštitnih plinova dokazano je da se dodatkom helija može utjecati na povećanje penetracije u osnovni materijal te se može utjecati na oblik profila zavara koji poprima zaobljeni oblik.

Ključne riječi: MIG – P, AC MIG, aluminijske legure, argon, helij

---

**SUMMARY**

This master's thesis consists of theoretical and experimental part. The theoretical part explains the issues related to welding aluminum alloys and describes different welding procedures used for welding aluminum alloys. Two welding processes, MIG – P and AC MIG, are explained in detail. Along with the welding procedures, the role of shielding gases in the welding process is also explained. The differences between the two gases used for welding aluminum alloys, argon and helium, are explained.

In the experimental part of the thesis, a comparison is made between the MIG – P and AC MIG welding procedures, as well as between the shielding gas argon and shielding gas mixture of argon and helium. The comparison was made through an analysis of the weld surface and weld profile. Sample analysis has proven that the AC MIG process is superior for welding aluminum alloys due to its penetration, increased speed, and reduced heat input. Furthermore, the analysis of the influence of shielding gases has shown that the addition of helium can impact the increased penetration into the base material and affect the shape of the weld profile, giving it a rounded form.

Key words: MIG – P, AC MIG, aluminum alloys, argon, helium

## 1. UVOD

U današnjem vremenu postoji vrlo velik broj postupaka spajanja, ali zavarivanje se postavilo kao jedan od najvažnijih i najraširenijih postupaka. Zavarivanje je proces koji je izrazito složen zbog nejednolikog i, relativno velikog, unosa topline u materijal čime nastupaju promjene u mikrostrukturi. Osim promjena u mikrostrukturi, dolazi i do pojave zaostalih naprezanja kao i deformacija. Uz nejednolik unos topline, zavarivanje otežava i sama osjetljivost procesa. Proces zavarivanja ovisi o velikom broju faktora poput vlažnosti, temperature, čistoće, tlaka i mnogih drugih faktora. Kako bi se smanjio utjecaj okolišnih uvjeta na zavar, koriste se zaštitni plinovi. [1]

Ukoliko se tijekom procesa zavarivanja koriste zaštitni plinovi, taj zavareni spoj imati će bolja gotovo sva svojstva od zavarenog spoja bez zaštitnog plina. Zaštitni plin ima velik broj prednosti poput lakšeg uspostavljanja i održavanja strujnog luka, poboljšanja mehaničkih, fizikalnih i kemijskih svojstava materijala. [2]

U današnje vrijeme posebna važnost pridaje se efikasnosti svih procesa. Iznimni naponi ulažu se u smanjenje potrošnje energije na svakom koraku. Proizvođači svih vrsta transportnih vozila pokušavaju implementirati što više lakih aluminijskih legura kako bi se smanjila potrošnja energije. Uz transportna sredstva, velika potreba za aluminijskim legurama i ostalim korozijski postojanim metalima, javlja se u kemijskim i prehrambenim industrijama kao i u medicini. Zbog svega navedenog, iznimno je važno odabrati odgovarajući proces zavarivanja takvih materijala. [3]

Kao što je navedeno, veliki nedostatak zavarivanja jest prekomjerni unos topline u materijal, što kod korozijski postojanih legura nije dopustivo jer ono rezultira deformacijama, promjenama u mikrostrukturi, poroznosti materijala i mnogim drugim neželjenim pojavama. [1]

Jedan od najčešće korištenog postupka, kojim se izbjegavaju neželjene pojave u metalu, za zavarivanje aluminijskih legura i nehrđajućih čelika jest TIG (*eng. Tungsten Inert Gas*) postupak. Iako TIG postupak zavarivanja rezultira zavarom visoke kvalitete, ukoliko je dobro proveden, njegov glavni nedostatak, pogotovo u današnjem vremenu masovne proizvodnje, jest izrazito niska brzina zavarivanja. [4]

Kako bi se eliminirala niska brzina zavarivanja, a zadržala dobra svojstva zavara koja omogućuje TIG proces, odabire se MIG (*eng. Metal Inert Gas*) postupak zavarivanja. MIG

---

postupak je izrazito fleksibilan postupak zavarivanja koji omogućuje velik broj modifikacija samog postupka. Za zavarivanje aluminijskih legura i korozijski postojanih čelika, najčešće se koristi MIG-P (MIG zavarivanje impulsnom strujom) te AC MIG zavarivanje (MIG zavarivanje izmjeničnom strujom). Modifikacije MIG postupka pobliže će biti objašnjene i uspoređene u daljnjem tekstu. [4]

## 2. KONVENCIONALNI MIG POSTUPAK ZAVARIVANJA

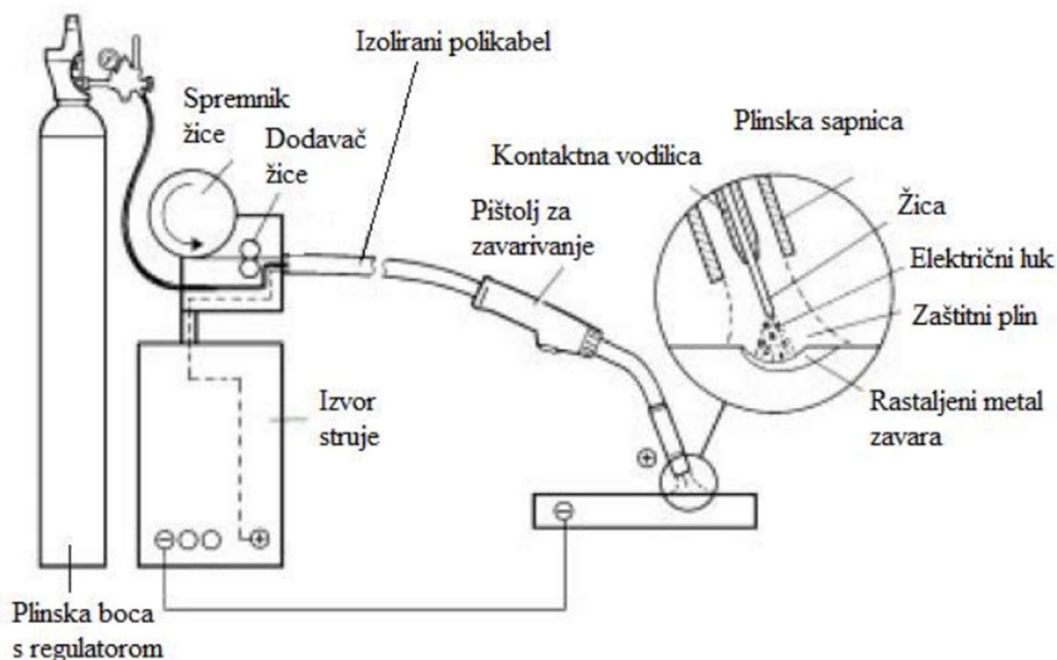
MIG postupak zavarivanja, prema normi HRN EN 4063, spada pod elektrolučne postupke zavarivanja. Elektrolučni postupci zavarivanja su postupci kod kojih dolazi do taljenja metala djelovanjem električnog luka nastalog između elektrode (neprekidno dobavljana žica) te osnovnog materijala. [5]

MIG postupak zavarivanja provodi se u atmosferi inertnog plina koji se, pomoću sapnice, dobavlja do mjesta zavara. Inertni plin označava one plinove koji ne reagiraju s osnovnim i dodatnim materijalom. Najčešće su to argon (Ar) ili helij (He). Utjecaj dodatnog plina pobliže će biti objašnjen u budućim poglavljima. [5]

MIG postupak spada pod poluautomatske postupke zbog toga što je dodavanje žice automatsko, dok je pomicanje pištolja ručno. Iako spada pod poluautomatske postupke, postoje varijacije MIG postupka gdje je i pomicanje pištolja automatizirano, čime postupak prelazi u automatski. [6]

Prilikom MIG zavarivanja materijal je najčešće spojen na minus pol dok je žica spojena na pozitivan pol. Kontaktnim vodilicama struja se dovodi na žicu čime se uspostavlja električni luk koji omogućava taljenje osnovnog i dodatnog materijala te njihovo zavarivanje. [6]

Na slici 1. moguće je vidjeti osnovne dijelove sustava za MIG zavarivanje.



Slika 1. Sustav za konvencionalno MIG zavarivanje [6]

Sustav za MIG zavarivanje sastoji se od [6]:

- Izvora struje
- Sustava za dovođenje žice
- Plinske boce
- Spremnika rashladnog sredstva
- Pištolja za zavarivanje
- Izoliranog polikabela

MIG postupak ima velik broj prednosti, od kojih su neki [7]:

- Mogućnost zavarivanja u svim položajima
- U usporedbi s drugim postupcima zavarivanja, relativno malen unos topline
- Mogućnost zavarivanja velikog raspona materijala
- Visoka iskoristivost procesa i žice za zavarivanje
- Relativno jednostavna prilagodba i nadogradnja u neku od varijacija MIG postupka
- Izvrstan izgled zavara
- Minimalno prskanje
- Minimalno naknadno čišćenje zavara
- Nizak udio difundiranog vodika (<5mL/100 g zavara)

Iako MIG postupak ima velik broj prednosti, isto tako ima i neke nedostatke [7]:

- Oprema je složena u usporedbi s ostalim postupcima
- U posebnim slučajevima ograničen pristup pištolja mjestu zavara

### **2.1. Prijenos metala u električnom luku pri konvencionalnom MIG zavarivanju**

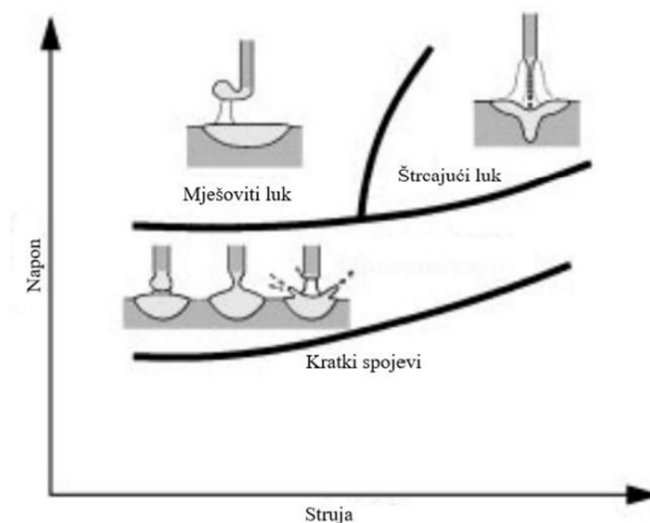
Prijenos metala u električnom luku prilikom MIG zavarivanja ovisi o velikom broju faktora poput parametara zavarivanja, površinske napetosti, gravitacijskoj sili, elektromagnetskim silama između osnovnog i dodatnog materijala, zaštitnoj atmosferi plina te sili pritiska plazme. [6]

Prijenos metala u električnom luku, posebno u današnjem vremenu kada postoji velik broj modifikacija MIG postupka, definiran je na nekoliko načina ovisno o autoru teksta. No iako postoji velik broj podjela, postoje dvije osnovne podjele, a to su [6]:

- Slobodan/prirodan prijenos metala

- Područje kratkih spojeva
- Područje mješovitog luka
- Područje štrcajućeg luka
- Kontrolirani prijenos metala
  - Impulsni način prijenosa metala

Na slici 2. moguće je vidjeti raspodjelu prijenosa metala u električnom luku.



**Slika 2. Prijenos metala [6]**

Prijenos metala kratkim spojevima nastupa taljenjem kontinuirano dobavljane žice zbog kratkog spajanja s talinom. Kako bi ovaj prijenos metala bio moguć, potreban je fizički kontakt između žice i taline. Prednosti ovog načina prijenosa metala su mali unos topline, mogućnost zavarivanja u svim položajima, dok su nedostaci moguće povećano prskanje. [6, 7, 8]

Prijenos metala mješovitim lukom nastupa taljenjem kontinuirano dobavljane žice kombinacijom kratkih spojeva i štrcajućeg luka. Prilikom ovog načina prijenosa metala povećano je prskanje te je geometrija zavora narušena zbog različitih veličina odvojenih čestica. [6, 7, 8]

Područje štrcajućeg luka nastupa zbog velike energije električnog luka koja se dobiva povećanjem jakosti struje i napona. Velika energija rezultira formiranjem i odvajanjem kapljica s vrha žice te one, slobodnim letom, padaju na osnovni materijal kroz zaštitnu atmosferu. Formiranje i odvajanje čestica nastupa bez kontakta dodatnog i osnovnog materijala. Prednosti ovog postupka su velika količina deponiranog materijala i minimalno štrcanje, dok su nedostaci povećan unos topline i mogućnost primjene u isključivo horizontalnom položaju. [6, 7, 8]



Kako se MIG-P postupak koristi za zavarivanje aluminijskih legura i korozijski postojanih čelika, pobliže će biti objašnjen u sljedećem podnaslovu.

### 2.1.1. Impulsni način prijenosa metala

Impulsno MIG zavarivanje ili MIG - P, (eng. *pulsed MIG welding*), kontrolirani je prijenos metala štrcajućim lukom prilikom kojeg se izmjenjuju dvije vrijednosti istosmjerne struje, maksimalna (vršna) i minimalna (bazna/osnovna). Prijenos metala odvija se prilikom maksimalnog iznosa struje. [6, 7, 8]

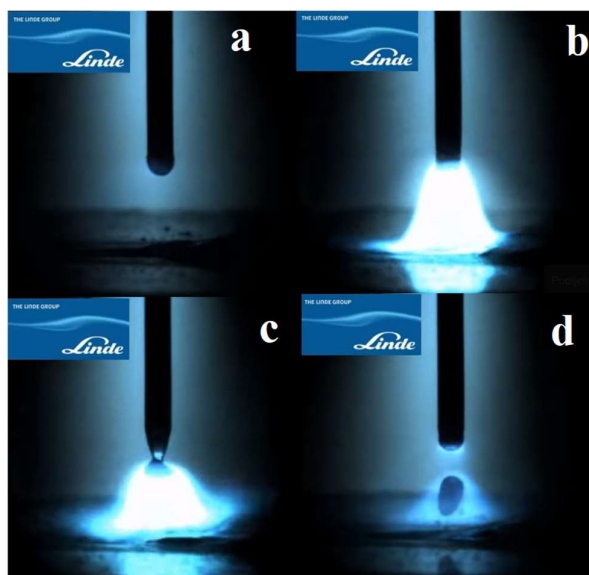
MIG-P prijenos metala razvijen je kako bi se zadovoljila 2 zahtjeva:

- Kontrola prskanja
- Eliminacija nepotpune fuzije koja se događa kod ostalih načina prijenosa metala

U početku primjene MIG-P postupka, ono se koristilo za zavarivanje niskolegiranih čelika visoke čvrstoće u brodogradnji. Glavna prednost MIG-P postupka je tada bila povećana iskoristivost elektrode te zavari sa smanjenim udjelom vodika u zavaru.[7]

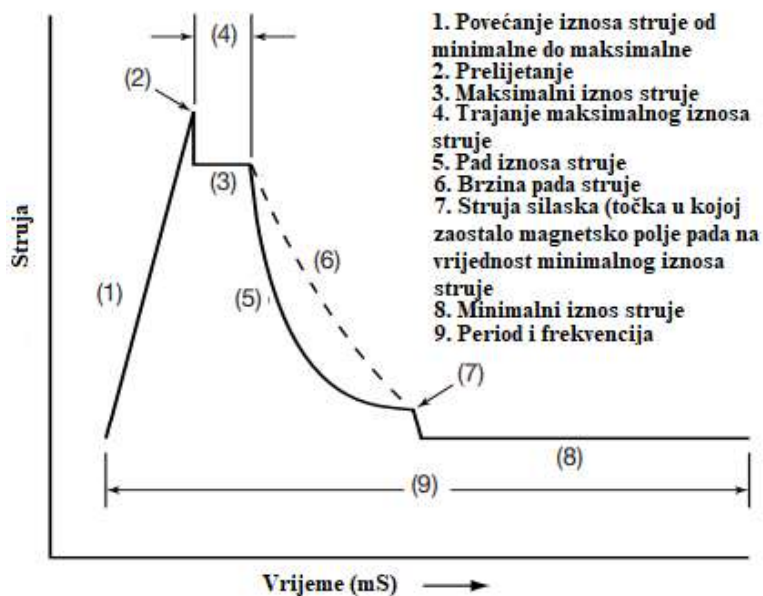
Kao što je napisano, u ovom načinu prijenosa metala, izmjenjuju se dvije vrijednosti struje. Minimalni iznos struje je onaj iznos koji je dovoljan za održavanje električnog luka, dok maksimalni iznos struje (struja impulsa) prelazi vrijednost područja mješovitog luka gdje je osigurano da nema prijenosa kratkim spojevima. Struja impulsa dovoljne je jačine da zagrije, rastali i oslobodi jednu kapljicu sa žice. Trajanje maksimalne struje je minimalno, u idealnom slučaju ono traje samo onoliko koliko traje formiranje i odvajanje jedne kapljice. [6, 7, 8]

Slika 3. prikazuje nastajanje i odvajanje jedne kapljice dodatnog materijala.



