

# Utjecaj parametara zavarivanja na nepravilnosti pri MIG zavarivanju aluminija izmjeničnom strujom

---

Sikora, Mia

Undergraduate thesis / Završni rad

2023

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

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:353698>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-03-31**

*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

**Mia Sikora**

Zagreb, 2023.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

Mentor:

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

Student:

Mia Sikora

Zagreb, 2023.

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

Zahvaljujem se mentoru, prof. dr. sc. Ivici Garašiću i asistentu mag. ing. Mislavu Štefoku za stručne savjete i pomoć tijekom izrade završnog rada.

Zahvaljujem se djelatnicima Laboratorija za zavarivanje Fakulteta strojarstva i brodogradnje za pomoć tijekom izrade eksperimentalnog dijela završnog rada.

Također se zahvaljujem svojoj obitelji na podršci i razumijevanju tijekom cijelog studija.

Mia Sikora



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 / 23 – 6 / 1	
Ur.broj: 15 - 1703 - 23 -	

## ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Mia Sikora** JMBAG: **0035220909**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Utjecaj parametara zavarivanja na nepravilnosti pri MIG zavarivanju aluminijskim strujom**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Influence of welding parameters on defects at alternating current MIG welding of aluminium**

Opis zadatka:

Na temelju literature detaljno proučiti i opisati specifičnosti MIG zavarivanja aluminijskih legura. Specificirati osnovne parametre pri MIG zavarivanju izmjeničnom strujom te odrediti način odabira dodatnih materijala i zaštitnih plinova. Proučiti i dati kratki pregled norme HRN EN ISO 10042 koja definira razine kvalitete s obzirom na nepravilnosti.

U eksperimentalnom dijelu osmisлити plan eksperimenta za zavarivanje kutnog i sučeljenog spoja na aluminiju uz primjenu MIG postupka izmjeničnom strujom. Za više razina parametara zavarivanja analizirati pojavnost određenih nepravilnosti te iste specificirati sukladno normi HRN EN ISO 10042. Zaključno, odrediti rizično područje parametara za pojavu nepravilnosti pri MIG zavarivanju izmjeničnom strujom.

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

Zadatak zadan:

30. 11. 2022.

Datum predaje rada:

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

Predviđeni datumi obrane:

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

Zadatak zadao:

Prof. dr. sc. Ivica Garašić

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Branko Bauer

## SADRŽAJ

1. UVOD .....	1
2. ALUMINIJ I ALUMINIJEVE LEGURE .....	2
2.1. Aluminij .....	2
2.1.1. Svojstva tehničkog aluminija .....	3
2.1.2. Korozijska postojanost aluminija .....	4
2.2. Aluminijeve legure .....	5
2.2.1. Podjela i označavanje aluminijevih legura .....	6
3. MIG ZAVARIVANJE .....	10
3.1. Postupak MIG zavarivanja .....	11
3.1.1. Pištolj za zavarivanje .....	12
3.1.2. Dodavač žice .....	13
3.2. AC MIG zavarivanje .....	15
3.2.1. Utjecaj balansa i frekvencije .....	17
3.3. Odabir zaštitnih plinova .....	20
3.4. Tehnika rada .....	21
3.5. Odabir dodatnog materijala .....	22
3.6. Zavarljivost aluminija i aluminijevih legura .....	23
3.6.1. Poroznost .....	25
3.6.2. Oksidni film .....	27
3.6.3. Tople pukotine .....	28
3.6.4. Reducirana čvrstoća u području zavara i zone utjecaja topline .....	30
4. RAZINE KVALITETE ZAVARA OBZIROM NA NEPRAVILNOSTI PREMA NORMI HRN EN ISO 10042 .....	32
5. EKSPERIMENTALNI RAD .....	35
5.1. Osnovni i dodatni materijali .....	35
5.2. Oprema za zavarivanje .....	37
5.3. Postupak eksperimenta .....	37
5.3. Dobiveni makrouzorci .....	38
5.4. Makroanaliza uzoraka .....	41
5.5. Specificiranje nepravilnosti prema normi HRN ISO 10042:2005 .....	50
6. ZAKLJUČAK .....	55

**POPIS SLIKA**

Slika 1. Boksit [5].....	2
Slika 2. Bayerov i Hall Heroultov proces dobivanja aluminija [6].....	3
Slika 3. Pourbaix-ov dijagram [7].....	5
Slika 4. Načini prijenosa metala [13].....	11
Slika 5. Shematski prikaz MIG zavarivanja [10].....	12
Slika 6. Zrakom hlađen pištolj za MIG zavarivanje [15].....	13
Slika 7. Push sustav za dovod žice [2].....	14
Slika 8. Push - pull sustav za dovod žice [2].....	15
Slika 9. Valni oblik struje za AC MIG [17].....	16
Slika 10. Utjecaj balansa na dubinu penetracije [20].....	17
Slika 11. Utjecaj balansa i jakosti struje na dubinu penetracije [20].....	18
Slika 12. Utjecaj balansa na širinu zavra [20].....	18
Slika 13. Utjecaj balansa na nadvišenje zavara [20].....	19
Slika 14. Utjecaj wave pulse načina rada na izgled zavara [19].....	19
Slika 15. Utjecaj zaštitnog plina na geometriju zavara [1].....	20
Slika 16. Utjecaj tehnike rada na oblik zavara [10].....	21
Slika 17. Preporučeni dodatni materijali za zavarivanje aluminijevih legura [21].....	23
Slika 18. Fenomen puhanja luka u žlijebu [10].....	24
Slika 19. Zavarivanje preklopnog spoja različitih debljina [10].....	25
Slika 20. Topljivost vodika u aluminiju i aluminijevim legurama [1].....	26
Slika 21. Poroznost [1].....	27
Slika 22. Oksidni film u kutnom zavaru [1].....	28
Slika 23. Topla pukotina kod A6082 aluminijeve legure [1].....	29
Slika 24. Utjecaj legiranih elemenata na pojavu toplih pukotina [1].....	30
Slika 25. Utjecaj zavarivanja na hladno očvrstnute aluminijeve legure [1].....	31
Slika 26. Vanjske nepravilnosti prema normi HRN EN ISO 10042 [22].....	33
Slika 27. Primjeri udjela poroznosti prema normi HRN ISO 10042 – Dodatak A [22].....	34
Slika 28. Makrouzorci sučeljenih spojeva.....	39
Slika 29. Makrouzorci kutnih spojeva.....	40
Slika 30. Makroanaliza uzorka 1.....	41
Slika 31. Mjerenja nedovoljne penetracije uzorka 1.....	42
Slika 32. Makroanaliza uzorka 2.....	43
Slika 33. Izmjere uzorka 2.....	43
Slika 34. Makroanaliza uzorka 3.....	44
Slika 35. Makroanaliza uzorka 4.....	45
Slika 36. Geometrija zavara uzorka 4.....	45
Slika 37. Vrijednosti nadvišenja zavara uzorka 4.....	46
Slika 38. Makroanaliza uzorka 5.....	47
Slika 39. Geometrija zavara uzorka 5.....	47
Slika 40. Vrijednosti nadvišenja zavara uzorka 5.....	48
Slika 41. Makroanaliza uzorka 6.....	49
Slika 42. Izmjerene vrijednosti uzorka 6.....	49

---

**POPIS TABLICA**

Tablica 1. Osnovna svojstva nelegiranog aluminija [3].....	4
Tablica 2. Usporedba svojstava aluminijevih legura i konstrukcijskih čelika [9] .....	6
Tablica 3. Podjela i osnovne značajke gnječanih aluminijskih legura [3] .....	7
Tablica 4. Kemijski sastav osnovnog materijala sučeljenog spoja [23].....	35
Tablica 5. Kemijski sastav dodatnog materijala sučeljenog spoja [23] .....	36
Tablica 6. Kemijski sastav osnovnog materijala kutnog spoja [23].....	36
Tablica 7. Karakteristike uređaja za zavarivanje Daihen Varstroj WB-W400 [19].....	37
Tablica 8. Parametri zavarivanja sučeljenih spojeva .....	38
Tablica 9. Parametri zavarivanja kutnih spojeva .....	38
Tablica 10. Izmjerene vrijednosti nedovoljne penetracije uzroka 1.....	42
Tablica 11. Izmjerene vrijednosti uzorka 2.....	44
Tablica 12. Geometrija zavara uzorka 4.....	46
Tablica 13. Geometrija zavara uzorka 5.....	48
Tablica 14. Specificiranje unutarnjih nepravilnosti [22].....	51
Tablica 15. Specificiranje unutarnjih nepravilnosti [22].....	52
Tablica 16. Specificiranje nepravilnosti u geometriji spoja [22] .....	53



**POPIS OZNAKA**

<b>Oznaka</b>	<b>Jedinica</b>	<b>Opis</b>
$f$	Hz	Frekvencija
$I$	A	Jakost struje
$I_B$	A	Jakost bazne struje
$I_{EN}$	A	Jakost struje negativnog polariteta
$I_p$	A	Jakost impulsne struje
$t$	°C	Temperatura u Celzijevim stupnjevima
$T_B$	s	Vrijeme bazne struje
$T_{EN}$	s	Vrijeme negativnog polariteta
$T_p$	s	Vrijeme impulsa
$U$	V	Napon
$v_c$	mm/min	Brzina zavarivanja

---

**SAŽETAK**

U teorijskom dijelu rada navedeno je označavanje aluminijskih legura s obzirom na elemente kojima su legirane. Detaljno je opisan AC MIG postupak zavarivanja te njegove prednosti i nedostaci. Detaljno je opisana i problematika odabira parametara pri AC MIG zavarivanju aluminijskih legura. Prikazane su i opisane najčešće nepravilnosti koje se pojavljuju tijekom postupka zavarivanja. Također je objašnjen način specificiranja nepravilnosti prema normi ISO 10042.

U eksperimentalnom dijelu provedeno je zavarivanje sučeljenih i kutnih spojeva korištenjem AC MIG postupka zavarivanja pri različitim parametrima na aluminijskim legurama. Nakon zavarivanja provedena je makroanaliza uzoraka te je analizirana pojavnost nepravilnosti u ovisnosti o različitim parametrima. Na temelju rezultata analize, uzorcima su dodijeljene razine kvalitete prema normi ISO 10042. Na kraju je određeno rizično područje parametara za sučeljeni i kutni spoj kod MIG zavarivanja izmjeničnom strujom.

**Ključne riječi:** AC MIG, nepravilnosti, aluminijske legure, ISO 10042

---

**SUMMARY**

The teoretical part of this thesis covers the designation of aluminium alloys according to their alloying elements. The AC MIG welding process and its advantages and disadvantages are described in detail. The issue of parameter selection during AC MIG welding of aluminium alloys is also described in detail. The most common irregularities that appear during the welding process are shown and described. The method of specifying irregularities according to the ISO 10042 standard is also explained.

In the experimental part, AC MIG welding of butt and corner joints was performed at different parameters on aluminium alloys. After welding, a macroanalysis of the samples was carried out and the incidence of irregularities was analyzed depending on different parameters. Based on the result of the analysis, the samples were assigned quality levels according to the ISO 10042 standard. Finally, the risk area of the parameters for the butt and corner joints in MIG welding with alternating current was determined.

Key words: AC MIG, irregularities, aluminium alloys, ISO 10042

## **1. UVOD**

Aluminij je prvi puta bio izložen 1855. godine u Parizu na izložbi što ga čini jednim od novijih metala u uporabi. Tadašnja cijena bila je 30 puta veća od cijene čelika, no zbog povoljnih uporabnih svojstava, svoju svrhu pronašao je u brojnim granama industrije. Aluminij je i danas vrlo rasprostranjen u industriji. Koristi se u automobilskoj, vojnoj, zrakoplovnoj industriji, građevinarstvu, ali i za izradu ambalaže koja se potom koristi u prehrambenoj industriji. Razlog tomu je povoljan omjer čvrstoće i gustoće, dobra korozijska postojanost te relativno niska cijena. U većini slučajeva, uporaba aluminija ne temelji se na čistom tehničkom aluminiju već na aluminijskim legurama. Svrha legiranja aluminija leži u poboljšavanju njegovih svojstava te samim time i dobivanju šireg spektra uporabe. Zbog sve veće uporabe aluminijevih legura, došlo je do razvoja AC MIG postupka zavarivanja. Iako se aluminijeve legure mogu zavarivati konvencionalnim MIG postupkom, to najčešće nije slučaj. AC MIG postupak omogućio je manji unos topline te povećanje produktivnost u proizvodnji što je uvelike olakšalo zavarivanje aluminija. Postupak MIG zavarivanja izmjeničnom strujom temelji se na periodičnoj izmjeni polariteta. Pozitivan polaritet osigurava veću stabilnost luka, dok negativan polaritet osigurava manji unos topline, a samim time i manje deformacije. [1,2]

## 2. ALUMINIJ I ALUMINIJEVE LEGURE

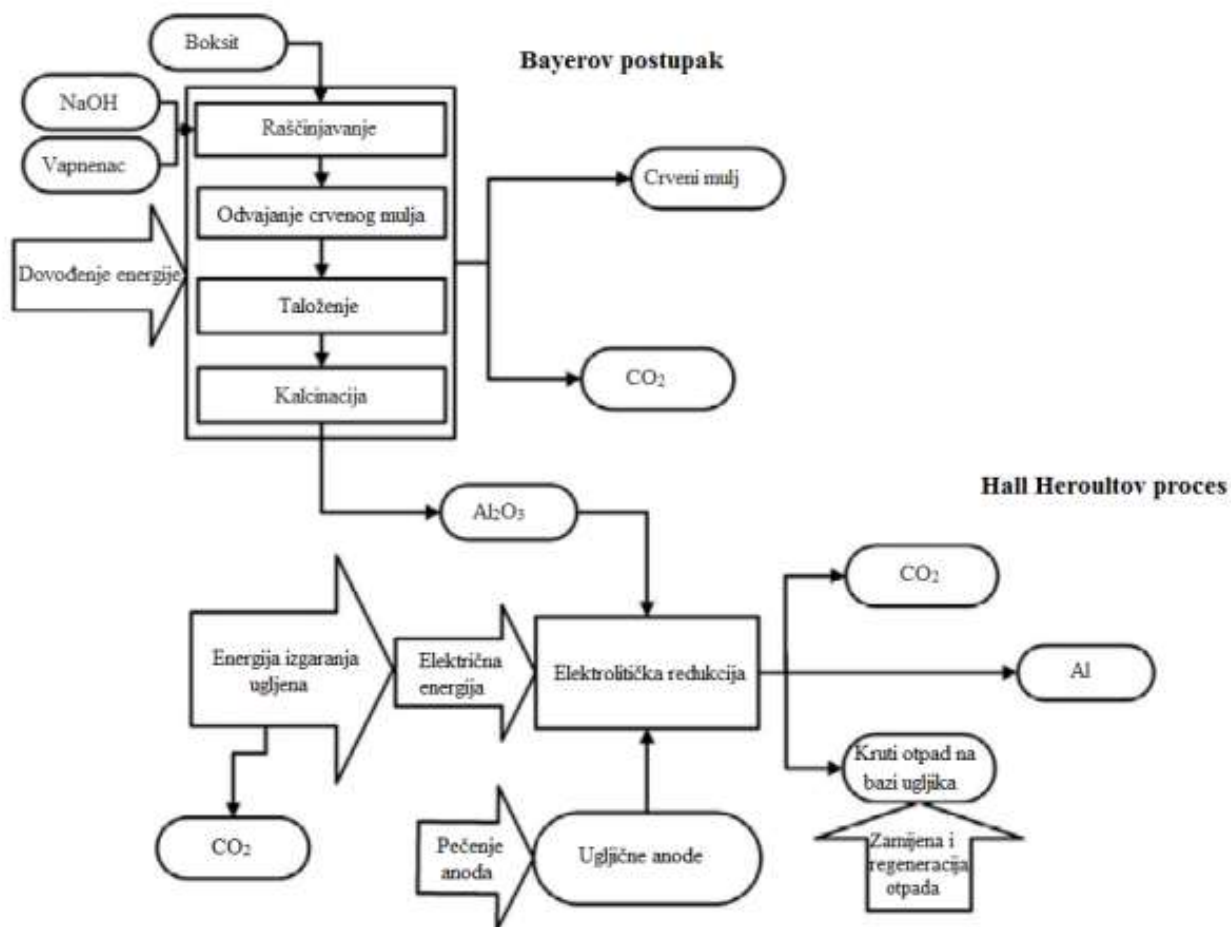
### 2.1. Aluminij

Treći najrasprostranjeniji kemijski element u Zemljinoj kori, nakon kisika i silicija, upravo je aluminij. U Zemljinoj kori nalazi se u obliku različitih spojeva, kojih ima nekoliko stotina. Najvažniji takav spoj je boksit (slika 1.). Prvi proizveden aluminij datira iz 1825. godine kada je danski kemičar H.C. Ørsted koristeći skupo redukcijsko sredstvo u obliku metalnog kalija proizveo aluminij. Obzirom da je takav način dobivanja aluminija iziskivao velike troškove, aluminij se tada smatrao vrlo rijetkim i dragocjenim metalom. 1886. godina dvojica znanstvenika, Charles Hall i Paul Heroult, došli su do otkrića relativno jeftinog postupka za proizvodnju aluminija. Unatoč tome što je svaki znanstvenik radio zasebno, došli su do istog otkrića. Njihov postupak temeljio se na elektrolitičkoj redukciji na katodnom dnu ili katodi smjese kriolita i glinice koja se prethodno talila na 950 °C. 1889. godine Carl Josef Bayer razvio je ekonomičan postupak dobivanja aluminija iz rude boksita. Bayerov postupak i danas je jedna od najučestalijih metoda dobivanja aluminija. Razvojem Bayerovog postupka došlo je do naglog implementiranja aluminija u brojne grane industrije radi ekonomičnosti samog postupka, a time i niže cijene aluminija. [4]



Slika 1. Boksit [5]

Suvremena tehnologija proizvodnje aluminija sadrži dvije faze. Prva faza obuhvaća preradu aluminijevih ruda (najčešće boksita) u aluminijev oksid (Bayerov postupak). Druga faza sastoji se od redukcije aluminijeva oksida elektrolitičkim postupkom u aluminij (Hall Heroultovog procesa). [6] Na slici 2. dan je shematski prikaz Bayerovog i Hall Heroultovog procesa dobivanja aluminija.



