

# Utjecaj mješavine Ar-He na oblik spoja pri AC MIG zavarivanju aluminija

---

Mišak, Lovro

Undergraduate thesis / Završni rad

2024

*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:235:972738>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-02-18**

*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

**Lovro Mišak**

Zagreb, 2024.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

Mentor:

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

Student:

Lovro Mišak

Zagreb, 2024.

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

Zahvaljujem se mentoru prof. dr. sc. Ivici Garašiću na ukazanom povjerenju, trudu, izdvojenom vremenu i znanju prenešenom na dosadašnjem dijelu studija.

Također se zahvaljujem asistentima. Kristijanu Jurgecu, mag. ing. mech. i Marku Frajzmanu, mag. ing. mech., te laborantima Krešimiru Sukobljeviću i Daliboru Denkoviću na pomoći kod izrade završnog rada.

Zahvaljujem se i svojoj obitelji i prijateljima koji su mi bili najveća podrška na studiju.

Lovro Mišak



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomске ispite  
Povjerenstvo za završne i diplomске ispite studija strojarstva za smjerove:  
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo  
materijala i mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 – 04 / 24 – 06 / 1	
Ur.broj: 15 – 24 –	

## ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Lovro Mišak** JMBAG: **0035225029**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Utjecaj mješavine Ar-He na oblik spoja pri AC MIG zavarivanju aluminija**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Influence of Ar-He mixture on joint shape at AC MIG welding of aluminium**

Opis zadatka:

S obzirom na sve intenzivniju primjenu aluminija u izgradnji transportnih sredstava posebno je važno definirati produktivne i ekonomski isplative tehnologije zavarivanja. U zadnjih nekoliko godina sve veću primjenu u proizvodnji nalazi AC MIG postupak koji ima niz prednosti. U teorijskom dijelu, na temelju pregleda literature opisati fizikalna načela AC MIG postupka te definirati osnovne parametre. Posebno proučiti utjecaj zaštitnih plinova pri zavarivanju aluminija.

U eksperimentalnom dijelu, za prikladnu debljinu osnovnog materijala legure serije 5083 definirati parametre AC MIG postupka za izradu kutnog zavara uz primjenu mješavine Ar-He. Na uzorku provesti ispitivanja makrostrukture i oblika zavara te procijeniti prednosti i nedostatke definirane tehnologije za primjenu u realnim proizvodnim uvjetima.

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

Zadatak zadan:

30. 11. 2023.

Zadatak zadao:

Prof. dr. sc. Ivica Garašić

Datum predaje rada:

1. rok: 22. i 23. 2. 2024.  
2. rok (izvanredni): 11. 7. 2024.  
3. rok: 19. i 20. 9. 2024.

Predviđeni datumi obrane:

1. rok: 26. 2. – 1. 3. 2024.  
2. rok (izvanredni): 15. 7. 2024.  
3. rok: 23. 9. – 27. 9. 2024.

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Damir Godec

---

**SADRŽAJ**

SADRŽAJ .....	I
POPIS SLIKA .....	III
POPIS TABLICA.....	IV
POPIS OZNAKA .....	V
POPIS KRATICA .....	VI
SAŽETAK.....	VII
SUMMARY .....	VIII
1. UVOD.....	1
2. ALUMINIJ .....	2
2.1. Svojstva aluminija i njegovih legura.....	2
2.2. Zavarljivost aluminijskih legura .....	4
2.2.1. Poroznost.....	5
2.2.2. Uklanjanje oksidnog sloja .....	6
2.2.3. Tople pukotine .....	8
2.2.4. Redukcija čvrstoće zavara.....	8
2.3. Aluminijska legura 5083.....	9
3. MIG POSTUPAK ZAVARIVANJA.....	10
3.1. Oprema za MIG zavarivanje .....	12
3.1.1. Izvor struje .....	13
3.1.2. Pogonski sustav žice .....	13
3.1.3. Pištolj za zavarivanje.....	14
3.2. Prijenos metala pri MIG zavarivanju .....	15
3.3. AC MIG zavarivanje.....	17
3.4. Parametri MIG zavarivanja.....	18
3.4.1. EN omjer .....	19
3.5. Zaštitni plinovi .....	20
3.5.1. Argon.....	20
3.5.2. Helij.....	21
4. EKSPERIMENTALNI DIO .....	22
4.1. Oprema za zavarivanje.....	22
4.2. Dodatni materijal .....	24
4.3. Zaštitna atmosfera.....	25

---

4.4. Priprema za zavarivanje .....	26
4.5. Parametri zavarivanja i obrada makroizbrusaka .....	27
4.6. Utjecaj zaštitnog plina na makrostrukturu i oblik zavara .....	33
4.7. Utjecaj brzine zavarivanja na makrostrukturu i oblik zavara .....	36
5. ZAKLJUČAK.....	39
LITERATURA.....	40

---

**POPIS SLIKA**

Slika 1. Definicija zavarljivosti [7] .....	4
Slika 2. Prikaz poroznosti u materijalu zavara [5] .....	5
Slika 3. Prikaz topivosti vodika u aluminiju ovisno o temperaturi [4] .....	6
Slika 4. Utjecaj polariteta na katodno čišćenje površine [5] .....	7
Slika 5. Shema MIG zavarivanja uz prikaz elemenata pištolja za zavarivanje [9] .....	10
Slika 6. Lijeve tehnika [11] .....	11
Slika 7. Oprema za MIG zavarivanje [14] .....	12
Slika 8. Oblik utora na kotačiću za dovod aluminijske žice .....	14
Slika 9. Načini prirodnog prijenosa metala [10] .....	15
Slika 10. Prijenos metala kod impulsnog zavarivanja [13] .....	16
Slika 11. Valni oblik impulsnog AC MIG postupka zavarivanja [16] .....	19
Slika 12. Utjecaj zaštitnog plina na profil penetracije zavara kod aluminijskih legura [8] .....	21
Slika 13. Daihen Varstroj Welbee W400 .....	23
Slika 14. Karakteristike izvora struje Welbee W400 .....	23
Slika 15. Postava za zavarivanje .....	24
Slika 16. Specifikacija dodatnog materijala [20] .....	25
Slika 17. Zaštitni plin argon .....	26
Slika 18. Zaštitna plinska mješavina argona i helija u omjeru 85:15 .....	26
Slika 19. Pripojni zavari .....	27
Slika 20. Uzorak 1A nakon čišćenja .....	29
Slika 21. Uzorak 2A nakon čišćenja .....	30
Slika 22. Izgled zavara uzorka 1B nakon čišćenja .....	30
Slika 23. Izgled zavara uzorka 2B nakon čišćenja .....	31
Slika 24. Stroj za poliranje Mecatech 250 .....	31
Slika 25. Makroizbrusak uzorka 1A .....	32
Slika 26. Makroizbrusak uzorka 2A .....	32
Slika 27. Makroizbrusak uzorka 1B .....	33
Slika 28. Makroizbrusak uzorka 2B .....	33



---

**POPIS TABLICA**

Tablica 1. Oblici proizvoda i primjena aluminijskih legura [5].....	3
Tablica 2. Kemijski sastav aluminijske legure 5083 [7].....	9
Tablica 3. Mehanička svojstva aluminijske legure 5083 [7].....	9
Tablica 4. Fizikalna svojstva aluminijske legure 5083 [7] .....	9
Tablica 5. Parametri zavarivanja.....	27
Tablica 6. Makroizbrusci 1A i 1B s karakterističnim dimenzijama zavora .....	34
Tablica 7. Geometrija zavarenih spojeva uzoraka 1A i 1B.....	34
Tablica 8. Makroizbrusci 2A i 2B s karakterističnim dimenzijama zavora .....	35
Tablica 9. Dimenzije zavora uzoraka 2A i 2B .....	35
Tablica 10. Makroizbrusci 1A i 2A s karakterističnim dimenzijama zavora.....	36
Tablica 11. Dimenzije zavora uzoraka 1A i 2A .....	36
Tablica 12. Makroizbrusci 1B i 2B s karakterističnim dimenzijama zavora .....	37
Tablica 13. Dimenzije zavora uzoraka 1B i 2B.....	37

---

**POPIS OZNAKA**

<b>Oznaka</b>	<b>Mjerna jedinica</b>	<b>Opis oznake</b>
$I_B$	A	Jakost bazne struje
$I_{EN}$	A	Jakost struje na negativnom polu
$I_{EP}$	A	Jakost struje na pozitivnom polu
$T$	°C	Temperatura
$T_B$	s	Vrijeme trajanja bazne struje
$T_{EN}$	s	Vrijeme trajanja struje na negativnom polu
$T_{EP}$	s	Vrijeme trajanja struje na pozitivnom polu
$v_z$	cm/min	Brzina zavarivanja
$\eta$	-	Stupanj iskoristivosti

---

**POPIS KRATICA**

<b>Kratika</b>	<b>Značenje</b>
AC	<i>Alternating Current</i> - izmjenična struja
AC MIG	<i>Alternating Current Metal Inert Gas</i> - Elektrolučno zavarivanje taljivom elektrodom u zaštitnoj atmosferi inertnog plina koristeći izvor izmjenične struje
Al	Aluminij
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Aluminijev oksid
Cr	Krom
Cu	Bakar
DC	<i>Direct Current</i> - istosmjerna struja
DCEN	<i>Direct Current Electrode Negative</i> – Negativni polaritet
DCEP	<i>Direct Current Electrode Positive</i> – Pozitivni polaritet
EO	Elektrootporno zavarivanje
EPP	Elektrolučno zavarivanje pod zaštitnim praškom
Fe	Željezo
HF	Fluorovodična kiselina
H <sub>2</sub> O	Voda
HCl	Klorovodična kiselina
ISO	<i>International Organisation for Standardization</i> – Međunarodna organizacija za standardizaciju
MAG	<i>Metal Active Gas</i> – Elektrolučno zavarivanje taljivom elektrodom u zaštitnoj atmosferi aktivnog plina
Mg	Magnezij
MIG	<i>Metal Inert Gas</i> - Elektrolučno zavarivanje taljivom elektrodom u zaštitnoj atmosferi inertnog plina
Mn	Mangan
REL	Ručno elektrolučno zavarivanje
Si	Silicij
Ti	Titan
TIG	<i>Tungsten Inert Gas</i> - Elektrolučno zavarivanje netaljivom elektrodom u zaštitnoj atmosferi inertnog plina
Zn	Cink

---

## SAŽETAK

Završni rad sastoji se od dva dijela, teorijskog i eksperimentalnog. U teorijskom dijelu završnog rada navedena su svojstva i karakteristike aluminijskih legura općenito te je detaljnije opisana aluminijska legura 5083 (EN AW-5083 H111). Objasnjene su najčešće greške koje se pojavljuju kod zavarivanja aluminijskih legura. Nakon toga opisan je MIG postupak zavarivanja, navedene su prednosti i nedostaci te oprema koja se koristi za navedeni postupak. Opisane su vrste prijenosa metala kod MIG zavarivanja. Detaljnije je objašnjen AC MIG postupak zavarivanja te su navedeni parametri koji utječu na zavarivanje. Opisana su svojstva zaštitnih plinova argona i helija te njihov utjecaj na svojstva i izgled zavara.

U eksperimentalnom dijelu završnog rada provedeno je zavarivanje kutnog spoja između ploča napravljenih od aluminijske legure 5083 (EN AW-5083 H111) debljine 8 mm primjenom AC MIG postupka zavarivanja. Za zaštitnu atmosferu kod zavarivanja korišteni su čisti argon i mješavina argon + helij. Nakon zavarivanja provedena je makroanaliza uzoraka gdje su se uspoređivali oblik i makrostruktura uzoraka pri upotrebi različitih plinova i različitih brzina zavarivanja. Na temelju rezultata analize zaključeno je da korištenje mješavine argon + helij poboljšava penetraciju u osnovni materijal, smanjuje pojavu poroznosti te povećava površinu zavara u usporedbi s korištenjem čistog argona. Pri usporedbi različitih brzina zavarivanja, rezultati su pokazali da se porastom brzine zavarivanja smanjuje penetracija u osnovni materijal te se smanjuje površina zavara.

Ključne riječi: AC MIG, argon, helij, aluminijske legure, brzina zavarivanja

---

## SUMMARY

The undergraduate thesis consists of two parts, theoretical and experimental. In the theoretical part of the the thesis, the properties and characteristics of aluminium alloys in general are listed, and the aluminium alloy 5083 (EN AW-5083 H111) is described in more detail. The most common welding defects that occur when welding aluminium alloys were explained. After that, the MIG welding process is described. The advantages, disadvantages and the equipment used for the said process are listed. Types of metal transfer used in MIG welding were described. The AC MIG welding process is explained in more detail and the parameters that affect welding are listed. The properties of shielding gases argon and helium and their influence on the properties and appearance of the weld were described.

In the experimental, the welding of the corner joint between the plates made of aluminium alloy 5083 (EN AW-5083 H111) with a thickness of 8 mm was carried out using the AC MIG welding process. As a shielding gas in welding process, pure argon and a mixture of argon and helium were used. After welding, a macroanalysis of the samples was carried out, where the shape and macrostructure of the samples were compared when different gases and different welding speeds were used. Based on the results of the analysis, it was concluded that the use of argon and helium mixture improves penetration into the base material, reduces the occurrence of porosity and increases the weld surface area compared to using pure argon. When comparing different welding speeds, the results showed that as the welding speed increases, the penetration into the base material reduces and the weld surface area decreases.