Slika 3. Proces MIG-P [9]

Slika 4. prikazuje jedan impuls u MIG – P načinu prijenosa metala.



Slika 4. Jedan impuls [7]

Prednosti MIG-P prijenosa metala [7]:

- Smanjeno ili u potpunosti otklonjeno prskanje
- Izvrstan izgled zavara
- Smanjen unos topline, samim time smanjene deformacije i zaostala naprežanja
- Smanjeni udio vodika u zavaru
- Mogućnost automatizacije
- Velike brzine zavarivanja
- Relativno jednostavno za korištenje
- Visoka iskoristivost elektrode

Nedostatci MIG-P prijenosa metala [7]:

- Oprema za ovu vrstu prijenosa metala je skuplja od konvencionalnog MIG zavarivanja
- Složenost parametara
- Potrebno korištenje skupljih plinskih mješavina

### 3. AC MIG

AC MIG postupak razvio se kao posljedica standarda koje je vremenom postavila industrija. Industrija je nalagala istraživanje i razvijanje materijala koji bi omogućili smanjenje mase konstrukcija uz zadržavanje, odnosno poboljšavanje, mehaničkih i kemijskih svojstava. To je dovelo do potrebe za zavarivanjem materijala male debljine, odnosno debljih materijala manje gustoće, koji imaju dobra mehanička i kemijska svojstva. [3]

Zavarivanje navedenih materijala konvencionalnim metodama dovelo je do velikih problema poput nemogućnosti potpunog spajanja materijala, zavora koji ne zadovoljava zahtjeve te progaranja. Uz navedene probleme, konvencionalne metode rezultirale bi potraćenim vremenom i uložnim novcem kako bi se dobio zavar zadovoljavajuće kvalitete. [10]

Zbog navedenog, razvijen je AC MIG postupak koji omogućava kvalitetnije, brže i efikasnije zavarivanje modernih materijala u usporedbi s konvencionalnim postupcima.

#### 3.1. Uloga polariteta u zavarivanju

Odabirom načina miješanja dodatnog i osnovnog materijala dobivaju se različite karakteristike zavora.

Najčešći način spajanja u konvencionalnom MIG postupku zavarivanja istosmjernom strujom jest spajanje dodatnog materijala na + (anoda), dok se osnovni materijal spaja na – (katoda). Takav način spajanja naziva se DCEP, odnosno (eng. *Direct Current Electrode Positive*). Ukoliko se koristi ovaj način spajanja električni luk imati će sljedeće karakteristike [4]:

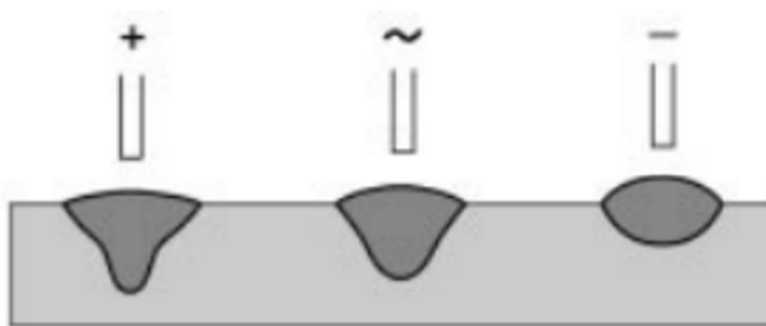
- Stabilan električni luk
- Efekt čišćenja oksida
- Duboka penetracija

Drugi način spajanja jest spajanje dodatnog materijala na – (katoda), dok se osnovni materijal spaja na + (anoda). Takav način spajanja naziva se DCEN, odnosno (eng. *Direct Current Electrode Negative*). Karakteristike električnog luka u DCEN spoju su [4]:

- Blaga nestabilnost luka
- Veća količina taline
- Manja penetracija

Prilikom AC MIG zavarivanja moguće je ostvariti prednosti korištenja pozitivnog i negativnog polariteta uz dobro namještanje parametara. AC MIG zavarivanje omogućava čišćenje oksida, stabilnost električnog luka uz vrlo dobru kontrolu oblika i dubine penetracije. [4]

Slika 5. prikazuje utjecaj polariteta na profil zavara.



Slika 5. Utjecaj polariteta na profil zavara [6]

### 3.2. Parametri AC MIG zavarivanja

Kao što je već objašnjeno, AC MIG zavarivanje koristi izmjeničnu struju kako bi se obuhvatile prednosti DCEN i DCEP postupka. Izmjenična struja sadrži elektrone promjenjivog polariteta, odnosno elektrone koji periodički mijenjaju smjer gibanja.

Kako se pri AC MIG zavarivanju koristi izmjenična struja, dva faktora se postavljaju kao ključna, a to su [11]:

- EN omjer/balans pozitivnog i negativnog polariteta
- Frekvencija

#### 3.2.1. EN omjer i njegov utjecaj na geometriju zavara

##### 3.2.1.1. Tanki materijali

Slika 6. prikazuje primjer tijeka struje prilikom AC MIG zavarivanja. Na slici je moguće vidjeti već objašnjeno, a to je kako se polaritet mijenja između DCEN i DCEP. Tijek struje izražava se preko EN omjera, a on predstavlja omjer struje negativnog polariteta i ukupne struje u trajanju jednog ciklusa izmjenične struje. EN omjer izražava se preko sljedeće jednadžbe [12]:

$$EN = \frac{I_{EN} \times T_{EN}}{(I_{EP} \times T_{EP}) + (I_{EN} \times T_{EN})} \times 100\%$$

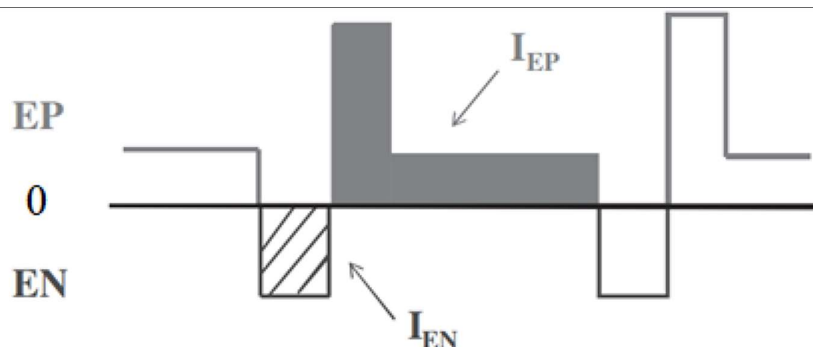
Oznake navedene u jednadžbi predstavljaju:

$I_{EN}$  – Jačina prosječne struje na negativnom polu, [A]

$I_{EP}$  – Jačina prosječne struje na pozitivnom polu, [A]

$T_{EN}$  – Vrijeme trajanja negativnog impulsa, [A]

$T_{EP}$  – Vrijeme trajanja pozitivnog impulsa, [A]



Slika 6. Primjer izgleda struje prilikom AC MIG zavarivanja [12]

Slika prikazuje simboličan prikaz AC MIG zavarivanja. Oblik i iznos struje i napona mogu se prilagođavati određenoj primjeni. [12]

EN omjer postavlja se kao najvažniji parametar u AC MIG zavarivanju zbog čega je potrebno vrlo dobro razumijevanje njegovog utjecaja na sam proces zavarivanja.

Promjenom EN omjera moguće je kontrolirati penetraciju, unos topline, količinu depozita te isto tako riješiti problem pripreme spoja gdje je razmak između materijala velik. [4, 12]

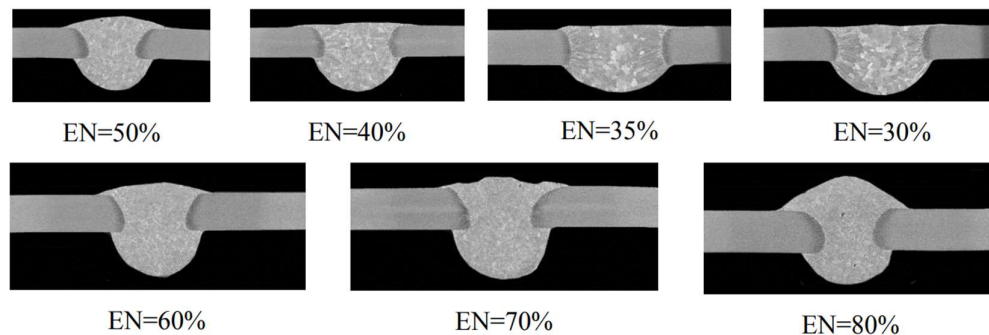
Oblik i dubina penetracije jednostavno se može kontrolirati EN omjerom. Povećanjem EN omjera, pri konstantnoj brzini dodavanja žice, dolazi do smanjenja srednje struje, a samim time i dubine i širine penetracije dok se nadvišenje zavara povećava. Primjer je moguće vidjeti na slici 7. koja prikazuje različitu geometriju zavara za različite EN omjere pri konstantnoj brzini zavarivanja. [13]

EN omjer 0%	EN omjer 10%	EN omjer 20%	EN omjer 40%
$I_a = 98A / V_a = 17.6V$	$I_a = 88A / V_a = 16.2V$	$I_a = 83A / V_a = 15.6V$	$I_a = 65A / V_a = 15.6V$
Brzina taljenja žice: 600 cm/min ; Brzina zavarivanja: 60 cm/min			

Slika 7. Utjecaj EN omjera na penetraciju [13]

Ukoliko je želja povećati EN omjer, a zadržati konstantni iznos struje, potrebno je povećati brzinu dobavljanja žice. Pri konstantnoj struji, ne dolazi do značajnih promjena u dubini i obliku penetracije. Povećanjem EN omjera, isto tako rasti će nadvišenje zavara. [13]

Iako povećanje EN omjera pozitivno utječe na penetraciju kod tankih limova, preveliko povećanje EN omjera rezultirati će nekvalitetnim zavarom. Slika 8. prikazuje kako, ukoliko se pretjera s visinom EN omjera, pojavit će se nadvišenje korijena te će zavar biti nepravilne geometrije. [11]



**Slika 8. Utjecaj visokog EN omjera na geometriju zavara [11]**

Kako je objašnjeno u utjecaju EN omjera na geometriju zavara, povećanje EN omjera, pri konstantnoj brzini zavarivanja, rezultirati će smanjenjem iznosa struje i napona. [4, 12] Smanjenje struje i napona direktno utječe na smanjenje unosa topline, što je moguće zaključiti iz sljedeće formule dobivene iz norme HRN EN ISO 1011 [14]:

$$Q = k \times \frac{U \times I}{v_z} \times \frac{60}{1000} \text{ [kJ/cm]}$$

Oznake navedene u jednadžbi predstavljaju:

$Q$  – unos topline, [kJ/cm]

$k$  – stupanj iskorištenja postupka zavarivanja (prema normi HRN EN 1011,  $k \approx 0,8$  za MIG/MAG postupak)

$U$  – napon zavarivanja, [V]

$I$  – jakost struje zavarivanja, [A]

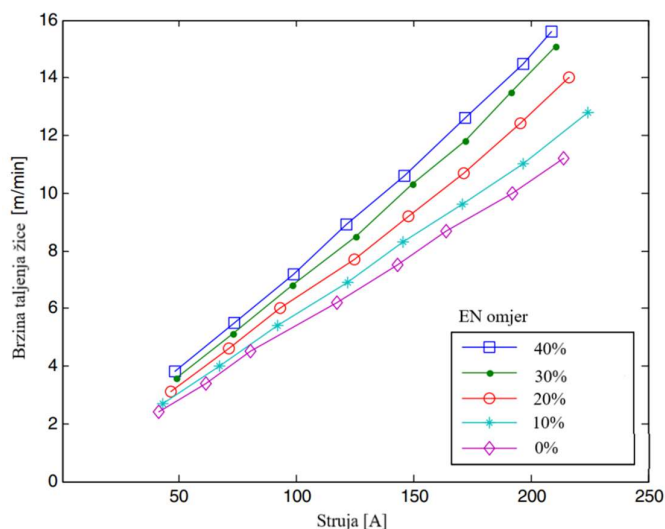
$v_z$  – brzina zavarivanja, [cm/min]

Isto tako, ukoliko su struja i napon konstantni, a poveća se brzina zavarivanja moguće je zaključiti da će efekt biti identičan. [4,12]

Parametar na koji je isto tako moguće utjecati povećanjem EN omjera je količina depozita. Razlog tome je ponašanje žice u električnom luku i načinu na koji je spojena u električni luk. Ukoliko je žica spojena na negativni pol (katoda) električni luk rasporedit će se na veću površinu dodatnog materijala te će se više dodatnog materijala zagrijavati, kapljice će biti veće. Za razliku od negativnog pola, pozitivni pol rezultirati će zagrijavanjem i uspostavljanjem električnog luka na samom vrhu žice što će dovesti do visokog zagrijavanja jedne kapljice i

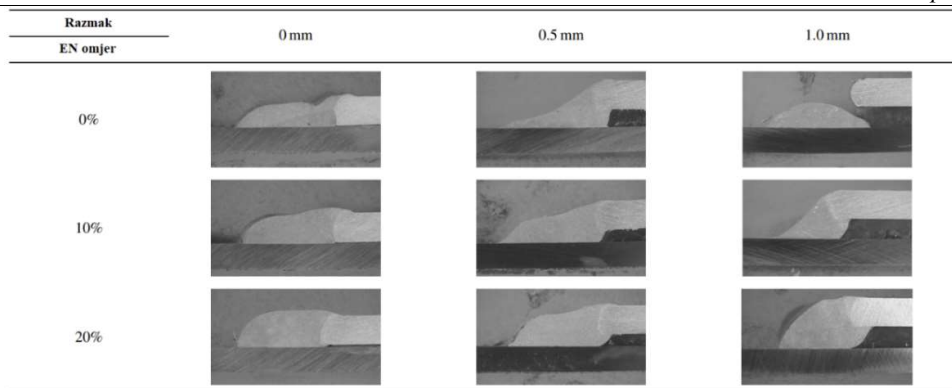
visokog unosa topline. Prilikom AC MIG zavarivanja, događaju se obje pojave. Vrijeme pozitivnog pola zaduženo je za prijenos dodatnog materijala u talinu, dok negativni pol ima zadatak kontrole penetracije i smanjenja unosa topline. [4]