Slika 2. Bayerov i Hall Heroultov proces dobivanja aluminija [6]

### 2.1.1. Svojstva tehničkog aluminija

Prednost aluminija ističe se u njegovoj gustoći koja iznosi trećinu gustoće čelika. Mala gustoća omogućava korištenje aluminija u industrijama poput zrakoplovne i automobilske gdje se zahtijevaju materijali s povoljnim omjerom gustoće i čvrstoće. Također, omjer električne vodljivosti i gustoće jedan je od najpovoljniji među svima metalima. Osim navedenog, aluminij ima i dobru korozijsku postojanost što mu omogućava širok spektar uporabe i na području graditeljstva. Kemijski sastav aluminija trgovačke kvalitete sadrži 99 % aluminija, ali moguće je dobiti i aluminij čistoće 99,9 %. Takav proces dobivanja čistog aluminija vrlo je skup i koristi se u iznimnim situacijama. Primarni aluminij koristi se isključivo u gnječenom stanju, no na fizikalna svojstva poput električne vodljivosti moguće je utjecati i toplinskom obradom. Toplinskom obradom primarnog aluminija na temperaturama 250 do 300 °C moguće je postići

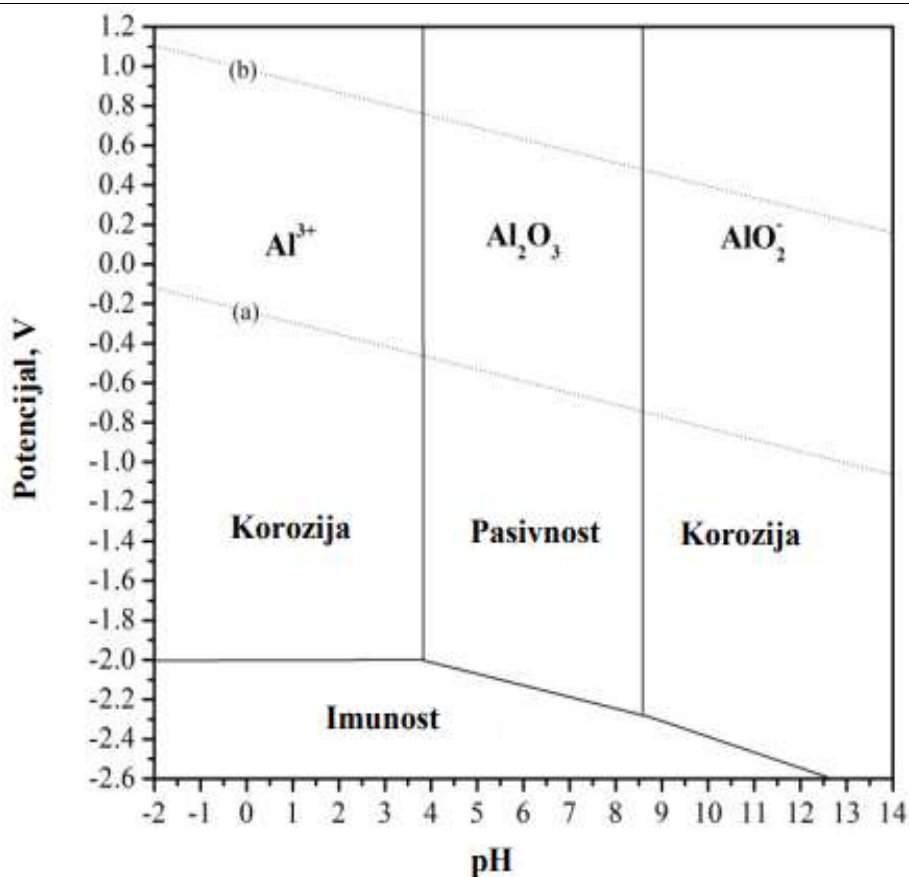
toplinsku vodljivost ekvivalentu toplinskoj vodljivosti najčišćeg aluminija. Razlog tomu je izlučivanje željeza i silicija u primarnom aluminiju. U tablici 1. prikazana su osnovna svojstva čistog tehničkog aluminija. [3]

**Tablica 1. Osnovna svojstva nelegiranog aluminija [3]**

Gustoća	kg/m <sup>3</sup>	2700
Točka taljenja	°C	660
Modul elastičnosti	N/mm <sup>2</sup>	69000
Vlačna čvrstoća	N/mm <sup>2</sup>	23,8
Istezljivost	N/mm <sup>2</sup>	40 - 180
Toplinska rastezljivost	%	4 - 50

### **2.1.2. Korozijska postojanost aluminija**

Čisti aluminij ima veću korozijsku postojanost od legura aluminija jer legirni elementi povećavaju njegovu osjetljivost na koroziju. Dobra korozijska postojanost čistog aluminija postiže se zahvaljujući pasivizaciji. Prema Pourbaix-ovom dijagramu (slika 3.) aluminij je pasivan u vlažnoj atmosferi, slatkoj vodi i slabijim lužinama i kiselinama kojima je pH vrijednost između 4 i 8,5. [7]



Slika 3. Pourbaix-ov dijagram [7]

Aluminij reagira s kisikom te kao produkt njihove reakcije nastaje tanki površinski sloj aluminijeva oksida  $Al_2O_3$ . Nastali sloj je vrlo tanak, njegova debljina iznosi  $2,5 \mu m$ , dok kroz nekoliko godina debljina sloja može dostići debljinu i do  $10 \mu m$ . Posebnost nastalog sloja je što je termički neaktivan, stoga sprječava nastanak korozije odnosno daje jaku zaštitu. No unatoč svemu, aluminijev oksid nije u potpunosti otporan na koroziju. U slučaju da se izloži jakom korozivskom sredstvu poput slane vode, postoji mogućnost pucanja sloja i nastanka korozije. [8] Postupak anodizacije omogućava umjetno podebljavanje prirodno nastalog oksidnog sloja. Takav postupak provodi se u kupkama sa sumpornom ili kromnom kiselinom. Nastali sloj oksida je ravnomjeren i gust te s obzirom da je aluminijev oksid vrlo tvrd istovremeno se povećava i otpornost na trošenje. [3]

## 2.2. Aluminijeve legure

Obzirom da je tehnički aluminij relativno mekan i ima nisku vlačnu čvrstoću, najčešće se legira s ciljem poboljšanja mehaničkih svojstava. Legiranjem aluminija proširuje se spektar uporabe, a tomu u korist ide i relativno niska cijena. Najčešći legirni elementi kod aluminija su: bakar



(Cu), magnezij (Mg), silicij (Si), mangan (Mn) i cink (Zn). Uz navedeno, u legurama aluminija prisutni su u manjim količinama i željezo (Fe), krom (Cr) i titan (Ti). Ostali elementi mogu biti prisutni u malim količinama, ali se ne smatraju legirnim elementima već nečistoćama. Aluminijske legure u odnosu na tehnički aluminij imaju znatno poboljšana mehanička svojstva, prvenstveno vlačnu čvrstoću i tvrdoću, krutost i rezljivost. Nečistoće imaju nepovoljan utjecaj na mehanička svojstva legura. U nekim slučajevima aluminijske legure bolji su izbor od konstrukcijskih čelika obzirom da imaju malu gustoću, dobru električnu vodljivost te su lako obradljive. U tablici 2. prikazana je usporedba osnovnih svojstava konstrukcijskih čelika i aluminijskih legura. [3, 9]

**Tablica 2. Usporedba svojstava aluminijskih legura i konstrukcijskih čelika [9]**

Svojstva	Aluminijske legure	Konstrukcijski čelici
Gustoća, kg/m <sup>3</sup>	2700	7850
Youngov modul elastičnosti, MPa	7200	205000
Toplinska vodljivost, W/K	235	79
Temperatura taljenja, °C	550 - 650	1500
Temperatura taljenja oksida, °C	2060	800 - 900
Električna vodljivost, Ω cm	2,65 · 10 <sup>-6</sup>	10 · 10 <sup>-6</sup>
Relativna magnetska permeabilnost	1 (paramagnetičan)	80 – 160 (feromagnetičan)
Kristalna struktura	FCC	BCC - FCC

### 2.2.1. Podjela i označavanje aluminijskih legura

Aluminijske legure mogu se podijeliti na dvije osnovne skupine:

- Lijevene legure
- Gnječene legure.

Lijevene legure dijele se u tri osnovne grupe: Al - Si, Al - Mg i Al - Cu. Daljnjom kombinacijom osnovnih grupa mogu se dobiti legure poboljšanih mehaničkih svojstava. Navedene legure

mogu se dobro lijevati u pijesku, u kokili, ali i tlačno. Al – Si legure najrasprostranjenije su u grupi lijevanih legura. Razlog tomu leži u dobroj livljivosti za što je zaslužan silicij. Al – Mg legure ističu se dobrom korozivskom postojanošću stoga se kod ovakvog tipa legura može postići visok sjaj. U uporabi su najviše legure s 3% i 5 % magnezija, iako legura sa 10% magnezija ima najbolju kombinaciju čvrstoće i žilavosti, jedna je od najteže livljivih legura. Al – Cu legure poznate su po dobroj rezljivosti te otpornošću pri visokim temperaturama, ali mana im je slaba livljivost te jako loša korozivska postojanost.

Gnječene legure dijele se na:

- legure očvrsnute hladnim deformiranjem
- precipitacijski očvrsnute legure.

Legure koje se očvršćuju hladnim deformiranjem karakteriziraju zadovoljavajuća čvrstoća i krutost u hladnom stanju te dobra korozivska postojanost. Osim navedenog, takve legure ističu se i dobrom duktilnošću. Najveća mana ovakvog tipa legura je što im se mehanička svojstva mogu mijenjati isključivo postupkom žarenja.

Precipitacijski očvrsnute legure karakterizira povoljan omjer čvrstoće i gustoće. Precipitacijsko očvrsnute primaran je odabir kada su postavljeni zahtjevi za povećanjem čvrstoće i tvrdoće. Ostali elementi poput titana, kroma i bizmuta služe za poboljšavanje ostalih svojstava (rezljivost, sitnije zrno). U tablici 3. prikazana je podjela i osnovne značajke gnječenih aluminijskih legura. [3]

**Tablica 3. Podjela i osnovne značajke gnječenih aluminijskih legura [3]**

Vrsta legure	Način očvrsnuća	$R_m$ , N/mm <sup>2</sup>
Al-Mn	deformiranjem u hladnom stanju	200 - 350
Al-Mg		
Al-Mg-Mn		
Al-Mg-Si	precipitacijom	~330
Al-Cu-Mg		~450
Al-Zn-Mg		~400
Al-Zn-Mg-Cu		~550
Al-Li-Cu-Mg		~500

Postoje dvije metode identifikacije aluminijskih legura. Jedna metoda temelji se na brojčanom označavanju, dok se druga temelji na kemijskom sastavu. Metodu s brojčanim označavanjem podupire i Aluminium Association, a temelji se na kombinaciji slova i četveroznamenkastih brojeva. Navedena metoda široko je prihvaćena u svijetu te je uspješno zamijenila sve dotadašnje metode koje su se razlikovale od države do države. [1]

U europskom sustavu slovo A označava aluminij, a koriste se sljedeći prefiksi:

- AB – ingoti
- AC – lijevani materijali
- AM – predlegura za lijevanje
- AW – gnječeni materijali.

Gnječene legure:

- AW 1XXX – tehnički čisti aluminij,
- AW 2XXX – aluminij – bakar legure,
- AW 3XXX – aluminij – mangan legure,
- AW 4XXX – aluminij – silicij legure,
- AW 5XXX – aluminij – magnezij legure,
- AW 6XXX – aluminij – magnezij – silicij legure,
- AW 7XXX – aluminij – cink – magnezij legure,
- AW 8XXX – ostali elementi, npr. litij, željezo,
- AW 9XXX – nije određena legirna skupina.

Kod gnječenih legura koriste se četveroznamenkasti brojevi, a prva znamenka predstavlja glavni legirni element. Iznimka je tehnički čisti aluminij gdje su posljednje tri znamenke proizvoljne i označavaju određenu leguru. Za slučaj istog aluminijskog, posljednje dvije znamenke označavaju minimalni udio aluminijskog, dok se druga znamenka koristi za prikaz udjela nečistoća u aluminiju. Nula označava prirodne granice nečistoća, dok brojke između 1 i 9 označavaju posebno provedene kontrole jedne ili više nečistoća ili legirajućih elemenata. [1]

Lijevene legure:

- AC 2 1 XXX – Al Cu,
- AC 4 1 XXX – Al SiMgTi,
- AC 4 2 XXX – Al Si7Mg,
- AC 4 3 XXX – Al Si10Mg,
- AC 4 4 XXX – Al Si ,

- AC 4 5 XXX – Al Si5Cu,
- AC 4 6 XXX – Al Si9Cu,
- AC 4 7 XXX – Al Si(Cu),
- AC 4 8 XXX – Al SiCuNiMg,
- AC 5 1 XXX – Al Mg,
- AC 7 1 XXX – Al ZnMg.

Lijevane legure dijele se u 11 podskupina. Kao što je slučaj kod gnječanih legura, tako i kod lijevanih legura treća i četvrta znamenka su proizvoljne i označavaju određenu leguru. [1]

### 3. MIG ZAVARIVANJE

Gas metal arc welding (GMAW) označava postupak elektrolučnog zavarivanja u zaštiti plina. Ukoliko se upotrebljava inertni zaštitni plin, postupak se naziva metal inert gas (MIG), dok se metal active gas (MAG) naziva postupak koji upotrebljava aktivne zaštitne plinove. Kod MIG zavarivanja koriste se inertni zaštitni plinovi poput argona ili helija, dok se kod MAG zavarivanja koriste aktivni zaštitni plinovi poput CO<sub>2</sub>. MIG/MAG postupak zavarivanja koristi za širok raspon debljina ploča, ali najveću efektivnost postiže pri zavarivanju limova manjih debljina. Ova tehnologija ističe se visokom produktivnošću radi jednostavnog načina uspostavljanja i zaustavljanja procesa zavarivanja. MIG zavarivanje temelji se na principu kod kojeg metalna žica prolazi kroz pištolj za zavarivanje te se tali kao zbog utjecaja električnog luka koji je uspostavljen preko nje. Žica ima dvostruku ulogu, istovremeno služi kao elektroda i kao dodatni materijal. Električni luk i rastaljeni materijal zaštićeni su od utjecaja atmosfere inertnim plinom koji ne reagira s rastaljenim materijalom. Kako bi proces MIG zavarivanja bio učinkovit te kako bi se postigli optimalni rezultati potrebno je odabrati odgovarajuće parametre zavarivanja. Parametri zavarivanja imaju značajan utjecaj na cijeli postupak zavarivanja, a samim time i na kvalitetu zavarenog spoja. [10]

Glavna prednost MIG zavarivanja je visoka produktivnost te nizak unos topline. Osim navedenog, ostale prednosti MIG zavarivanja su [11]:

- Primjenjiv za zavarivanje svih vrsta materijala
- Velika mogućnost izbora parametara i načina prijenosa materijala
- Zavarivanje u svim položajima
- Mogućnost zavarivanja i u radionici i na terenu
- Zavarivanje širokog raspona debljina
- Pogodan za automatizaciju.

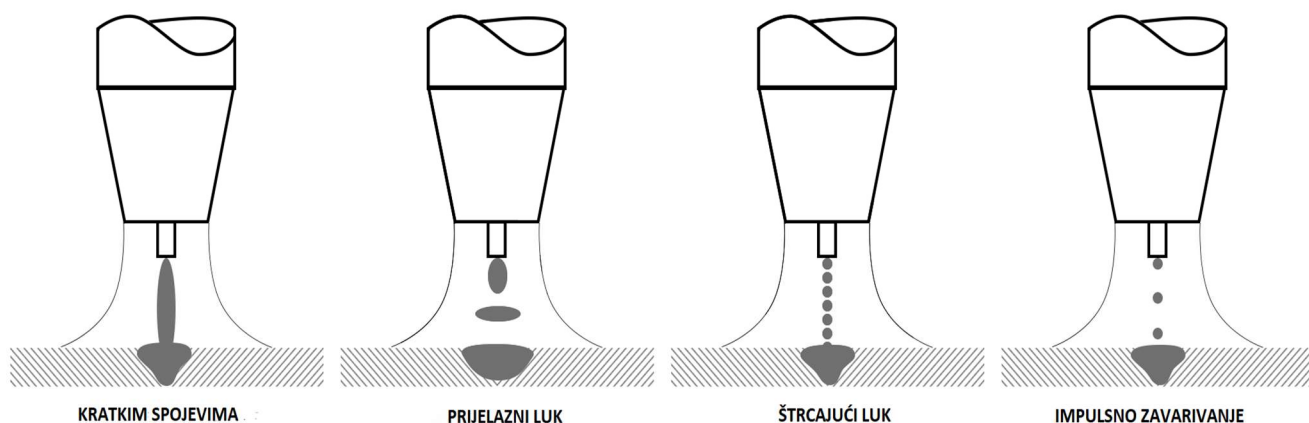
Nedostaci MIG zavarivanja su [4]:

- Problemi kod dovođenja žice (pogotovo kod aluminija)
- Kod rada na terenu vjetar može uzrokovati greške
- Nepravilna tehnika ili loše odabrani parametri uzrokuju brojne greške
- Prilikom zavarivanja kratkim spojevima dolazi do štrcanja
- Složen uređaj.