Key words: AC MIG, argon, helium, aluminium alloys, the welding speed

## 1. UVOD

Aluminij se je za izradu konstrukcija počeo koristiti zbog toga što se je javila potreba za lakšim konstrukcijama koje su morale imati mehanička svojstva slična čelicima. S obzirom na to da čisti aluminij nema adekvatna mehanička svojstva, počele su se koristiti aluminijske legure koje imaju bolja mehanička svojstva. Osnovni legirni elementi za aluminijske legure su: magnezij, bakar, silicij, cink i mangan. Najveće odlike aluminijskih legura su odlična korozijska postojanost, povoljan omjer čvrstoće i gustoće te omjer električne vodljivosti i gustoće. Zbog gustog nepropusnog oksidnog filma na površini aluminija, aluminij je otporan na koroziju. Ako se oksidni film ošteti, procesom oksidacije na površini nastaje novi. [1]

Zavarljivost općenito ovisi o sastavu materijala koji se zavaruje, tehnologiji zavarivanja i o utjecaju okoline u kojoj se zavaruje. Oksidni sloj kod zavarivanja predstavlja problem i mora ga se ukloniti zbog toga što je temperatura taljenja oksidnog sloja oko 1400 °C veća od temperature taljenja aluminija. Ako se oksidni film ne ukloni, dolazi do grešaka kao što su poroznost i progaranje osnovnog materijala. [2]

Zavarivanje je postupak spajanja dva ili više materijala primjenom topline ili pritiska, s ili bez dodavanja dodatnog materijala. Materijali koji se najčešće zavaruju su metali. Do razvoja postupka zavarivanja došlo je zbog potrebe za lakšim konstrukcijama i kako bi se smanjio utrošak materijala. Postoji više od 50 različitih postupaka zavarivanja, ali najviše se koristi njih pet, a to su: ručno elektrolučno zavarivanje (REL), zavarivanje taljivom elektrodom u zaštitnoj atmosferi aktivnog/inertnog plina ili plinskih mješavina (MAG/MIG), zavarivanje netaljivom volframovom elektrodom u zaštitnoj atmosferi inertnog plina (TIG), elektrolučno zavarivanje pod praškom (EPP) i elektrotoporno zavarivanje (EO). Jedan od postupaka koji se koristi za zavarivanje aluminija i aluminijskih legura je AC MIG postupak zavarivanja. AC MIG postupak zavarivanja omogućava uklanjanje oksida s površine aluminija te omogućava dobru kontrolu nad procesom zavarivanja. Kao zaštitni plinovi prilikom AC MIG postupka zavarivanja koriste se argon ili helij. Zaštitni plinovi koriste se za zaštitu zavarenog spoja od utjecaja okoline i zbog povoljnog utjecaja zaštitnih plinova na svojstva zavarenog spoja. [3]

---

## 2. ALUMINIJ

Aluminij je jedan od najrasprostranjenijih elemenata u Zemljinoj kori u kojoj ga ima oko 8 %. Postojanje aluminijskog oksida otkrio je Sir Humphrey Davy u prvoj polovici 19. stoljeća. S obzirom na to da aluminij u prirodi nije prisutan kao metal, nego kao oksid u kombinaciji s oksidima silicija, željeza, vanadija i drugih, bilo je potrebno otkriti proces pomoću kojeg bi se iz rude dobio čisti aluminij.[4]

1886. godine Pault Heroult i Charles M. Hall su istovremeno otkrili proces proizvodnje aluminijskog oksida na kojem se i danas temelji industrijska proizvodnja aluminijskog oksida. Proces se sastoji od dva dijela. Prvi je izdvajanje aluminijskog oksida ( $Al_2O_3$ ) iz rude boksita. Drugi dio je elektroliza aluminijskog oksida pomoću koje se dobiva aluminij s otprilike 5 do 10 % nečistoća koje se daljnjim procesima mogu izbaciti te se može postići čistoća aluminijskog oksida od 99,9 %. Njihovo otkriće označilo je početak industrijske proizvodnje aluminijskog oksida. Aluminij se je namjeravao koristiti u izradi konstrukcija zbog male mase i korozijske otpornosti, ali zbog toga što čisti aluminij ima loša mehanička svojstva, kao takav nije bio upotrebljiv. Istraživanjima su se ispitivali legirni elementi koji bi kao dodatak u strukturi aluminiju poboljšali mehanička svojstva. Na temelju rezultata istraživanja zaključeno je da su magnezij, cink, silicij i bakar legirni elementi koji najviše utječu na poboljšanje mehanička svojstva aluminijskog oksida. [5]

Povećanje čvrstoće aluminijskih legura moguće je postići procesom precipitacijskog očvršćavanja. Prvi korak kod precipitacijskog očvršćavanja je zagrijavanje legure aluminijskog oksida na temperaturu od oko 500 °C i držanje na toj temperaturi dovoljno dugo da se otope legirni elementi. Drugi korak je brzo gašenje kako bi legirni elementi ostali prisilno otopljeni u čvrstoj otopini. Treći korak je dozrijevanje koje može biti na temperaturi okoline (prirodno) ili na temperaturi od oko 150 °C (umjetno) kako bi došlo do izlučivanja sitnih precipitata unutar aluminijske jezgre. Nakon provođenja precipitacijskog očvršćavanja, aluminijska legura ima veću čvrstoću i tvrdoću. [1]

### 2.1. Svojstva aluminijskih legura i njihovih legura

Primjena aluminijskih legura široko je rasprostranjena u svijetu zbog njihovih dobrih mehaničkih i kemijskih svojstava. Oblici proizvoda glavnih skupina aluminijskih legura i njihova primjena prikazani su u tablici 1.

Tablica 1. Oblici proizvoda i primjena aluminijskih legura [5]

Seriya aluminija	Oblik proizvoda	Primjena
Čisti aluminij	Folije, valjane ploče	Pakiranja, pokrov, korozijski otporni spremnici i posude
Seriya 2xxx (Al-Cu)	Valjane ploče i limovi, otkovci	Dijelovi pod opterećenjem, strukturni dijelovi u zrakoplovstvu
Seriya 3xxx (Al-Mn)	Valjane ploče i limovi, otkovci	Pakiranja, pokrov, spremnici za kemikalije, procesna oprema i oprema za proizvodnju hrane
Seriya 4xxx (Al-Si)	Žice, odljevci	Glave motora, blokovi, motora, dijelovi ventila
Seriya 5xxx (Al-Mg)	Valjane ploče i limovi, otkovci, cijevi, cjevovodi	Posude, spremnici, dijelovi vozila i vagona, strukturni dijelovi
Seriya 6xxx (Al-Si-Mg)	Valjane ploče i limovi, otkovci, cijevi, cjevovodi	Strukturni dijelovi visoke čvrstoće, vozila, vagoni, brodogradnja
Seriya 7xxx (Al-Mg-Zn)	Valjane ploče i limovi, otkovci	Strukturni dijelovi visoke čvrstoće, zrakoplovstvo, oklopne ploče

Kao što je prije navedeno, čisti aluminij se ne koristi zbog niske čvrstoće. Aluminijske legure imaju dobru toplinsku vodljivost, oko 60 % od vodljivosti bakra i stoga se koriste kod izrade izmjenjivača topline, glava motora, isparivača i mnogih drugih komponenti. Također, aluminij ima jako dobru oblikovljivost zbog dobre duktilnosti pa zato postoje razne debljine i oblici materijala. Jedno od povoljnih svojstava aluminijskih legura je njihova korozijska postojanost. Na površini aluminija stvara se tanak oksidni sloj debljine od oko 0,01 mm. Na površini dolazi do reakcije aluminija s kisikom, odnosno do stvaranja aluminijevog oksida. Taj sloj doprinosi zaštiti od korozije. Ako dođe do oštećenja zaštitnog sloja, vrlo brzo se procesom oksidacije stvara novi. [6] Međutim, oksidni sloj predstavlja problem kod zavarivanja zato što prisustvo oksida u zavarenom spoju smanjuje kvalitetu zavarenog spoja. Oksidni sloj ima talište od oko 2050 °C, a talište aluminija je na oko 660 °C, tako da zavarivanjem ne dolazi do taljenja oksidnog filma te se uključuje

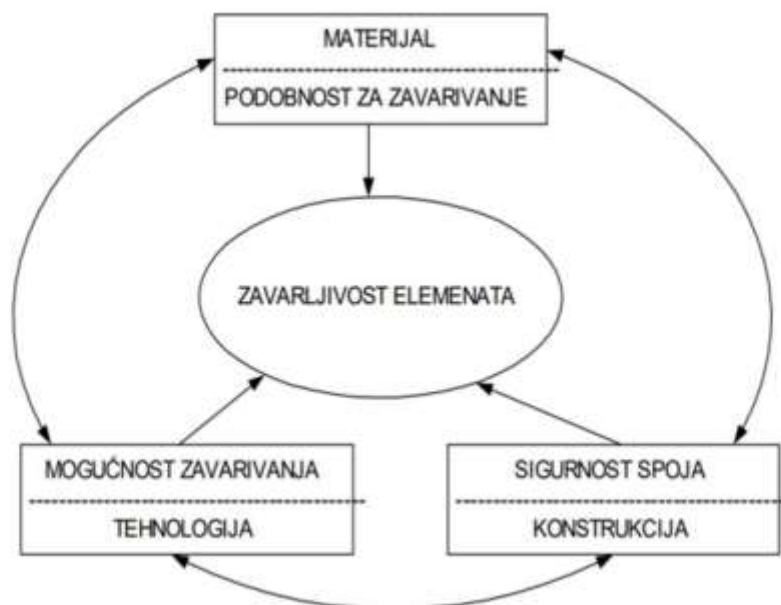


oksida pojavljuju u mikrostrukturi zavara. Posljedica neuklanjanja oksidnog sloja je pojava poroznosti, manja čvrstoća zavarenog spoja i progaranje osnovnog materijala. Koeficijent toplinskog istezanja aluminija dva puta je veći od koeficijenta toplinskog istezanja čelika pa se kod zavarivanja aluminija mora kontrolirati unos topline kako ne bi došlo do prevelike deformacije osnovnog materijala. Koeficijent toplinske vodljivosti aluminija je šest puta veći od koeficijenta toplinske vodljivosti čelika. Unos topline kod zavarivanja aluminija mora biti koncentriraniji i veći kako ne bi došlo do prebrzog hlađenja zavarenog spoja, a time i veće mogućnosti za pojavu grešaka u strukturi zavara. Zbog svoje plošno – centrirane kristalne rešetke, aluminij ne gubi žilavost sa smanjenjem temperature te mu je oblikovljivost jako dobra. [5]

## 2.2. Zavarljivost aluminijskih legura

Definicija zavarljivosti prema normi ISO/TR 581:2005 glasi: „Metalni materijal smatra se zavarljivim danim postupkom kada se kontinuitet materijala može održati korištenjem prikladnog postupka zavarivanja. Istovremeno, zavareni spojevi moraju zadovoljavati dane zahtjeve u smislu njihovih metalurških i mehaničkih svojstava i njihovom utjecaju na konstrukciju čije su dio.“ [7]

Na slici 1. prikazana je shema zavarljivosti prema normi ISO/TR 581:2005



Slika 1. Definicija zavarljivosti [7]

---

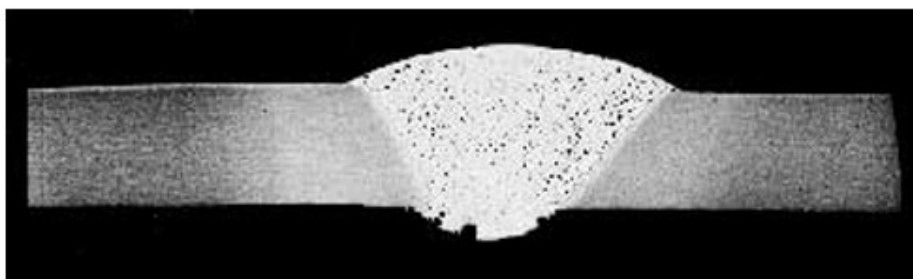
Tri faktora koji utječu na zavarljivost su [7]:

- Materijal – odnosi se na podobnost za zavarivanje
  - Fizikalna i metalurška svojstva
  - Kemijski sastav
- Mogućnost zavarivanja – odnosi se na tehnologiju zavarivanja
  - Priprema za zavarivanje
  - Postupak zavarivanja
  - Predgrijavanje
  - Položaj zavarivanja
  - Parametri zavarivanja
  - Naknadna toplinska obrada
  - Strojna obrada
- Sigurnost spoja – odnosi se na konstrukciju
  - Raspodjela naprezanja u materijalu
  - Debljina materijala
  - Temperatura
  - Korozijski učinak okoline

Glavni problemi kod zavarivanja aluminija su: poroznost, uklanjanje oksidnog filma, tople pukotine i redukcija čvrstoće zavara.

### **2.2.1. Poroznost**

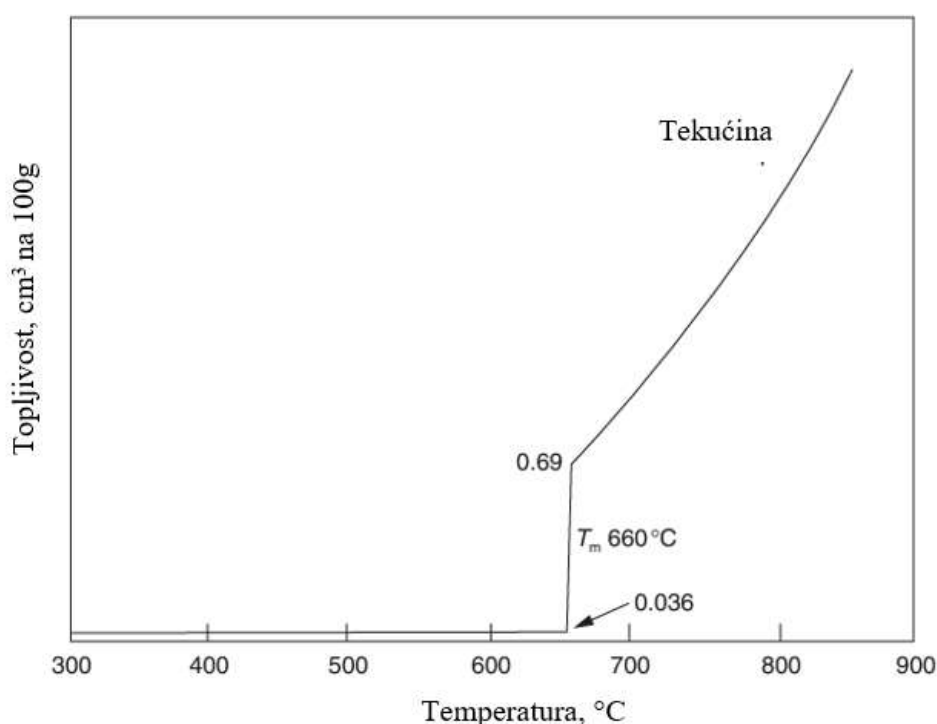
Poroznost je problem koji se odnosi na sam metal zavara. Do pojave poroznosti dolazi kada sitni mjehurići vodika ostanu zarobljeni u materijalu zavara. Na slici 2. prikazan je primjer poroznosti u metalu zavara.



Slika 2. Prikaz poroznosti u materijalu zavara [5]

Vodik ima visoku topivost u talini, ali prelaskom u kruto stanje topivost se smanjuje 20 puta. Aluminijev oksid apsorbira vlagu i on može biti izvor s kojeg vodik prelazi u metal zavara ako se površina dobro ne očisti. Glavni izvor vodika kod zavarivanja aluminija je dodatni materijal, odnosno žica koja se koristi. Većim unosom topline prilikom zavarivanja može se omogućiti vodiku da izađe iz metala zavara jer se tako produžuje vrijeme hlađenja. Legirni elementi također imaju svoju ulogu kod topivosti vodika. Magnezij povećava topivost vodika, dok je bakar i silicij smanjuju. Plin koji koristimo za zavarivanje može sadržavati vlagu pa se mora paziti da se odabere plin s niskom točkom rosišta. [5]

Na slici 3. prikazan je dijagram topivosti vodika u aluminiju ovisno o temperaturi.