Zbog navedenog moguće je zaključiti kako će se povećanjem EN omjera, povećati trajanje negativnog impulsa što znači kako će se povećati količina depozita pri konstantnom iznosu struje. Isto tako moguće je zaključiti da ukoliko se želi zadržati jednaka količina depozita kao pri MIG-P zavarivanju, moguće je smanjiti iznos struje što povoljno utječe na unos topline kao i na mogućnost progaranja. Slika 9. prikazuje ponašanje brzine taljenja žice u ovisnosti o EN omjeru. [4]



**Slika 9. Ponašanje brzine taljenja žice u ovisnosti o EN omjeru [4]**

Još jedan ključan faktor koji AC MIG postupak zavarivanja omogućava, a to je popunjavanje praznina/razmaka između materijala. S obzirom da se prilikom zavarivanja tankog aluminija najčešće koristi preklopni spoj, moguća je pojava nepravilnosti u zavaru poput nepotpune fuzije materijala te deformiranja materijala zbog prekomjernog unosa topline. Zbog toga, potrebno je osigurati postupak zavarivanja koji će imati dovoljnu toleranciju na popunjavanje razmaka. MIG-P postupkom moguće je zavariti tanke ploče aluminija koje imaju minimalan razmak između, iako i tu postoji mogućnost progaranja zbog debljine osnovnog materijala. AC MIG postupak omogućava povećanjem EN omjera rješavanje navedenog problema. Rješenje problema proizlazi iz već objašnjene povećane količine taline koja je moguća zbog negativnog pola na kojem se odvajaju čestice većeg volumena. Uz to, smanjen je iznos struje i napona koji će pozitivno utjecati na potencijalno progaranje. Slika 10. prikazuje utjecaj EN omjera na popunjavanje razmaka između materijala (uvjeti za sva tri omjera su identična, napon u iznosu od 16.7 V, prosječna struja u iznosu od 47 A te brzina zavarivanja 0,5 m/min).. [12]

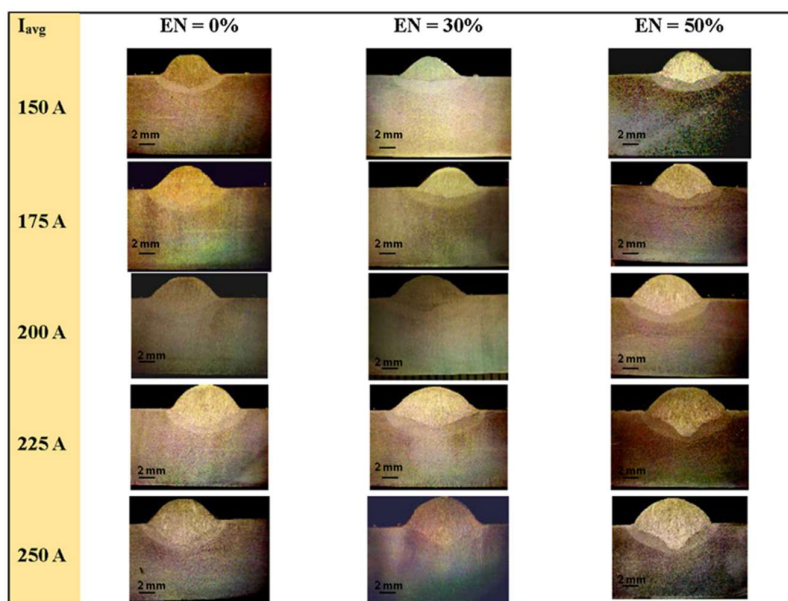


Slika 10. Utjecaj EN omjera na popunjavanje razmaka [12]

### 3.2.1.2. Debeli materijali

Prilikom zavarivanja tankih limova AC – MIG postupkom, povećanjem EN omjera moguće je smanjiti kontrolu penetracije kako bi se izbjeglo progaranje.

Naime, zanimljivu i neočekivanu pojavu moguće je primijetiti prilikom zavarivanja debelih materijala. Pojava je vidljiva na slici 11.



Slika 11. Utjecaj EN omjera i struje na zavarivanje debelih materijala [32]

Iz slike 11. moguće je vidjeti promjenu dubine i geometrije zavara pri različitim EN omjerima i jakostima struje. Zanimljiva pojava javlja se prilikom zavarivanja strujom jačom od 200 A i EN omjerom koji iznosi 50%. Vidljivo je da oblik penetracije mijenja svoj oblik u tanki i duboki na vrhu zavara. Pojava nastaje zbog povećanja struje što za rezultat ima povećanje tlaka električnog luka i povećanje elektromagnetskih sila. Povećanjem navedenih mehanizama dolazi



do promjene konvektivnog prijenosa topline u zavaru, na način da je više usmjeren u osnovni materijal što dovodi do smanjenja širine zavora i povećanja njegove dubine. [32]

Važno je napomenuti kako daljnjim povećavanjem EN omjera na 60%, pri struji zavarivanja većoj od 200A, dolazi do nestabilnosti luka i prskanja. [32]

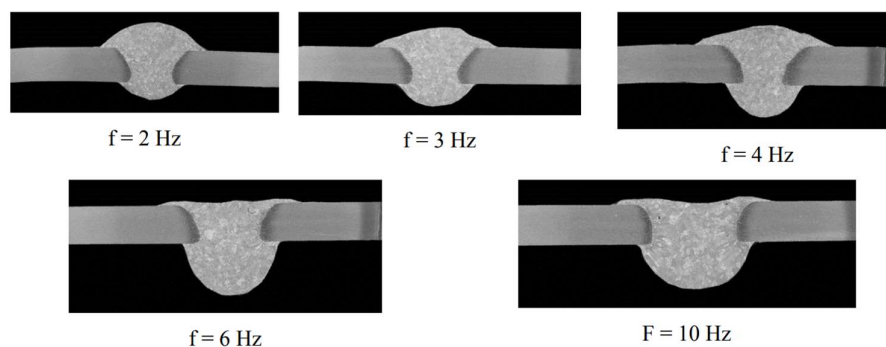
Iz svega navedenog, moguće je zaključiti kako AC – MIG kao postupak zavarivanja nudi izrazitu fleksibilnost zbog toga što omogućuje zavarivanje tankih limova bez problema progaranja te isto tako omogućava zavarivanje debelih limova s izvrsnom penetracijom. [32]

Iako je fenomen prikazan, postoje autori koji tvrde kako bi povećanjem EN omjera, neovisno o jačini struje, dubina penetracije trebala padati. [32]

Kako bi se fenomen dokazao, u ovom radu provest će se eksperiment koji će prikazati što će se dogoditi sa zavarom prilikom zavarivanja strujama većim od 200 A i EN omjerom jednakim 50%

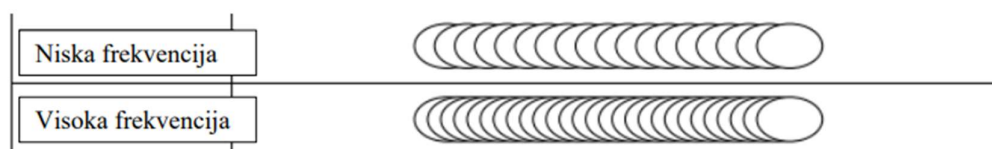
### 3.2.2. *Frekvencija i njezin utjecaj na geometriju zavora*

Parametar kojim je moguće utjecati na kvalitetu i geometriju zavora pri AC MIG zavarivanju jest frekvencija. Frekvencija je parametar koji predstavlja koliko impulsa se događa u jednoj sekundi (1Hz znači jedan kompletni impuls u sekundi). Povećanje frekvencije popraćeno je povećanjem penetracije korijena te smanjenjem nadvišenja zavora. Slika 12. prikazuje utjecaj frekvencije na zavar. [11]



Slika 12. Utjecaj frekvencije na profil zavora [11]

Isto tako, visina frekvencije određuje estetski izgled zavora koji je moguće vidjeti na slici 13.



Slika 13. Utjecaj frekvencije na izgled zavora [15]

## 4. ALUMINIJ

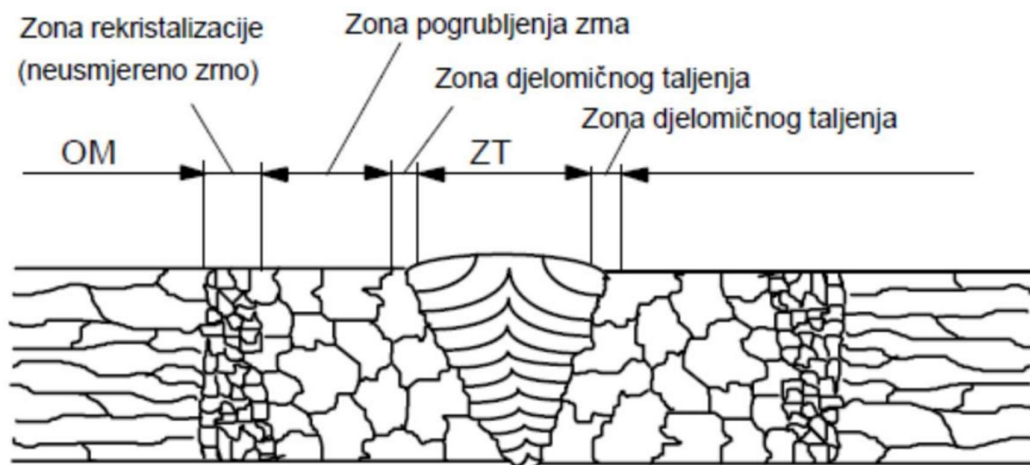
Aluminij kao element otkriven je 1825. godine. Iako je otkriven tada, njegovo značajno korištenje u industriji nije započelo sve do 1886. godine. Gotovo 40 godina prošlo je od njegovog otkrića do uporabe zbog toga što je potrebno bilo otkriti kako ga upotrijebiti. Razlog tome je što su svojstva čistog aluminija izrazito loša – dan danas se čisti aluminij gotovo pa i ne koristi. 1886. godine označen je početak industrijske proizvodnje aluminija iz rude boksita. Isto tako otkriveno je kako se dodavanjem raznih legiranih elemenata poput mangana (Mn), magnezija (Mg), cinka (Zn), bakra (Cu) i silicija (Si) mogu drastično poboljšati svojstva aluminija. Uz to, otkriveno je precipitacijsko očvršnuće koje aluminijskim legurama povisuje čvrstoću na razinu pojedinih čelika, dok je masa legure gotovo pa i tri puta manja. [18]

Zbog velikog razvoja aluminija i njegovih legura, javila se potreba za novim načinima oblikovanja i spajanja. Upotreba aluminija rezultirala je razvojem elektrolučnih postupaka zavarivanja. Elektrolučni postupci koji su se postavili kao ključni za spajanje aluminijskih legura su TIG i MIG postupci, dok se u suvremenom svijetu AC MIG postavlja kao najbolji novi postupak za spajanje. [18]

### 4.1. Karakteristike aluminija i aluminijskih legura

Aluminijske legure su materijali koji su posebni zbog izvrsnih mehaničkih svojstava pri niskoj gustoći. Osim izvrsnih mehaničkih svojstava, korozijska postojanost aluminijskih legura naspram ugljičnih čelika puno je bolja. Korozijska postojanost aluminijskih legura moguća je zbog tankog sloja oksida koji se formira na površini materijala. Aluminijev oksid ( $Al_2O_3$ ) membrana je debljine svega 0,01mm na materijalu sobne temperature. Iako oksidni sloj daje odličnu postojanost prema koroziji, on izaziva posebne probleme prilikom zavarivanja. Razlog tome je što talište aluminijskih legura iznosi oko  $600^{\circ}C$  dok talište oksidnog sloja iznosi  $2050^{\circ}C$ . Ukoliko se oksidni sloj ne odstrani može se zaključiti kako će prvo doći do taljenja legure, a tek onda do taljenja oksidnog sloja što će rezultirati vrlo lošim ili nemogućim zavarivanjem. Isto tako, ukoliko se oksidni sloj ne očisti pravilno te ostanu dijelovi sloja postoji velika opasnost od njegovog miješanja u talinu što će rezultirati pojavom poroznosti, pukotina i smanjenjem mehaničkih svojstava. Iz navedenog, jako je bitno očistiti oksidni sloj prije samog zavarivanja, bilo mehaničkim ili kemijskim putem te osigurati onemogućavanje njegovog ponovnog formiranja na površini tijekom zavarivanja na način da se onemogući dotok kisika na površinu korištenjem zaštitnog plina. Isto tako potrebno je osigurati otklanjanje oksidnog sloja tijekom zavarivanja na način da se elektroda spoji na plus pol. [18, 19]

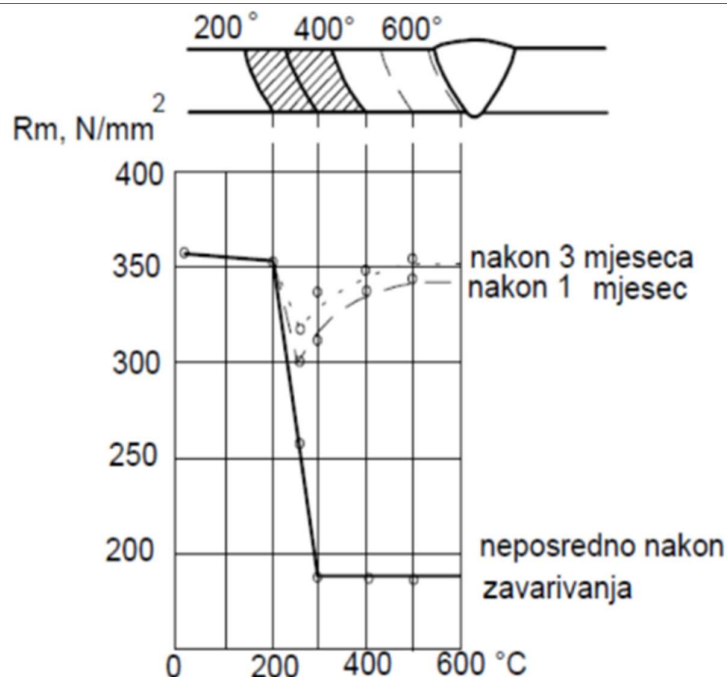
Uz oksidni sloj, toplinska vodljivost aluminijskih legura je još jedno svojstvo koje otežava zavarivanje. Razlog tome je što je toplinska vodljivost aluminijskih legura visoka te rezultira izrazito brzim širenjem topline po cijelom materijalu što otežava lokalno taljenje materijala. Iako je talište legura relativno nisko, zavarivanje je potrebno provesti s relativno snažnim i koncentriranim električnim lukom kako bi se riješio problem toplinske vodljivosti. Ukoliko električni luk ne bi bio dovoljno jak dobila bi se široka zona utjecaja topline (ZUT) što bi negativno utjecalo na mehanička i kemijska svojstva materijala. [18, 19]