Obzirom na brojne prednosti, MIG zavarivanje ima širok raspon primjene. Primjenjuje se u brojnim industrijama poput automobilske industrije, brodogradnje te građevinarstva. [10]

Prijenos metala kod MIG zavarivanja može se odvijati na četiri načina (slika 4.) [10,12]:

1. Prijenos metala kratkim spojevima: niska unesena energija, koristi se za zavarivanje tanjih limova te za zavarivanje u prisilnim položajima, napon 13-21 V, jakost struje 50-170 A (parametri odgovaraju žici promjera 1,2 mm)
2. Prijenos metala prijelaznim lukom: kap rastaljenog metala raste sve dok se ne odvoji kratkim spojem ili silom gravitacije, napon 22 – 25 V, jakost struje 170 – 235 V
3. Prijenos metala štrcajućim lukom: prijenos rastaljenog materijala u obliku malih kapljica, stabilniji luk, koristi se za zavarivanje materijala veće debljine, karakterizira ga veća učinkovitost, problem radi velikog unosa topline, napon 25 – 40 V, jakost struje 200 – 600 A
4. Impulsno zavarivanje: kontrolirani prijenos štrcajućim lukom, “kapljica metala po impulsu“, koristi se za zavarivanje aluminija i nehrđajućih čelika,

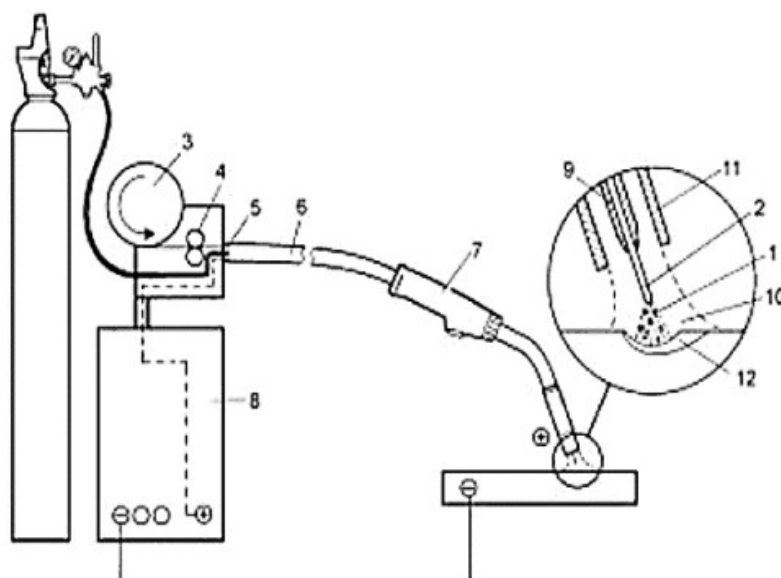


Slika 4. Načini prijenosa metala [13]

### 3.1. Postupak MIG zavarivanja

Kod MIG zavarivanja dodatni materijal je u obliku žice koja je namotana na bubanj ili kolut. Žica kroz polikabel dolazi do pištolja za zavarivanje, a uz pomoć pogonskih kotačića osigurava se njezino kontinuirano dostavljanje kako bi se nadomjestio rastaljeni materijal. Žica je uglavnom promjera 1,0; 1,2 i 1,6 mm te prolazi kroz polikabel brzinom od nekoliko metara po

minuti. Kroz polikabel osigurava se i električna energija koja se potom prenosi na žicu putem kontaktne vodilice. Elektroda je uglavnom spojena na pozitivan pol izvoda, dok je radni komad spojen na negativan pol. Nastankom električnog luka između žice i radnog komada zatvara se strujni krug te dolazi do zavarivanja radnog komada. Kroz zasebnu cijev kroz polikabel struji zaštitni inertni plin. Inertni plin ne sudjeluje u procesu zavarivanja već ima ulogu u zaštiti elektrode, električnog luka i rastaljenog materijala od utjecaja okolne atmosfere. Na slici 5. prikazan je shematski prikaz MIG zavarivanja. Na slici su vidljivi: električni luk (1), elektroda (2), bubanj sa žicom (3), pogonski kotačići (4), savitljivo crijevo (5), polikabel (6), pištolj za zavarivanje (7), izvor struje (8), kontaktna elektroda (9), zaštitni plin (10), mlaznica (11) i bazen taline (12). [10]

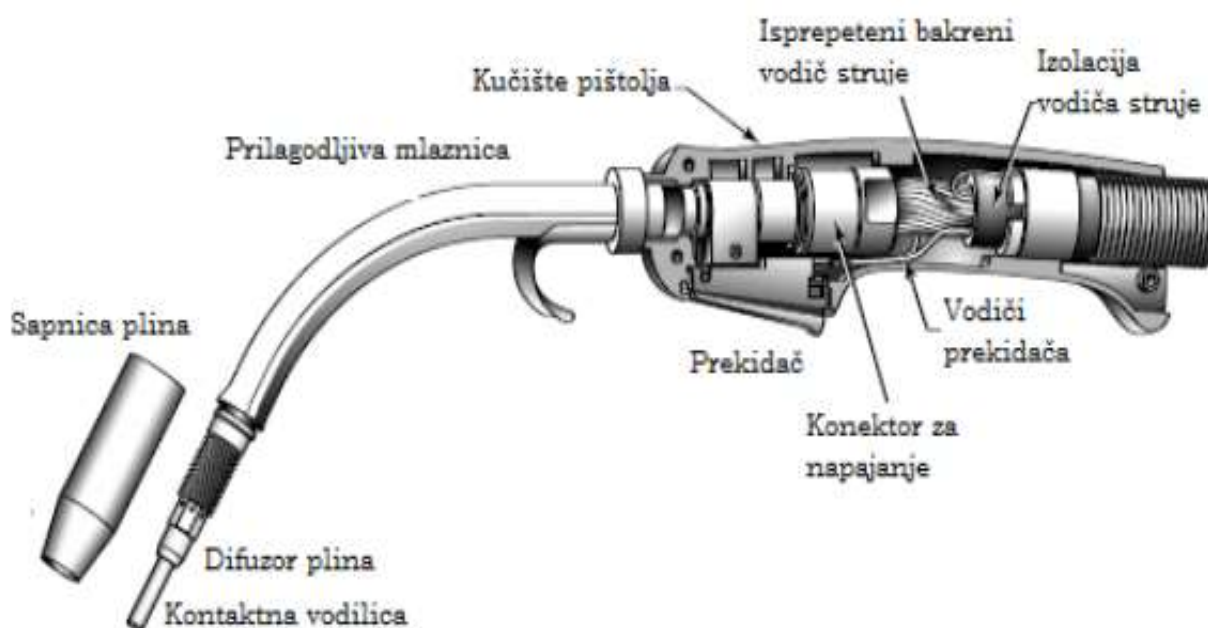


**Slika 5. Shematski prikaz MIG zavarivanja [10]**

### **3.1.1. Pištolj za zavarivanje**

Pištolj za zavarivanje mora biti lagan i dobro dizajniran, ergonomičan, kako bi se zavarivaču olakšao proces zavarivanja. Nikako ne smije biti težak i robustan jer bi u tom slučaju zavarivač teško upravljao njime, a to bi se odrazilo i na kvalitetu zavarenog spoja. Pištolj za zavarivanje spojen je na polikabel, te se na taj način do pištolja dobavlja električna energija, žica i zaštitni plin. Pritiskom prekidača na pištolju za zavarivanje dobavlja se električna energija koja se putem kontaktne vodilice prenosi na žicu, istovremeno dolazi i do ispuštanja zaštitnog plina iz sapnice te kontinuiranog dobavljanja žice. Osim zračnog hlađenja pištolja, kod viših struja

zavarivanja (300 A) postoje izvedbe pištolja s vodenim hlađenjem. Način na koji će pištolj za zavarivanje biti hlađen ovisi o građi polikabela. Za MIG zavarivanje aluminijskih legura razvijeni su posebni spool i push-pull pištolji. [1] Spool pištolji na sebi imaju pričvršćen kolut žice pa se tijekom procesa zavarivanja žica odmotava s koluta uz pomoć pogonskih kotačića te prolazi kroz pištolj. Prednost spool pištolja je što žica prolazi samo duljinu pištolja pa je opasnost zapinjanja i gužvanja žice manja. Push-pull pištolj sadržava motorizirani dodavač žice koji je sinkroniziran s dodavačem žice u stroju. Na taj način dodavači žice zajedno omogućuju neometani dotok žice kroz pištolj. [14] Slika 6. prikazuje zrakom hlađen pištolj za MIG zavarivanje.



Slika 6. Zrakom hlađen pištolj za MIG zavarivanje [15]

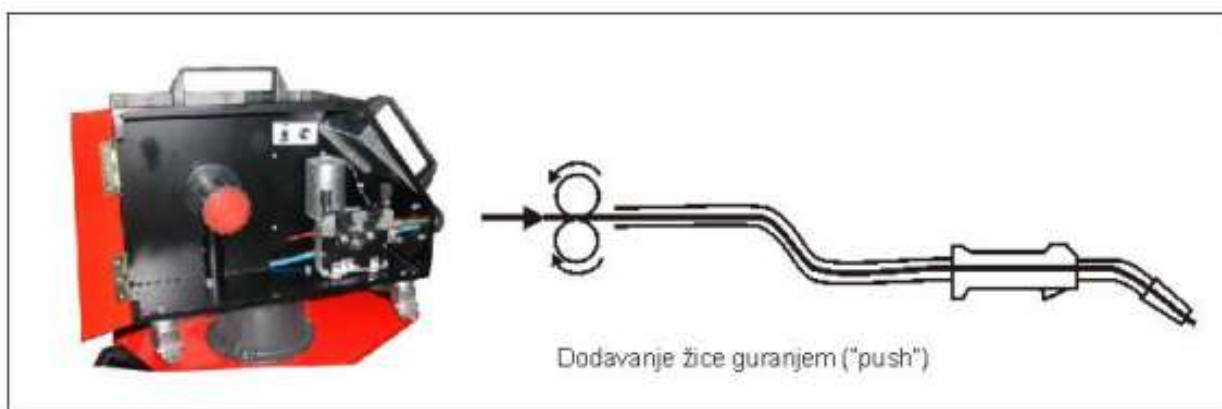
### 3.1.2. Dodavač žice

Glavna uloga dodavača žice je automatsko i kontinuirano dodavanje žice, odnosno elektrode tijekom MIG procesa zavarivanja. Kako bi se dobila veća mobilnost, manja cijena pri proizvodnji te manji volumen uređaja, dodavač žice smještao se u kućište izvora struje, no danas to više nije tako. Danas se dodavači žice smještaju van kućišta izvora struje s ciljem smanjenja mogućih pogreški pri vođenju žice, odnosno na taj način dobiva se veća preglednost namotaja žice. Pomoću dodavača žice posredno se može utjecati na parametre zavarivanja, odnosno na duljinu slobodnog kraja žice te brzinu dodavanja žice. [16]



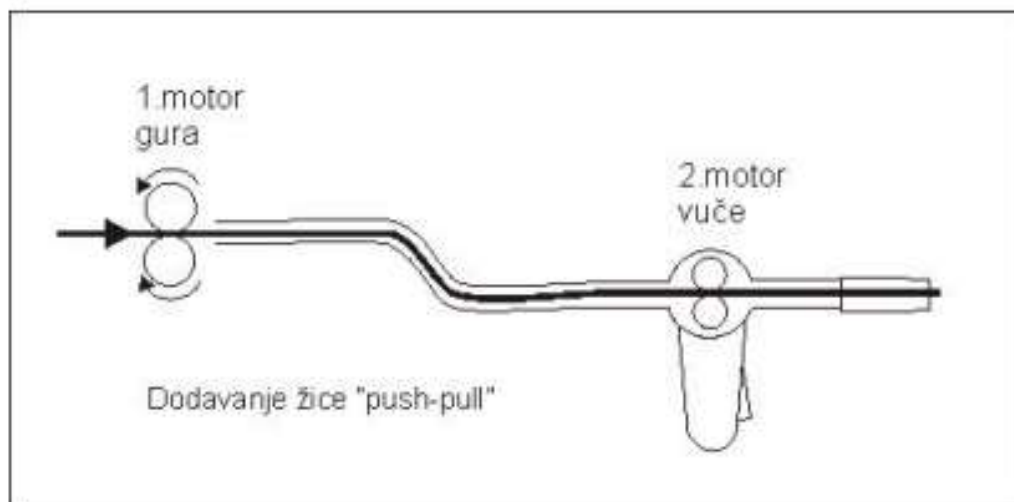
Postoje tri osnovna sustava dodavanja žice: push, pull i push – pull. Kod MIG zavarivanja aluminijevih legura u upotrebi su push i push – pull sustavi. Razlog tomu je elastičnost aluminijeve žice koja se tijekom dovodnje može zapetljati i uzrokovati brojne probleme.

Kod push sustava za dovod žice (slika 7.), žica se uz pomoć 2 ili 4 pogonska kotačića gura kroz posebno kalibrirane utore do mjesta za zavarivanje. Ovakav način dovoda omogućava rad sa žicama od aluminija promjera od 1,2 do 2,4 mm. Kontinuirani dovod žice osigurava elektronički regulirani istosmjerni motor. Push sustav danas je najčešće u uporabi, a omogućava kontroliran i kontinuiran dovod žice na udaljenostima do 3 m od izvora. [17]



**Slika 7. Push sustav za dovod žice [2]**

Push – pull sustav je sustav kod kojega pogonski kotačići omogućuju prolazak žice kroz vodilicu, dok zatim pogonski kotačići u gorioniku omogućavaju dovod žice do mjesta za zavarivanje. Ovakav sustav korišten je isključivo za malo promjere žice, pretežno aluminijeve. Prednost push – pull sustava je što omogućuje kontinuirani dovod žice na udaljenosti i do 15 m od izvora, no problem predstavlja kolot sa žicom čiji promjer ne smije biti veći od 100 mm te na sebi ne smije nositi više od 0,5 kg žice. Na slici 8. prikazan je push – pull sustav za dovod žice. [2]



**Slika 8. Push - pull sustav za dovod žice [2]**

### 3.2. AC MIG zavarivanje

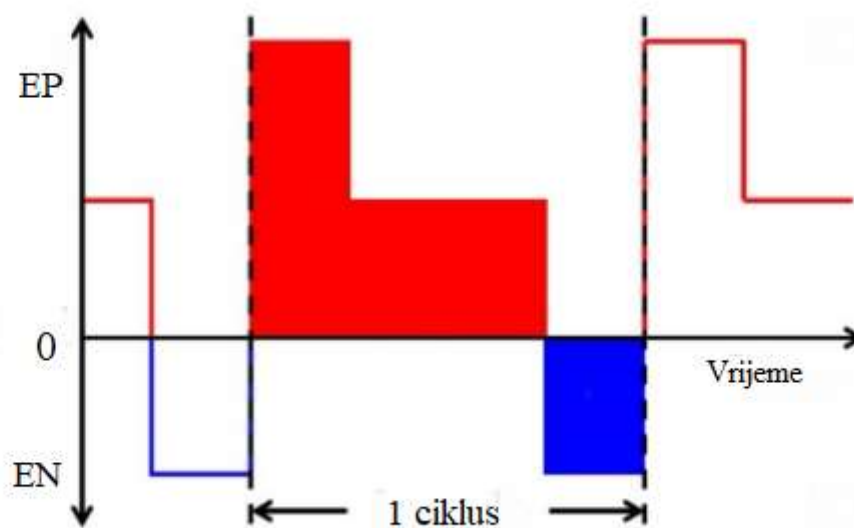
Tijekom MIG zavarivanja uobičajeno se koristi istosmjerna struja, međutim prilikom zavarivanja aluminija to nije uvijek slučaj. Izmjeničnu struju karakterizira periodička promjena smjera i polariteta. Budući da struja kontinuirano mijenja polaritet, u jednom trenutku dolazi do prelaska preko nule. Prelazak preko nule odvija se dovoljno brzo da se osigura ponovno paljenje luka. Pozitivan polaritet (engl. naziv EP) osigurava veću stabilnost luka, dok negativan polaritet (engl. naziv EN) osigurava manji unos topline, a time i manje deformacije. EN omjer predstavlja vrijeme provedeno na negativnom polu te se izražava postocima u odnosu na ukupno vrijeme. EN omjer prikazan je u jednadžbi (1). Ukoliko je iznos EN omjera 50 %, omjer pozitivnog i negativnog polariteta je jednak. Za slučaj da je EN omjer veći od 50 %, prevladava negativan polaritet te dolazi do povećanja brzine taljenja žice. Slika 9. prikazuje valni oblik struje za AC MIG. [17, 18, 19]

$$\text{EN omjer} = \frac{I_{\text{EN}}}{I_{\text{EN}} + I_{\text{EP}}} \times 100\% \quad (1)$$

Gdje je:

$I_{\text{EP}}$  – jakost struje pozitivnog polariteta

$I_{\text{EN}}$  – jakost struje negativnog polariteta



Slika 9. Valni oblik struje za AC MIG [17]

Zavarivanje izmjeničnom strujom u većini situacija je svojstveno radi konstantne promjene polariteta, međutim kod zavarivanja određenih vrsta metala pokazala se korisnom.

Zavarivanje izmjeničnom strujom koristi se kod:

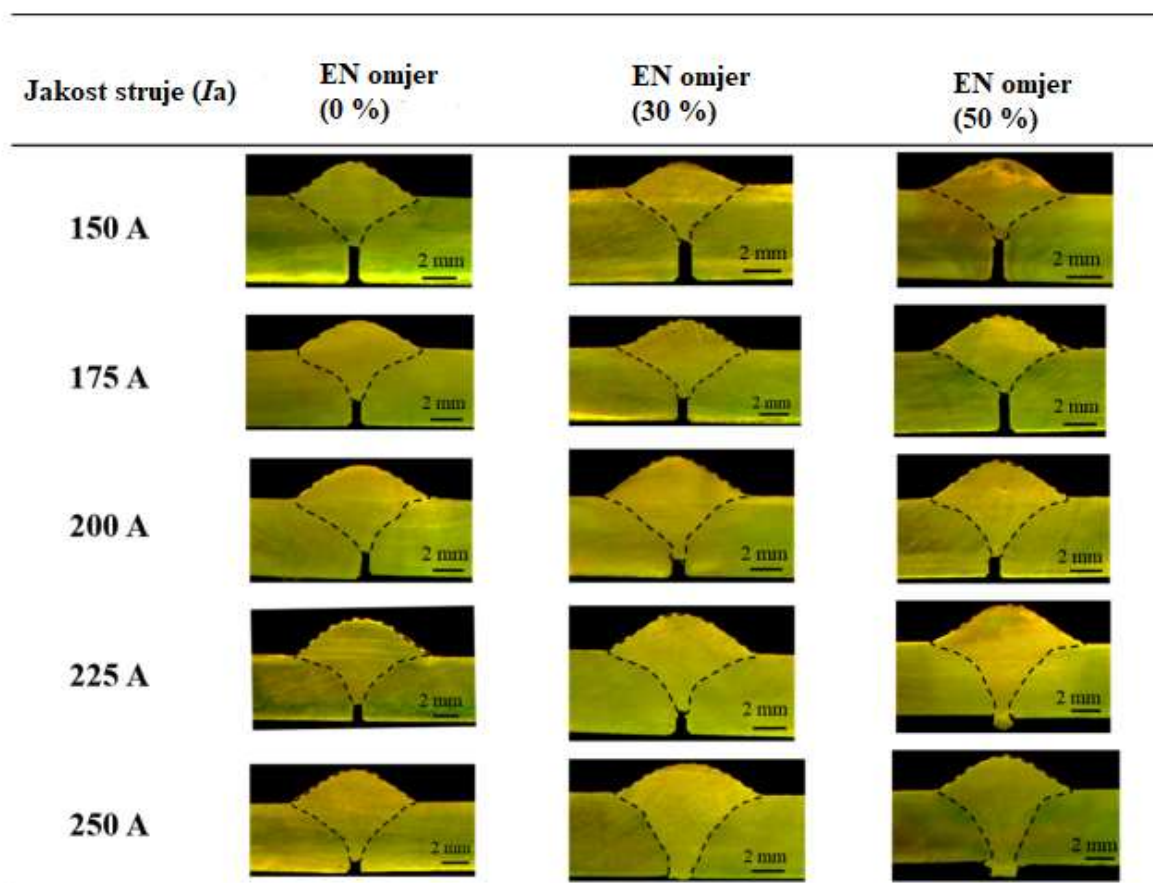
- Aluminijska i aluminijevih legura
- Magnetičnih materijala
- Visokotemperaturnih zavarivanja

Obzirom da izmjenična struja često mijenja svoj polaritet, na nju ne utječe magnetizam, stoga je često u uporabi kod popravaka, odnosno zavarivanja strojeva na kojima se nalaze magnetični materijali. [18]