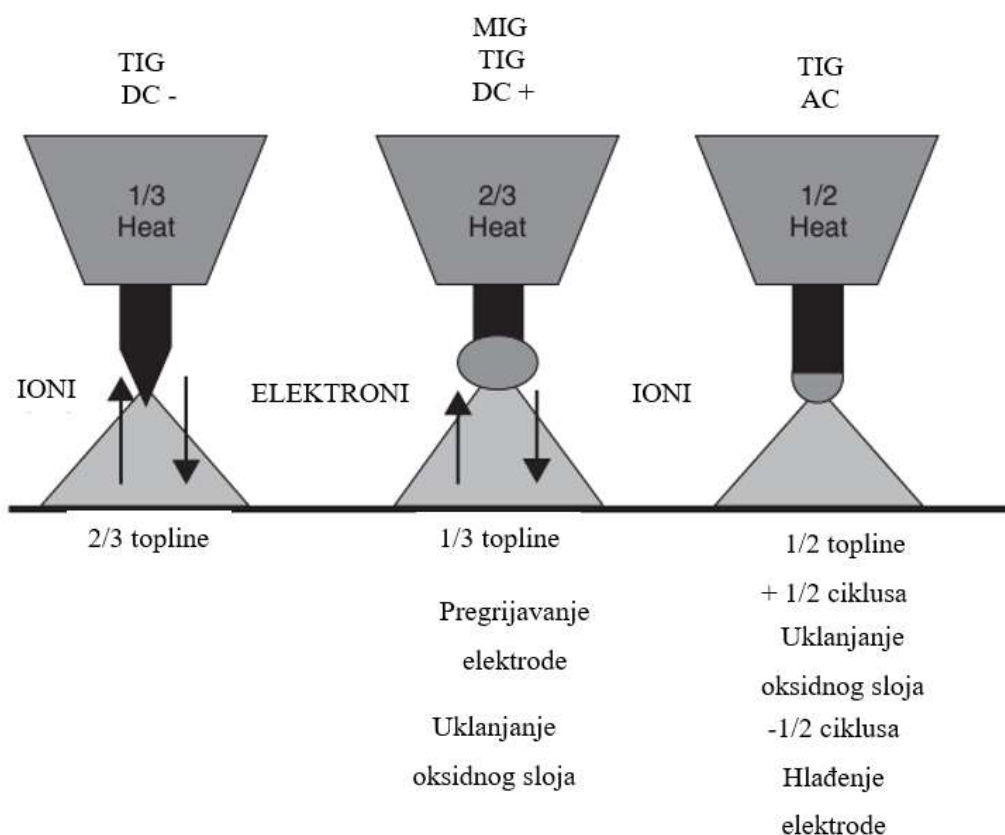
Slika 3. Prikaz topivosti vodika u aluminiju ovisno o temperaturi [4]

### 2.2.2. Uklanjanje oksidnog sloja

Uklanjanje oksidnog filma s površine aluminija nužno je kako bi se izbjegle greške u zavaru kao što su poroznost, pukotine i nedovoljno miješanje osnovnog materijala i metala zavara. Oksidni film na površini aluminija osim što se mora ukloniti prije zavarivanja, mora se uklanjati i tijekom zavarivanja. Talište aluminijevog oksida od oko 2060 °C veće je od tališta aluminija koje iznosi 660 °C. Zagrijavanje aluminija do temperature tališta bez uklanjanja oksidnog filma rezultiralo bi zarobljenom talinom aluminija unutar oksidne opne. Stoga se za uklanjanje aluminijevog oksida s površine koristi takozvano katodno čišćenje. Kada je elektroda spojena na pozitivan pol izvora

istosmjernje struje, tada počinje prelazak elektrona s obratka na elektrodu, a ioni se gibaju u suprotnom smjeru i „bombardiraju“ površinu obradka. Bombardiranjem ionima oksidni film se odstranjuje i raspršuje, te se omogućuje miješanje rastaljenog dodatnog materijala s osnovnim materijalom. Kod MIG postupka elektroda je najčešće spojena na pozitivan pol izvora struje (DCEP), a obradak na negativni pol izvora struje. Navedenim načinom spajanja ostvaruje se efekt katodnog čišćenja. Spajanje elektrode na negativan pol DC izvora (DCEN), a obradka na pozitivan pol rezultira nestabilnim električnim lukom i lošom kvalitetom zavara. Kod TIG postupka zavarivanja obično se koristi istosmjerni izvor struje s elektrodom spojenom na negativan pol izvora struje, što kod aluminijsa može uzrokovati lošu kvalitetu zavara jer nema čišćenja oksida s površine. Spajanjem elektrode na pozitivan pol istosmjernog izvora struje kod TIG postupka može doći do pregrijavanja volframove elektrode zbog toga što se 60 do 70 % topline kod TIG zavarivanja oslobađa na pozitivnom polu. Preporučeno je korištenje TIG postupka s izvorom izmjenične struje. Tijekom pozitivnog dijela ciklusa uklanja se sloj oksida, a hlađenje elektrode odvija se tijekom negativnog dijela ciklusa. [5]

Na slici 4. prikazan je utjecaj polariteta na čišćenje površine.



Slika 4. Utjecaj polariteta na katodno čišćenje površine [5]

### 2.2.3. *Tople pukotine*

Tople pukotine su problem koji se ne javlja kod čistih metala, nego samo kod legura. One ne nastaju samo kod aluminijskih legura nego i kod legura čelika, nikla i bakra. Tople pukotine se javljaju zbog različitih temperatura tališta elemenata koji su prisutni u materijalu. Nakon zavarivanja kada se zavareni spoj počinje hladiti, u kruto stanje prvo prelaze elementi s najvišom točkom taljenja. Ostatak elemenata je još u tekućem stanju te se javljaju praznine između zrna skrućenih elemenata. Ako je razlika u talištima elemenata dovoljno velika, uslijed hlađenja će doći do pucanja tekućeg filma na granicama zrna koji se manifestira kao topla pukotina. Kod Al – Si legura, osjetljivost na tople pukotine prisutna je kod udjela od 0,5 do 1,2 % silicija u leguri. Kod Al – Cu legura ta je vrijednost u intervalu od 2 do 4 % bakra, a kod Al – Mg legura u intervalu od 0,5 do 2,5 % magnezija. [5]

Tople pukotine mogu se spriječiti na sljedeće načine: [5]

- Korištenjem materijala sa sitnozrnatom strukturom
- Kontrolom sastava metala zavara
- Adekvatnom pripremom spoja
- Zavarivanjem najvećom mogućom brzinom
- Odabirom postupka zavarivanja koji uzrokuje najmanja zaostala naprezanja
- Odabirom dodatnog materijala za zavarivanje kojem je talište slično talištu osnovnog materijala

### 2.2.4. *Redukcija čvrstoće zavara*

Kod zavarivanja taljenjem osnovni i dodatni materijal zagrijavaju se na visoku temperaturu s ciljem njihovog taljenja, odnosno spajanja dvaju ili više materijala kako bi se ostvario nerastavljivi spoj. Postoje tri zone zavarenog spoja: zona metala zavara, zona utjecaja topline i zona osnovnog materijala. Zona utjecaja topline izložena je velikom broju ciklusa zagrijavanja i hlađenja i zbog toga se svojstva u ovom dijelu zavarenog spoja mogu jako razlikovati od svojstava osnovnog materijala. Najizraženija promjena u zoni utjecaja topline je smanjenje čvrstoće materijala. Smanjenje čvrstoće materijala zbog utjecaja topline najčešća je pojava kod aluminijskih legura koje su prije zavarivanja bile podvrgnute hladnom oblikovanju ili precipitacijskom očvršćivanju. Zbog toga što aluminij ima visoku toplinsku vodljivost, zona utjecaja topline je široka. Kod legura koje su netretirane ili su bile podvrgnute žarenju neće doći do pada čvrstoće u zoni utjecaja topline. [5]

### 2.3. Aluminijska legura 5083

Al 5083 (EN AW-5083 H111) je aluminijska legura serije 5xxx. Glavni legirni element ove serije je magnezij. [7]

U tablici 2. prikazan je udio legirnih elemenata u aluminijskoj leguri 5083.

Tablica 2. Kemijski sastav aluminijske legure 5083 [7]

Element	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Cr
Postotak	0,4	0,4	0,1	0,4 - 1,0	4,0 – 4,9	0,25	0,15	0,05 – 0,25

Legura 5083 vrlo je otporna na utjecaje okoliša, te se zbog iznimne korozijske otpornosti na morsku vodu koristi u brodogradnji. [7] Mehanička svojstva legure 5083 prikazana su u tablici 3.

Tablica 3. Mehanička svojstva aluminijske legure 5083 [7]

Mehaničko svojstvo	Vrijednost
Granica razvlačenja	110 min MPa
Vlačna čvrstoća	260 min MPa
Tvrdoća – po Brinellu	70 HB
Istezljivost	min 12 %

Od svih toplinski neobrađivih serija aluminijske legure serije 5xxx imaju najveću čvrstoću. Legura 5083 zadržava izuzetnu čvrstoću nakon zavarivanja. Zbog prisustva magnezija u strukturi, legura 5083 teško je strojno obrađiva. [8] Fizikalna svojstva legure 5083 prikazana su u tablici 4.

Tablica 4. Fizikalna svojstva aluminijske legure 5083 [7]

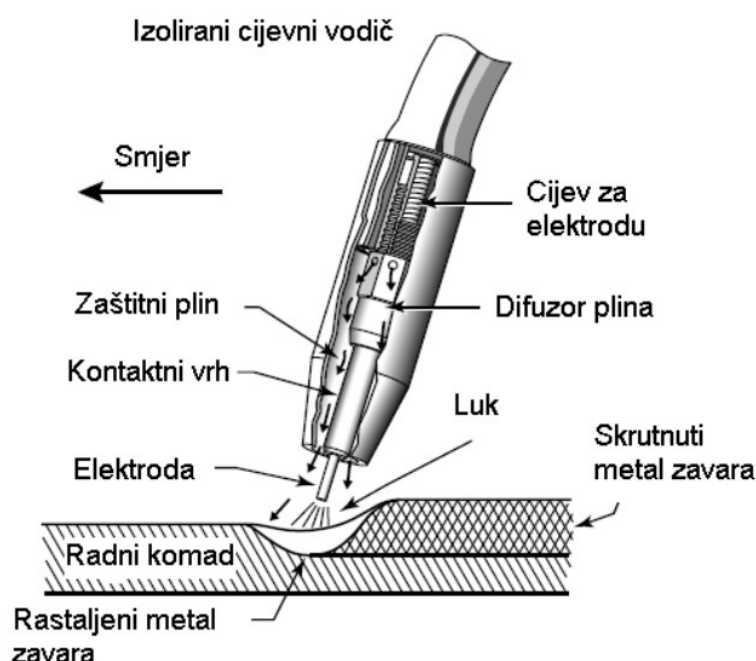
Svojstvo	Vrijednost
Gustoća	2650 kg/m <sup>3</sup>
Talište	570 °C
Modul elastičnosti	72 GPa
Električni otpor	$0,58 \times 10^{-6} \Omega \cdot m$
Toplinska vodljivost	121 W/(m K)
Toplinsko istezanje	$25 \times 10^{-6} /K$

Kod zavarivanja obradaka od aluminijske legure 5083 međusobno ili s aluminijskim legurama serije 5xxx, kao dodatni materijal preporučena je aluminijska legura 5183. Legura 5083 koristi se kod: izrade tračnih vozila, karoserija automobila, kamionskih karoserija, spremnika pod tlakom, u brodogradnji. [8]

### 3. MIG POSTUPAK ZAVARIVANJA

Kod MIG (Metal Inert Gas) postupka zavarivanja električni luk se održava između taljive elektrode koja je u obliku žice te je u pravilu spojena na pozitivan pol istosmjernog izvora struje i osnovnog materijala koji je spojen na negativan pol istosmjernog izvora struje. Žica je ujedno elektroda i dodatni materijal. Dodatni materijal mora imati jednaka ili približno jednaka svojstva kao i osnovni materijal. Kod MIG zavarivanja koriste se inertni zaštitni plinovi (često se koriste argon, helij i mješavine argona i helija). Zaštitni plinovi štite rastaljeni metal od utjecaja atmosfere, a dovode se do mjesta zavarivanja kroz sapnicu na pištolju za zavarivanje. [3]

Shema MIG postupka zavarivanja prikazana je na slici 5.



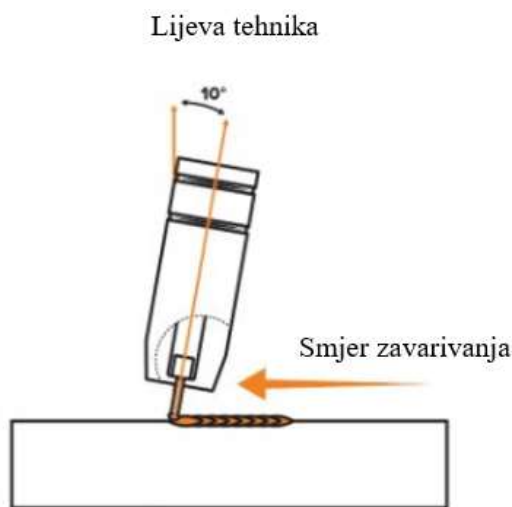
Slika 5. Shema MIG zavarivanja uz prikaz elemenata pištolja za zavarivanje [9]

MIG zavarivanje koristi se za širok raspon debljina materijala, a odlika ovog postupka zavarivanja je mogućnost zavarivanja jako tankih limova. Lako se započinje i zaustavlja postupak zavarivanja. S obzirom na to da je dodatni materijal namotan na kolut u većim količinama, nije potrebna česta zamjena dodatnog materijala. [10]

MIG zavarivanje može biti poluautomatizirani i automatizirani postupak. Kod poluautomatiziranog postupka dovođenje žice je automatizirano, a vođenje pištolja za zavarivanje ručno. Kod automatiziranog postupka dovođenje žice je automatizirano, ali vođenje pištolja ili obratka je se odvija pomoću nekog mehanizma. Danas se u raznim proizvodnim pogonima koriste roboti koji mogu izvoditi zavarivanje potpuno autonomno. [3]

Postoje tri tehnike zavarivanja, lijeva, desna i neutralna. Lijevo tehnika se u pravilu upotrebljava za zavarivanje limova tanjih od 3 mm, a kod debljih limova koristi se desna tehnika. Kod zavarivanja aluminijskih legura koristi se lijeva tehnika uz kut nagiba pištolja za zavarivanje od 5 do 10°. Lijevo tehnika se koristi zbog toga što daje bolju penetraciju i zbog toga što kod desne tehnike postoji opasnost od neadekvatne zaštite, odnosno pojavu nedovoljne koncentracije plina na području zavarenog spoja i to može dovesti do grešaka u zavarenom spoju poput poroznosti. [11]

Na slici 6. prikazana je lijeva tehnika zavarivanja.