**Slika 14. Mikrostruktura zavarene aluminijske legure [20]**

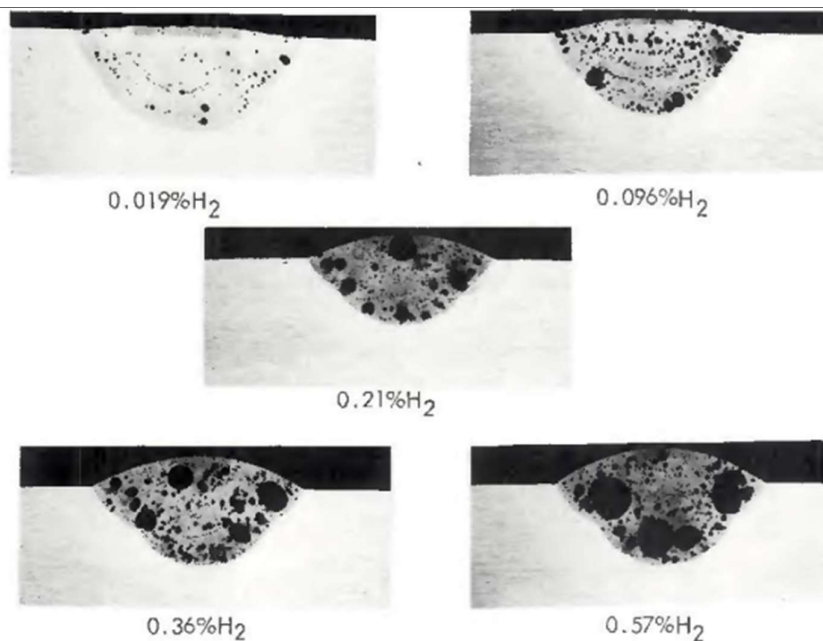
Slika 14. prikazuje kako izgleda mikrostruktura zavarenog spoja i ZUT – a u aluminijskoj leguri. Moguće je primijetiti kako nastupaju promjene u mikrostrukтури materijala, a poznato je kako mikrostruktura utječe na mehanička i kemijska svojstva. Zavarivanje aluminijskih legura, rezultirati će neizbježnim smanjenjem svojstava. Iako će se dio svojstava izgubiti, potrebno je minimizirati taj utjecaj korištenjem pravilnog postupka zavarivanja s pravilnim parametrima te pripremom spoja kao i naknadnom obradom. [20]

Mehanička svojstva aluminijskih legura tik nakon zavarivanja najniža su, no ona se mogu poboljšati dozrijevanjem odnosno starenjem materijala. Na slici 15. prikazana je ovisnost vlačne čvrstoće u vremenu jedne aluminijske legure. Iz slike je moguće primijetiti kako se nakon tri mjeseca čvrstoća približila nazivnoj, dok se čvrstoća u rekristalizacijskoj zoni (200 °C – 400 °C) smanjila za približno 70 N/mm<sup>2</sup>. [20]



**Slika 15. Vlačna čvrstoća aluminijske legure prikazana u vremenu [20]**

Sljedeće svojstvo aluminijskih legura na koje je izrazito važno obratiti pozornost jest topivost vodika u rastaljenom stanju. Vodik nepovoljno utječe na zavar zbog toga što dovodi do poroznosti i do pukotina te komprimira kvalitetu zavara. Topivost vodika u rastaljenom aluminiju je i do dvadeset puta veća nego li je to slučaj u krutom stanju. Ukoliko vodik nije eliminiran iz okolne atmosfere on će se otapati u talini, što će tijekom kristalizacije materijala rezultirati zarobljavanjem vodika u mikrostrukturi materijala, kada dođe do naglog pada topivosti vodika. Zarobljeni vodik stvoriti će poroznost koja će utjecati na smanjenje svojstava. Primjer utjecaja vodika na aluminijsku leguru 1100 moguće je vidjeti na slici 16. [21]

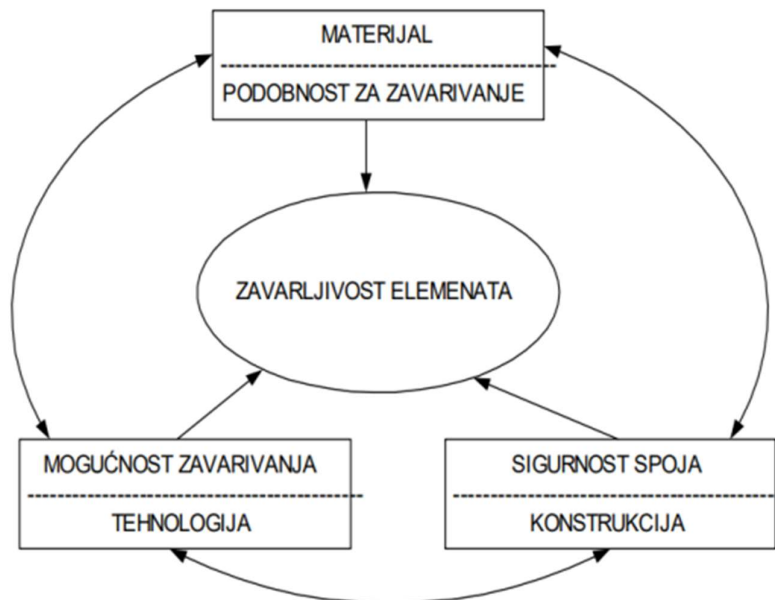


**Slika 16. Primjer utjecaja vodika na mikrostrukturu aluminijske legure [21]**

Kao i koeficijent toplinske vodljivosti, aluminij ima i visok koeficijent toplinskog istežanja. Toplinsko istežanje utječe na deformacije materijala tijekom zavarivanja, a pošto je kod aluminija visok, biti će velike i toplinske deformacije. Zbog agresivnog i nepravilnog unosa topline tijekom zavarivanja u materijal on će se deformirati te postoji opasnost od pojava pukotina u samom zavaru, ali i u zoni utjecaja topline. [19]

#### **4.2. Zavarljivost aluminija i aluminijskih legura**

Zavarljivost je pojam koji je definiran na ogroman broj načina ovisno o autoru teksta, zbog čega će se u ovom radu koristiti definicija zavarljivosti prema Međunarodnoj organizaciji za standardizaciju (eng. *International organization for standardization* – ISO). Definicija glasi: „Metalni materijal smatra se zavarljivim u određenom stupnju, utvrđenim postupkom zavarivanja i za određenu primjenu, ako se kontinuitet materijala ostvaruje zavarenim spojem izvedenim pod uvjetima predviđenim za ostvarivanje tog stupnja zavarljivosti. Zavareni spoj mora u potpunosti odgovarati prihvaćenim kriterijima kako svojim lokalnim karakteristikama, tako i utjecajem na konstrukciju koje je sastavni dio.“ [22]. Slika 17. prikazuje definiciju zavarljivosti prema ISO.



**Slika 17. Definicija zavarljivosti [22]**

Iz slike je moguće vidjeti kako postoje tri glavne skupine koje utječu na zavarljivost materijala, a to su [22]:

- Materijal – odnosi se na podobnost za zavarivanje
  - Kemijska, metalurška i mehanička svojstva materijala
- Mogućnost zavarivanja – odnosi se na tehnologiju zavarivanja
  - Priprema za zavarivanje
  - Određivanje temperature predgrijavanja i međuslojne temperature
  - Čišćenje
  - Postavljanje elemenata u pravilan položaj
  - Naknadna toplinska obrada
  - Postupak zavarivanja
  - Parametri postupka zavarivanja
- Sigurnost spoja – odnosi se na konstrukciju
  - Okolna atmosfera
  - Temperatura
  - Debljina materijala
  - Vrsta i veličina naprezanja u materijalu

### 4.3. Aluminijska legura 5083

Legura 5083, koja pripada seriji 5xxx, je legirana magnezijem i ima kemijski sastav prikazan u Tablici 2. U seriji 5xxx, maksimalni udio magnezija je 5%. Ova serija legura ima najveću čvrstoću od svih toplinski neobrađivih serija, zbog čega se široko primjenjuju u brodogradnji, izradi mostova, tlačnim spremnicima i drugim područjima. Međutim, legure koje sadrže više od 3% magnezija ne preporučuju se za upotrebu na temperaturama iznad 65°C, zbog potencijalne senzibilizacije i napetosne korozije. Serija 5xxx ima dobra mehanička svojstva (prikazana u Tablici 3) i izvrsna korozijska svojstva. Važno je napomenuti da oblikovljivost ovih legura opada s porastom udjela magnezija. Fizikalna svojstva ove serije legura prikazana su u Tablici 1. [33]

Oznaka H111 označava jedno od stanja aluminijske legure. Ukoliko materijal ima oznaku H111 znači kako je materijal toplinski obrađen i blago ojačan deformacijom. Takav materijal ima visoku deformabilnost, ali manju čvrstoću. Bitno je razlikovati oznaku H111 od H11 koja označava stanje materijala visoke čvrstoće i niske deformabilnosti. [33]

**Tablica 1. Fizikalna svojstva aluminijske legure 5083 H111 [33]**

Svojstvo	Vrijednost
Gustoća	2650 kg/m <sup>3</sup>
Talište	570 °C
Modul elastičnosti	72 GPa
Električna otpornost	0,58 × 10 <sup>-6</sup> Ω.m
Toplinska vodljivost	121 W/(m K)
Toplinsko istežanje	25 × 10 <sup>-6</sup> /K

**Tablica 2. Kemijski sastav aluminijske legure 5083 H111 [33]**

Kemijski sastav aluminijske legure							
Si %	Fe %	Cu %	Mn %	Mg %	Zn %	Ti %	Cr %
0,4	0,4	0,1	0,4 – 1,0	4,0 – 4,9	0,25	0,15	0,05 – 0,25

Legura 5083 H111 ima puno manju gustoću od čelika te ima izrazito visok odnos čvrstoće prema specifičnoj težini u usporedbi s čelikom. (omjer specifične težine je 1:3, a rastezne čvrstoće je 1:2). [33]

Za zavarivanje aluminijske legure 5083 na identičnu leguru ili leguru iz serije 5xxx preporučeno je korištenje dodatnog materijala aluminijske legure 5183. [33]

**Tablica 3. Mehanička svojstva aluminijske legure 5083 H111 [33]**

Mehaničko svojstvo	Vrijednost
Granica razvlačenja	110 min MPa
Vlačna čvrstoća	260 Min Mpa
Tvrdoća	70 HB
Istezljivost	12 min %

Aluminijska legura 5083 najčešće se koristi u brodogradnji, karoseriji automobila, vagonima te spremnicima pod tlakom [33].

Aluminijska legura 5083 najčešće se isporučuje u obliku ploča. [33]



## 5. ZAŠTITNI PLINOVI

Zaštitni plinovi služe kako bi se zaštitila talina od štetnih utjecaja zraka, odnosno okolne atmosfere. Zrak se sastoji u najvećem dijelu od dušika i kisika, dva elementa koja je potrebno izbjeći prilikom zavarivanja. Dušik je potrebno izbjeći jer se tijekom zavarivanja spaja u vruću talinu, no prilikom hlađenja i kristalizacije izlazi kao zrak te nastaju pore. Isto tako povezan je s nastajanjem krhkosti zavarenog spoja. Kisik može izazvati oksidaciju materijala čime smanjuje svojstva spoja. [6, 7]

Zaštitni plinovi imaju dvije glavne uloge, a to su:

- Zaštita zavarenog spoja od okolne atmosfere koji obuhvaća, električni luk, osnovni i dodatni materijal te talinu
- Poboljšavanje procesa zavarivanja, pozitivni utjecaj na stabilnost električnog luka, penetraciju, brzinu i kvalitetu

### 5.1. Fizikalna svojstva zaštitnih plinova

Postoje različiti zaštitni plinovi, od kojih svaki ima posebna svojstva i utjecaj na zavar. Različite utjecaje na zavar duguju svojim fizikalnim svojstvima, od kojih su najvažnija [23, 24]:

- Kemijska reaktivnost
- Ionizacijski potencijal
- Toplinska vodljivost
- Disocijacija i rekombinacija
- Gustoća plina
- Čistoća plina

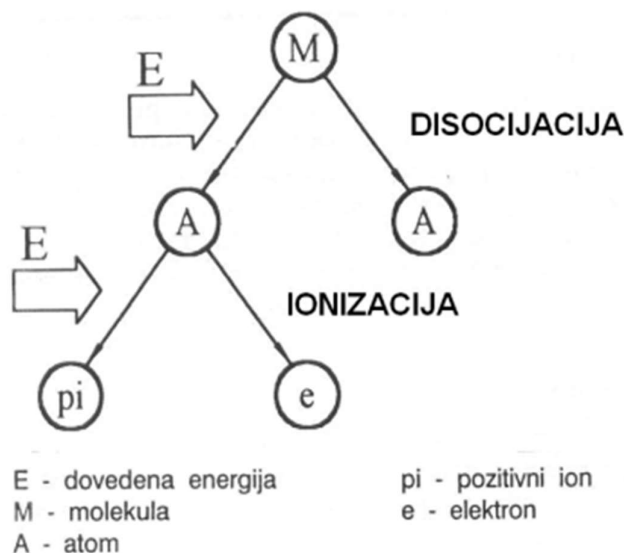
Kemijska reaktivnost svojstvo je koje govori postoji li sklonost zaštitnog plina da reagira s talinom. Zaštitni plinovi, prema kemijskoj reaktivnosti, dijele se na aktivne i inertne. Neki aktivni plinovi su kisik i ugljikov dioksid koji reagiraju s talinom tvoreći okside ili otpadne plinove. Vodik je isto tako aktivni plin, ali on je reducens, što znači kako on reagira s oksidacijskim sredstvima te onemogućuje nastanak oksida u talini. Najčešći inertni plinovi su argon i helij. Inertni plinovi nemaju nikakav kemijski utjecaj na zavar. Poseban primjer je dušik koji je inertan samo pri sobnoj temperaturi. Pri povišenim temperaturama zavarivanja on se pretvara u reaktivan plin. [23, 24]

Ionizacijski potencijal definira se kao energija potrebna za uklanjanje elektrona iz atoma zaštitnog plina te njegovo pretvaranje u ion. Ionizacijski potencijal povezan je i ovisi o atomskoj

masi elementa plina. Ukoliko je ionizacijski potencijal manji, atomska masa plina je veća. [23, 24]

Toplinska vodljivost fizikalno je svojstvo koje daje uvid u provođenje topline određenih plinova. Toplinska vodljivost utječe na širenje topline, odnosno na gubitak energije od središnje točke električnog luka pa do periferije. Električni luk sastoji se od dva područja, vruća i uska jezgra te hladna vanjska periferija. Plinovi koji posjeduju višu toplinsku vodljivost provodit će više toplinske energije u hladniju periferiju zbog čega će električni luk biti širi. [23, 24]

Disocijacija i rekombinacija je fizikalno svojstvo razgradnje zaštitnog plina. Naime zaštitni plinovi čije se molekule sastoje od više atoma (kisik, ugljični dioksid i vodik) prilikom temperatura zavarivanja razgradit će se (disocirati) na atome. Atomi se dijelom ioniziraju i tvore slobodne elektrone koji pospješuju tok struje. Prilikom doticaja razgrađenog plina s hladnijom površinom materijala, atomi će se rekombinirati te stvoriti početne molekule što će rezultirati velikim gubitkom topline. Zbog velike predaje topline s disociranih atoma na osnovni materijal, nastupit će intenzivno taljenje osnovnog materijala. Važno je napomenuti kako su argon i helij (dva zaštitna plina korištena prilikom MIG zavarivanja aluminija) građeni od atoma te se oni ne mogu disocirati. Upotreba plinova koji se mogu disocirati i rekombinirati rezultirati će većom generiranom toplinom na radnoj površini, pri istoj temperaturi električnog luka, nego plinovi koji se ne mogu disocirati i rekombinirati. [23, 24]



Slika 18. Disocijacija i ionizacija [24]

Gustoća plina bitan je faktor koji je povezan s gustoćom zraka. Plinovi koji imaju veću gustoću od zraka iziskuju manji protok plina od plinova koji imaju manju gustoću, uz jednako dobru zaštitu taline tijekom zavarivanja. [23, 24]

Čistoća plina iznimno je važno svojstvo koje može rezultirati nekvalitetnim zavarom. Mali udio nečistoća može iznimno negativno utjecati na fuziju zavara, poroznost, pukotine, izgled i općenito svojstva zavara. Jako je važno da zaštitni plin zadovoljava norme koje određuju toleranciju čistoće zaštitnog plina. [23, 24]

## 5.2. Klasifikacija zaštitnih plinova

Prema normi HRN EN ISO 14175 zaštitni plinovi i zaštitne plinske mješavine klasificiraju se prema kemijskoj reakciji:

- I – inertne plinske mješavine
- R – reducirajuće plinske mješavine
- M – oksidirajuće mješavine koje se sastoje od inertnih plinova i CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>
- C – visokooksidirajuće plinske mješavine
- F – nereaktivni plinovi ili reducirajuće plinske mješavine za plazma zavarivanje i zaštitu korijena