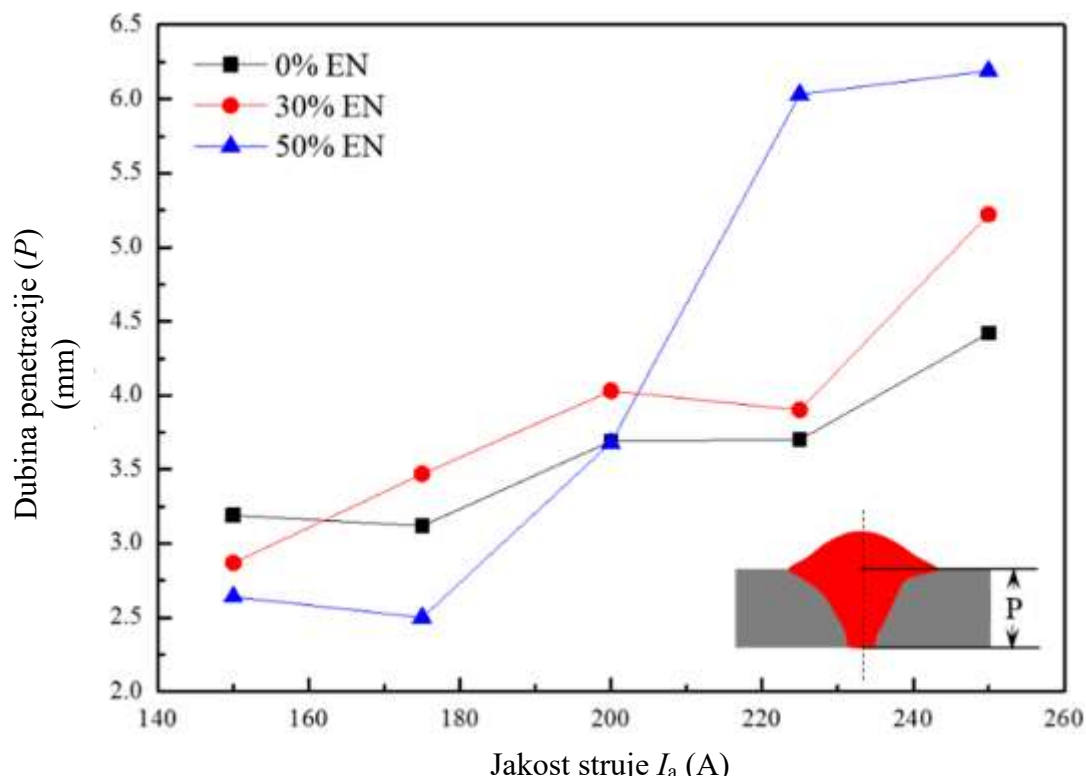
Prilikom zavarivanja aluminijska i sličnih metala koji su osjetljivi na unos topline, postupkom AC MIG zavarivanja omogućuju se bolja mehanička svojstva u zoni utjecaja topline. To je posljedica malog unosa topline koji je karakterističan za AC MIG. [14]

### 3.2.1. Utjecaj balansa i frekvencije

Na dubinu penetracije značajan utjecaj ima balans pri AC MIG zavarivanju. Pri nižim vrijednostima jakosti struje te istovremenim povećavanjem EN omjera, dubina penetracije se smanjivala. Uspoređujući dubinu penetracije pri vrijednosti EN omjera od 50 % sa vrijednostima EN omjera od 0 % i 30 %, uočeno je kako se dubina penetracije smanjivala (slika 10.). Također, pri višim vrijednostima jakosti struje, te istovremenim povećanjem EN omjera, dubina penetracije se povećavala, a razlog tomu leži u intenzivnim mlazovima plazme koji su generirani duž osi zavara. Dublja penetracija pri višim vrijednostima jakosti struje te višim vrijednostima EN omjera omogućava zavarivanje debljih ploča. Na slici 11. prikazan je dijagram ovisnost balansa i jakosti struje o dubini penetracije. [20]

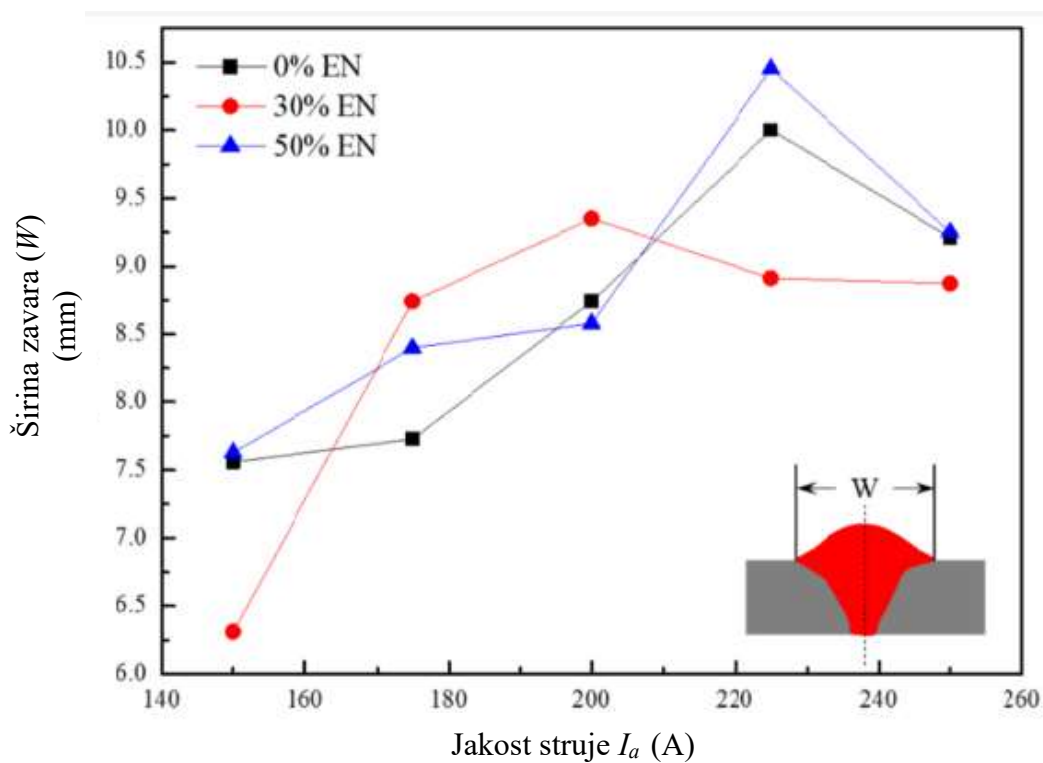


Slika 10. Utjecaj balansa na dubinu penetracije [20]

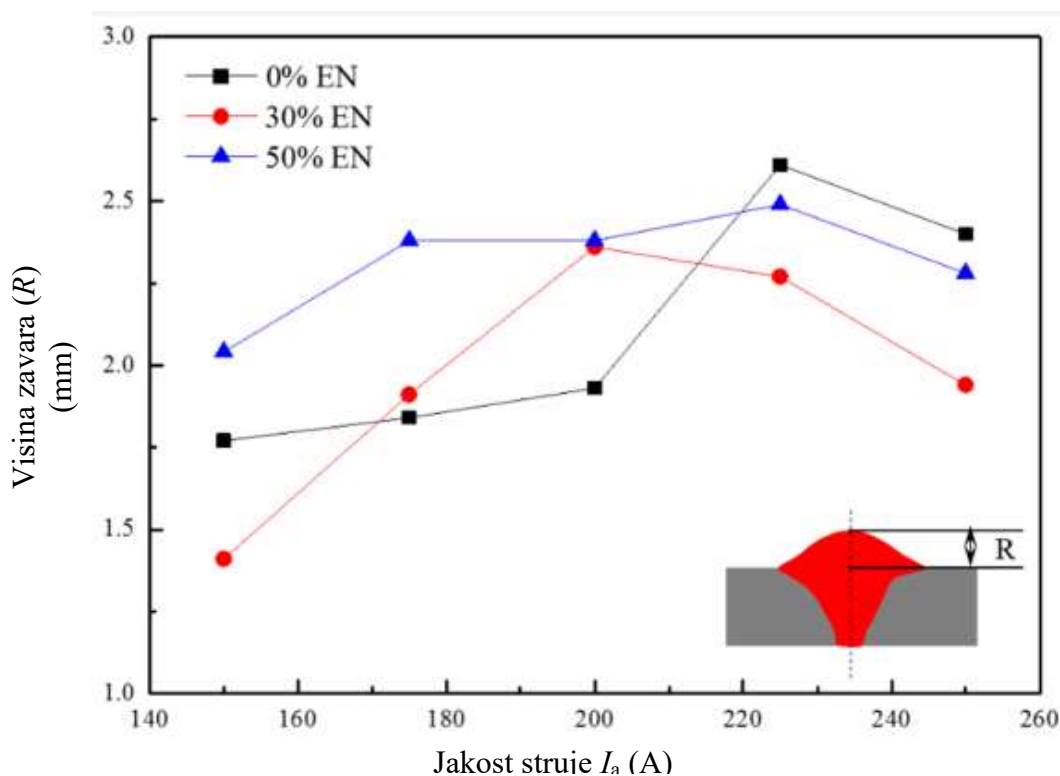


**Slika 11. Utjecaj balansa i jakosti struje na dubinu penetracije [20]**

Osim na dubinu penetracije, balans utječe i na širinu zavora te na nadvišenje zavora. Na slikama 12. i 13. prikazan je utjecaj balansa na širinu i nadvišenje zavora.



**Slika 12. Utjecaj balansa na širinu zavora [20]**



Slika 13. Utjecaj balansa na nadvišenje zavora [20]

Tijekom valnog impulsnog zavarivanja dolazi do nastanka dva odvojena jedinična impulsa na niskoj frekvenciji. Oni omogućuju nastanak kontinuiranog zavora čiji izgled podsjeća na niz ribljih ljuski. Valno impulсно zavarivanje utječe na brzinu dodavanja žice i stanje impulsa. Kada je iznos valne frekvencije 3 Hz, tada postoji mala amplituda brzine dodavanja žice. Pri vrijednostima valnih frekvencija od 5 Hz ili više, amplituda nestaje te je brzina dodavanja žice stabilna, a mijenja se samo stanje impulsa. Na slici 14. prikazan je utjecaj frekvencije na izgled zavora. [19]

Wave frekvencija	Izgled zavora
Niska	
Visoka	

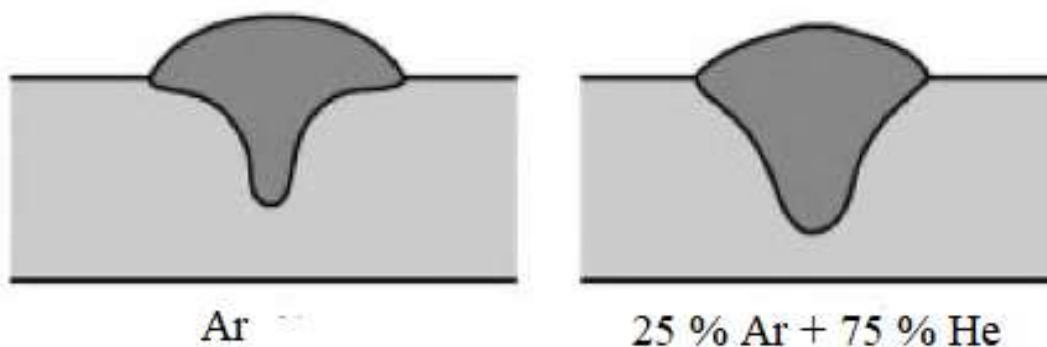
Slika 14. Utjecaj wave pulse načina rada na izgled zavora [19]

### 3.3. Odabir zaštitnih plinova

Primarna uloga zaštitnih plinova kod MIG zavarivanja je zaštita rastaljenog materijala od štetnog utjecaja atmosfere. Osim navedenog, zaštitni plinovi imaju i velik utjecaj na konačni proizvod. Utječu na stabilnost luka, produktivnost te kvalitetu zavara. Zaštitni plinovi moraju imati čistoću od 99.998% te nisku razinu vlage jer bi se u protivnom nečistoće i vlaga odrazile na kvalitetu zavara. Za zavarivanje aluminijske legure najčešće se koristi argon i mješavina argona i helija. Pri zavarivanju aluminijske legure do 12 mm debljine, koristi se čisti argon. Za debljine veće od 12 mm koriste se plinske mješavine od 75 % argona i 25 % helija i suprotno. Na slici 15. prikazan je utjecaj zaštitnog plina na geometriju zavara. [1,15]

Argon je znatno jeftiniji od helija te osigurava stabilan luk i širok zavareni spoj. Nedostatak argona je nizak unos topline, a posljedično i male brzine zavarivanja što može uzrokovati pojavu određenih nepravilnosti u zavaru. [1]

Helij u odnosu na argon za istu jakost struje osigurava mnogo veći napon električnog luka i veći unos topline. Jedan od glavnih nedostataka helija je teža uspostava električnog luka te viša cijena. [1]



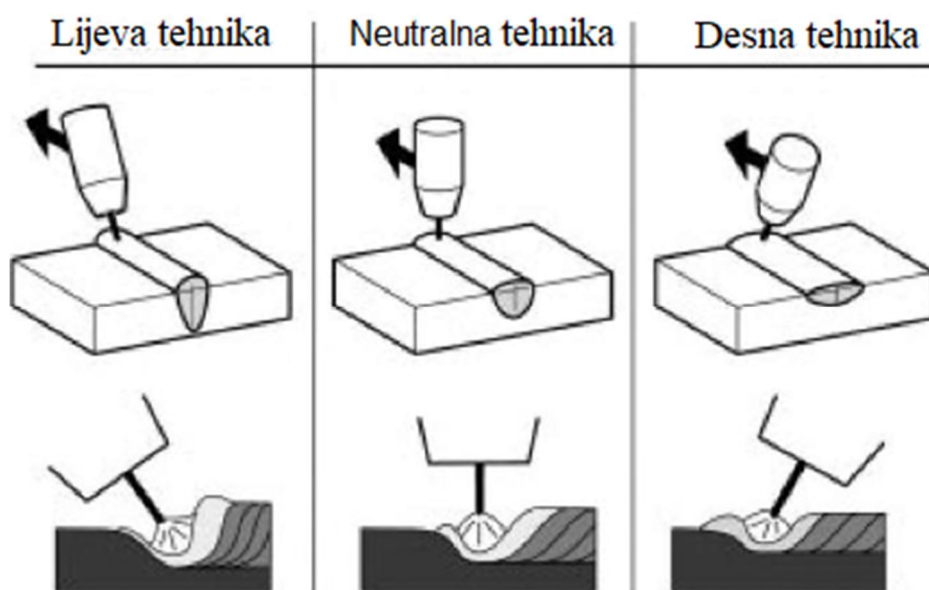
Slika 15. Utjecaj zaštitnog plina na geometriju zavara [1]

Odgovarajući protok plina ima velik utjecaj na kvalitetu zavara. Prenizak protok plina uzrokuje neadekvatnu zaštitu zavara, odnosno dolazi do utjecaja atmosfere na rastaljeni metal. Previsok protok plina može uzrokovati turbulencije tijekom izlaska plina iz mlaznice, a kao posljedica toga dolazi do uvlačenja kisika i dušika u električni luk. Prenizak i previsok protok plina za

sobom ostavljaju lošu kvalitetu zavora što može uzrokovati brojne probleme poput kontaminiranosti zavora oksidima i nitridima te porozitet. Zavarivanje aluminija zahtijeva veći protok zaštitnog plina u odnosu na zavarivanje čelika. Također, što je veća udaljenost između mlaznice i radnog komada, potreban je veći protok plina. [10]

### 3.4. Tehnika rada

Prilikom zavarivanja mogu se koristiti lijeva, neutralna i desna tehnika rada, a odnose se na nagib pištolja tijekom postupka zavarivanja. Svaka od navedenih tehnika ima utjecaj na zavar (slika 16). Prilikom lijeve tehnike rada, dolazi do male penetracije te širokih zavora, a koristi se kod zavarivanja tankih limova. Neutralna tehnika rada označava pištolj vertikalno u odnosu na radni komad te se uglavnom koristi kod automatiziranog zavarivanja. Prednost takvog zavarivanja je dobra penetracija te nadvišen profil zavora. Desna tehnika rada koristi se prilikom zavarivanja debljih materijala, a karakteriziraju je dobra penetracija te uzak profil zavora. Prilikom zavarivanja aluminija i aluminijevih legura, preporučuje se korištenje lijeve tehnike zavarivanja. [10]



Slika 16. Utjecaj tehnike rada na oblik zavora [10]



### 3.5. Odabir dodatnog materijala

Kod MIG zavarivanja, žica istovremeno ima ulogu i elektrode i dodatnog materijala. Odabir dodatnog materijala ima velik utjecaj na kvalitetu zavarenog spoja. Odgovarajući dodatni materijal rezultirat će zavarenim spojem zadovoljavajuće čvrstoće, bez pukotina i poroznosti. Također, utjecaj na kvalitetu zavarenog spoja ima i skladištenje dodatnog materijala. Žicu je potrebno skladištiti u suhom i čistom prostoru, a prije korištenja potrebno ju je očistiti kako bi se spriječila kontaminacija zavarenog spoja. [1]

Prilikom zavarivanja aluminijskih legura, dodatni materijal bira se na temelju kemijskog sastava osnovnog materijala, debljine materijala i zahtjeva na zavareni spoj. U odnosu na čelik, kod kojega sastav dodatnog materijala uglavnom odgovara sastavu osnovnog materijala, kod aluminijskih legura to nije slučaj. Kod aluminijskih legura sastav dodatnog materijala uglavnom se razlikuje od sastava osnovnog materijala. Odabiru se dodatni materijali s kojima je moguće postići odgovarajuću čvrstoću, otpornost na pukotine, koroziju te otpornost na puzanje. [1]

Prilikom odabira dodatnog materijala potrebno se pridržavati određenih smjernica: [1]

- Prilikom zavarivanja legura s više od 2 % magnezija, potrebno je izbjegavati korištenje dodatnog materijala koji sadržava silicij. Silicij čini spoj krhkim te može uzrokovati lom dinamički opterećenih dijelova
- Dodatni materijali serije 5XXX s više od 5 % magnezija trebaju se izbjegavati ukoliko radna temperatura prelazi 65 °C. Magnezij zajedno s aluminijem tvori spoj  $Al_2Mg$  koji leguru čini osjetljivom na napetosnu koroziju.
- Legure serije 1XXX vrlo su mekane, stoga postoji mogućnost zapetljavanja žice tijekom dodavanja.
- Kod legura iz serije 5XXX s udjelom magnezija manjim od 2 % može doći do toplih pukotina ukoliko se koristi dodatni materijal istog sastava, stoga je preporučljivo koristiti  $AlMg_5$  kao dodatni materijal.
- Ponekad se dodatni materijali legiraju titanom i cirkonijem s ciljem sprječavanja nastanka toplih pukotina u zavaru