Slika 6. Lijevo tehnika [11]

Prednosti MIG postupka zavarivanja su: [9]

- Mogu se zavarivati sve vrste materijala
- Mogućnost velikog izbora parametara i načina prijenosa materijala
- Zavarivanje u svim položajima
- Mogućnost primjene praškom punjene žice
- Široki raspon debljina materijala
- Pogodan je za automatizaciju
- Moguća je primjena i za lemljenje
- Mogućnost primjena različitih plinskih mješavina



Nedostaci MIG postupka su: [9]

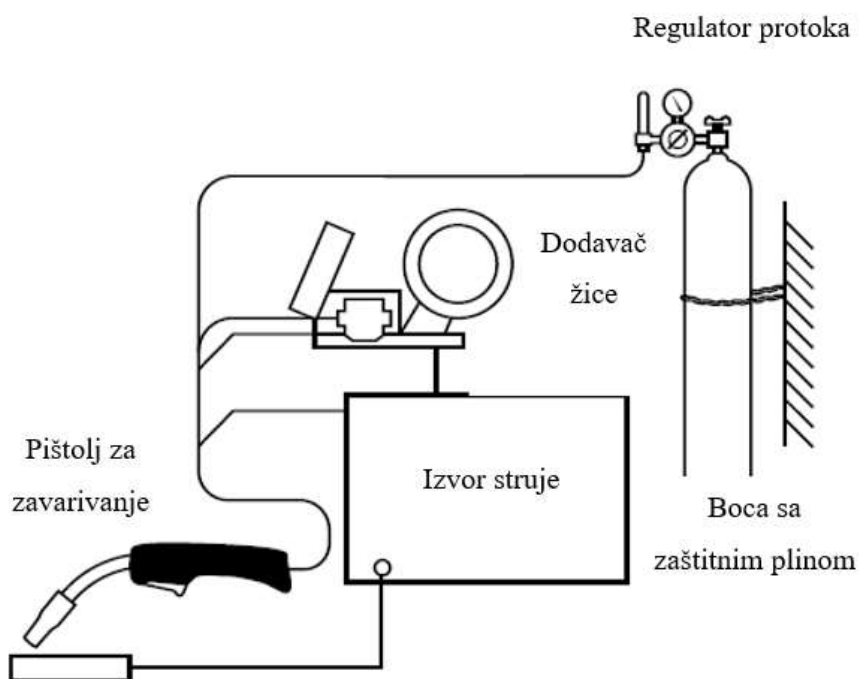
- Kod rada na terenu moguće su greške zbog vjetrova koji otpuhuju plin što dovodi do neadekvatne zaštite
- Problemi s dovođenjem žice, što je najistaknutije kod aluminija
- Veći broj grešaka uslijed neodgovarajuće tehnike rada i parametara zavarivanja
- Štrcanje kod zavarivanja kratkim spojevima
- Uređaji su složeniji
- Teško održavanje stabilnosti luka u vertikalnom i nadglavnom položaju

### 3.1. Oprema za MIG zavarivanje

Oprema za MIG zavarivanje sastoji se od sljedećih komponenti: [9]

- Izvor struje
- Pogonski sustav žice
- Pištolj za zavarivanje s polikabelom
- Boca s plinovima i regulator protoka plina

Na slici 7. prikazana je oprema za MIG zavarivanje.



Slika 7. Oprema za MIG zavarivanje [14]

### 3.1.1. Izvor struje

Kod MIG postupka zavarivanja obično se koriste izvori istosmjerne struje. Preko izvora struje upravlja se uspostavom luka, stabilnosti luka i količinom topline unešene u materijal. Statička karakteristika izvora struje za zavarivanje prikazuje međusobni odnos napona i jakosti struje zavarivanja tijekom djelovanja statičkog opterećenja izvora. Postoje izvori struje sa statičkom karakteristikom konstantnog napona i sa statičkom karakteristikom konstantne jakosti struje. Kod MIG zavarivanja koristi se karakteristika konstantnog napona koja održava kontrolu nad visinom električnog luka. Dinamička karakteristika izvora struje prikazuje promjenu napona i jakosti struje kod određenog postupka zavarivanja. Ovisno o postupku zavarivanja, registriraju se promjene napona i jakosti struje zavarivanja, pri čemu se koriste sustavi za mjerenje, registraciju i obradu glavnih parametara zavarivanja (napona i jakosti struje). Kada se zavaruju materijali kao što su aluminijske legure, potrebna je kontrola unosa topline te električni luk mora biti stabilan. [10]

### 3.1.2. Pogonski sustav žice

Sustav dovođenja žice važan je dio opreme za MIG zavarivanje. Žica se provodi kroz polikabel koji može biti dugačak i do 15 metara. Parametar koji se kontrolira preko sustava za dovođenje žice je brzina dovođenja žice. Pokretanje i zaustavljanje dovoda žice mora biti brzo i brzina dovođenja žice ne smije varirati kako ne bi utjecala na kvalitetu zavara. Kada bi brzina dovođenja žice varirala, količina dodatnog materijala ne bi bila jednolika duž presjeka zavara. Kolut s namotanom žicom sastavni je dio izvora struje. Elektromotor okreće kolut sa žicom i pomoću kotačića preko kojih se ostvaruje gibanje žica se dovodi u polikabel i putuje dalje do pištolja za zavarivanje. Cjevčica po kojoj žica putuje do pištolja većinom je metalna, ali kod dovođenja aluminijske žice preporučuje se korištenje plastike s malim koeficijentom trenja. Kod provođenja aluminijske žice kroz polikabel problem je to što zbog manje čvrstoće i mogućnosti lakšeg deformiranja aluminija, postoji mogućnost da žica zapne u polikabelu. [10]

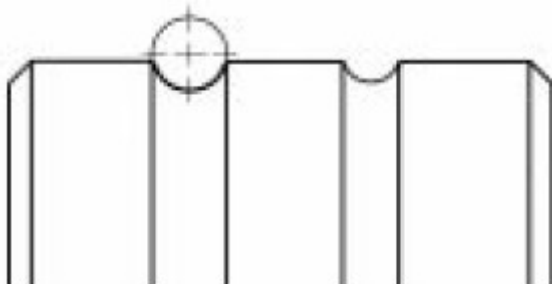
Tipovi sustava za dovođenje žice koji postoje su: [10]

- Push metoda
- Pull metoda
- Push – pull metoda

Vodilice su jedan ili dva seta kotačića s utorima koji su prilagođeni obliku žice kako bi bio omogućen prijenos žice. Kod dovoda aluminijske žice koriste se vodilice s U oblikom utora za žicu. Push sustav koristi vodilicu samo prije ulaska u sam polikabel te se koristi u najvećem broju

slučajeva. Pull metoda koristi kotačiće za dobavu žice unutar pištolja za zavarivanje. Push – pull metoda koristi kotačiće za dobavu žice unutar pištolja zavarivanje i prije ulaska u polikabel. Push – pull metodu preporučljivo je koristiti kod aluminijske žice jer se tako osigurava konstantna zategnutost žice u vodilici. [10]

Na slici 8. prikazan je oblik utora na kotačiću koji se koristi za dovođenje aluminijske žice.



Slika 8. Oblik utora na kotačiću za dovod aluminijske žice

### 3.1.3. Pištolj za zavarivanje

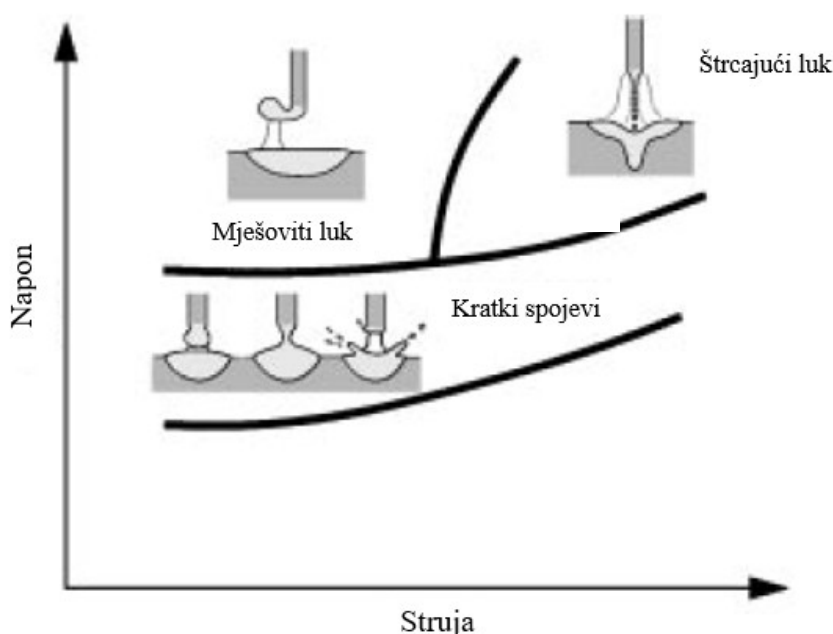
Pištolj za MIG zavarivanje polikabelom je povezan s pogonskim sustavom žice. Pomoću polikabela električna struja, zaštitni plin i dodatni materijal dovode se do pištolja za zavarivanje. Pritiskom prekidača električna struja dovedena polikabelom preko bakrenog vodiča struje prenosi se u kontaktnoj vodilici na žicu dodatnog materijala uz istovremeni izlazak zaštitnog plina iz sapnice. Na vrhu pištolja može se postići temperatura od preko 300 °C pa zbog toga vrh vodilice mora biti izrađen od materijala koji je otporan na visoku temperaturu. Preporučuje se korištenje legure CuCrZr i sličnih zbog njihove visoke tvrdoće i otpornosti na visoke temperature. Kod velikih struja zavarivanja, koriste se i vodom hlađeni pištolji za zavarivanje. Sapnicu iz koje izlazi plin je potrebno povremeno čistiti jer se na njoj nakupljaju produkti zavarivanja, što može dovesti do smanjenog protoka plina odnosno do neadekvatne zaštite mjesta zavarivanja. Teško je konstruirati pištolj za zavarivanje koji bi bio manjih dimenzija i mase s ciljem lakšeg rukovanja, a da je istovremeno robustan i otporan na teške uvjete rada. [10]

### 3.2. Prijenos metala pri MIG zavarivanju

Osnovna podjela prijenosa metala kod MIG zavarivanja je na: [10]

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

Na slici 9. prikazani su prirodni načini prijenosa metala u električnom luku.



Slika 9. Načini prirodnog prijenosa metala [10]

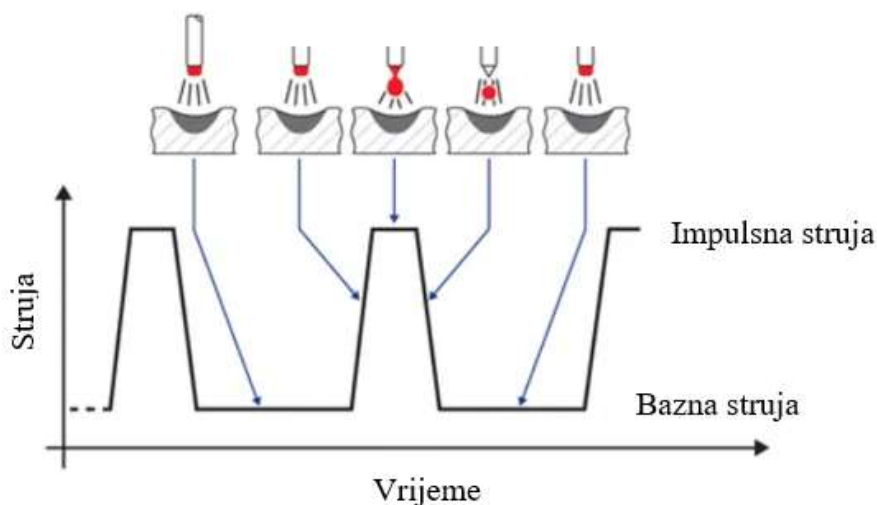
Struja koja se koristi kod prijenosa metala kratkim spojevima iznosi od 50 do 170 A, a napon koji se koristi iznosi od 13 do 21 V za žicu promjera 1,2 mm. Prijenos metala kratkim spojevima događa se kada se rastaljene kapljice dodatnog materijala na vrhu žice spoje s talinom te dolazi do kratkog spoja. U jednoj sekundi do kratkog spoja dođe od 20 do 200 puta. Korištenjem prijenosa metala kratkim spojevima može se zavarivati u svim položajima. Ovaj način prijenosa metala zbog niske struje zavarivanja (od 50 do 170A za žicu promjera 1,2 mm) pogodan je za zavarivanje materijala debljine do oko 8 mm. Nedostatak ovog postupka je pojava prskanja. Prijenos metala kratkim spojevima nije dobar za zavarivanje aluminijskih legura zbog toga što unos toplote nije velik i zbog dobre toplinske vodljivosti aluminijskih svojstva zavarenih spojeva ostvarenih ovim načinom prijenosa metala ne bi bila zadovoljavajuća. [10], [12]

Prijenos metala štrcajućim lukom odvija se kod viših struja zavarivanja koje iznose od 230 do 600 A za žicu promjera 1,2 mm i pri višim iznosima napona (od 25 do 40 V). Kod prijenosa metala štrcajućim lukom kapljice rastaljenog metala deponiraju se u talinu velikom brzinom. Zbog velikog unosa topline mogu se zavarivati samo obradci s debljinom većom od 5 mm. Zbog visoke struje količina depozita je velika pa je zbog toga moguće zavarivati samo u horizontalnom položaju. Kod prijenosa metala štrcajućim lukom električni luk je stabilan i nema pojave prskanja. [12], [10]

Struja koja se koristi kod prijenosa metala mješovitim lukom iznosi od 170 do 235 A, a napon je iznosa od 22 do 25 V za žicu promjera 1,2 mm. Kod prijenosa metala mješovitim lukom djelomično je prisutan prijenos metala kratkim spojevima, a djelomično štrcajućim lukom, ovisno radi li se s manjom ili većom strujom.. S obzirom na to da su iznosi struje i napona veći nego kod prijenosa metala kratkim spojevima, stvaraju se veće kapljice koje kod deponiranja u talinu uzrokuju prskanje. Zbog toga se ne može zavarivati u svim položajima i izgled zavara je lošiji. Mješoviti luk se zbog svojih loših karakteristika nastoji izbjegavati. [12], [10]

Impulsno zavarivanje primarno se koristi za zavarivanje aluminija i nehrđajućih čelika. Izvor struje daje frekvenciju impulsa od 30 do 300 Hz, kontrolira se veličina kapljica na vrhu elektrode i osigurava se stabilan luk bez pojave prskanja. Zbog mogućnosti kontroliranja veličine kapljica, može se koristiti žica većeg promjera što olakšava dovođenje žice kroz vodilice, posebno kod aluminija. Kod impulsnog prijenosa metala izmjenjuju se vrijednosti vršne i bazne struje. Kod vrijednosti vršne struje dolazi do prijenosa metala, a bazna struja služi za održavanje električnog luka. [10]

Na slici 10. prikazan je impulsni način prijenosa metala.