Isto tako, prema normi HR EN ISO 14175 plinovi koje je moguće koristiti u procesu zavarivanja su:

- Argon
- Helij
- Ugljikov dioksid
- Kisik
- Dušik
- Vodik

Za zaštitnu atmosferu može se koristiti jedan plin ili mješavina više plinova. Postoje dvokomponentne, trokomponentne i četverokomponentne plinske mješavine. Ovisno o željenim svojstvima, bira se vrsta i broj plinova. [6]

Kako se u ovom radu obrađuje MIG zavarivanje aluminijskih spojeva, pobliže će biti objašnjena dva plina i njihove mješavine koje se koriste u tom postupku zavarivanja, a to su argon i helij. [7]

### **5.2.1. Argon**

Argon je jednoatomni inertni plin bez boje, mirisa, okusa, neotrovan je, nezapaljiv i netopiv u talini. U zemljinoj atmosferi, argon je zastupljen manje od 1%. Gušći je od zraka otprilike 1,4 puta, a dobiva se ukapljivanjem i destilacijom zraka. [6, 7, 24]

Inertnost argona i veća gustoća od zraka postavili su argon kao jedan od glavnih zaštitnih plinova koji se koristi u gotovo svim postupcima zavarivanja. Argonom je moguće zavarivati željezne i neželjezne materijale (aluminij, bakar, nikal, titan, magnezij, ...). [6, 7, 24]

Argon ima nisku energiju ionizacije što omogućuje lako uspostavljanje električnog luka te pridonosi stabilnosti električnog luka. Isto tako, argon ima nisku toplinsku vodljivost i visoku gustoću što rezultira fokusiranim električnim lukom na malom središnjem mjestu zavara. [6, 7, 24]

Plinske mješavine koje sadrže visok udio argona podržavaju sve vrste prijenosa metala u električnom luku. [6, 7, 24]

Važno je napomenuti kako je argon, u odnosu na helij, cjenovno pristupačniji. [6, 7, 24]

Zbog svega navedenoga argon se postavio kao najčešći inertni zaštitni plin u svim elektrolučnim procesima zavarivanja. [6, 7, 24]

### **5.2.2. Helij**

Helij, kao i argon, je jednoatomni inertni plin. Za razliku od argona, ima malu atomsku masu i gustoću koja iznosi svega 14% gustoće zraka. Helij zauzima svega 0,0005% u zemljinoj atmosferi zbog čega se helij dobiva na drugi način, a to je separacijom iz prirodnog plina gdje se helij smatra kao nepoželjna supstanca. [6, 7, 24]

Helij kao zaštitni plin koristi se prilikom zavarivanja nehrđajućih čelika, aluminijskih i magnezijevih. [6, 7, 24]

Helij ima višu energiju ionizacije od argona zbog čega su struja i napon pri zavarivanju veći. To isto tako rezultira težim uspostavljanjem električnog luka. Posljedica navedenog je visoki unos toplinske energije. Zbog stabilnosti električnog luka doprinosi količini deponiranog materijala pri zavarivanju visokim gustoćama struje. [6, 7, 24]

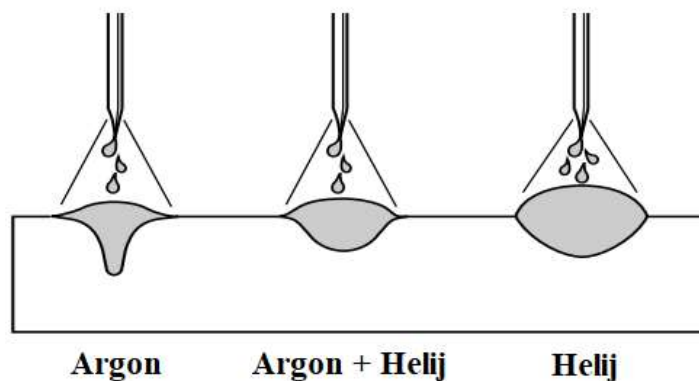
Helij ima višu toplinsku vodljivost od argona što rezultira plićim i širim penetracijskim profilom. [6, 7, 24]

### 5.2.3. Najčešće korištene mješavine argona i helija za zavarivanje aluminija

Argon + helij mješavine najčešće se koriste za zavarivanje aluminijskih legura. Dodatak helija argonu omogućava veću viskoznost taline te ravniji profil penetracije odnosno eliminira uski, a duboki profil penetracije koji se dobiva kod argona. Helij također omogućava i veće brzine zavarivanja. Dodatna prednost helija jest ta da je povezan sa smanjenjem vodikovih pukotina. Uz navedene prednosti helija, argon omogućava izvrsno uspostavljanje luka te promovira čišćenje aluminija. [7]

75% Argon + 25% Helij je dvokomponentni zaštitni plin koji se često koristi u zavarivanju aluminijskih legura. Dodavanjem helija argonu moguće je oblikovati profil penetracije zavara na način da se smanji dubina i poveća širina. Isto tako, dodatkom helija argonu dobiva se talina veće viskoznosti [7]

75% Helij + 25% Argon je dvokomponentni zaštitni plin koji se koristi kada je potrebna visoka toplinska vodljivost i visoka viskoznost taline. Profil penetracije je širok te omogućava odličnu penetraciju bočnih stijenki. [7]



Slika 19. Utjecaj argona, helija i njihove mješavine na profil penetracije [7]

Potrebno je napomenuti kako, ukoliko se zavaruju aluminijske legure debljine do 12 mm, preporučeno je korištenje 100% Argona kao zaštitnog plina. Ukoliko je aluminij deblji od 12 mm, preporučeno je korištenje neke od dvije navedene mješavine 75% Argon + 25% Helij ili 75% Helij + 25% Argon, ovisno o željenom rezultatu. Upotreba helija u plinskoj mješavini omogućit će dodatnu energiju kako bi pomogao pri zavarivanju većih debljina. Isto tako dobit će se zavar koji u presjeku ima više okrugao izgled. [7]

Prilikom MIG postupka zavarivanja aluminija izrazito je bitno izbjeći i najmanji udio kisika, vodika i ugljikovog dioksida jer mogu negativno utjecati na kvalitetu zavara. [7]

## 6. EKSPERIMENTALNI DIO

Kako bi se provela usporedba utjecaja zaštitnog plina i postupka zavarivanja, potrebno je prvo zavariti uzorke. S obzirom kako će biti ispitan utjecaj zaštitnog plina i postupka zavarivanja, potrebno je zavariti četiri uzorka:

- Uzorak 1A – zavaren je MIG – P postupkom u zaštitnoj atmosferi argona i helija, 85%Ar + 15%He, (prema normi HRN EN ISO 14175 – I3 – ArHe – 15)
- Uzorak 1B – zavaren je AC MIG postupkom u zaštitnoj atmosferi argona i helija, 85%Ar + 15%He, (prema HRN EN ISO 14175 – I3 – ArHe – 15)
- Uzorak 2A – zavaren je MIG-P postupkom u zaštitnoj atmosferi argona (prema normi HRN EN ISO 14175 – II – AR)
- Uzorak 2B – zavaren je AC MIG postupkom u zaštitnoj atmosferi argona (prema normi HRN EN ISO 14175 – II – AR)

Usporedba utjecaja zaštitnih plinova i postupka zavarivanja provedena je pomoću dva glavna kriterija:

- Izgled zavara
- Izgled profila zavara

Deformacije uzoraka relativno su minimalne i podjednake između sva četiri uzorka te zbog toga neće biti razmatrane kao utjecajni faktor.

### 6.1. Priprema spoja

Kako bi proces zavarivanja bio zadovoljavajuće kvalitete, potrebno je provesti pripremu spoja. Prvi korak pripreme spoja jest čišćenje i odmašćivanje površine osnovnog materijala. Nakon toga ploče su pripojene kratkim zavarima na nekoliko mjesta kako bi zadržale poziciju tijekom procesa zavarivanja. Nakon toga uzorci su ponovno očišćeni. Pripojene ploče moguće je vidjeti na slici 20.



Slika 20. Pripojni zavari

## 6.2. Dodatni materijal

Kao dodatni materijal za zavarivanje aluminijske legure 5083, korištena je žica aluminijske legure 5183, promjera 1,2 mm. Kemijski sastav i mehanička svojstva dodatnog materijala u zavarenom spoju vidljiva su u tablicama 4. i 5. [34]

**Tablica 4. Kemijski sastav dodatnog materijala 5183 [34]**

Maseni udjeli elemenata u dodatnom materijalu 5183								
Al %	Mg %	Zn %	Fe %	Cu %	Ti %	Si %	Mn %	Cr %
94,2	4,9	0,01	0,13	0,01	0,1	0,04	0,65	0,08

**Tablica 5. Mehanička svojstva dodatnog materijala 5183 u zavarenom spoju [34]**

Vlačna čvrstoća	275 min, MPa
Granica razvlačenja $R_{p0,2}$	125 MPa
Istezljivost	17 %
Gustoća	2,66 g/cm <sup>3</sup>

## 6.3. Oprema za zavarivanje

Zavarivanje uzoraka provedeno je na postavi prikazanoj na slici 25. Postava za zavarivanje sastoji se od automata na koji je spojen pištolj za MIG zavarivanje i postolja na koji je stavljen uzorak te pričvršćen pomoću škripca. Ovakva postava koristi se kako bi se eliminirao ljudski utjecaj tijekom procesa zavarivanja. Automat omogućava konstantnu brzinu zavarivanja te održava konstantnu udaljenost između uzorka i pištolja, te položaj pištolja. Zavarivanje je provedeno u PA položaju.

Slika 21. prikazuje postavu za zavarivanje.



**Slika 21. Postava za zavarivanje**

Za sam postupak zavarivanja korišten je Welbee Inverter W400 prikazan na slikama 22., 23. i 24. Welbee Inverter W400 izvor je struje za zavarivanje s dvostrukim inverterom te omogućava preciznu kontrolu električnog luka i unosa topline. Zbog svojih karakteristika kao izvora struje, moguće je relativno jednostavno zavarivati tanke i debele aluminijske ploče. Velika prednost ovog izvora struje jest njegova velika fleksibilnost. Welbee Inverter W400 nudi mogućnost odabira različitih postupaka poput:

- DC TIG
- DC impulsno
- DC *wave* impulsno
- REL
- AC impulsno
- AC *wave* impulsno

Zbog svoje fleksibilnosti, Welbee se postavlja kao izrazito isplativa investicija jer omogućava zavarivanje različitim postupcima korištenjem jednog izvora struje. Uz to, važno je napomenuti kako je moguće memorirati do 100 programa čime se ubrzava postavljanje stroja i odabira parametara.






Slika 22. Welbee Inverter W400





Slika 23. Welbee Inverter W400 s dodatnim materijalom

<b>DAIHEN VARSTROJ d.d.</b> Industrijska ulica 4, 9220 Lendava, Slovenija		<b>DAIHEN VARSTROJ</b>			
AC/DC WELDING POWER SOURCE <b>WB-W400 AC-MIG</b>		P30205Y-1095012	DATE 2021		
		EN 60974-1			
		30 A / 15.5 V - 400 A / 34.0 V			
		X	40%	60%	100%
S	U <sub>0</sub> 106 V	I <sub>2</sub>	400 A	360 A	350 A
		U <sub>2</sub>	34.0 V	32.0 V	31.5 V
	U <sub>1</sub> = 400 V	I <sub>1max</sub> = 30.9 A	I <sub>1rat</sub> = 19.8 A		
IP23					
				Mass: 86 kg	
NA 808344.00					

Slika 24. Karakteristike izvora struje Welbee Inverter W400

#### 6.4. Zavarivanje uzoraka i priprema makroizbruska

Uzorci su zavareni parametrima prikazanim u sljedećoj tablici.

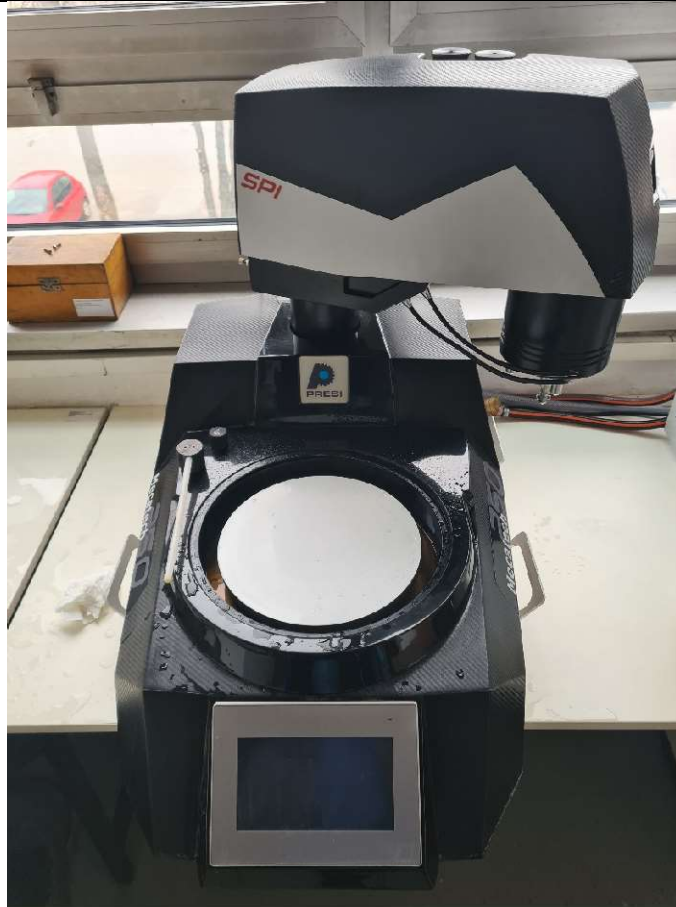
**Tablica 6. Parametri zavarivanja**

Parametri zavarivanja				
	Uzorak 1A (MIG – P)	Uzorak 1B (AC – MIG)	Uzorak 2A (MIG – P)	Uzorak 2B (AC – MIG)
Struja [A]	230	230	230	230
Napon [V]	25	25,8	25	25,8
Brzina dodavanja žice [m/min]	15	16,1	15	16,1
Brzina zavarivanja [cm/min]	45	52	45	52
Protok plina [l/min]	20	20	20	20
Tehnika zavarivanja (lijeva)	10°	10°	10°	10°
Slobodni kraj žice [mm]	18	18	18	18
Omjer balansa [%]	-	50	-	50

Nakon zavarivanja, uzorci su pušteni da se ohlade na sobnu temperaturu te su očišćeni pomoću alkohola te četke. Sljedeći korak bila je priprema uzoraka za makroizbrusak. Svaki uzorak odrezan je pomoću pile te je prvo brušen ručno. Ručno brušenje provedeno je u dva koraka, prvo brušenje izvedeno je na brusnom papiru granulacije 120, dok je drugo brušenje odrađeno na brusnom papiru granulacije 240.

Nakon ručnog brušenja, uzorci su strojno brušeni pomoću Mecatech 250, stroja za poliranje. Korištenjem Mecatech 250 stroja, uzorci su polirani u pet koraka s brusnim papirima granulacije 320, 600, 1200, 2400 te 4000.