Iz slike 17. vidljivi su preporučeni dodatni materijali za zavarivanje aluminijskih legura. Rubovi tablice označavaju osnovne materijale aluminijskih legura, dok su unutar tablice navedeni preporučeni dodatni materijali ovisno o osnovnom materijalu, ali i o drugim

svojstvima. Ukoliko je polje unutar tablice prazno, ne postoji odgovarajuća kombinacija osnovnog i dodatnog materijala koja bi zavar učinila zadovoljavajućim. [21]

1199	1199																		
1080		1050																	
		8004	1080																
1050	1050	1050																	
	1199	8004	1050	1050															
1200			1050	1200	1050	1200													
				1200															
3003			1050	1050	1050	1050	3003	3003											
				1200	3003	3003	3003	3003											
3005			1050	1050	1050	1050	3005	3005	4043	5854									
3004			3004	1200	3004	3003	3005	3004	3004	3005									
			3005	3005	3004				3004	3005									
5005			1050	1050	1050	1050	5005	5005	4043	5854	4043	5854							
5050			5050	1200	5050	3003	5050	5050	3004	3005	5050	5050							
			5005	5005	5005				3004	3005	5005	5005							
5052			4043	5356	4043	5356	4043	5356	5183/5356	5183/5356	5183/5356	5183/5356							
			5183	5183	5183	5183	5183	5183	5183/5356	5183/5356	5183/5356	5183/5356							
5754			4043	5356	4043	5356	4043	5356	5183/5356	5183/5356	5183/5356	5183/5356	5183/5356						
			5183	5183	5183	5183	5183	5183	5183/5356	5183/5356	5183/5356	5183/5356	5183/5356						
5083				5183	5183	5183	5183	5183					5183	5183	5183				
6963			4043	5356	4043	5356	4043	5356	4043	5356	4043	5356	4043	5356	4043	5356	5356	4043	5356
									3005	5050									5050
6080			4043	5356	4043	5356	4043	5356	4043	5356	4043	5356	4043	5356	4043	5356	5356	4043	5356
6082									3005	5050									5050
7051			4043	5356	4043	5356	4043	5356	4043	5356	4043	5356	5356	5356	5356	4043	5356	4043	5356
7005																			
D osnovni materijal	1199	1080	1050	1200	3003	3005	5005	5050	5052	5754	5083	6963	6080	7051					
						3004	5050						6082	7005					

Slika 17. Preporučeni dodatni materijali za zavarivanje aluminijevih legura [21]

### 3.6. Zavarljivost aluminija i aluminijevih legura

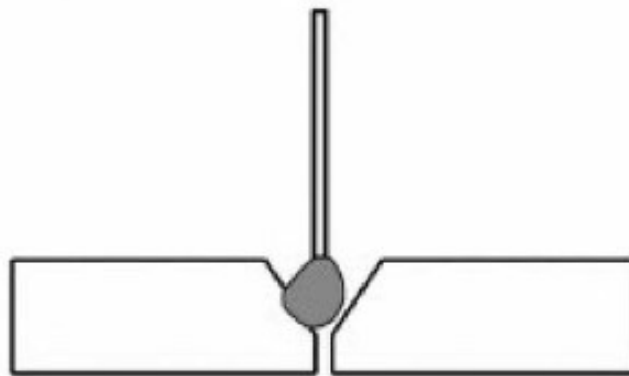
Zavarivanje je najčešća tehnologija spajanja materijala. Pri zavarivanju aluminija i aluminijevih legura, najveći problem predstavlja njihova zavarljivost. Kako bi se odredila zavarljivost nekog materijala, koristi se niz različitih metoda. [10]

Zavareni spoj sastoji se od zone taljenja (ZT), zone utjecaja topline (ZUT) i osnovnog materijala (OM). U idealnom slučaju zavareni spoj treba imati ista svojstva kao i osnovni materijal. U većini slučajeva takvo stanje teško se postiže jer postoji niz problema povezanih sa zavarljivošću aluminija i njegovih legura. [1]

U najvećoj mjeri na kvalitetu zavarenog spoja kod aluminija i aluminijevih legura utječu: [1]

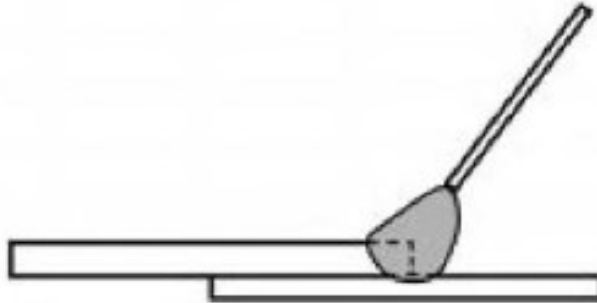
- Poroznost
- Tople pukotine
- Oksidni film
- Reducirana čvrstoća u području zavara i zone utjecaja topline
- Reducirana korozijska otpornost
- Reducirana električna otpornost
- Slabo taljenje.

Aluminijeve legure serija 1XXX, 3XXX, 5XXX, 6XXX i 7XXX karakterizira dobra zavarljivost. Odabirom odgovarajućim parametara zavarivanja i dodatnih materijala, zavari će biti zadovoljavajući. Visok koeficijent toplinskog rastezanja kod aluminija predstavlja problem pri zavarivanju te može uzrokovati deformacije. Iz tog razloga, potrebno je fiksirati tanke aluminijeve limove prije zavarivanja sučeonog spoja. Na taj način sprječavaju se moguća izobličenja. Prilikom zavarivanja aluminijevih limova većih debljina, preporuka je da kod sučeonog zavara, kut između V spoja bude veći u odnosu na kut kod zavarivanja čelika. Razlog tomu je nestabilnost električnog luka koji će se približavati najužem dijelu spoja te tako dovesti do nedostatka fuzije te veća toplinska vodljivost aluminija. Slika 18. prikazuje fenomen puhanja luka u žlijebu. [10]



**Slika 18. Fenomen puhanja luka u žlijebu [10]**

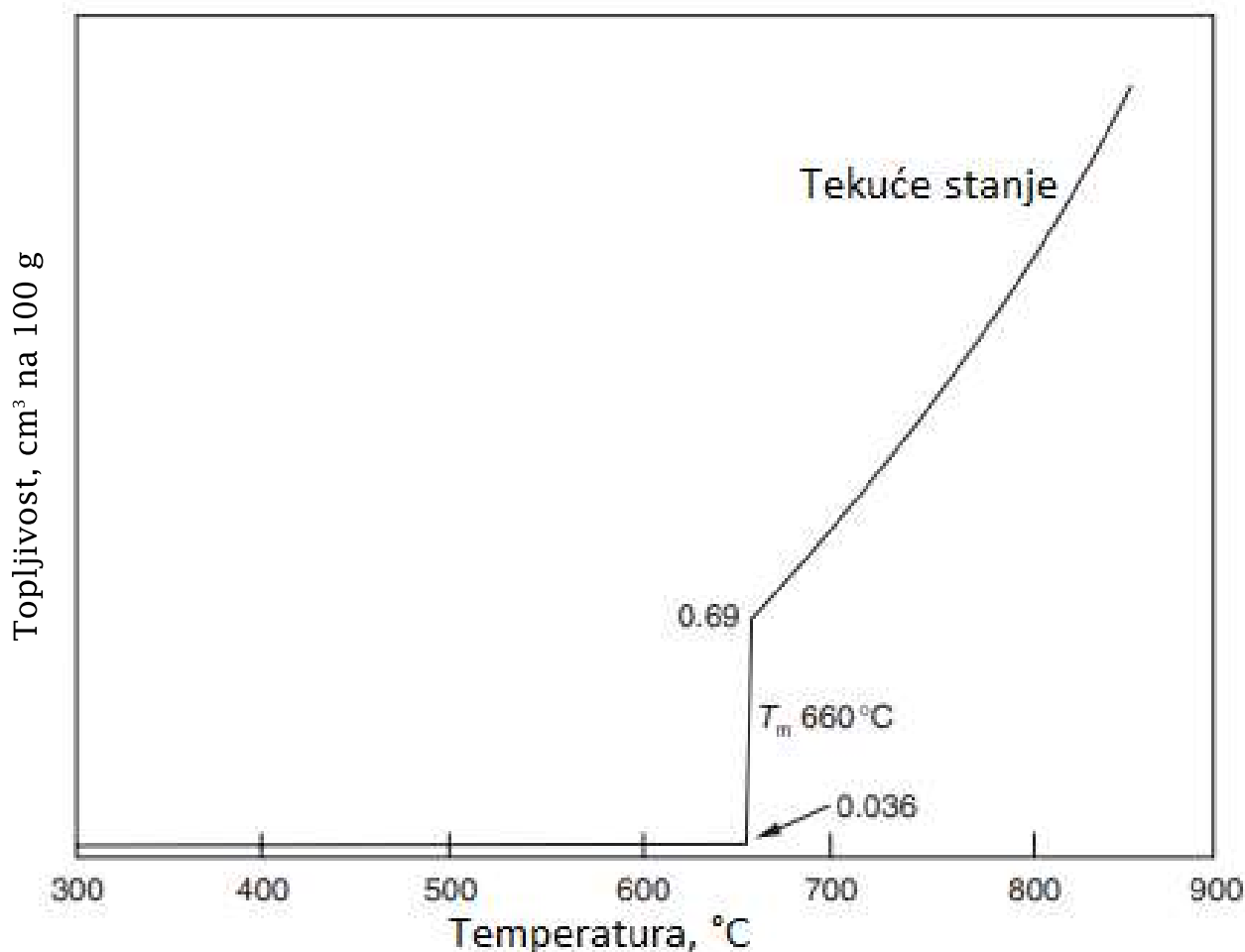
Prilikom zavarivanja preklopnog spoja s dijelovima različitih debljina, električni luk ima tendenciju najviše zagrijati najtanji dio. Kako bi se navedeno spriječilo, najtanji dio se postavlja kao donji, odnosno udaljeniji od elektrode (slika 19.). [10]



**Slika 19. Zavarivanje preklopnog spoja različitih debljina [10]**

### **3.6.1. Poroznost**

Poroznost je nepravilnost koja je uvijek prisutna kod zavarivanja aluminijskih i aluminijskih legura. Posljedica je plina koji je otopljen u rastaljenom metalu, no kako se metal hladi i skrućuje, tako plin ostaje zarobljen u metalu stvarajući mjehuriće u skrutnutom metalu zavariva. Kod zavarivanja aluminijskih, vodik je uzrok poroznosti. Vodik ima visoku topljivost u rastaljenom aluminiju, ali se ne otapa u čvrstom aluminiju. Pad topljivosti vodika je toliko izražena, da je gotovo nemoguće dobiti zavar bez poroznosti. Slika 20. prikazuje topljivost vodika u aluminiju i aluminijskim legurama. [1]

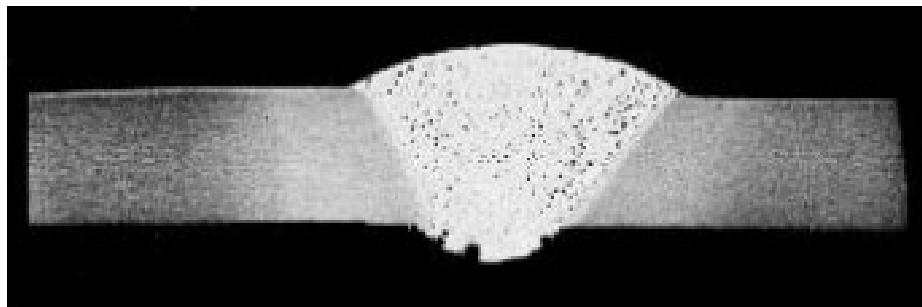


Slika 20. Topljivost vodika u aluminiju i aluminijevim legurama [1]

Poroznost može varirati od mikroporoznosti do grube poroznosti kod koje promjer mjehurića može biti 3 do 4 milimetra.

Na smanjenje poroznosti može se utjecati smanjenjem brzine zavarivanja. Ukoliko se povećava unos topline tijekom zavarivanja u horizontalnom položaju, također se može postići smanjenje poroznosti. U tom slučaju mjehurići vodika izlaze iz zavara jer brzina stvaranja vodika iz zavara veća je od brzine adsorpcije. Povećanje poroznosti posljedica je povećanja napona i/ili duljine luka jer se u tom slučaju povećava izloženost metala kontaminaciji. Sastav legura također ima utjecaj na poroznost. Ukoliko legura sadrži udjel od 6 % magnezija, topljivost vodika u rastaljenom metalu povećat će se dva puta. Suprotno tomu, bakar i silicij povećavaju poroznost. Čistoća osnovnog metala ima veliku ulogu u smanjenju poroznosti. Neophodno je odmaščivanje i mehaničko čišćenje metala prije nego započne postupka zavarivanja. Mehaničko čišćenje podrazumijeva četkanje osnovnog metala četkom od nehrđajućeg čelika kako bi se uklonio sloj oksida na površini aluminija ili aluminijevih legura. Nakon provedenog

mehaničkog čišćenja, metal je potrebno što prije zavariti. Uzrok vodik može biti i vlaga. Tijekom zavarivanja, vlaga se u električnom luku razlaže na vodik, koji na taj način dospijeva u rastaljeni metal uzrokujući poroznost. Vlaga je sastavni dio električnog luka u svim elektrolučnim procesima, no izvor vlage može biti i zaštitni plin. Slika 21. prikazuje prisutnost poroznosti u zavaru. [1]

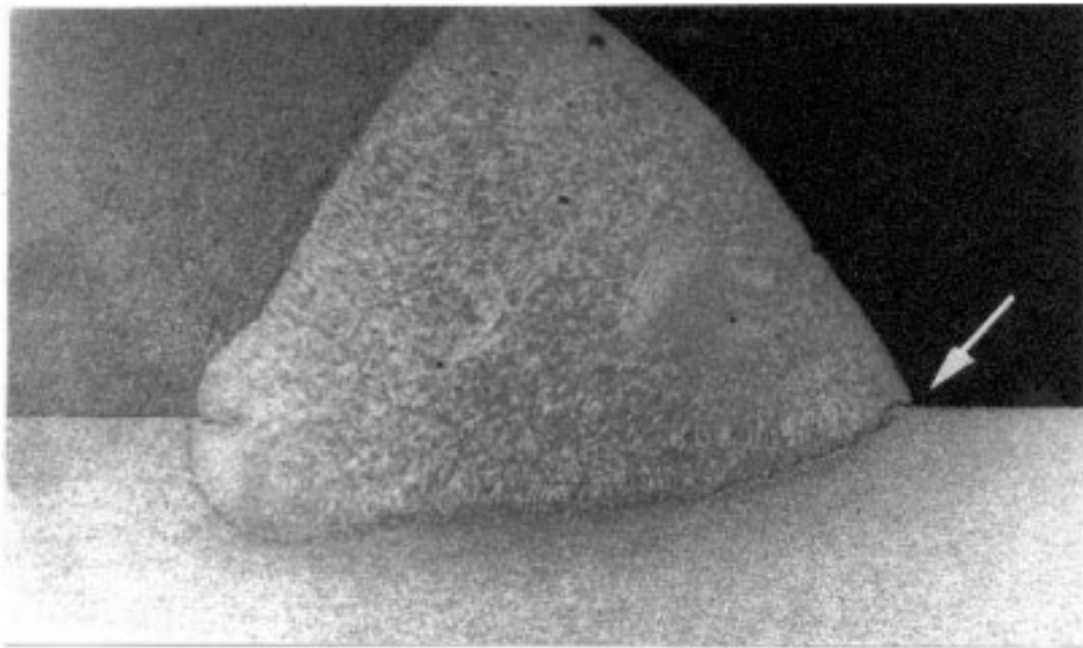


**Slika 21. Poroznost [1]**

### **3.6.2. Oksidni film**

Aluminijev oksid ( $Al_2O_3$ ) tanki je film na površini aluminijskih i aluminijevih legura. Brzo se stvara i žilav je što aluminiju omogućuje veliku korozivnu postojanost. U odnosu na aluminij, čije je talište oko  $660\text{ }^\circ\text{C}$ , aluminijev oksid ima vrlo visoko talište ( $2060\text{ }^\circ\text{C}$ ). Zagrijavanjem aluminijskih na točku taljenja, aluminijev oksid bit će netaknut, a rastaljeni aluminij zarobljen ispod sloja aluminijevog oksida (slika 22.). Kako bi se navedeno izbjeglo, potrebno ga je ukloniti prije postupka zavarivanja.