Slika 10. Prijenos metala kod impulsnog zavarivanja [13]

Uređaji za impulsno MIG zavarivanje mogu prilagođavati parametre zavarivanja na temelju brzine dodavanja žice kako bi se konstantno održavao stabilan električni luk. Zbog bolje kontrole unosa topline nego kod štrcajućeg luka, omogućeno je zavarivanje tanjih materijala u svim položajima zavarivanja. [10]

Iz navedenog može se zaključiti da su najbolji načini prijenosa metala štrcajući luk i impulsno zavarivanje zbog unosa topline i dobre penetracije. [10]

### 3.3. AC MIG zavarivanje

AC MIG postupak razvio se je zbog potreba koje je nametnuo razvoj industrije. U cilju je da se za razne konstrukcije i proizvode koriste materijali koji imaju dobra mehanička i kemijska svojstva, a da imaju što manju masu. Primjer je moderna automobilska industrija gdje se aluminijske legure koriste za izradu dijelova karoserije. Došlo je do potrebe zavarivanja materijala male debljine koji imaju dobra mehanička i kemijska svojstva. Zavarivanje tanjih materijala postupcima koji koriste izvore istosmjernje struje prouzročilo je probleme poput progaranja osnovnog materijala i nemogućnosti spajanja materijala. Razvojem AC MIG postupka omogućena je bolja kontrola nad procesom zavarivanja te je to rezultiralo kvalitetnijim zavarima. [15], [16]

Pri MIG zavarivanju istosmjernom (DC) strujom, elektroda se može spojiti na pozitivan ili negativan pol izvora struje za zavarivanje. Najčešće se elektroda spaja na pozitivan pol izvora, a osnovni materijal na negativan pol izvora. Navedeni način spajanja naziva se DCEP (*Direct Current Electrode Positive*). Karakteristike DCEP načina spajanja su: [16]

- Čišćenje oksida s površine
- Duboka penetracija
- Stabilan električni luk

Drugi način spajanja je spajanje elektrode na negativan pol izvora struje za zavarivanje, a osnovnog materijala na pozitivan pol izvora. Navedeni način spajanja naziva se DCEN (*Direct Current Electrode Negative*). Karakteristike DCEN načina spajanja su: [16]

- Veća količina taline
- Manja penetracija
- Nestabilnost luka

AC MIG postupkom zavarivanja kombiniraju se dobre karakteristike DCEN – a i DCEP – a.

---

### 3.4. Parametri MIG zavarivanja

Glavni parametri MIG zavarivanja su: [10]

- Napon zavarivanja
- Brzina dodavanja žice
- Struja zavarivanja
- Brzina zavarivanja
- Duljina slobodnog kraja žice
- Vrsta i protok zaštitnog plina
- Induktivitet

Kvaliteta i izgled zavara ovise o pravilnom odabiru parametara zavarivanja.

Napon zavarivanja utječe na način prijenosa metala, duljinu električnog luka i širinu zavara. Kod većeg napona širina zavara je veća, a penetracija je manja. Premali napon može uzrokovati probleme s uspostavom luka. Kod MIG zavarivanja izvor struje ima mogućnost podešavanja vrijednosti napona pomoću synergic control funkcije koja održava stabilan električni luk na temelju brzine dodavanja žice. [10], [17]

Jakost struje zavarivanja određuje se prema brzini dodavanja žice i promjeru žice. Navedeni parametri odabiru se prema debljini materijala koji se zavaruje i prema količini dodatnog materijala koji je potreban. O struji zavarivanja ovise stabilnost električnog luka, penetracija i količina rastaljenog materijala. [10]

Brzina zavarivanja važna je s gledišta produktivnosti. Cilj je postići što veću brzinu zavarivanja kako bi se posao brže napravio, ali ovisno o materijalu i postupku zavarivanja, brzina zavarivanja ima svoju granicu. Ako se previše poveća brzina zavarivanja, zavari postaju užji i penetracija u materijal se smanjuje. [10]

Duljina slobodnog kraja žice određuje se tako da se izmjeri udaljenost između vrha kontaktne vodilice i komada koji se zavaruje. Ta udaljenost otprilike iznosi 10 do 15 x promjer žice. Duljina slobodnog kraja žice mora biti u rasponu u kojem je moguće zavarivanje bez pojave navedenih problema. Povećanjem duljine slobodnog kraja žice smanjuje se unos topline što uzrokuje manju penetraciju, a količina rastaljenog dodatnog materijala ostaje ista. [10]

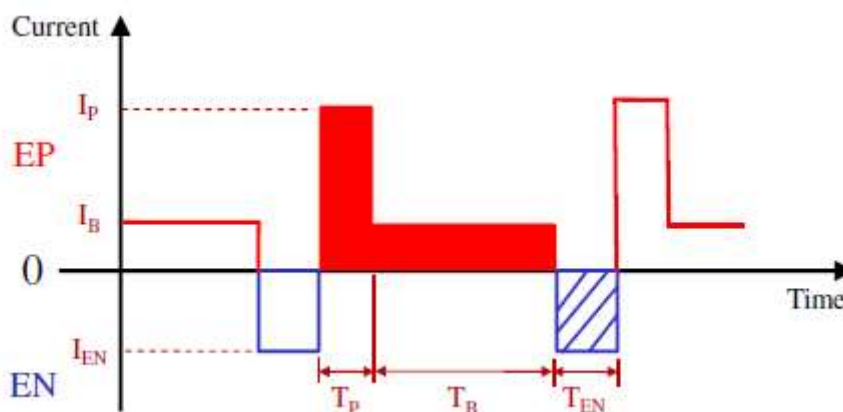
Induktivitet je parametar kojim se opisuje brzina porasta jakosti struje unutar vremenskog perioda nakon ostvarivanja kratkog spoja. Pomoću vrijednosti induktiviteta kontrolira se pojava štrcanja kod zavarivanja. Povećanjem induktiviteta smanjuje se frekvencija kapljica što uzrokuje manju

pojavu štrcanja, dok se smanjenjem induktiviteta povećava frekvencija kapljica što povećava pojavu štrcanja. [18]

### 3.4.1. EN omjer

Jedan od bitnijih faktora kod AC MIG zavarivanja je EN (*Electrode Negative*) omjer. EN omjer je definiran kao omjer površine negativnog polariteta i ukupne površine jednog ciklusa struje. [16]

Na slici 11. prikazan je primjer valnog oblika struje kod impulsnog AC MIG postupka.



Slika 11. Valni oblik impulsnog AC MIG postupka zavarivanja [16]

Jednadžba kojom se izračunava EN omjer glasi [16]:

$$EN \text{ omjer} = \frac{I_{EN} \cdot T_{EN}}{(I_P \cdot T_P) + (I_B \cdot T_B) + (I_{EN} \cdot T_{EN})} \cdot 100 \% \quad (1)$$

Oznake navedene u jednadžbi predstavljaju:

$I_{EN}$  – jakost struje na negativnom polaritetu, A

$T_{EN}$  – vrijeme trajanja negativnog impulsa, s

$I_P$  – jakost impulsne struje na pozitivnom polu, A

$T_P$  – vrijeme trajanja impulsne struje, s

$I_B$  – bazna struja na pozitivnom polu, A

$T_B$  – vrijeme trajanja bazne struje na pozitivnom polu, s

Promjenom EN omjera moguće je kontrolirati penetraciju, unos topline i količinu depozita. S povećanjem EN omjera pri konstantnoj struji, povećava se trajanje negativnog polariteta te se kao rezultat toga povećava brzina taljenja žice i veličina kapljica. Količina depozita može se povećati povećanjem EN omjera koristeći jednaku jakost struje zavarivanja. Povećanjem EN omjera dolazi do smanjenja srednje struje pri konstantnoj brzini taljenja žice te je posljedica toga slabija



penetracija. Uvjet za bolju penetraciju je povećanje brzine dobave žice. EN omjer se ne smije previše povećavati zbog toga što se može narušiti geometrija samog zavara zbog prevelike količine depozita. [16]

### 3.5. Zaštitni plinovi

Zaštitni plinovi u zavarivanju služe kao zaštita od utjecaja atmosfere i odabir zaštitnog plina ovisi o tome kakva se svojstva zavara žele ostvariti. Plinovi koji se koriste kod MIG zavarivanja aluminija i njegovih legura su argon, helij i njihove mješavine. Oni se koriste zato što su inertni, odnosno ne reagiraju s drugim tvarima i osiguravaju stabilnost luka. Plinovi koji se koriste za zavarivanje moraju imati visoku čistoću. [10]

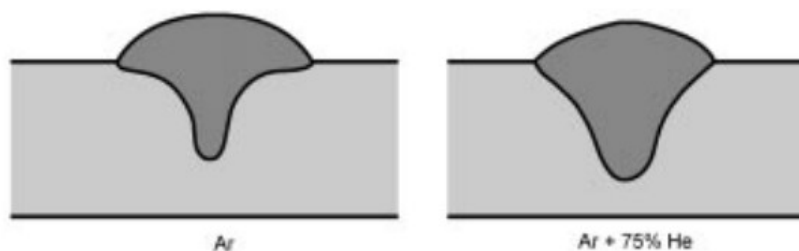
Zaštitni plinovi imaju sljedeće uloge kod zavarivanja:

- Zaštita od utjecaja okoline
- Osigurati stabilnost luka
- Osigurati produktivnost zavarivanja i pouzdanost zavara
- Uspostava električnog luka
- Utjecaj na dubinu i oblik penetracije

#### 3.5.1. Argon

Argon je inertni plin što znači da kemijski ne reagira s drugim tvarima u normalnim uvjetima. Dobiva se iz atmosfere frakcijskom destilacijom tekućeg zraka te se može dobiti jako visoka čistoća plina. Argon se može koristiti pri zavarivanju svih metala. Često se koristi u plinskim mješavinama s drugim plinovima u kojima je argon glavna komponenta. Ionizacijski potencijal plina predstavlja energiju potrebnu za ionizaciju plina izraženu u elektronvoltima. Argon ima nizak ionizacijski potencijal od 15,7 eV, što znači da je uspostava električnog luka lakša i njegova stabilnost je veća. Toplinska vodljivost argona je relativno niska pa su radi toga napon zavarivanja i unos topline relativno niski. Zbog navedenih svojstava, penetracija kod korištenja čistog argona je manja pa se kod zavarivanja aluminijskih legura koriste mješavine argona i helija da bi se penetracija poboljšala. [10], [19]

Na slici 12. prikazan je utjecaj zaštitnog plina na profil penetracije zavara.



Slika 12. Utjecaj zaštitnog plina na profil penetracije zavara kod aluminijskih legura [8]

### 3.5.2. Helij

Helij je kao i argon inertan plin. Količina helija u zraku je mala pa se proizvodnja helija bazira na ekstrakciji iz prirodnog plina s udjelom helija većim od 0.4 %. Nakon ekstrakcije helij se pročišćuje. Zbog manje dostupnosti i kompliciranijeg postupka dobivanja helija, njegova cijena je veća od ostalih plinova pa se zato koristi samo u slučajevima gdje su njegove prednosti nužne. Kao i argon, helij se može koristiti kod svih metala. Ionizacijski potencijal helija je veći od argona i iznosi 24,5 eV. To znači da su kod helija potrebne veće vrijednosti struje i napona za uspostavu električnog luka te je zbog toga kod zavarivanja s helijem u zaštitnoj atmosferi unos topline veći. Toplinska vodljivost helija puno je veća od vodljivosti argona pa su zato veći napon zavarivanja i unos topline uz istu jakost struje. Zbog toga je luk manje koncentriran što rezultira širom i dubljom penetracijom te se smanjuje mogućnost nastanka grešaka poput poroznosti i toplih pukotina. Kod korištenja plinskih mješavina koje sadržavaju helij mora se povećati protok plina jer helij zbog svoje manje gustoće daje lošiju zaštitnu atmosferu od argona. [10], [19]

---

## 4. EKSPERIMENTALNI DIO

U eksperimentalnom dijelu završnog rada promatran je utjecaj zaštitnog plina i brzine zavarivanja na svojstva i oblik zavara. Kako bi se provela analiza, bilo je potrebno zavariti četiri uzorka za ispitivanje:

- Uzorak 1A – zavaren AC MIG impulsnim postupkom u zaštitnoj atmosferi argona (HRN EN ISO 14175–I1–Ar) s brzinom zavarivanja 50 cm/min
- Uzorak 1B – zavaren AC MIG impulsnim postupkom u zaštitnoj atmosferi mješavine s 85 % argona i 15 % helija (HRN EN ISO 14175–I3–ArHe–15) s brzinom zavarivanja od 50 cm/min
- Uzorak 2A – zavaren AC MIG impulsnim postupkom u zaštitnoj atmosferi argona (HRN EN ISO 14175–I1–Ar) s brzinom zavarivanja 70 cm/min
- Uzorak 2B – zavaren AC MIG impulsnim postupkom u zaštitnoj atmosferi mješavine s 85 % argona i 15 % helija (HRN EN ISO 14175–I3–ArHe–15) s brzinom zavarivanja od 70 cm/min

Nakon zavarivanja, izrađeni su makroizbrusci za analizu zavarenog spoja. Nakon brušenja, površina za ispitivanje podvrgnuta je nagrizanju. Analizirani su oblik, penetracija i makrostruktura zavarenog spoja.

### 4.1. Oprema za zavarivanje

Kao izvor struje za zavarivanje korišten je Welbee Inverter W400 proizvođača Daihen Varstroj. Welbee W400 idealan je izbor kod potrebe precizne kontrole unosa topline i stabilnosti električnog luka. Ovaj uređaj opremljen je posebnim programima za zavarivanje aluminija i nehrđajućih čelika. Koristeći Welbee W400 može se zavarivati s više različitih postupaka:

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

AC impulsno i AC wave impulsno zavarivanje koristi se za zavarivanje aluminijskih legura zbog dobrih svojstava zavarenog spoja i smanjene količine nusprodukata zavarivanja koji se nakon

zavarivanja moraju čistiti s površine osnovnog materijala. Još jedna prednost ovog uređaja je mogućnost memoriranja i do 100 postavki parametara zavarivanja tako da kod zavarivanja istog materijala više puta u nekom vremenu već postoje spremni parametri te se tako povećava produktivnost. Na slici 13. prikazan je izvor struje Welbee W400 s pripadajućim dodavačem žice, a na slici 14. prikazane su karakteristike navedenog izvora struje.



Slika 13. Daihen Varstroj Welbee W400

<b>DAIHEN VARSTROJ d.d.</b> Industrijska ulica 4, 9220 Lendava, Slovenija		<b>DAIHEN VARSTROJ</b>	
<b>AC/DC WELDING POWER SOURCE</b> <b>WB-W400 AC-MIG</b>		P30205Y-1095012	DATE 2021
		EN 60974-1	
		30 A / 15.5 V - 400 A / 34.0 V	
<b>S</b>	$U_0$ 106 V	X	40% 60% 100%
		$I_2$	400 A 360 A 350 A
		$U_2$	34.0 V 32.0 V 31.5 V
	$U_1 = 400 V$	$I_{1max} = 30.9 A$	$I_{1eff} = 19.8 A$
3 ~ 50/60 Hz	<b>IP23</b>		
			Masa: 86 kg
			NA 908344.00

Slika 14. Karakteristike izvora struje Welbee W400

Zavarivanje je provedeno pomoću automata marke BUG – O 5300 na koji je pričvršćen pištolj za zavarivanje i postolja na koje je stavljen pripremljen obradak s pripojnim zavarima. Automatizirano vođenje pištolja za zavarivanje korišteno je zbog toga što omogućava konstantnu brzinu zavarivanja i duljinu slobodnog kraja žice te veću preciznost vođenja električnog luka. Položaj zavarivanja bio je vodoravan. Na slici 15. prikazana je postava za zavarivanje.