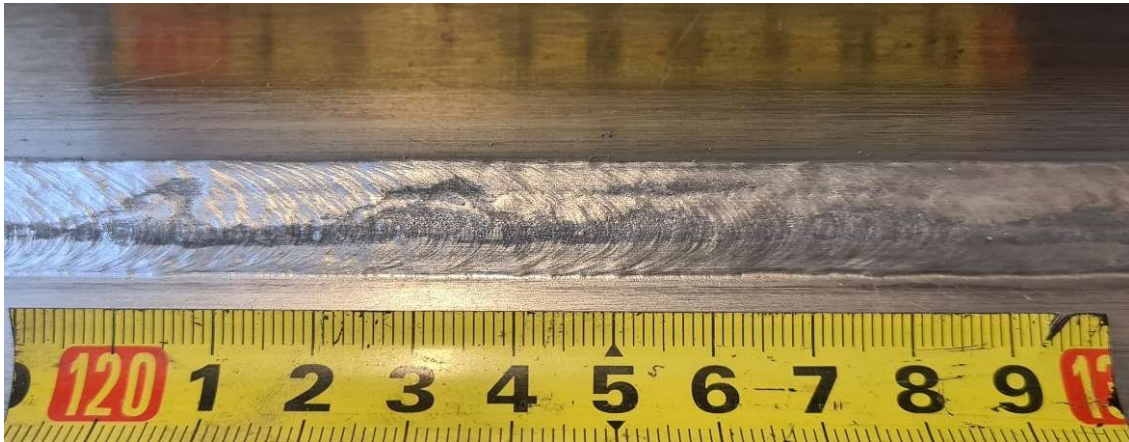
Slika 25. prikazuje Mecatech 250, stroj za poliranje.



**Slika 25. Mecatech 250, stroj za poliranje**

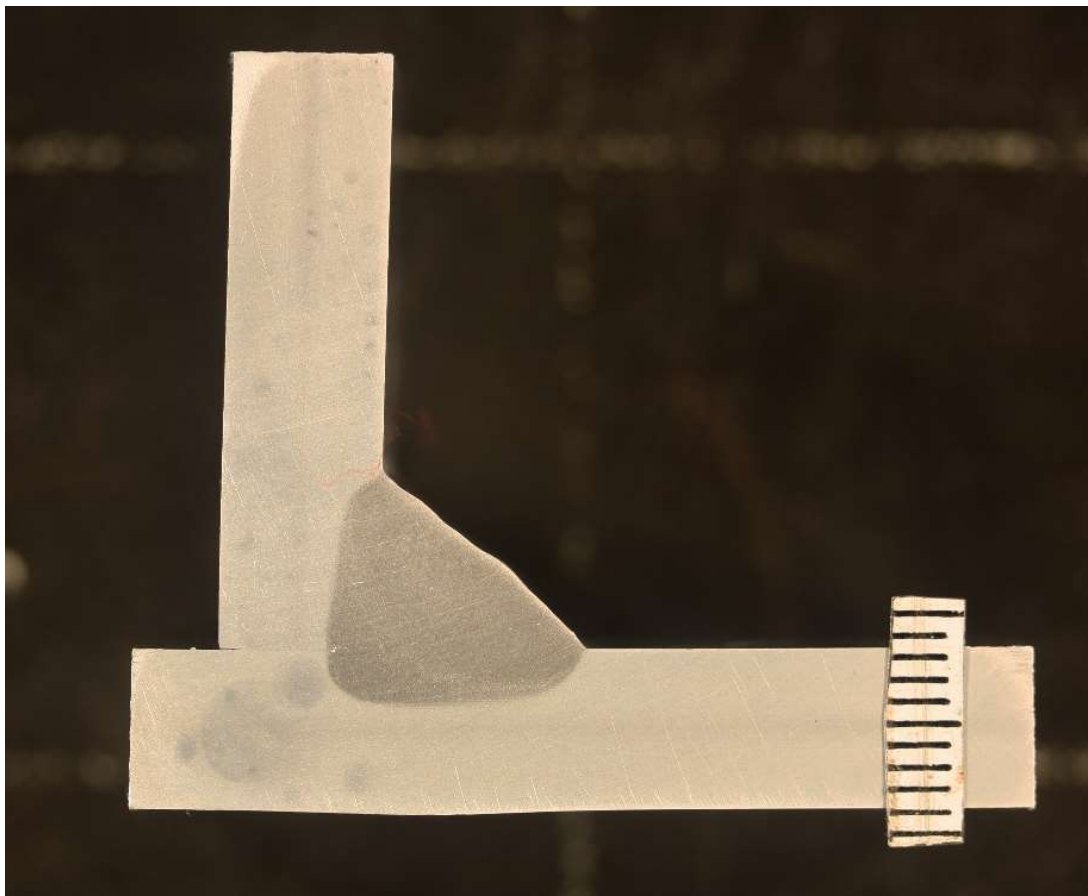
Završenim strojnim brušenjem, sljedeći korak bio je nagrivanje uzoraka. Nagrivanje uzoraka provedeno je u otopini HCL (15mL) + HF (10 mL) + H<sub>2</sub>O (85 mL). Nagrivanje uzoraka trajalo je tri minute nakon čega su uzorci stavljeni pod blagi mlaz vode te obrisani.

Slika 26. prikazuje izgled zavara uzorka 1A nakon čišćenja



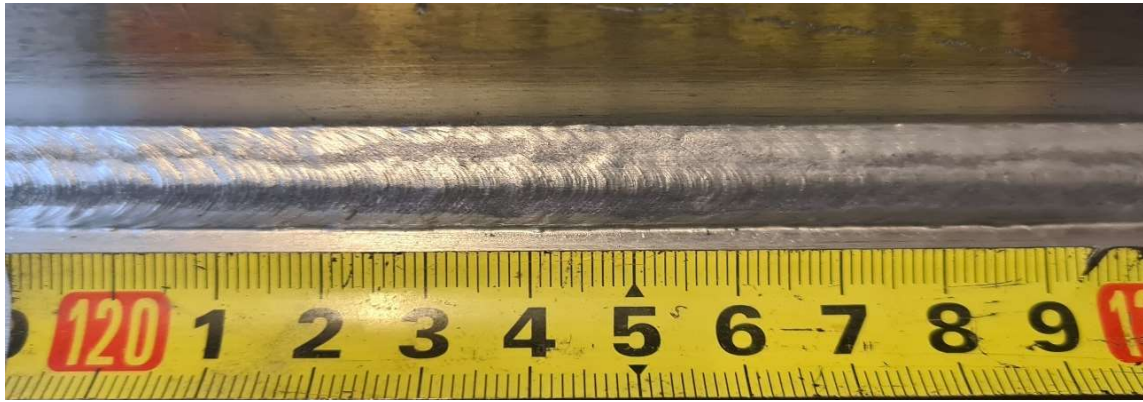
**Slika 26. Izgled zavara uzorka 1A nakon čišćenja**

Slika 27. prikazuje izgled makroizbruska uzorka 1A



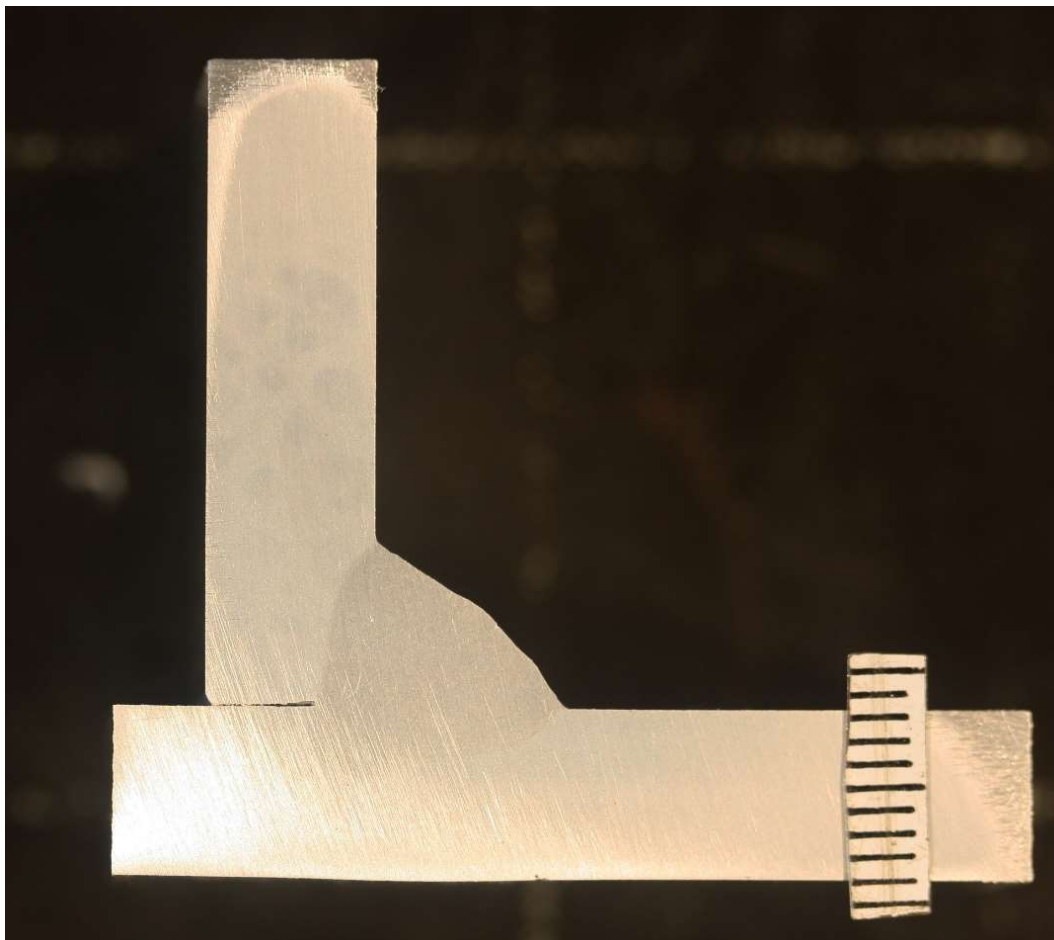
**Slika 27. Makroizbrusak uzorka 1A**

Slika 28. prikazuje izgled zavara uzorka 1B nakon čišćenja.



**Slika 28. Izgled zavara uzorka 1B nakon čišćenja**

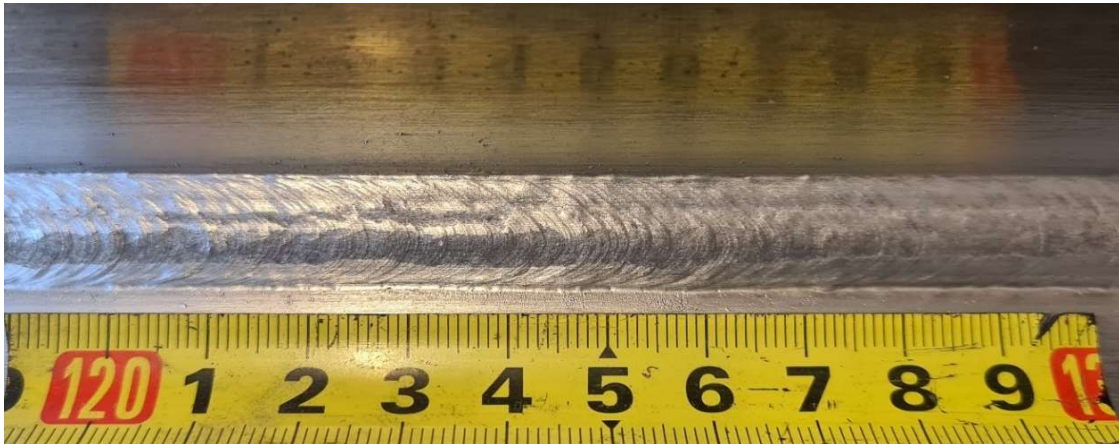
Slika 29. prikazuje izgled makroizbruska uzorka 1B



**Slika 29. Makroizbrusak uzorka 1B**

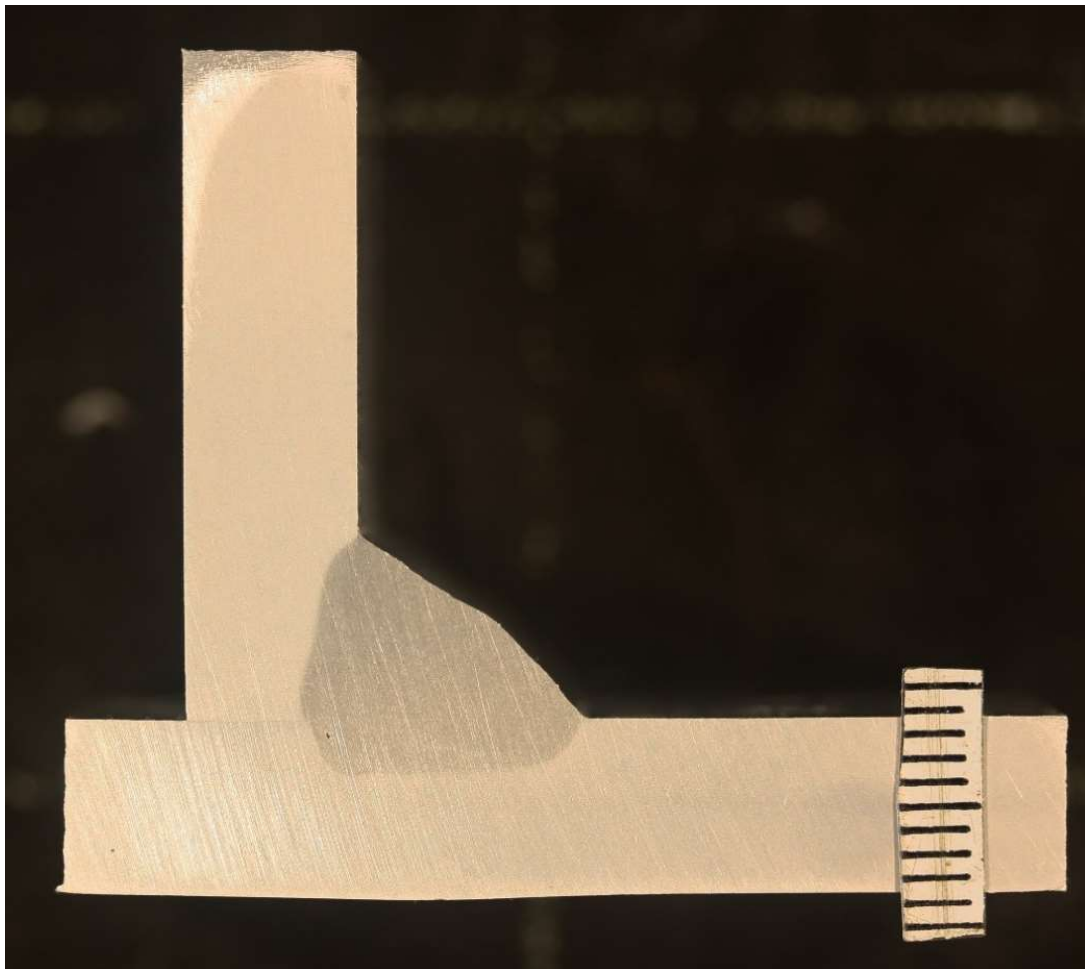


Slika 30. prikazuje izgled zavara uzorka 2A nakon čišćenja.



Slika 30. Izgled zavara uzorka 2A nakon čišćenja

Slika 31. prikazuje izgled makroizbruska uzorka 2A.