Oksidni film moguće je ukloniti mehaničkim čišćenjem, odnosno četkanjem s četkom od nehrđajućeg čelika. Kod elektrolučnih postupaka zavarivanja, oksidni film moguće je ukloniti na dva načina. Prvi način uklanjanja oksidnog filma korištenjem izmjenične struje tijekom provođenja postupka zavarivanja. Drugi način temelji se na zavarivanju istosmjernom strujom gdje je elektroda priključena na pozitivan pol izvora struje. Na taj način elektroni putuju od radnog komada prema elektrodi, dok istovremeno ioni putuju od elektrode prema radnom komadu. Posljedično dolazi do ionskog bombardiranja površine radnog komada i uklanjanja oksidnog sloja. Takav postupak naziva se katodno čišćenje. [1]



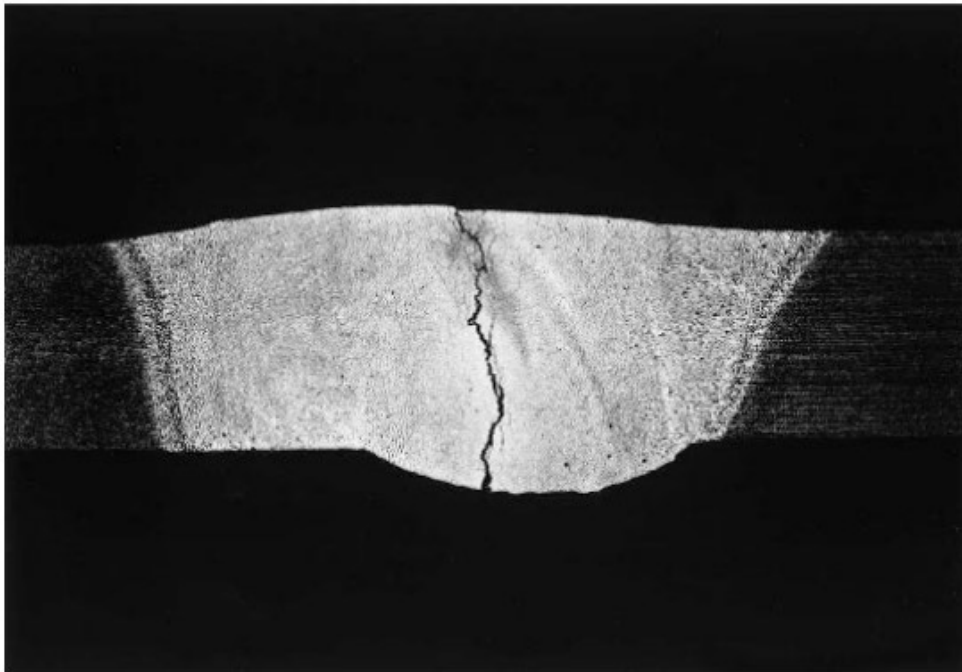
**Slika 22. Oksidni film u kutnom zavaru [1]**

### ***3.6.3. Tople pukotine***

Tople pukotine su nepravilnosti karakteristične za određene sustave legura, dok se u čistim metalima ne javljaju. Njihova pojava nije ograničena isključivo na aluminij, već se javljaju i kod čelika, kao i legurama nikla i bakra. Razlog pojave toplih pukotina isti je u svim sustavima legura. Nastanak toplih pukotina posljedica je dodavanja legirajućih elemenata čistom metalu. Legiranjem čistog metala temperatura solidifikacije nastale legure različita je u odnosu na temperaturu solidifikacije osnovnog metala što rezultira različitim fazama. Tople pukotine uglavnom nastaju između granica kristalnih zrna te se pojavljuju duž sredine zvara (slika 23.). [1]

Tople pukotine moguće je izbjeći: [1]

- Smanjenjem veličine kristalnog zrna koje se postiže dodavanjem male količine titana ili cirkonija
- Kontroliranjem sastava metala zvara dodavanjem odgovarajućeg dodatnog materijala
- Zavarivanjem najvećom brzinom
- Odabirom dodatnog materijala čija je temperatura taljenja približno jednaka temperaturi taljenja osnovnog materijala

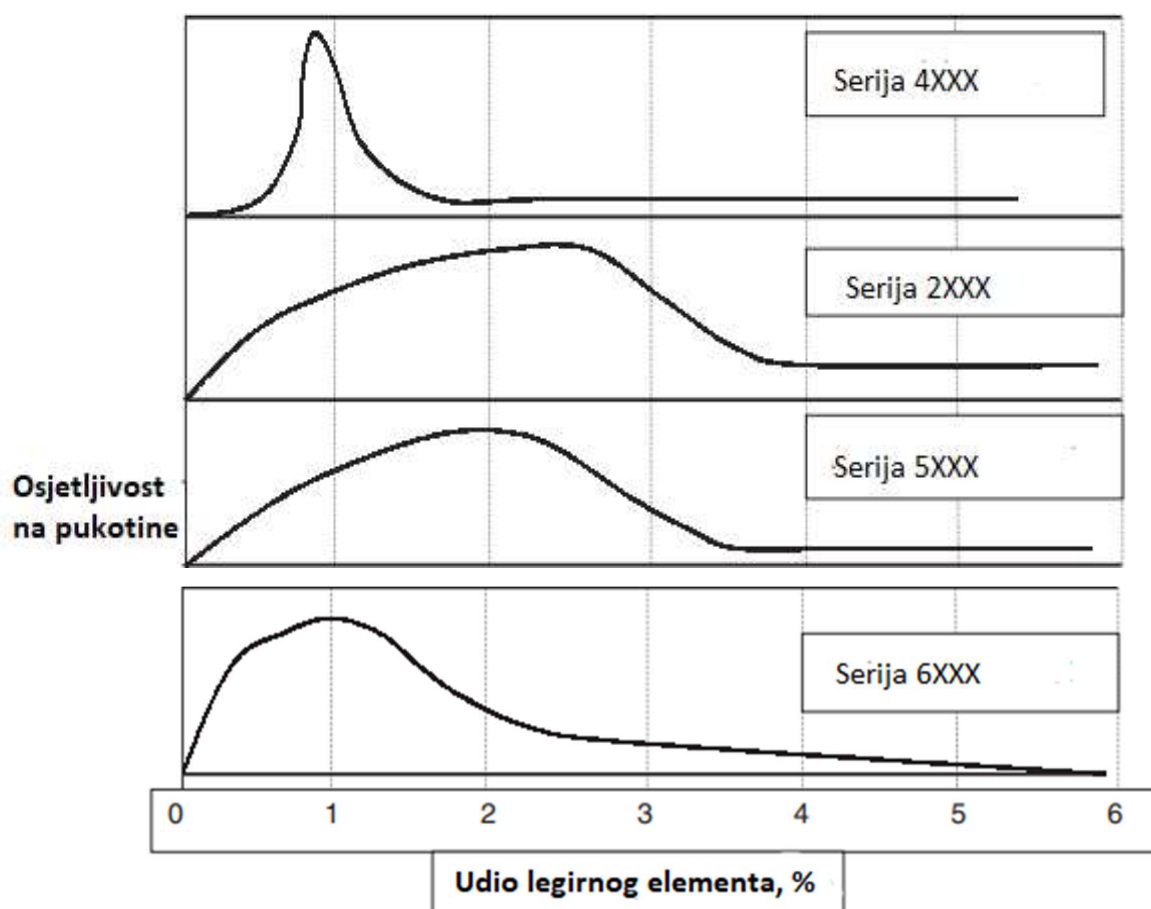


**Slika 23. Topla pukotina kod A6082 aluminijske legure [1]**

Dodavanjem legirnih elemenata čistom aluminiju, temperatura solidifikacije značajno je niža u odnosu na čisti aluminij. Kao posljedica toga, sve aluminijske legure podložne su toplim pukotinama.

Utjecaj legirnih elemenata na pojavu toplih pukotina kod aluminijskih legura ispitan je raznim ispitivanjima. Rezultati ispitivanja pokazali su kako sve aluminijske legure imaju najmanju pojavnost toplih pukotina pri velikim i malim udjelima legirnih elemenata (slika 24.). Pri malim udjelima legirnih elemenata utvrđena je prisutnost male količine eutektika čija je posljedica pojava tankog tekućeg filma na granicama zrna. Uspostavljen je i raspon unutar kojeg svaka od serija aluminijskih legura ima najveću osjetljivost na tople pukotine. Raspon je nazvan „hot short range“. [1]



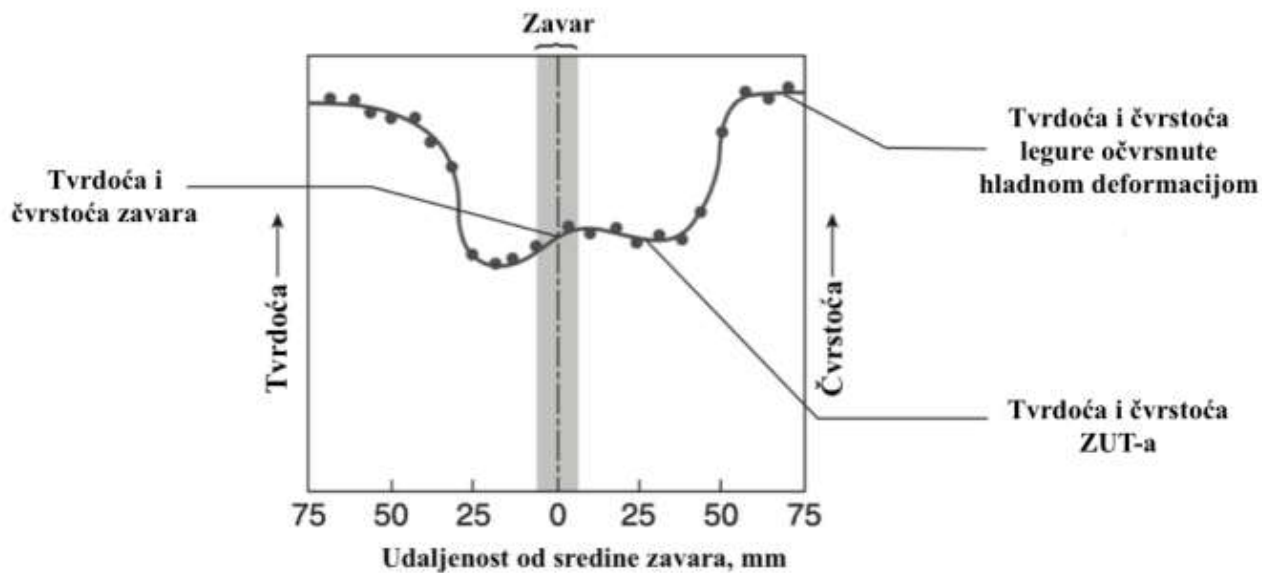


Slika 24. Utjecaj legirnih elemenata na pojavu toplih pukotina [1]

### 3.6.4. Reducirana čvrstoća u području zavara i zone utjecaja topline

Svaki zavareni spoj sastoji se od 3 dijela: osnovnog materijala, zone utjecaja topline (ZUT) te metala zavara. Svojstva zone utjecaja topline mogu se izuzetno razlikovati u odnosu na svojstva osnovnog materijala. Razlog tomu je izloženost ZUT-a jednom ili više ciklusa hlađenja i grijanja. To je posebno izraženo kod aluminijevih legura koje su bile izložene hladnom ili precipitacijskom očvršćivanju. Kod takve vrste legura, s višim unosom topline te predgrijavanjem, dolazi do šireg ZUT-a. Na taj način utječe se i na mehanička svojstva ZUT-a koja se mijenjaju ovisno o udaljenosti od zavara. Hladno očvrsnute legure karakterizira smanjenje čvrstoće radi rekristalizacije u području zone utjecaja topline. Rekristalizacija započinje kada u zoni utjecaja topline temperatura prijeđe 200 °C te progresivno napreduje kad nastupi potpuno žarenje pri temperaturi od 300 °C. Kod toplinski obradivih legura, čvrstoća

ZUT-a gotovo je jednaka čvrstoći osnovnog materijala. Na slici 25. prikazan je utjecaj zavarivanja na hladno očvrsnute aluminijeve legure. [1]



Slika 25. Utjecaj zavarivanja na hladno očvrsnute aluminijeve legure [1]

#### **4. RAZINE KVALITETE ZAVARA OBZIROM NA NEPRAVILNOSTI PREMA NORMI HRN EN ISO 10042**

Norma ISO 10042 definira razine kvalitete obzirom na nepravilnosti kod zavarenih spojeva. Postupci zavarivanja koji su obuhvaćeni navedenom normom su: MIG, TIG i plazma zavarivanje. Norma se odnosi na aluminij i aluminijeve legure, debljine iznad 0,5 milimetara. Također, norma se odnosi na sve vrste zavara, na ručno, ali i automatizirano zavarivanje te na sve položaje pri zavarivanju.

Prema normi, postoje tri razine kvalitete definirane slovima B, C i D te je obuhvaćen širok raspon zavarenih konstrukcija. Razina B označava najviše zahtjeve na nepravilnosti unutar zavara.

Nepravilnosti su podijeljene na četiri dijela: vanjske nepravilnosti, unutarnje nepravilnosti, nepravilnosti u geometriji zavara te višestruke nepravilnosti.

Vanjske nepravilnosti odnose se na vanjski izgled zavara i podrazumijevaju: pukotine, krater pukotine, poroznost, nedovoljnu ili preveliku penetraciju, višak ili manjak dodatnog materijala, asimetričan zavar, utonulost zavara, oštećenja električnim lukom te onečišćenja metalnim kapljicama. Slika 26. prikazuje vanjske nepravilnosti i njihova ograničenja prema razini kvaliteta B, C i D zavarenog spoja.

Rezanjem zavara na makrouzorke moguća je analiza unutarnjih nepravilnosti poput: poroznosti, pukotina, mikropukotina, uključaka oksida ili stranog metala, nedovoljnog protaljivanja i nepotpune penetracije.

Analizom geometrije zavarenih spojeva mogu se uočiti nepravilnosti poput neporavnatosti i netočnog razmaka kod kutnog spoja. [22]

Br.	Referentan br. u ISO 6520-1	Opaska	t mm	Ograničenja nepravilnosti za razine kvalitete			
				D	C	B	
<b>1 Vanjske nepravilnosti</b>							
1.1	100	Pukotina	—	≥0,5	Nije dopušteno	Nije dopušteno	Nije dopušteno
1.2	104	Krater pukotina	—	≥0,5	$h \leq 0,4s / 0,4a$ $l \leq 0,4s / 0,4a$	Nije dopušteno	Nije dopušteno
1.3	2018	Površinska poroznost	Za procjenu poroznosti vidjeti primjere u Dodatku A	≥0,5	≤2 %	≤1 %	≤0,5 %
1.4	2013	Lokalizirana poroznost					

**Slika 26. Vanjske nepravilnosti prema normi HRN EN ISO 10042 [22]**

Dodatak A (slika 27.) sadržava primjere s različitim udjelima poroznosti kako bi se jednostavnije odredio udio poroznosti te samim time i razina kvalitete u vlastitom primjeru zavarenog spoja.

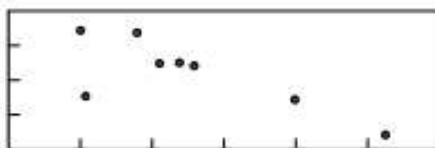


Figure A.1 — 0,5 %

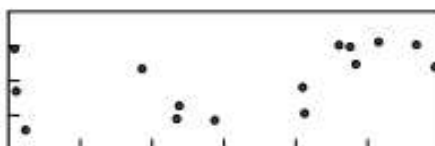


Figure A.2 — 1 %



Figure A.3 — 2 %



Figure A.4 — 3 %

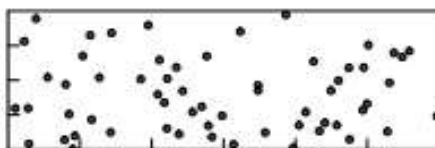


Figure A.5 — 4 %

Slika 27. Primjeri udjela poroznosti prema normi HRN ISO 10042 – Dodatak A [22]

## 5. EKSPERIMENTALNI RAD

Eksperimentalni dio završnog rada proveden je u Laboratoriju za zavarivanje Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. U eksperimentalnom dijelu provedeno je zavarivanje ploča aluminijskih legura u obliku sučeljenog i kutnog spoja. Postupak zavarivanja proveden je uz primjenu MIG postupka izmjeničnom strujom. Za postupke zavarivanja ploča korišteni su različiti parametri kako bi se odredilo rizično područje parametara za pojavu nepravilnosti kod MIG zavarivanja izmjeničnom strujom. Provedena su 3 zavarivanja kutnih spojeva te 3 zavarivanja sučeljenih spojeva. Analizirana je pojava nepravilnosti na kutnim i sučeljenim spojevima te su specificirane sukladno normi HRN ISO 10042.

### 5.1. Osnovni i dodatni materijali

Kao osnovni materijal za zavarivanje sučeljenog spoja korištena je gnječena aluminijska legura serije 5XXX (Al- Mg). Karakterizira ju niska gustoća te visoka čvrstoća stoga se često upotrebljava u zrakoplovstvu i brodogradnji. Kemijska svojstva navedena su u tablici 4.

**Tablica 4. Kemijski sastav osnovnog materijala sučeljenog spoja [23]**

Si, %	0,30 max
Fe, %	0,07 max
Cu, %	0,20 max
Mn, %	0,20 max
Mg, %	0,50 – 1,10
Cr, %	0,10 max
Zn, %	0,25 max

Kao dodatni materijal kod zavarivanja sučeljenih spojeva korištena je aluminijska legura 5356. U tablici 5. prikazan je kemijski sastav dodatnog materijala.

**Tablica 5. Kemijski sastav dodatnog materijala sučeljenog spoja [23]**

Si, %	0,05
Fe, %	0,09
Cu, %	0,03
Mn, %	0,12
Mg, %	4,9
Cr, %	0,08
Zn, %	<0,01
Ti, %	0,15
Be, %	0,0002

Kod zavarivanja kutnih spojeva kao osnovni materijal korištena je legura 5083, gnječena aluminijska legura iz serije 5XXX (Al – Mg). Žica proizvođača SAF – PRO – ALUFIL AlMg4,5Mn korištena je kao dodatni materijal. Obzirom da je dodatni materijal sličnog kemijskog sastava kao i osnovni materijal, u tablici 6. prikazan je samo kemijski sastav osnovnog materijala.

**Tablica 6. Kemijski sastav osnovnog materijala kutnog spoja [23]**

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

## 5.2. Oprema za zavarivanje

Za postupak zavarivanja korišten je uređaj marke Daihen Varstroj WB-W400. Karakteristike stroja za zavarivanje prikazane su u tablici 7. Korišten je postupak AC MIG impulsnog zavarivanja, dok je kao zaštitni plin korišten Argon klase 5.0.

**Tablica 7. Karakteristike uređaja za zavarivanje Daihen Varstroj WB-W400 [19]**

Broj faza	3
Frekvencija, Hz	50/60
Nazivni ulazni napon, V	400±15%
Ulazna snaga, kW	17
Nazivna struja zavarivanja, A	400
Nazivni napon opterećenja, V	34
Raspon struje zavarivanja, A	30 – 400
Raspon napona zavarivanja, V	12 - 35
Balans (EN omjer)	(-50) – (+50)
Masa, kg	86
Dimenzije, mm	395 x 710 x 762

## 5.3. Postupak eksperimenta

Za eksperiment su korištene ploče debljine 8 mm. Prije postupka zavarivanja, ploče su očišćene metalnom četkom kako bi se uklonio sloj oksida s površine te zatim očišćene acetilenom. Nakon pripreme ploča, postavljeni su parametri za zavarivanje. U tablicama 8. i 9. prikazani su parametri za zavarivanje sučeljenih i kutnih spojeva. Sučeljeni spojevi označeni su brojevima od 1 do 3, dok su kutni spojevi označeni brojevima od 4 do 6.