Slika 15. Postava za zavarivanje

#### 4.2. Dodatni materijal

Kao dodatni materijal korištena je žica aluminijske legure 5183, promjera 1,2 mm. Karakteristike dodatnog materijala prikazane su na slici 16.

<b>NORME</b>					
HRN EN ISO 18723	AWS / ASME SFA-5.10		W. Nr.		
S Al 5183 / AlMg4,5Mn0,7(A)	ER5183		3.3548		
<b>SVOJSTVA I PODRUČJE PRIMJENE</b>					
Aluminijska žica za MIG zavarivanje legirana s cca 4,8% Mg i 0,7% Mn. Namijenjena je za zavarivanje Al-Mg-Mn i AlMg legura. Visoka čvrstoća i dobra žilavost metala zavara omogućuju široku primjenu kod zavarivanja aluminijskih konstrukcija. Zavar se odlikuje dobrom korozijskom postojanošću u morskoj atmosferi.					
<b>MEHANIČKA SVOJSTVA ČISTOG METALA ZAVARA</b>					
$R_{p0,2}$ N/mm <sup>2</sup>	$R_m$ N/mm <sup>2</sup>		$A_5$ %		
140	280		> 24		
<b>ORIJENTACIJSKI KEMIJSKI SASTAV ŽICE</b>					
	Al	Mg	Mn	Si	Fe
%	bal.	4,8	0,7	0,1	0,2
<b>ZAŠTITNI PLIN</b>					
I1 (Ar)					
<b>PAKIRANJE</b>					
Promjer žice mm			Namotaj		
0,8; 1,0; 1,2; 1,6; 2,0			Žica do žice (S-S)		
7 kg - žičani kolut					

Slika 16. Specifikacija dodatnog materijala [20]

### 4.3. Zaštitna atmosfera

Pri zavarivanju su za stvaranje zaštitne atmosfere korišteni argon i mješavina argon + helij. Kod zavarivanja uzoraka 1A i 2A korišten je argon čistoće 99,998 % (HRN EN ISO 14175–I1–Ar), a kod uzoraka 1B i 2B korištena je mješavina argona + helij (HRN EN ISO 14175–I3–ArHe–15) u omjeru 85:15. Na slikama 17. i 18. prikazane su boce s navedenim zaštitnim plinovima.



Slika 17. Zaštitni plin argon

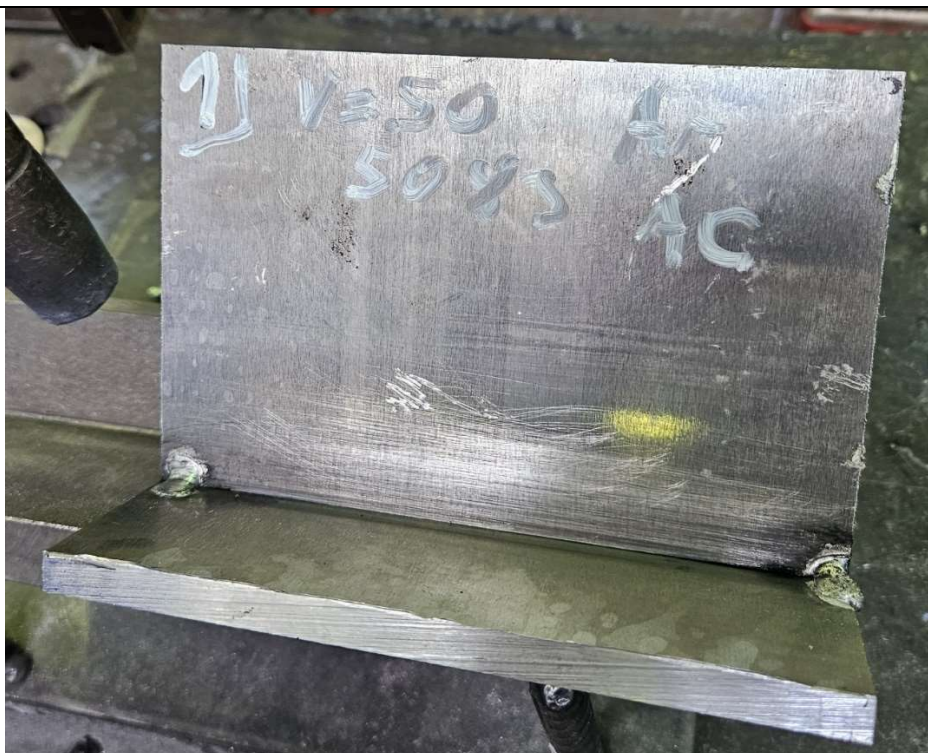


Slika 18. Zaštitna plinska mješavina argona i helija u omjeru 85:15

#### 4.4. Priprema za zavarivanje

Za eksperiment su korištene četiri ploče od aluminijske legure 5083 (EN AW-5083 H111). Dimenzije ploča su 150 mm x 100 mm x 8 mm. Zavarena su četiri kutna spoja. Kako bi se izbjegle greške u zavaru, prije zavarivanja provedeno je temeljito čišćenje i odmašćivanje osnovnog materijala. Nakon toga, ploče su postavljene u položaj za kutni zavar te su na krajevima ploča napravljeni pripojni zavari kako bi se osiguralo da ploče ostanu u željenom položaju. Nakon toga, površina je ponovno očišćena.

Na slici 19. prikazane su ploče s pripojnim zavarima neposredno prije početka zavarivanja.



Slika 19. Pripojni zavari

#### 4.5. Parametri zavarivanja i obrada makroizbrusaka

Nakon pripreme spoja, svi uzorci su zavareni AC MIG - P (impulsnim) postupkom. Početni parametri zavarivanja odabrani su na temelju rezultata zavarivanja probnih uzoraka. Za sva četiri uzorka, odabrana jakost struje zavarivanja iznosila je 200 A, a vrijednost napona zavarivanja iznosila je 28 V. Iznosi jakosti struje zavarivanja i napona zavarivanja mijenjali su se tijekom postupka zavarivanja, dok su ostali parametri ostali konstantni. Parametri zavarivanja uzoraka prikazani su u tablici 5.

Tablica 5. Parametri zavarivanja

Uzorak	1A	2A	1B	2B
Postupak	AC MIG - P	AC MIG - P	AC MIG - P	AC MIG - P
Jakost struje zavarivanja (očitano), A	228	227	227	227



Napon zavarivanja (očitano), V	24,3	23,5	25,7	24,4
Brzina dobave žice, m/min	16,6	16,6	16,6	16,6
Brzina zavarivanja, cm/min	50	70	50	70
Protok plina, l/min	23	23	23	23
Tehnika zavarivanja	lijeva (10°)	lijeva (10°)	lijeva (10°)	lijeva (10°)
Slobodni kraj žice, mm	15	15	15	15
Temperatura predgrijavanja, °C	40	40	40	40
Omjer balansa, %	+50	+50	+50	+50
Unos topline, kJ/cm	5,32	3,66	5,6	3,80

Unos topline je izračunat prema izrazu: [21]

$$Q = \frac{U \cdot I \cdot 60}{v_z \cdot 1000} \cdot \eta \left[ \frac{\text{kJ}}{\text{cm}} \right] \quad (2)$$

U – napon zavarivanja, V

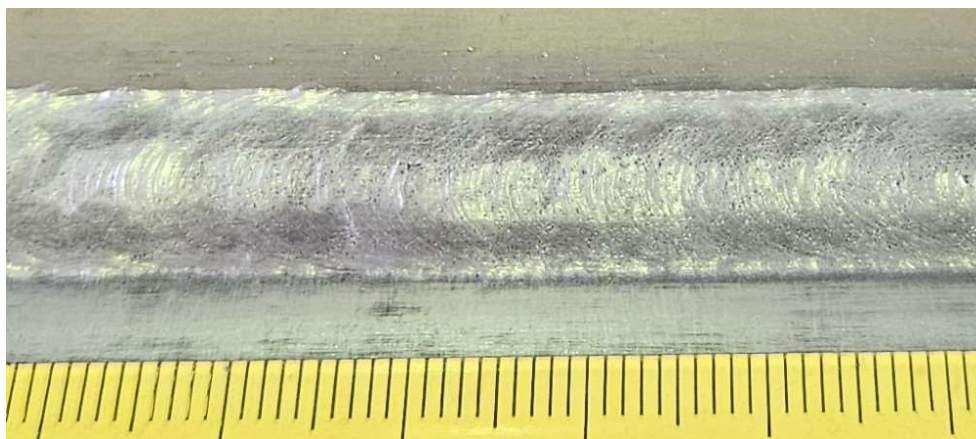
I – jakost struje zavarivanja, A

$v_z$  – brzina zavarivanja, cm/min

$\eta$  – stupanj iskoristivosti (prema normi DIN EN 1011-1, za MIG postupak  $\eta$  iznosi 0,8)

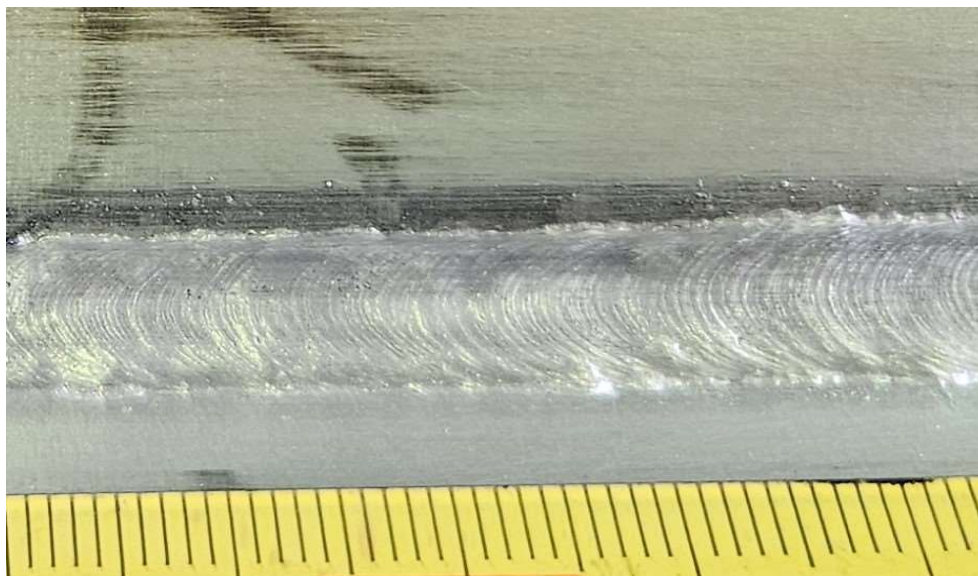
Iz tablice 5. vidljivo je da je jakost struje bila konstantna pri zavarivanju sva četiri uzorka. Napon zavarivanja je bio veći kod uzoraka kod kojih je korištena zaštitna atmosfera plinske mješavine argon + helij, nego kod uzoraka gdje se je koristila zaštitna atmosfera čistog argona. Do navedene razlike došlo je zbog toga što helij ima veći ionizacijski potencijal od argona. Napon zavarivanja manji je kod uzoraka zavarivanih brzinom zavarivanja od 70 cm/min. Brzina dobave žice i protok plina bili su konstantni za sva četiri uzorka. Brzina zavarivanja kod uzoraka 1A i 1B iznosila je 50 cm/min, a kod uzoraka 2A i 2B 70 cm/min. Kod zavarivanja sva četiri uzorka korištena je lijeva tehnika rada s nagibom pištolja od 10°. Duljina slobodnog kraja žice, temperatura predgrijavanja i omjer balansa bili su konstantni za sva četiri uzorka. Rezultati zavarivanja naknadno su objašnjeni. Nakon zavarivanja uzorci su stavljani na čeličnu podlogu zbog bržeg hlađenja na sobnu temperaturu. Kad su se uzorci ohladili, sa žičanom četkom od nehrđajućeg čelika s površine uzoraka odstranjene su nečistoće nastale uslijed zavarivanja.

Tijekom zavarivanja uzorka 1A, električni luk je bio stabilan. Nakon zavarivanja je površina uzorka očišćena. Na površini zavara vidljiva je pojava poroznosti. Na površini oko zavara, vidljiva je manja pojava rasprskavanja. Na slici 20. prikazan je zavar uzorka 1A nakon čišćenja.



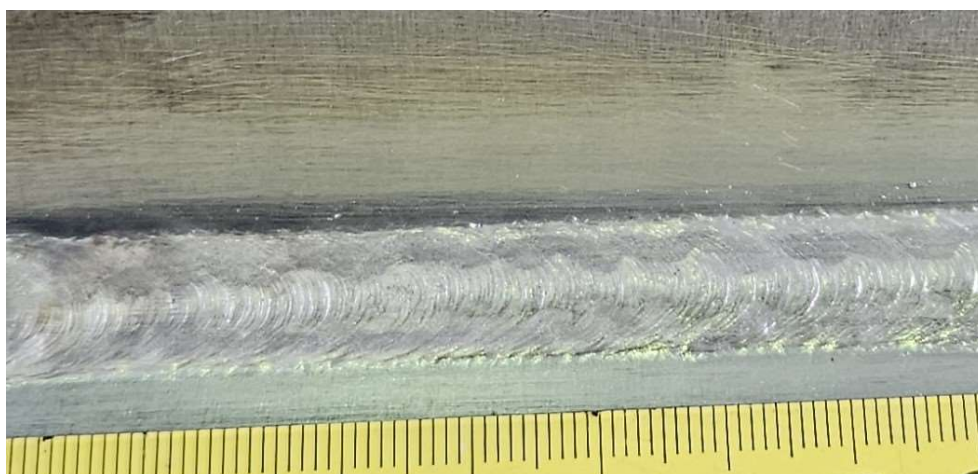
Slika 20. Uzorak 1A nakon čišćenja

Tijekom zavarivanja uzorka 2A, električni luk je bio stabilan. Nakon zavarivanja, površina uzorka je očišćena. Na površini zavara nisu primjećene vidljive greške. Na površini oko zavara, vidljiva je mala pojava rasprskavanja. Na slici 21. prikazan je zavar uzorka 2A nakon čišćenja.