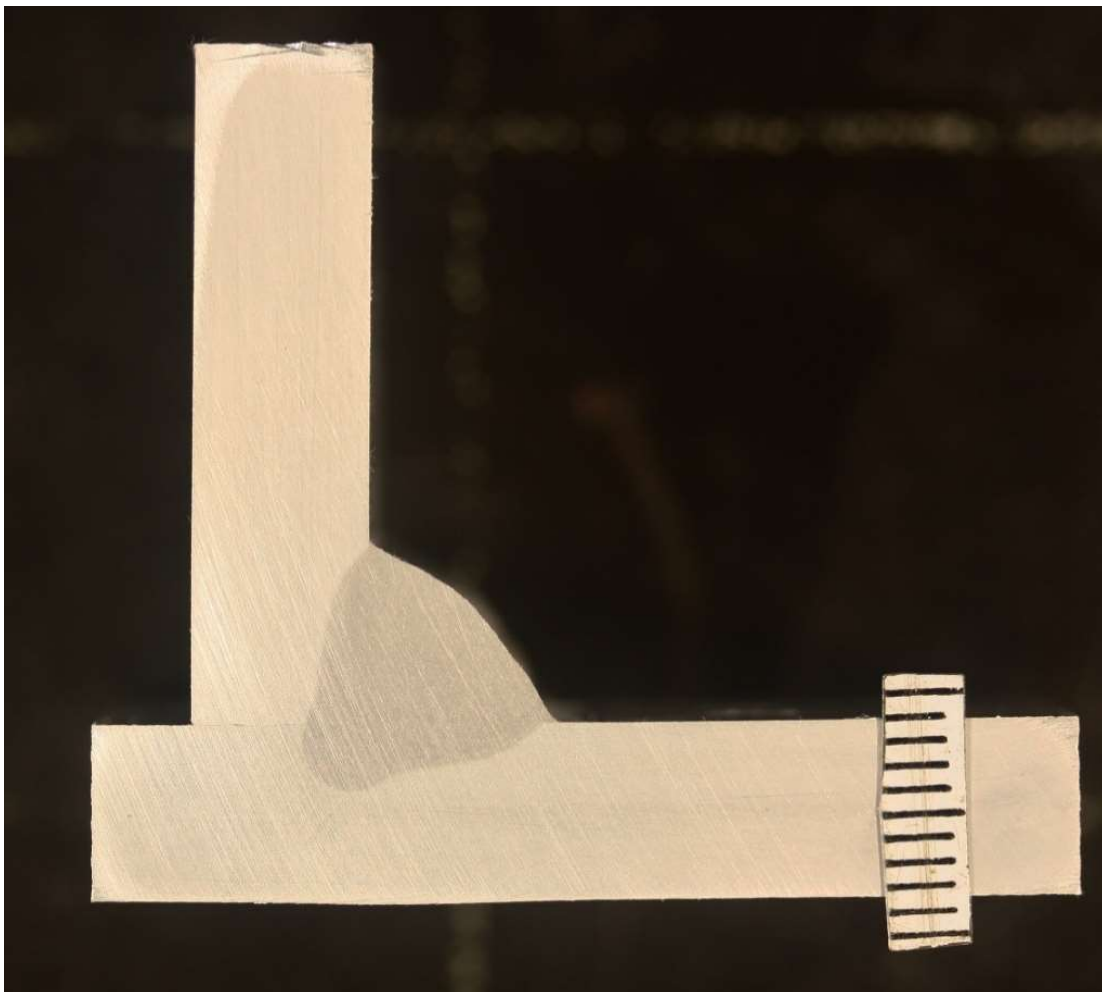
Slika 31. Makroizbrusak uzorka 2A

Slika 32. prikazuje izgled zavara uzorka 2B nakon čišćenja.



**Slika 32. Izgled zavara uzorka 2B nakon čišćenja**

Slika 33. prikazuje izgled makroizbruska uzorka 2B.

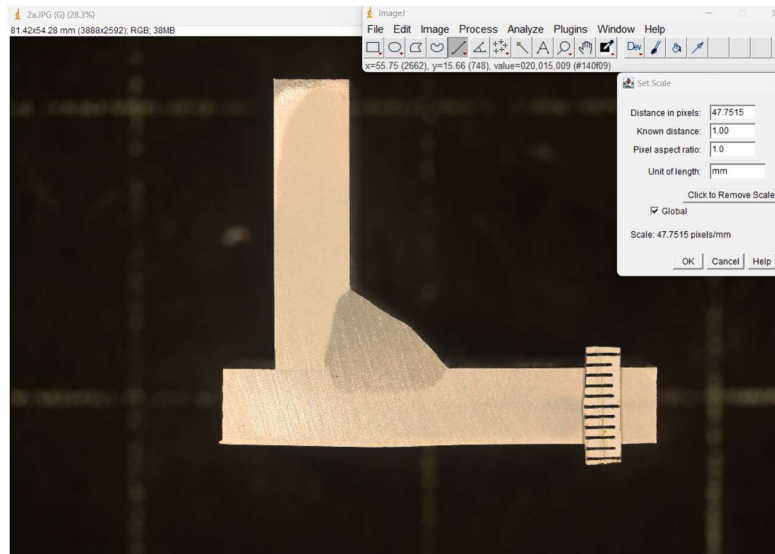


**Slika 33. Makroizbrusak uzorka 2B**

## 6.5. Analiza rezultata

Analiza makroizbrusaka provedena je u programu „ImageJ“. Prije same analize, potrebno je prvo provesti kalibraciju, što se učinilo pomoću mjerke koja se nalazi na slici uzoraka.

Program i njegova kalibracija vidljiva je na slici 34.



Slika 34. "Sučelje i kalibracija programa ImageJ"

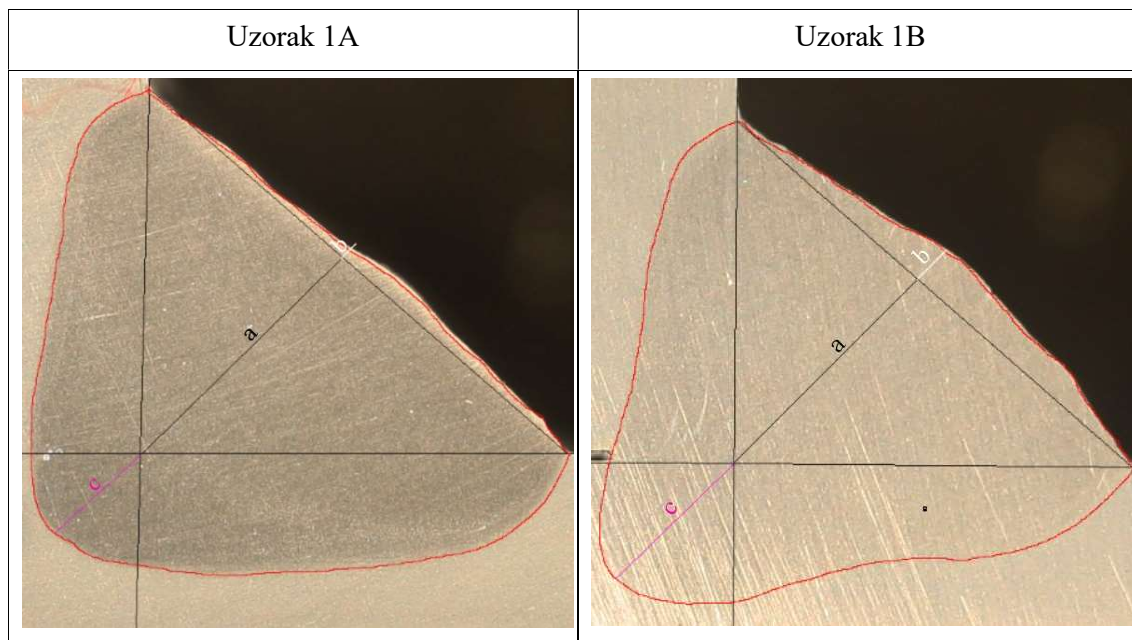


## 6.6. Utjecaj postupka na zavar

Kako bi se analizirao utjecaj postupka na izgled i geometriju zavora, posebno će se analizirati zavarivanje u zaštitnoj atmosferi Ar + He, a posebno u zaštitnoj atmosferi Ar.

Prvo će se provesti analiza uzoraka zavarenih u zaštitnoj atmosferi Ar + He.

**Tablica 7. Analizirani makroizbrusci uzorka 1A i uzorka 1B.**



**Tablica 8. Geometrija zavora uzorka 1A i uzorka 1B.**

	MIG – P (uzorak 1A)	AC – MIG (uzorak 1B)
a [mm]	6,8	5,85
b [mm]	0,2	0,95
c [mm]	2,79	3,74
Površina zavora [mm <sup>2</sup> ]	99	84

Iz analize makroizbrusaka uzoraka zavarenih u zaštitnoj atmosferi Ar + He moguće je primijetiti kako uzorak 1B, koji je zavaren AC – MIG postupkom ima veću penetraciju u osnovni materijal i manju širinu od uzorka 1A zavarenog MIG – P postupkom. Isto tako, moguće zaključiti kako uzorak 1B ima veće nadvišenje i manju površinu od uzorka 1A. Navedene promjene u geometriji potvrđuju već napisanu teoriju, a to je, da korištenjem EN omjera 50% i zavarivanju strujom višom od 200A dobivamo zavar koji ima bolju penetraciju i koji je uži. Isto tako korištenjem negativnog impulsa dolazi do većeg zagrijavanja dodatnog materijala čime nastaje veća količina depozita koja omogućava povećanje brzine zavarivanja.

Povećanje brzine zavarivanja rezultira manjim unosom topline u materijal što je moguće izračunati iz sljedeće formule dobivene iz norme HRN EN 1011:

$$Q = k \times \frac{U \times I}{v} \times \frac{60}{1000} \text{ [kJ/cm]}$$

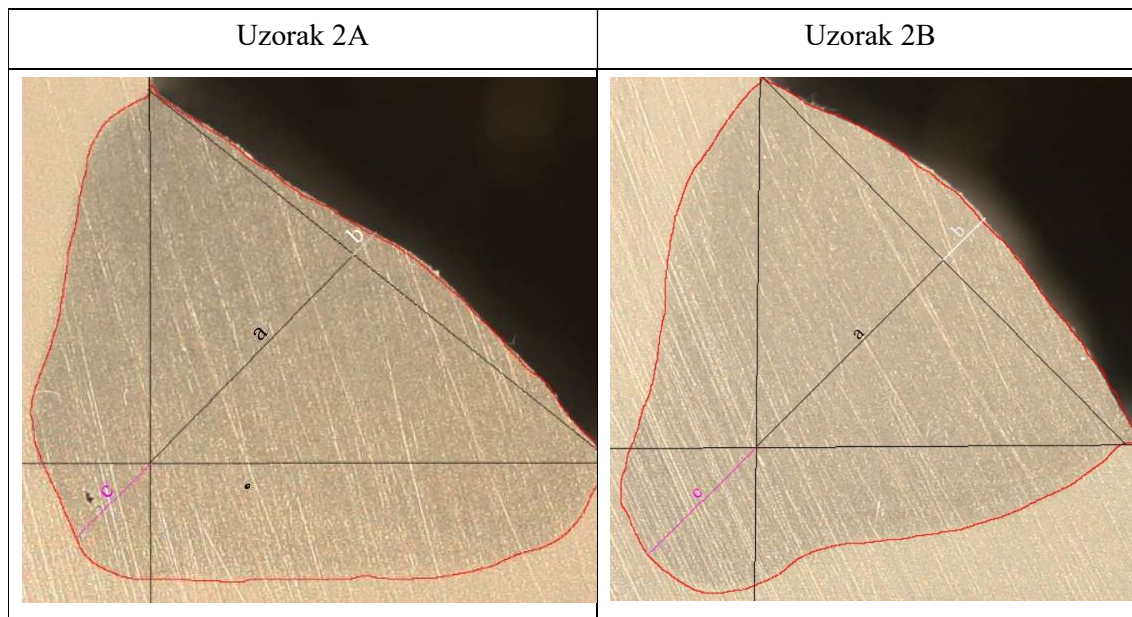
**Tablica 9. Unos topline u uzorak 1A i uzorak 1B**

Unesena topline [kJ/cm]	
MIG – P (Uzorak 1A)	AC – MIG (Uzorak 1B)
6,13	5,48

Uz promjene u geometriji koje su nastale, važno je napomenuti kako oba zavora izvedena navedenim postupcima nemaju nikakve vizualne nedostatke.

Iz svega navedenoga, moguće je zaključiti kako AC – MIG postupak omogućava brži proces zavarivanja s manjim unosom topline u osnovni materijal uz puno bolju penetraciju. Povećanje brzine procesa od 15% koje se dobiva korištenjem AC – MIG postupka moguće je uštedjeti značajno vrijeme i novac. Kako bi se približio utjecaj uštede vremena, uzmimo hipotetski primjer, da je na brodogradilištu potrebno zavariti 3 kilometra zavora (ignorirajući pripremu spoja, uređaja i sve ostalo...) te da je moguće birati između MIG – P i AC – MIG postupka. Korištenjem MIG – P postupka vrijeme za izradu svih zavora iznosilo bi približno 6667 minuta, dok bi korištenjem AC – MIG postupka vrijeme izrade bilo približno 5770 minuta. Ušteda vremena iznosila bi 897 minuta što iznosi gotovo 15 sati, odnosno dvije smjene po 8 sati.

Sljedeća analiza jest analiza uzoraka u zaštitnoj atmosferi Ar.

**Tablica 10. Analizirani makroizbrusci uzorka 2A i uzorka 2B.****Tablica 11. Geometrija zavara uzorka 2A i uzorka 2B.**

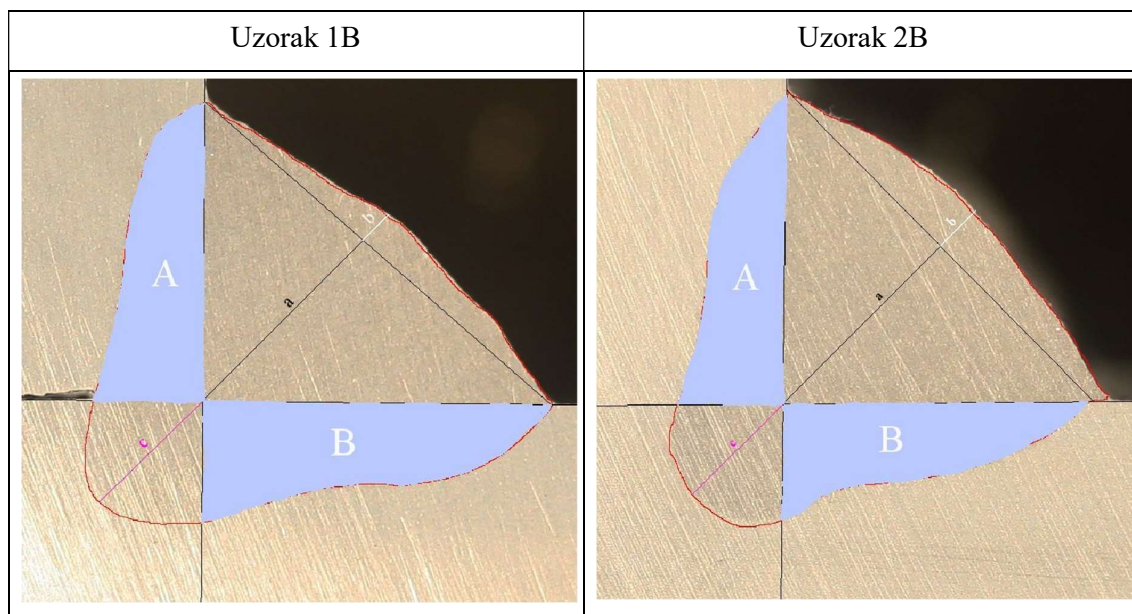
	Uzorak 2A	Uzorak 2B
a [mm]	6,5	5,75
b [mm]	0,6	1,25
c [mm]	2,37	3,36
Površina zavara [mm <sup>2</sup> ]	94	80

Zanemarujući utjecaj promjene plina na geometriju zavara koji će se objasniti u sljedećem poglavlju, vidljivo je kako su iste promjene u geometriji i izgledu zavara nastale u uzorcima 2A i 2B.

Ovim eksperimentom i usporedbom potvrđeno je da dolazi do povećanja penetracije prilikom zavarivanja debelih aluminijskih legura. Zbog svega navedenog moguće je sa sigurnošću potvrditi kako je AC – MIG postupak superiorniji postupak zbog svoje izrazite fleksibilnosti koju nudi. Korištenjem AC – MIG postupka moguće je zavarivati debele materijale s boljom penetracijom i tanje materijale s manjom penetracijom uz kraće vrijeme ciklusa.