**Tablica 8. Parametri zavarivanja sučeljenih spojeva**

Broj uzorka	Nazivna struja, A	Nazivni napon, V	Brzina zavarivanja, cm/min	Frekvencija wave pulsa, Hz	Brzina žice m/min
1.	244	24,6	56	3	15
2.	230	25,8	56	3	16,1
3.	246	24,5	46	3	16,1

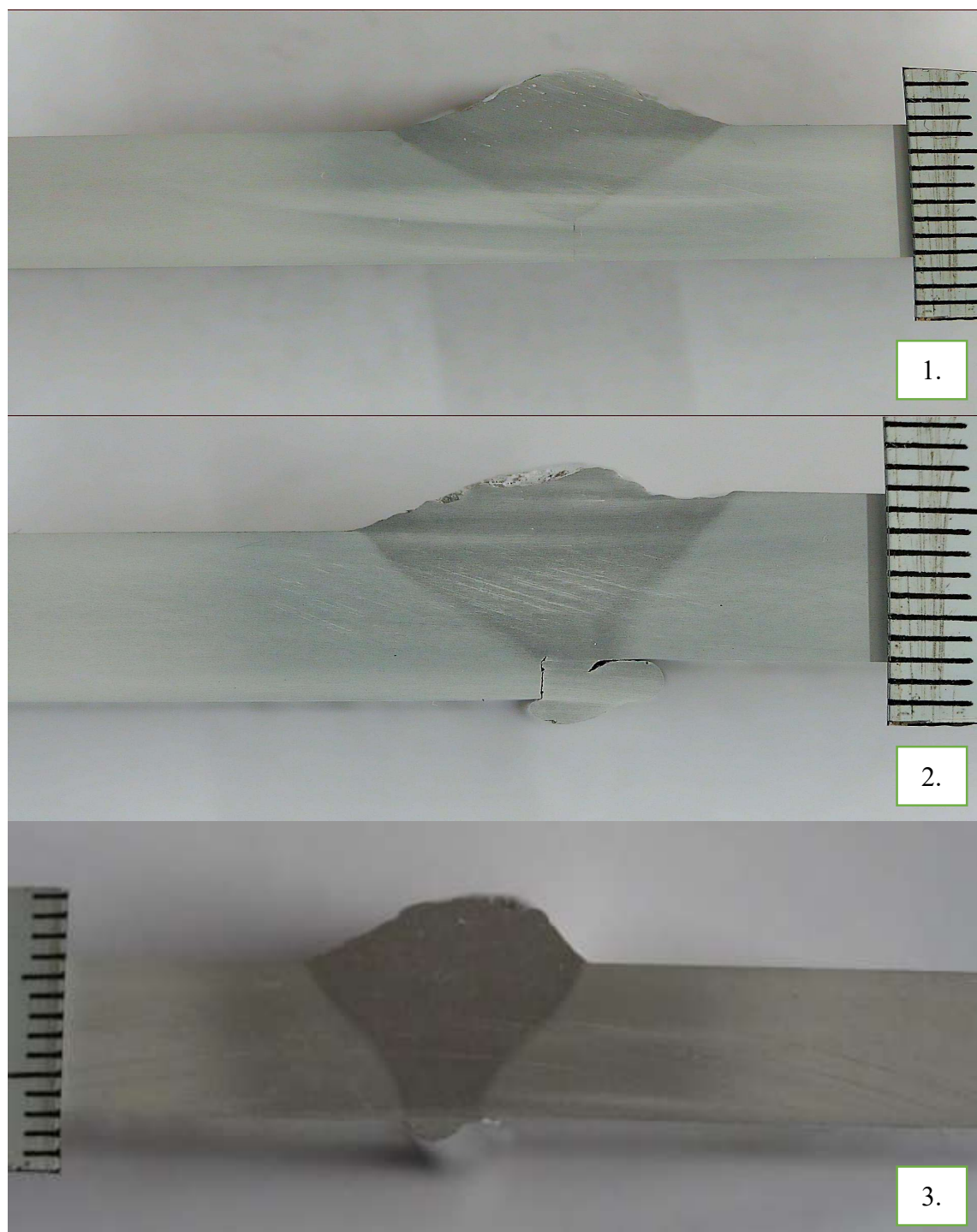
**Tablica 9. Parametri zavarivanja kutnih spojeva**

Broj uzorka	Nazivna struja, A	Nazivni napon, V	Brzina zavarivanja, cm/min	Frekvencija pulsa, Hz	Balans, %
4.	200	23,5	35	3	0
5.	200	23,5	41	3	+30
6.	200	23,5	48	3	-30

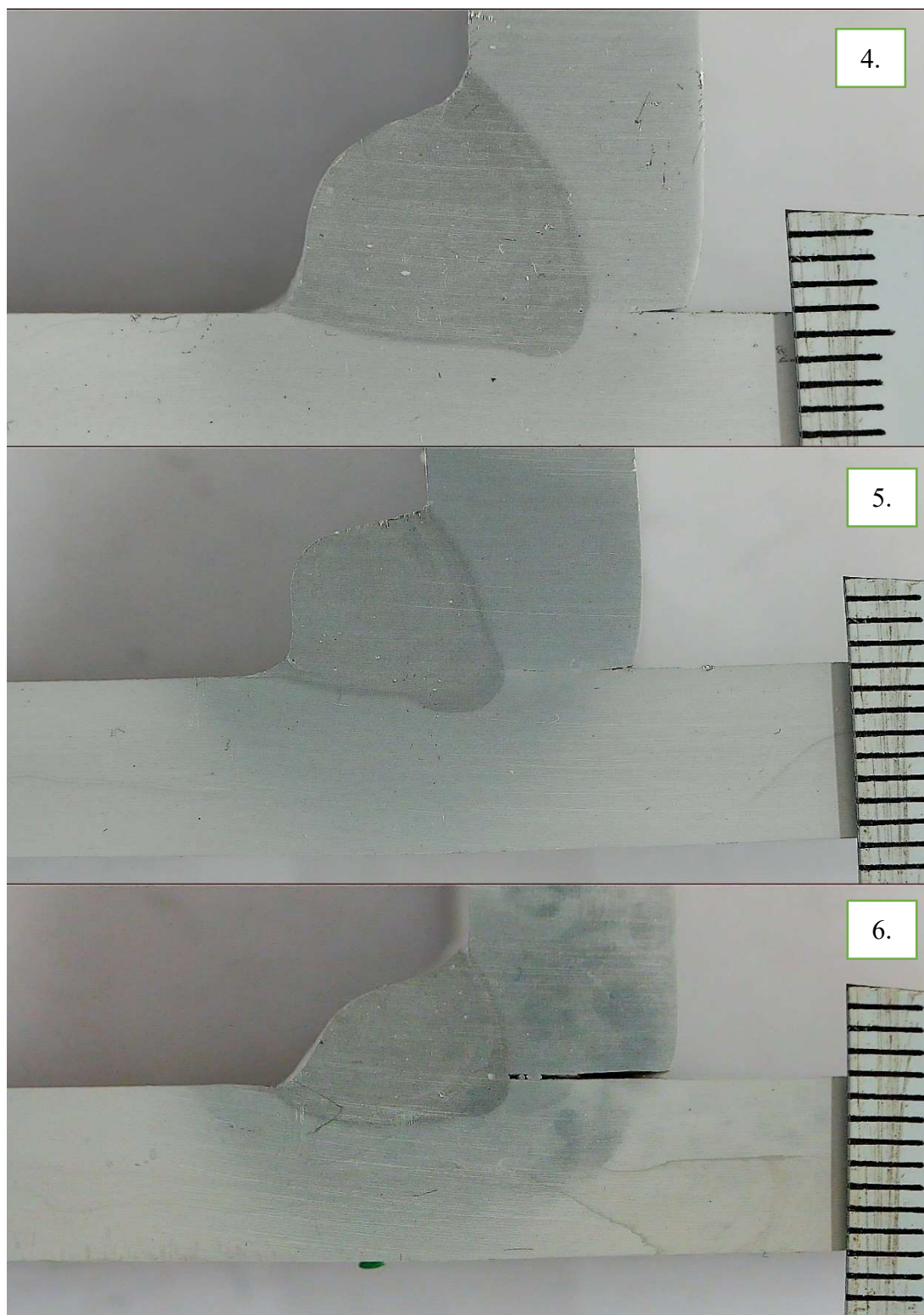
### 5.3. Dobiveni makrouzorci

Nakon postupka zavarivanja, izrezani su makrouzorci kako bi se provela analiza nepravilnosti. Dobiveni makrouzorci su brušeni i polirani. Nakon provedenog poliranja, uzorci su nagriženi u kiseline kako bi struktura zavara bila vidljiva. Nakon nagrizanja uzorci su isprani u vodi te ostavljeni da se osuše. Postupak nagrizanja odvijao se u Laboratoriju za zaštitu materijala. Na

slikama 28. i 29. prikazani su makrouzorci sučeljenog i kutnog spoja. Makrouzorci su označeni slikama od 1 do 6.



**Slika 28. Makrouzorci sučeljenih spojeva**

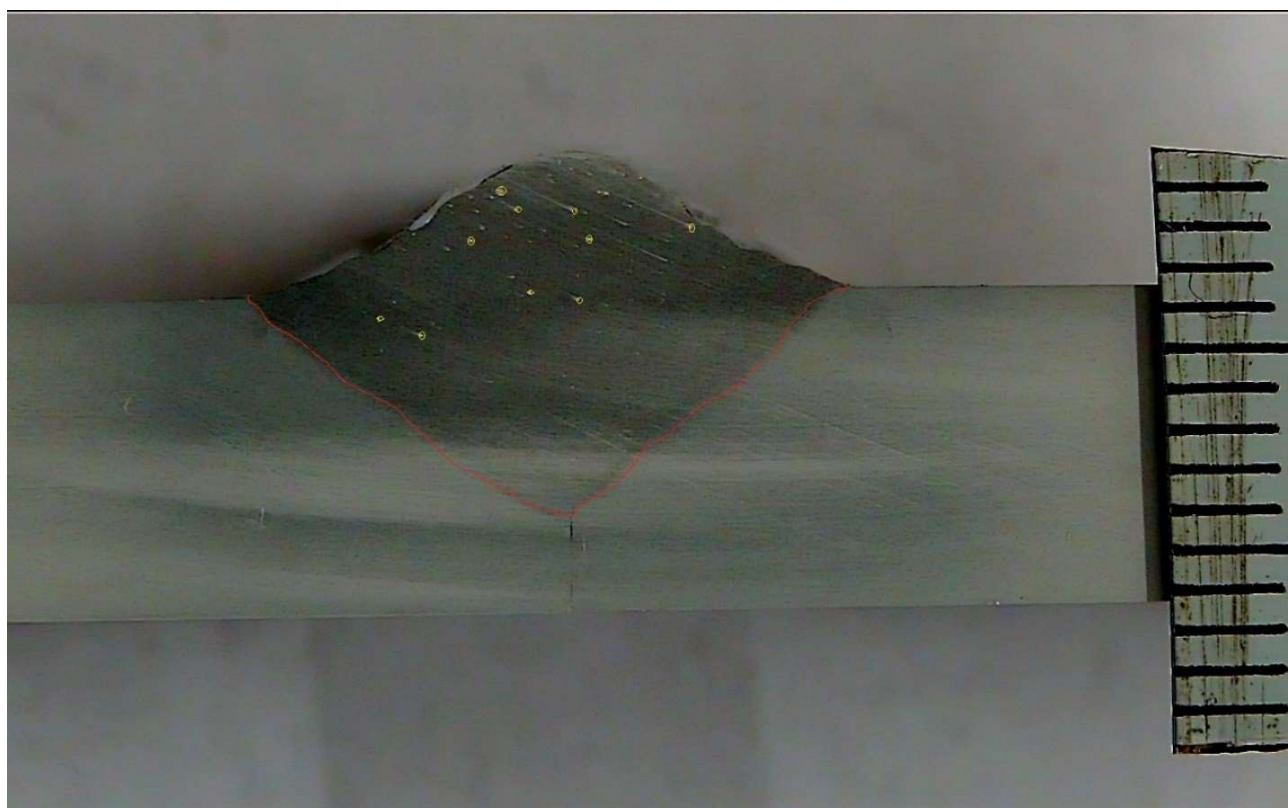


**Slika 29. Makrouzorci kutnih spojeva**

#### 5.4. Makroanaliza uzoraka

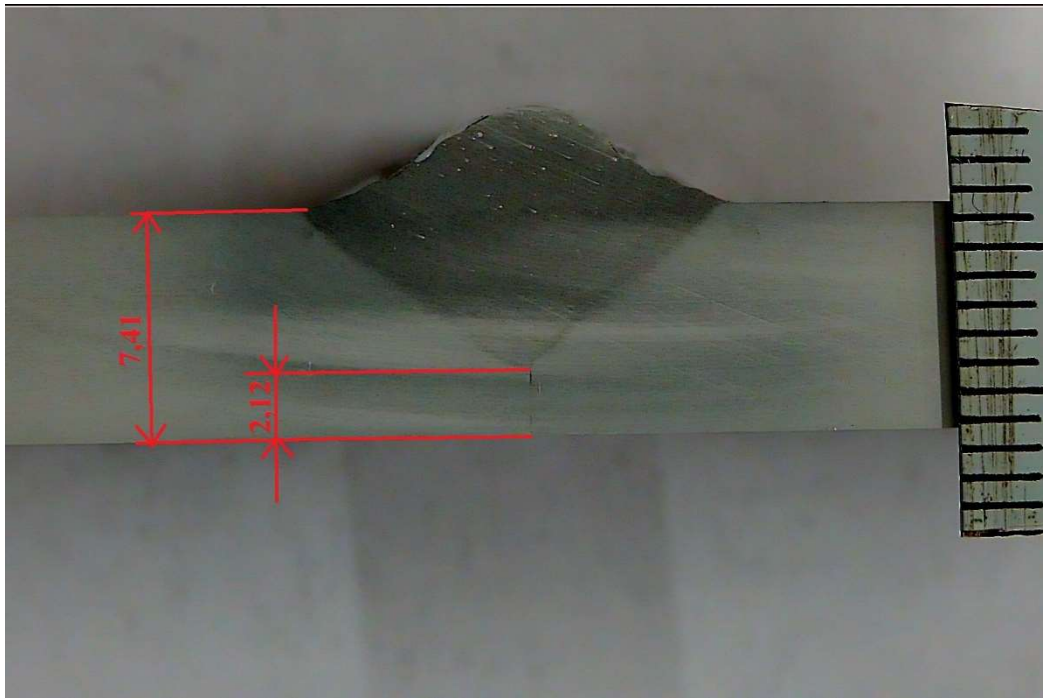
Makroanaliza uzoraka primjenjuje se kako bi se vidjele karakteristike zavora, širina zone utjecaja topline, linija staljivanja osnovnog i dodatnog materijala te moguće nepravilnosti u zavaru.

Kontura zavora te najveće pore makrouzorka 1. prikazane su na slici 30. Također, vidljivo je nedovoljno protaljivanje korijena zavora i preveliko nadvišenje zavora. Nedovoljno protaljivanje korijena posljedica je nedovoljnog zazora prilikom zavarivanja. Pojavu poroznosti kod aluminijskih i aluminijskih legura gotovo je nemoguće izbjeći. Prema normi ISO 10042 i Dodatku A, pogreška broj 2012 jednoliko raspoređena poroznost iznosi 3 % što je ocijenjeno kvalitetom D.



**Slika 30. Makroanaliza uzorka 1.**

Prema normi ISO 10042, pogreška broj 402 nedovoljna penetracija u uzorku 1. zadovoljava ograničenja kvalitete D. Na slici 31. prikazana su mjerenja nedovoljne penetracije uzorka 1. dok su u tablici 10. prikazane dobivene vrijednosti te razina kvalitete D.

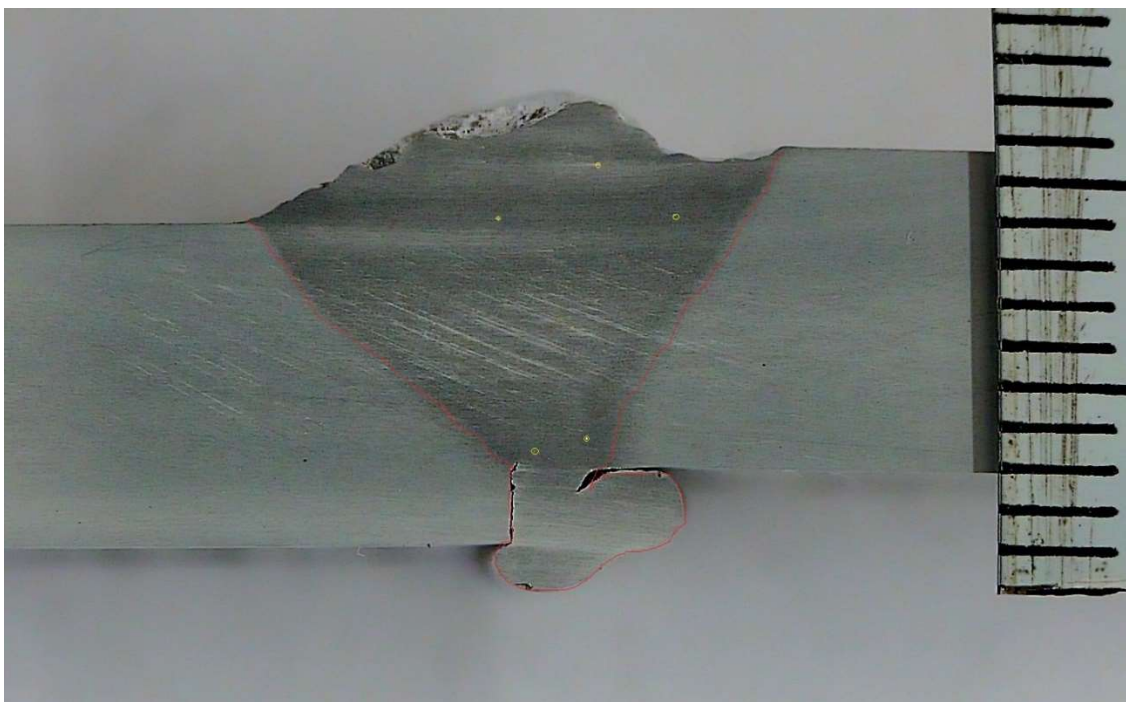


**Slika 31. Mjerenja nedovoljne penetracije uzroka 1.**

**Tablica 10. Izmjerene vrijednosti nedovoljne penetracije uzroka 1.**

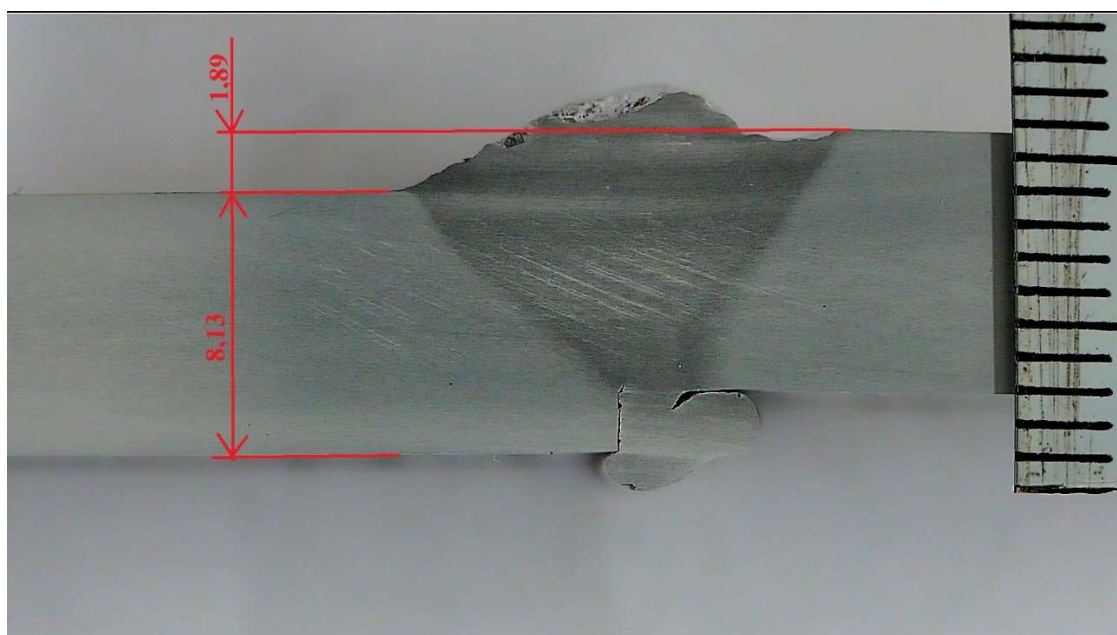
Ograničenja kvalitete D	$h \leq 0,4 s$
h (mm)	2,21
s (mm)	7,41

Prilikom zavarivanja uzroka 2. došlo je do smicanja ploča što je rezultiralo nepravilnim formiranjem korijena zavar. Vidljiv je preveliki provar, te su mogu uočiti pore ali u manjoj količini nego kod uzorka 1. Na slici 32. označena je kontura zavar i prisutnost pora uzorka 2.