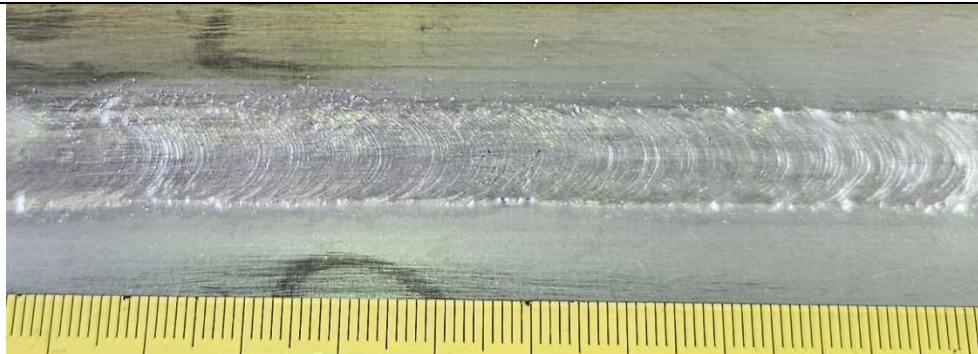
Slika 21. Uzorak 2A nakon čišćenja

Tijekom zavarivanja uzorka 1B, električni luk je bio stabilan. Nakon zavarivanja, površina uzorka je očišćena. Na površini zavara nisu primjećene vidljive greške. Na površini oko zavara, vidljiva je minimalna pojava rasprskavanja. Na slici 22. prikazan je zavar uzorka 1B nakon čišćenja.



Slika 22. Izgled zavara uzorka 1B nakon čišćenja

Tijekom zavarivanja uzorka 2B, električni luk je bio stabilan. Nakon zavarivanja je površina uzorka očišćena. Na površini zavara nisu primjećene vidljive greške. Na površini oko zavara, vidljiva je minimalna pojava rasprskavanja. Na slici 23. prikazan je zavar uzorka 2B nakon čišćenja.



Slika 23. Izgled zavora uzorka 2B nakon čišćenja

Nakon čišćenja, uzorci su izrezani na pili te su dobiveni makroizbrusci. Prvo se je provodilo ručno brušenje u četiri koraka koristeći granulacije brusnog papira redom 100, 240, 320 i 400. Nakon ručnog brušenja, uzorci su strojno brušeni na stroju za poliranje Mecatech 250. Na navedenom stroju uzorci su brušeni i na kraju polirani koristeći granulacije vodobrusnog papira redom 600, 1200 i 2400. Kod brušenja je bila primijenjena ručna sila pritiskanja, a brzina vrtnje je iznosila 300 okr/min.

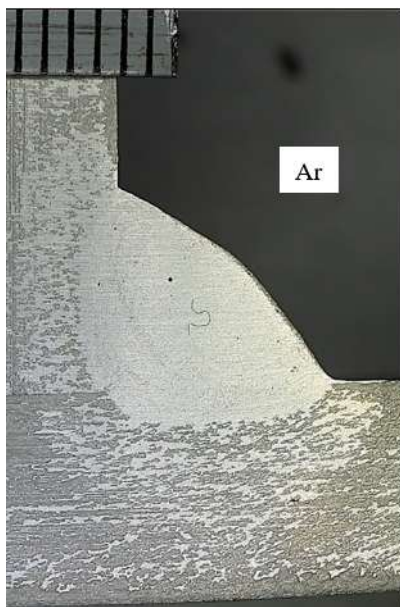
Na slici 24. prikazan je stroj za poliranje Mecatech 250.



Slika 24. Stroj za poliranje Mecatech 250

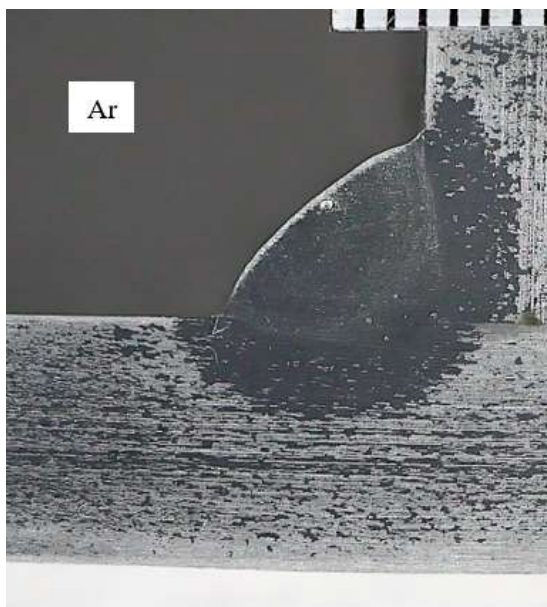
Nakon poliranja, provedeno je nagrivanje. Uzorci su nagriveni u otopini HCl (15mL) + H<sub>2</sub>O (85mL) + HF (10mL) u vremenu od tri minute te su uzorci nakon toga oprani vodom i obrisani. Za prikaz makrostrukture, koristio se je digitalni mikroskop s automatskim fokusom marke Insize.

Na slici 25. prikazan je makroizbrusak uzorka 1A.



Slika 25. Makroizbrusak uzorka 1A

Na slici 26. prikazan je makroizbrusak uzorka 2A.



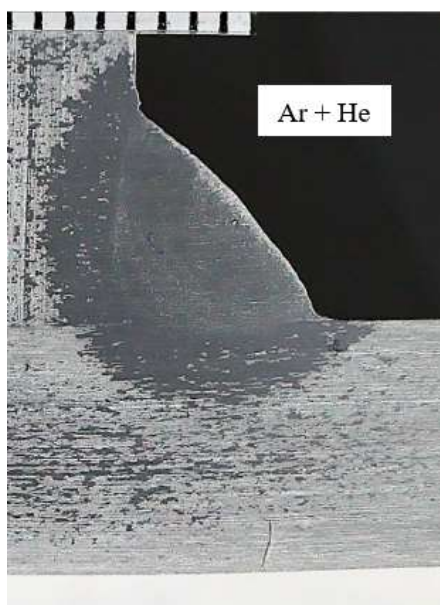
Slika 26. Makroizbrusak uzorka 2A

Na slici 27. prikazan je makroizbrusak uzorka 1B.



Slika 27. Makroizbrusak uzorka 1B

Na slici 28. prikazan je makroizbrusak uzorka 2B.



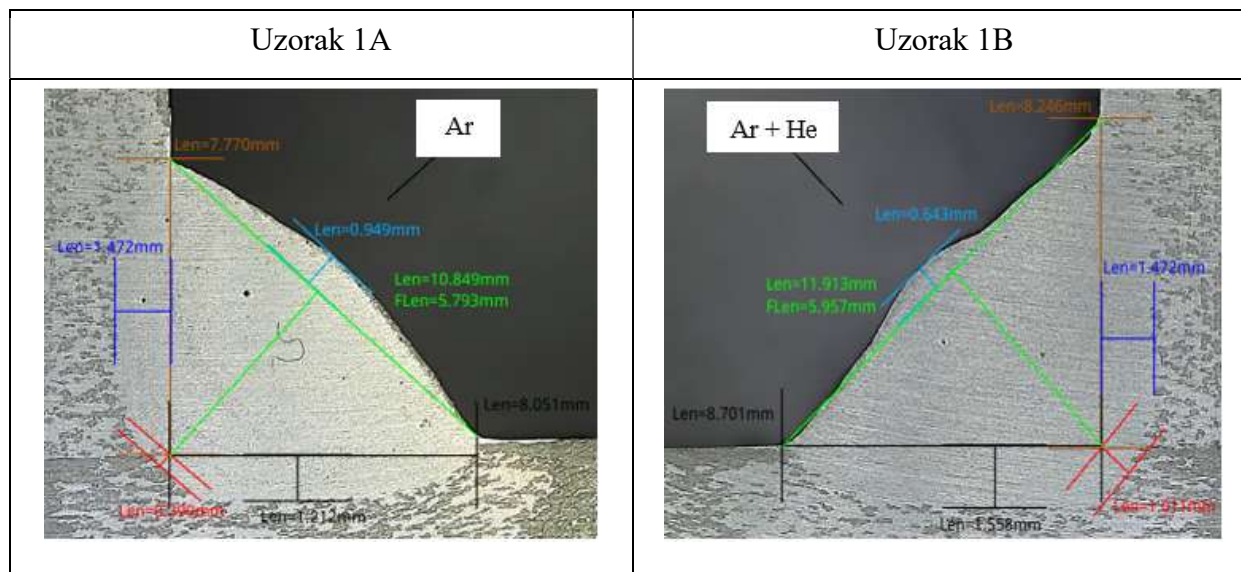
Slika 28. Makroizbrusak uzorka 2B

#### 4.6. Utjecaj zaštitnog plina na makrostrukturu i oblik zavara

Prvo je provedena analiza uzoraka koji su zavareni koristeći različite zaštitne atmosfere. U tablici 6. prikazani su uzorci 1A i 1B. Kod zavarivanja uzorka 1A korištena je zaštitna atmosfera čistog argona, a kod uzorka 1B mješavina 85 % argona i 15 % helija. Brzina zavarivanja iznosila je

50 cm/min.

Tablica 6. Makroizbrusci 1A i 1B s karakterističnim dimenzijama zavara



U tablici 7. prikazana je usporedba dimenzija zavara. Za analizu geometrije zavarenog spoja korišten je program mikroskopa proizvođača Insize, a za izračun površina samog zavara korišten je program „ImageJ“.

Tablica 7. Geometrija zavarenih spojeva uzoraka 1A i 1B

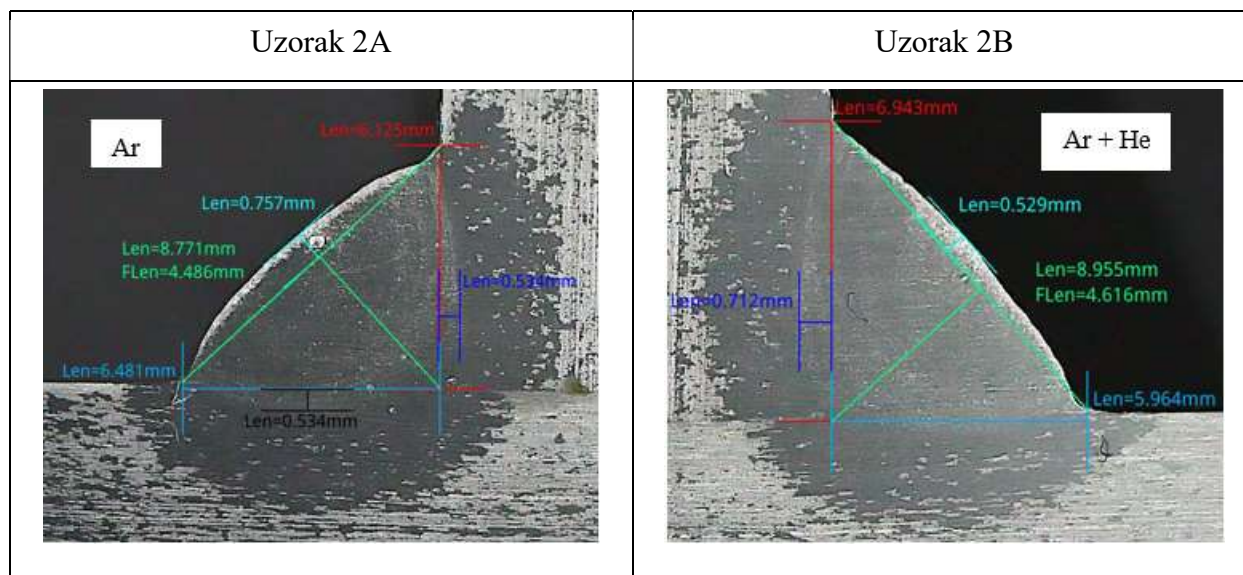
Uzorak	1A	1B
Visina zavara, mm	5,793	5,957
Nadvišenje zavara, mm	0,949	0,643
Dubina penetracije, mm	0,399	1,011
Površina zavara, mm <sup>2</sup>	55,715	58,202
Površina penetracije, mm <sup>2</sup>	19,332	21,522

Iz rezultata analize uzoraka vidljivo je da uzorak 1A ima manju visinu zavara, penetraciju i ukupnu površinu zavara od uzorka 1B. Kod uzorka 1A veće je nadvišenje zavara od nadvišenja uzorka 1B. Navedene razlike postoje zbog razlike u korištenim zaštitnim atmosferama. Korištenje helija u zaštitnoj atmosferi pri zavarivanju uzorka 1B dovelo je do povećanja penetracije u osnovni materijal, naročito u području korijena zavara. U horizontalnom smjeru nema razlike u penetraciji u osnovni materijal, a u vertikalnom smjeru razlika je izražena. Pri većem udjelu helija u plinskoj mješavini argon + helij, profil penetracije bi bio širi. Analizirajući makrostrukturu uzoraka, može se vidjeti da je kod uzorka 1B manja prisutnost poroznosti nego kod uzorka 1A, što je uzrokovano

korištenjem helija u plinskoj mješavini zaštitne atmosfere.

U tablici 8. prikazani su uzorci 2A i 2B. Kod zavarivanja uzorka 2A korištena je zaštitna atmosfera čistog argona, a kod uzorka 2B mješavina od 85 % argona i 15 % helija. Brzina zavarivanja iznosila je 70 cm/min.

Tablica 8. Makroizbrusci 2A i 2B s karakterističnim dimenzijama zavara



U tablici 9. prikazana je usporedba dimenzija zavara.

Tablica 9. Dimenzije zavara uzorka 2A i 2B

Uzorak	2A	2B
Visina zavara, mm	4,486	4,616
Nadvišenje zavara, mm	0,757	0,529
Površina zavara, mm <sup>2</sup>	29,078	29,468
Površina penetracije, mm <sup>2</sup>	3,958	3,977

Iz rezultata analize vidljivo je da su kod uzorka 2A penetracija, visina zavara i površina zavara manji nego kod uzorka 2B, dok je nadvišenje zavara kod uzorka 2A veće nego kod uzorka 2B. Razlike između dimenzija zavara uzorka 2A i 2B su minimalne. Analizirajući penetraciju u svaku ploču zasebno, vidljivo je da je kod uzorka 2B veća penetracija u vertikalnu ploču, a kod uzorka 2A veća penetracija u horizontalnu ploču. Kod uzorka 2B, u vertikalnom smjeru penetracije u osnovni materijal gotovo i da nema. Penetracija kod korijena zavara jako je mala kod oba uzorka. Promatrajući makrostrukturu, kod uzorka 2B može se primijetiti manja prisutnost poroznosti nego kod uzorka 2A što je rezultat primjene helija u zaštitnoj atmosferi.