## 6.7. Utjecaj zaštitnog plina na zavar

Tablica 12. Analizirani makroizbrusci uzorka 1B i uzorka 2B.



Tablica 13. Geometrija zavara uzorka 1B i uzorka 2B.

	Uzorak 1B	Uzorak 2B
a [mm]	5,85	5,75
b [mm]	0,95	1,25
c [mm]	3,74	3,36
Površina zavara [mm <sup>2</sup> ]	84	80
Površina A	15,27	14,63
Površina B	18,35	14,01

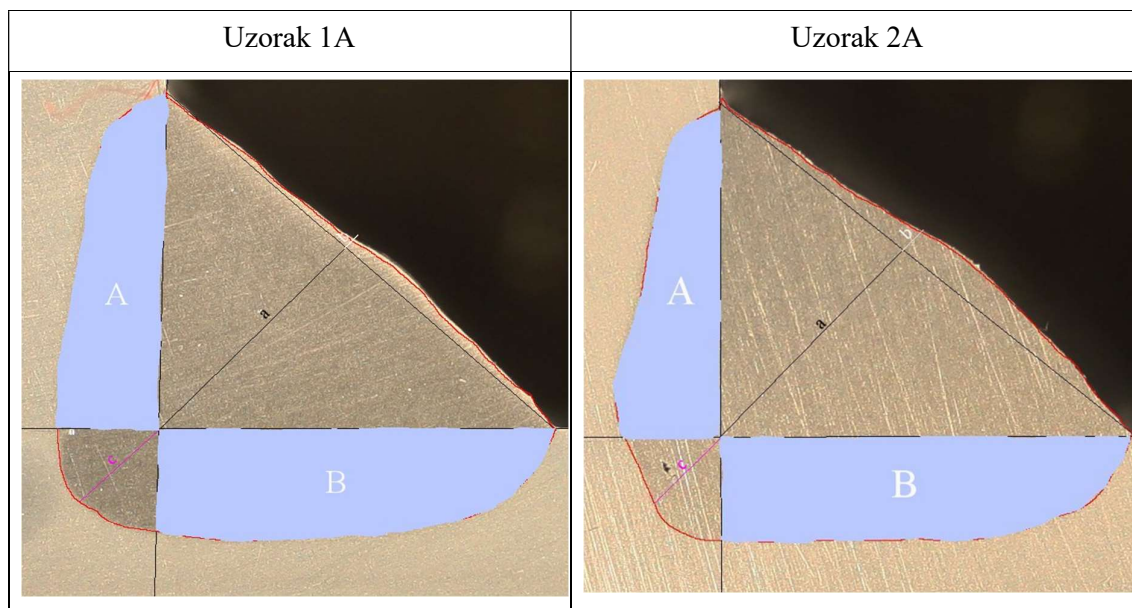
Uzorak 1B i uzorak 2B oba su zavarena AC – MIG postupkom, s istim parametrima, jedina promjena je u zaštitnom plinu. Uzorak 1B zavaren je u zaštitnoj atmosferi Ar + He (85% + 15%), dok je uzorak 2B zavaren u zaštitnoj atmosferi Ar.

Iz rezultata uzoraka moguće je zaključiti kako uzorak 2B ima manju širinu zavara, manju penetraciju, manju visinu s većim nadvišenjem te manju površinu. Iz slike je vidljivo kako je oblik cijelog zavara uzorka 2B blago izdužen, odnosno uzorak 1B ima bolju penetraciju bočnih stjenki.

Promjene u geometriji su minimalne, ali su prisutne. Razlog tome je što je za zavarivanje uzorka 1B korištena mješavina plinova s udjelom helija od samo 15%. Ukoliko bi bio udio helija viši, zavar bi bio širi s manjom penetracijom čime bi razlika između uzoraka bila primjetljivija.

Navedeni rezultati odgovaraju teorijskom opisu utjecaja zaštitnih plinova.

**Tablica 14. Analizirani makroizbrusci uzorka 1A i uzorka 2A.**



**Tablica 15. Geometrija zavara uzorka 1A i uzorka 2A.**

	Uzorak 1A	Uzorak 2A
a [mm]	6,8	6,5
b [mm]	0,2	0,6
c [mm]	2,79	2,37
Površina zavara [mm <sup>2</sup> ]	99	94
Površina A	18,76	15,88
Površina B	26,15	24,14

Za razliku od uzoraka zavarenih AC – MIG postupkom, kod uzoraka zavrenih MIG – P postupkom razliku je još teže uočiti.

Iako je razlika teško uočljiva, ona ipak postoji te odgovara uzorcima zavarenim AC – MIG postupkom, odnosno širina, površina, penetracija i visina uzorka 2A je manja od uzorka 1A dok je nadvišenje veće. Uz malo bolju analizu slika isto tako je moguće primijetiti kako uzorak 1A ima blago zaobljenu donju stranu zavara dok je kod uzorka 2A donja strana gotovo pa ravna, odnosno ima blagi kut nagiba prema dolje. Isto tako, kod uzorka 1A moguće je primijetiti kako je lijeva strana također zaobljena, dok je kod uzorka 2A, opet, lijeva strana gotovo pa ravna uz blagi kut nagiba.

---

Kao što je već napisano, veće razlike bi postojale ukoliko bi se pri zavarivanju plinskom mješavinom Ar + He koristio veći udio helija. No, iako bi se uz veći udio helija vidjela vjerojatno veća razlika, iz ovih slika moguće je potvrditi teorijske pretpostavke o ulozi helija kao zaštitnog plina koje govore kako helij rezultira većom penetracijom bočnih stjenki i povećanjem količine depozita, što rezultira zaobljenim profilom te većom površinom zavara.



---

**ZAKLJUČAK**

U današnjem, suvremenom, vremenu, sve veći značaj pridodaje se iskoristivosti, održivosti i, naravno, isplativosti. Ta tri zahtjeva koja se postavljaju na sve industrije, u zavarivačkoj, izazvale su potrebu za spajanjem lakih materijala, pretežito aluminijskih legura, manjih debljina. Iako postoje postupci koji omogućavaju zavarivanje takvih materijala, poput TIG – a i MIG – a, oni imaju svoje nedostatke. Glavna mana TIG postupka jest njegova produktivnost, odnosno manjak produktivnosti te potreba za preciznom pripremom spoja kao i veći unos topline što negativno utječe na deformacije i čvrstoću spoja. MIG postupkom moguće je zavariti materijale poput aluminijskih posebno uz primjenu impulsnih struja. Problemi s MIG – P postupkom nastupaju prilikom zavarivanja tankih i debelih aluminijskih ploča. Prilikom zavarivanja tankih materijala postoji velika opasnost od progaranja i deformacija. Zbog toga, razvijen je i implementiran MIG postupak zavarivanja s izmjeničnom strujom. Primjenom AC MIG postupka moguće je minimizirati deformacije te se u potpunosti riješiti problema progaranja prilikom zavarivanja tankih aluminijskih ploča. Iako se postavlja kao izvrsno rješenje za zavarivanje tankih aluminijskih ploča, AC MIG postupak isto tako je izvrstan za zavarivanje debelih aluminijskih ploča. Razlog tome je što je upotrebom AC MIG postupka i pravilnim odabirom parametara zavarivanja moguće ostvariti bolju penetraciju, za razliku od MIG – P postupka, te je moguće osigurati veću produktivnost. Uz navedene prednosti koje se dobivaju korištenjem AC MIG postupka, važno je napomenuti kako taj postupak osigurava i manji unos topline u osnovni materijal. Navedene prednosti AC MIG postupku dozvoljava EN omjer. EN omjer predstavlja omjer struje negativnog polariteta i ukupne struje u trajanju jednog ciklusa izmjenične struje.

Kako bi se dokazala prednost AC MIG postupka ispred konvencionalnog MIG – postupka, u eksperimentalnom dijelu napravljena je usporedba dva postupka. Nakon zavarivanja i analize rezultata, moguće je primijetiti kako se profili zavara znatno razlikuju između dva postupka. Profili zavara koji su zavareni korištenjem AC MIG postupka, uži su te imaju veću penetraciju u osnovni materijal od profila zavara uzoraka zavarenih MIG – P postupkom. Osim penetracije, uzorci zavareni AC MIG postupkom imaju veće nadvišenje uz manju površinu zavara. Rezultati dobiveni u ovom eksperimentu potvrđuju već opisanu teoriju koja govori kako je moguće dobiti uži zavar s boljom penetracijom ukoliko se koristi AC MIG zavarivanje, s EN omjerom 50% i strujom većom od 200A. Isto tako, zbog korištenja negativnog impulsa, povećana je količina depozita koja omogućuje povećavanje brzine zavarivanja (u ovom slučaju, povećanje je iznosilo 15%). Povećavanjem brzine zavarivanja povoljno se utječe na unos topline u zavar,

odnosno dolazi do smanjenog unosa topline za približno 15%. Ova zapažanja konzistentna su u obje zaštitne atmosfere koje su korištene u ovom radu.

Osim postupka zavarivanja, ključnu ulogu u zavarivanju igraju zaštitni plinovi. Upotrebom zaštitnih plinova dolazi do lakšeg uspostavljanja i održavanja električnog luka te se dobiva zavar s puno boljim svojstvima.

Drugi dio eksperimentalnog dijela bilo je dokazati utjecaj zaštitnih plinova na zavar. Usporedba je napravljena između zaštitnog plina argona i zaštitne smjese argon / helij s udjelom od 85% argona i 15% helija. Nakon zavarivanja i analize uzoraka moguće je zaključiti kako su profili uzoraka zavareni u zaštitnoj atmosferi argona uži s manjom bočnom i dubinskom penetracijom u osnovni materijal te većim nadvišenjem od uzoraka zavarenih u zaštitnoj smjesi argon / helij. Uz to, uzorci zavareni u zaštitnoj smjesi argon / helij imaju veću površinu zavara te oblik profila zavara koji je više zaobljen. Razlog tome jest dodatak helija koji ima višu energiju ionizacije i toplinsku vodljivost od argona.



---

**LITERATURA**

- [1] Jeffus, L.: Welding: Principles and applications, Delmar, Cengage Learning, 2012.
- [2] Kah, P.; Martikainen, J. : Influence of shielding gas in the welding of metals,, Springer-Verlag London Limited, 2012
- [3] Tong H, Ueyama T, Ushio M. Improvement of aluminium alloy sheet metal welding quality and productivity with AC pulsed MIG welding system (Report 2). Taylor & Francis. Welding International. 2002;16:104-109.
- [4] Park HJ, Kim DC, Kang MJ, Rhee S. The arc phenomenon by the characteristic of EN ratio in AC pulse GMAW. Springer. The international Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2012.
- [5] Singh R. Arc Welding Processes Handbook. Hoboken; Beverly: Wiley; Scrivener Publishing. 2021.
- [6] Weman K. Linden G. MIG welding guide. Cambridge: Woodhead Publishing LimitedManey Publishing Limited- CRC press. 2006
- [7] Nadzam J, Armao F, Byall L, Kotecki D, Miller D. Gas Metal Arc Welding Guidelines. Cleveland. Lincoln Global. 2014.
- [8] Horvat M., Kondić V., Brezovečki D.: Opravdanost primjene MAG forceArc postupka zavarivanja u izradi čeličnih konstrukcija, Tehnički glasnik, br. 8, 2014., str. 288-294
- [9] (Mrežno) Video <https://www.youtube.com/shorts/YZHrV41Q5vs>, pristupljeno 04.01.2023.
- [10] Arif N. Chung H. Alternating current-gas metal arc welding for application to thin sheets. Elsevier. Journal of Materials Processing Technology. 2014.
- [11] Adamiec J, Pfeifer T. Welding of Aluminium Alloy Thin Sheets Using Variable Polarity MIG Method. Switzerland. Trans Tech Publications. Solid State Phenomena. 2014;211:15-22.
- [12] Park HJ, Rhee S, Kang MJ, Kim DC. Joining of Steel to Aluminum Alloy by AC Pulse MIG Welding. The Japan Institute of Metal. Materials Transactions. 2009;9:2314-2317
- [13] Ueyama T., Era T., Uezono T., Tong H. Application of digital inverter-controlled AC pulsed MIG welding system to light metal joining, Mechatronics Company, Daihen Welding Company Limited, Osaka, Japan, 2009.
- [14] HRN EN ISO 1011-1: Preporuke za zavarivanje metalnih materijala - 1. dio
- [15] Priručnik za upotrebu Welbee Inverter W400, AC/DC Pulsed MIG Welding Power Source

- [16] Prakash J., Tewari S. P., Srivastava B.K. Shielding Gas for Welding of Aluminium Alloys by TIG/MIG Welding – A Review, International Journal of Modern Engineering Research (IJMER), Vol.1, Issue.2, pp-690-699, ISSN: 2249-6645
- [17] Olabode M., Kah. P, Martikainen J. Aluminium alloys welding processes: Challenges, joint types and process selection, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture 2013 227: 1129, 2013
- [18] Mathers G. The welding of aluminium and its alloys. Cambridge. Woodhead Publishing Limited - CRC press. 2002
- [19] Deekhunthod R. Weld Quality in Aluminium Alloys. Uppsala. Teknisk-naturvetenskaplig fakultet. 2014.
- [20] [https://www.sfsb.hr/kth/zavar/tii/al\\_lg.pdf](https://www.sfsb.hr/kth/zavar/tii/al_lg.pdf) Pristupljeno, 04. 01. 2023.
- [21] Woods R. A. Welding research, Porosity and Hydrogen Absorption in Aluminum Welds, American Welding Society and the Welding Research Council, 1974.
- [22] ISO-TR-581-2005:  
<https://cdn.standards.iteh.ai/samples/40507/3276ae191ae14b04a5d365de03029b17/ISO-TR581-2005.pdf>, Pristupljeno: 04.01.2023.
- [23] Jurica M. Utjecaj zaštitnoga plina i načina prijenosa metala na svojstva zavarenoga spoja čelika X80, Doktorski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2015.
- [24] Livio B. Utjecaj plinova na svojstva zavarenog spoja pri MAG zavarivanju konstrukcijskih čelika, Završni rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2009.
- [25] Radaj D. Heat Effects of Welding Temperature Field, Residual Stress, Distortion. Berlin. Springer-Verlag. 1992.
- [26] Colegrove P. Ikeagu C. Thistlethwaite A. Williams S. Nagy T. Suder W. Steuwer A. Pirling T. The welding process impact on residual stress and distortion. Science of Technology of Welding & Joining. 2009;14(8):717-725
- [27] Rossini NS. Dassisti M. Benyounis KY. Olabi AG. Methods of measuring residual stresses in components. Dublin City University. School of Mechanical and Manufacturing Engineering. 2011
- [28] Prevéy PS. Current applications of x-ray diffraction residual stress measurement Lambda Technologies. 1996.
- [29] Tanaka K. The  $\cos \alpha$  method for X-ray residual stress measurement using two dimensional detector. Nagoya Industrial Science Research Institute. Mechanical Engineering Reviews. 2019;6(1):1-13.
- [30] <http://eskola.chem.pmf.hr/udzbenik/u104/Kristalografija.htm>, Pristupljeno: 04.03.2023.

- [31] <https://www.stressmap.co.uk/wp-content/uploads/2018/08/XRD-practice.png>,  
Pristupljeno: 04. 03. 2023.
- [32] Arif N. Chung H. Alternating current-gas metal arc welding for application to thick plates.  
Elsevier. Journal of Materials Processing Technology. 2015.
- [33] <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=2804>, Pristupljeno; 13.05.2023.
- [34] <https://eurocardis.com/hojastecnicas/hilosaluminio/OKAutrod5183.pdf>  
Pristupljeno 13.05.2023.