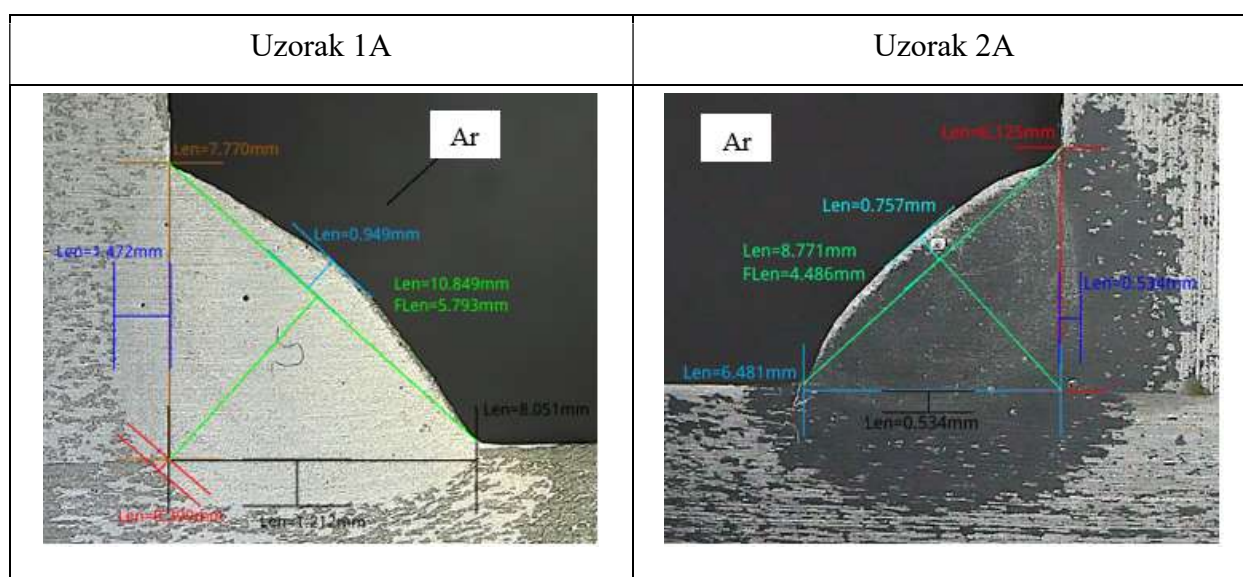


Usporedbe uzoraka dovode do zaključka da dodatak helija u pravilu povećava penetraciju. Pri većim brzinama zavarivanja, kod korištenja helija u zaštitnoj atmosferi trebalo bi koristiti veći protok plina. Povećanje protoka plina i udjela helija u plinskoj mješavini, može biti predmet budućih ispitivanja.

#### 4.7. Utjecaj brzine zavarivanja na makrostrukturu i oblik zavara

Sljedeća analiza provedena je na temelju zavarivanja uzoraka različitim brzinama zavarivanja. U tablici 10. prikazani su uzorci 1A i 2A. Kod zavarivanja uzorka 1A brzina zavarivanja iznosila je 50 cm/min, a kod zavarivanja uzorka 2A brzina zavarivanja iznosila je 70 cm/min.

Tablica 10. Makroizbrusci 1A i 2A s karakterističnim dimenzijama zavara



U tablici 11. prikazana je usporedba dimenzija zavara.

Tablica 11. Dimenzije zavara uzorka 1A i 2A

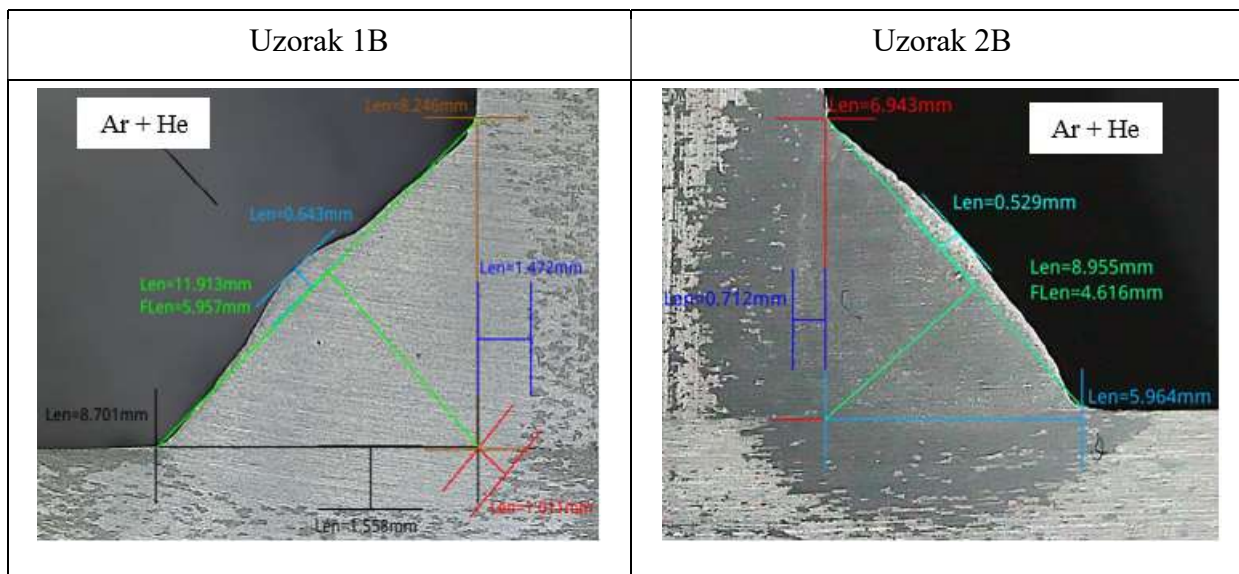
Uzorak	1A	2A
Visina zavara, mm	5,793	4,486
Nadvišenje zavara, mm	0,949	0,757
Površina zavara, mm <sup>2</sup>	55,715	29,078
Površina penetracije, mm <sup>2</sup>	19,332	5,817

Iz analize uzoraka vidljivo je da su visina zavara, nadvišenje zavara, površina zavara i penetracija zavara manji kod uzorka 2A nego kod uzorka 1A. Navedena razlika je nastala zbog veće brzine zavarivanja uzorka 2A. S obzirom na to da su svi parametri osim brzine zavarivanja ostali jednaki, kod uzorka 2A došlo je do manjeg unosa topline što je uzrokovalo manju penetraciju u osnovni

materijal. Veća brzina zavarivanja, odnosno manji unos topline u materijal rezultira manjom zonom utjecaja topline.

U tablici 12. prikazani su uzorci 1B i 2B. Kod zavarivanja uzorka 1B brzina zavarivanja iznosila je 50 cm/min, a kod zavarivanja uzorka 2B brzina zavarivanja iznosila je 70 cm/min.

Tablica 12. Makroizbrusci 1B i 2B s karakterističnim dimenzijama zavara



U tablici 13. prikazana je usporedba dimenzija zavara.

Tablica 13. Dimenzije zavara uzorka 1B i 2B

Uzorak	1B	2B
Visina zavara, mm	5,957	4,616
Nadvišenje zavara, mm	0,643	0,529
Površina zavara, mm <sup>2</sup>	58,202	29,468
Površina penetracije, mm <sup>2</sup>	21,522	5,937

Iz analize uzorka vidljivo je da su visina, nadvišenje, površina i penetracija zavara manji kod uzorka 2B nego kod uzorka 1B. Navedena razlika je nastala zbog veće brzine zavarivanja uzorka 2B. S obzirom na to da su svi parametri osim brzine zavarivanja ostali jednaki, kod uzorka 2B došlo je do manjeg unosa topline što je uzrokovalo manju penetraciju u osnovni materijal.

Na temelju analize može se zaključiti da se korištenjem veće brzine zavarivanja uz korištenje istih ostalih parametara kao kod manje brzine zavarivanja, ne može dobiti zadovoljavajući oblik zavarenog spoja. Kod veće brzine zavarivanja, prvi parametar koji bi se trebao povećati je brzina dodavanja žice. Na temelju povećanja navedenog parametra, izvor za zavarivanje prilagođava

---

potrebnu struju i napon za održavanje stabilnog strujnog luka. Kada se navedeni parametri prilagode, doći će do većeg unosa topline u materijal i biti će moguće postići željena svojstva i željen oblik zavarenog spoja. Kada bi se tome dodalo korištenje plinske mješavine s većim udjelom helija, pretpostavka je da bi penetracija bila šira. Kod sljedećih ispitivanja u obzir bi se trebali uzeti navedeni zaključci. Uspoređujući brzine zavarivanja od 50 i 70 cm/min za teoretsku smjenu od osam radnih sati, rezultat je 240 metara zavara za manju brzinu zavarivanja i 336 metara zavara za višu brzinu, tako da je razlika u produktivnosti velika.

---

## 5. ZAKLJUČAK

U današnje vrijeme u industriji se puno govori o optimizaciji proizvoda i proizvodnih procesa. Kako su aluminij i aluminijske legure postali lakše dostupni, počeli su se sve više koristiti u raznim konstrukcijama zbog svojih dobrih svojstava kao što su masa koje je manja od čelika za jednak volumen, jako dobra korozivna postojanost i mehanička svojstva koja su usporediva s mehaničkim svojstvima nekih čelika. Sve veća upotreba aluminija dovela je do potrebe za razvojem tehnika za zavarivanje aluminija i njegovih legura. Postupci koji se najviše koriste za zavarivanje aluminija su AC MIG i TIG postupak. TIG postupak zavarivanja koristi se kada se žele dobiti jako precizni zavari s minimalnom pojavom deformacija. Nedostaci TIG postupka zavarivanja su mala produktivnost, potreba za iskusnim zavarivačima te visoki troškovi opreme. Primjenom AC MIG postupka zavarivanja mogu se zavarivati tanki i debeli aluminijski obradci zbog jako dobre kontrole unosa topline. Produktivnost je puno veća nego kod TIG postupka te se proces može vrlo lako automatizirati. Izbor plinova za zaštitnu atmosferu također ima veliku ulogu kod AC MIG zavarivanja. Korištenje čistog argona omogućava užu penetraciju, jako dobru zaštitu od atmosfere i dobru uspostavu luka. Dodatkom helija argonu, povećava se unos topline, penetracija postaje šira i smanjuje se mogućnost nastanka poroznosti u strukturi zavarenog spoja.

U eksperimentalnom dijelu rada ispitan je utjecaj različitih zaštitnih plinova i utjecaj brzine zavarivanja na svojstva i oblik zavara. Nakon zavarivanja, analiza rezultata utjecaja zaštitnih plinova pokazala je da korištenje mješavine plinova argon + helij daje širu penetraciju, veću površinu zavara i manju mogućnost pojave poroznosti nego kod korištenja čistog argona. Kod veće brzine zavarivanja, navedeni utjecaj mješavine argon + helij na svojstva zavarenog spoja u odnosu na čisti argon se smanjio zato što je helij lakši od argona i pri većim brzinama zavarivanja se veća količina helija rasprši van područja zavarivanja. Kod korištenja čistog argona nadvišenje zavara je bilo veće. Pri usporedbi brzina zavarivanja uz korištenje jednakih ostalih parametara i zaštitne atmosfere, vidljivo je da su penetracija i površina zavara manji kod veće brzine zavarivanja zbog manjeg unosa topline. Navedeni rezultati podudaraju se s teorijskim pretpostavkama. Na temelju rezultata analize, može se zaključiti da se korištenje AC MIG postupka zavarivanja aluminija u proizvodnim uvjetima isplati zbog visoke produktivnosti, relativno visoke brzine zavarivanja, mogućnosti automatizacije procesa te dobrih svojstava zavarenih spojeva uz pravilno odabrane parametre zavarivanja.

---

**LITERATURA**

- [1] T. Filetin, F. Kovačiček, i J. Indof, *Svojstva i primjena materijala*. Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2002.
- [2] „Welding aluminum and how it compares to welding steel“. Pristupljeno: 15. veljača 2024. [Na internetu]. Dostupno na: <https://www.thefabricator.com/thefabricator/article/aluminumwelding/welding-aluminum-and-how-it-compares-to-welding-steel>
- [3] S. Kralj i Š. Andrić, *Osnove zavarivačkih i srodnih postupaka*. Zagreb: Sveučilišna tiskara d.o.o., 1992.
- [4] S. Lakusic, „Aluminij kao materijal za suvremene konstrukcije“, *J. Croat. Assoc. Civ. Eng.*, sv. 67, izd. 11, str. 1075–1085, pros. 2015, doi: 10.14256/JCE.1395.2015.
- [5] G. Mathers, *The welding of aluminium and its alloys*, Repr. Boca Raton, Fla.: CRC Press, 2005.
- [6] D. J.R., *Aluminum and Aluminum Alloys*. Detroit, Michigan, USA: ASM International®, 2001.
- [7] „TECHNICAL REPORT ISO/TR 581“. ISO copyright office, Switzerland, 2005.
- [8] „Aluminium Alloys - Aluminium 5083 Properties, Fabrication and Applications“, AZoM.com. Pristupljeno: 15. siječanj. 2024. [Na internetu]. Dostupno na: <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=2804>
- [9] I. Garašić, „Predavanja iz predmeta Zavarivanje i montaža“. FSB, Zagreb, 2021.
- [10] K. Weman i G. Linden, *MIG welding guide*. Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 2006.
- [11] „The Top 9 Tips and Tricks for the Best Aluminium MIG Welds | UNIMIG Welding Guides & Tutorials“, UNIMIG. Pristupljeno: 22. siječanj 2024. [Na internetu]. Dostupno na: <https://unimig.com.au/the-top-9-tips-and-tricks-for-the-best-aluminium-mig-welds/>
- [12] „Modes of Metal Transfer: What Are They & When Should You Use Them? | UNIMIG Welding Guides & Tutorials“, UNIMIG. Pristupljeno: 22. siječanj 2024. [Na internetu]. Dostupno na: <https://unimig.com.au/modes-of-metal-transfer/>
- [13] „What is a Pulse MIG? A how & why guide to Pulse MIG welding“. Pristupljeno: 08. veljača 2024. [Na internetu]. Dostupno na: <https://www.weldclass.com.au/blog/94-what-is-a-pulse-mig-a-how-why-guide-to-pulse-mig-welding>
- [14] N. Arif i H. Chung, „Alternating current-gas metal arc welding for application to thin sheets“, *J. Mater. Process. Technol.*, sv. 214, izd. 9, str. 1828–1837, ruj. 2014, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2014.03.034.

- 
- [15] H. Tong, T. Ueyama, i M. Ushio, „Improvement of aluminium alloy sheet metal welding quality and productivity with AC pulsed MIG welding system (Report 2)“. Pristupljeno: 24. siječanj. 2024. [Na internetu]. Dostupno na: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/09507110209549500>
- [16] H. J. Park, D. C. Kim, M. J. Kang, i S. Rhee, „The arc phenomenon by the characteristic of EN ratio in AC pulse GMAW“, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, sv. 66, izd. 5–8, str. 867–875, svi. 2013, doi: 10.1007/s00170-012-4371-1.
- [17] „What is Synergic MIG/MAG welding and what are its advantages?“ Pristupljeno: 17. veljača 2024. [Na internetu]. Dostupno na: <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/faq-what-is-synergic-mig-mag-welding-and-what-are-its-advantages.aspx>
- [18] J. Jasic, „What is ‚Inductance‘ in MIG/MAG Welding? | Jasic Blog“, Jasic UK. Pristupljeno: 19. veljača. 2024. [Na internetu]. Dostupno na: <https://www.jasic.co.uk/post/what-is-inductance-in-mig-mag-welding>
- [19] S. Brod, „ENGINEERING TECHNOLOGIES IN MANUFACTURING OF WELDED CONSTRUCTIONS AND PRODUCTS“, 2017.
- [20] „Elektroda Zagreb d.d.“ Pristupljeno: 29. siječanj 2024. [Na internetu]. Dostupno na: <https://www.ezg.hr/proizvodi/wire/EZMIGALMG45.html>
- [21] „TECHNICAL REPORT DIN EN 1011-1“. DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin., Deutschland, 1998.