**Slika 32. Makroanaliza uzorka 2.**

Prema normi ISO 10042 i Dodatku A, pogreška broj 2012 jednoliko raspoređena poroznost iznosi 2 % što je ocijenjeno kvalitetom C. Pogreška 502 nepravilnost ocijenjena je kvalitetom C, a uzrok pogreške je loša priprema. Na slici 33. prikazane su izmjere uzorka 2. dok su u tablici 11. prikazane izmjerene vrijednosti te ograničenja kvalitete C.



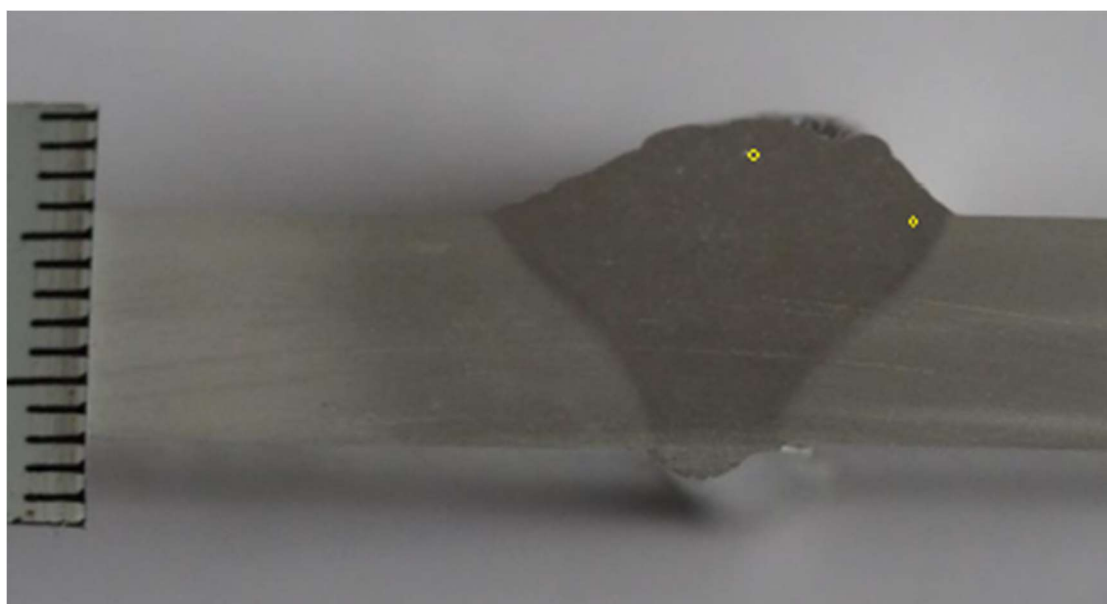
**Slika 33. Izmjere uzorka 2.**

**Tablica 11. Izmjerene vrijednosti uzorka 2.**

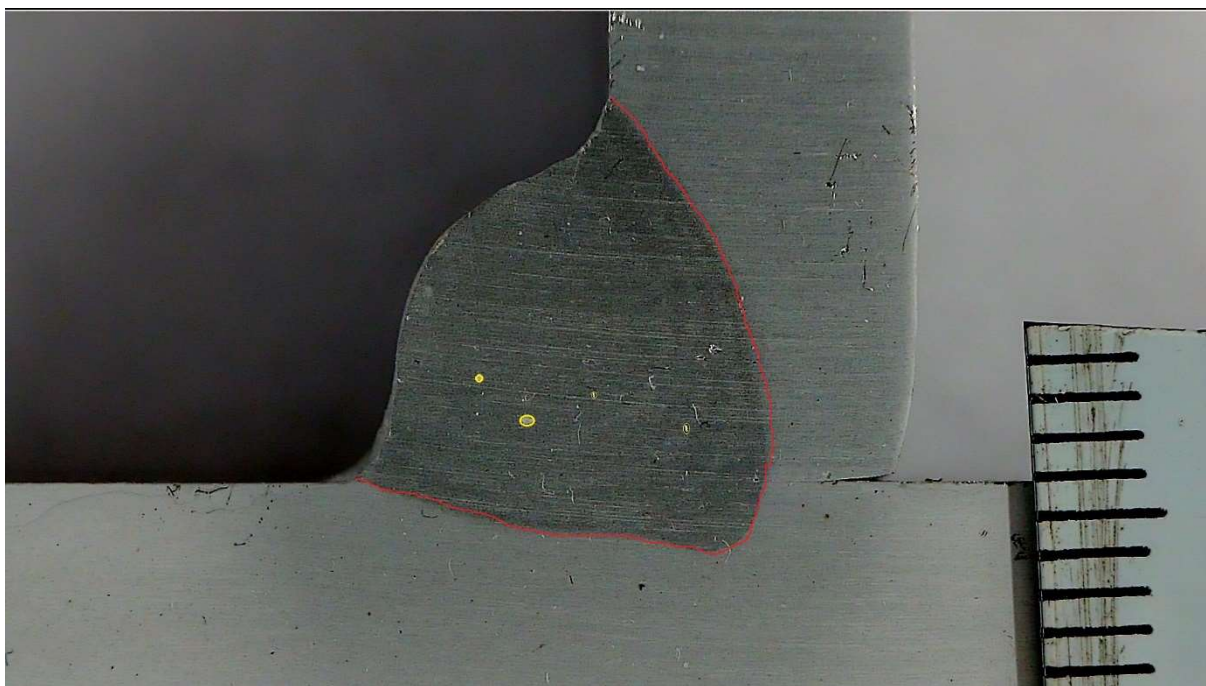
Ograničenja kvalitete C	$h \leq 0,3 t$
$t$ (mm)	8,13
$h$ (mm)	1,89

Uzorak 3. prikazan na slici 34. sadrži nepravilno formiran korijen te nadvišenje zavora. Vidljiv je vrlo nizak udio poroznosti u zavarenom spoju.

Pogreška broj 2012 jednoliko raspoređena poroznost iznosi 0,5 % što je ocijenjeno kvalitetom B.

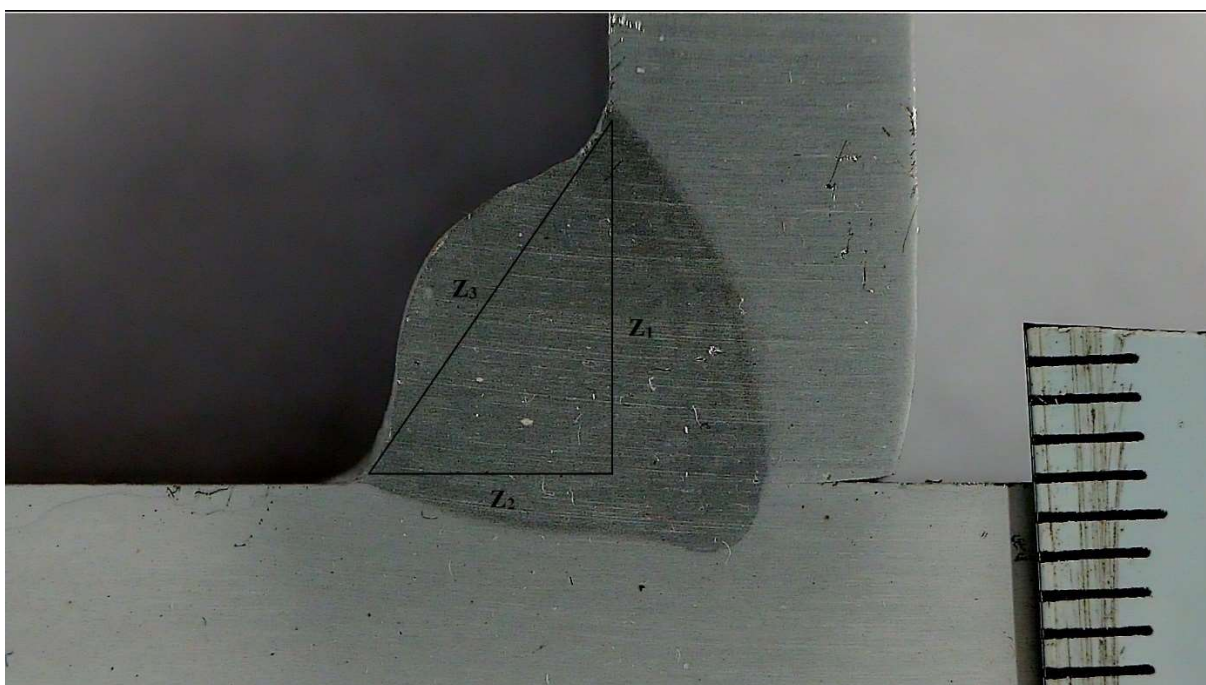
**Slika 34. Makroanaliza uzorka 3**

Na slici 35. označena je kontura zavora te najveće pore uzorka 4. Pogreška 2012 jednoliko raspoređena poroznost iznosi 2 % što je prema normi ocijenjeno razinom kvalitete C. Također, vidljiva je velika konveksnost zavora što može biti rezultat krive tehnike rada odnosno nepravilnog nagiba pištolja tijekom zavarivanja te nepravilna geometrija zavora.



**Slika 35. Makroanaliza uzorka 4.**

Geometrija zavora prikazana je na slici 36. te tablici 12. Podaci u tablici 12. dokazuju prisutnost pogreške nesimetričnog kutnog zavora. Iznosi geometrije zavora izmjereni su pomoću programa ImageJ.



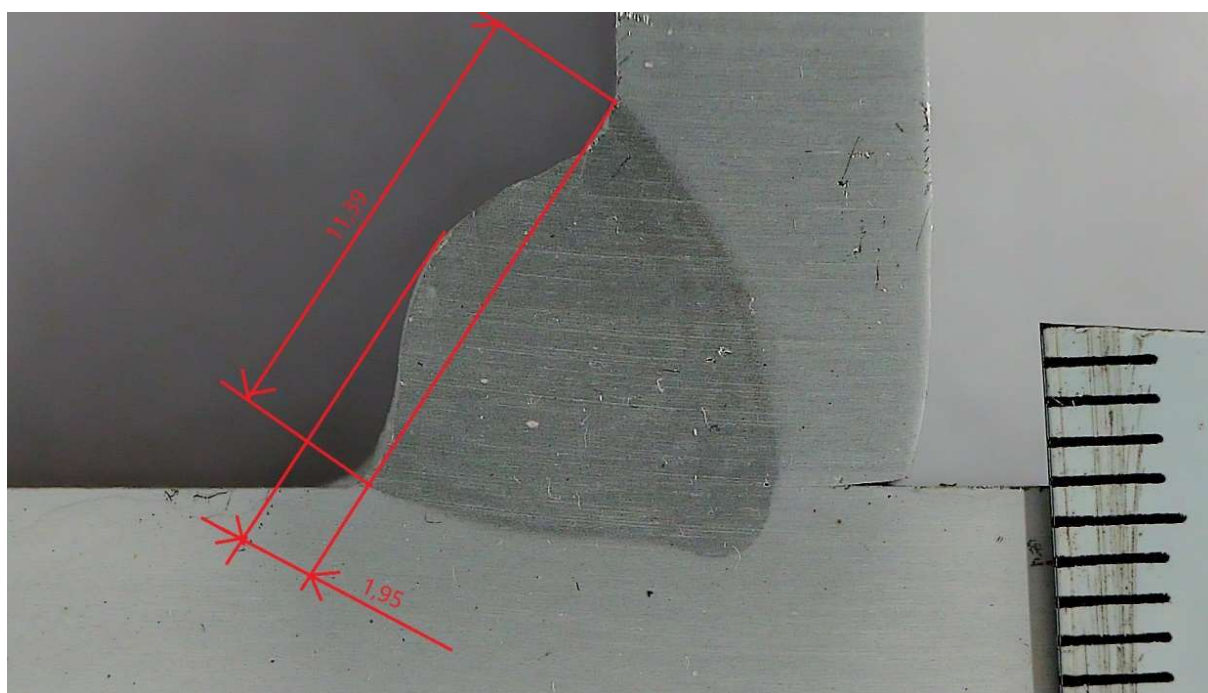
**Slika 36. Geometrija zavora uzorka 4.**



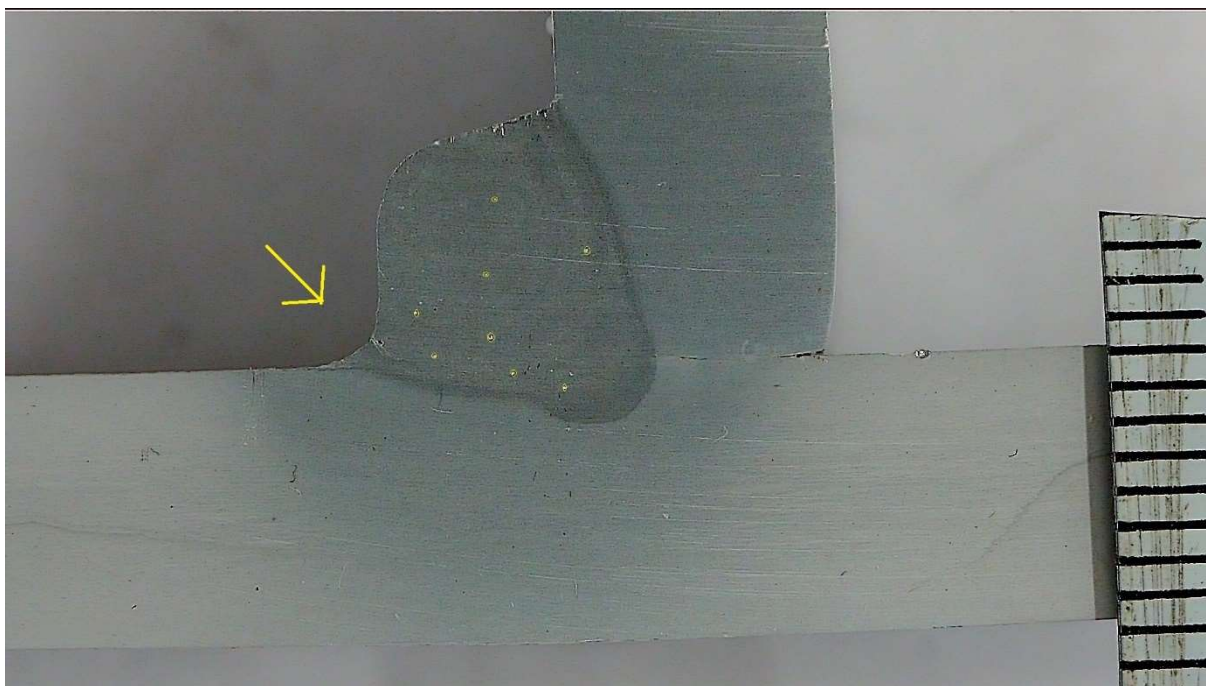
**Tablica 12. Geometrija zavora uzorka 4.**

Z <sub>1</sub> , mm	9,16
Z <sub>2</sub> , mm	6,31
Z <sub>3</sub> , mm	11,10

Pogreška 503 prevelika konveksnost zavora zadovoljava ograničenja razine B. Izmjerene vrijednosti uzorka 4. prikazane su na slici 37.

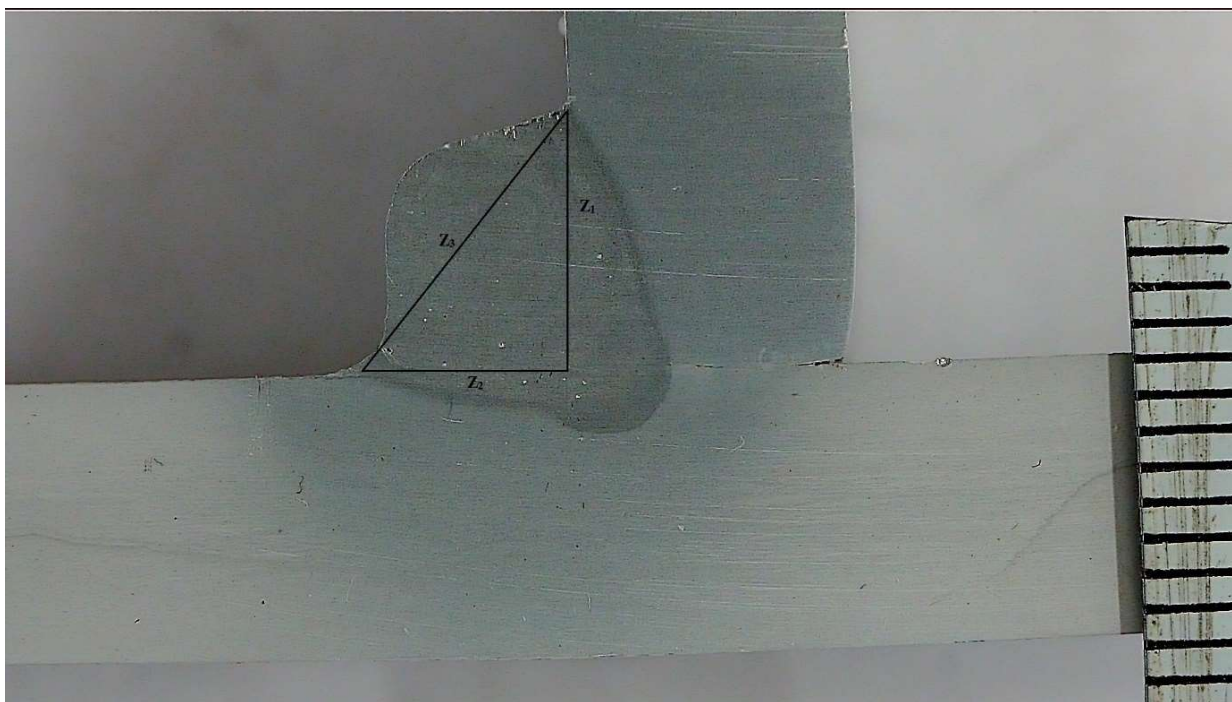
**Slika 37. Vrijednosti nadvišenja zavora uzorka 4.**

Na uzorku 5. vidljiva je prevelika konveksnost zavora kao posljedica nepravilnog nagiba pištolja za zavarivanje tijekom postupka zavarivanja. Također je vidljiva i prisutnost poroznosti i ugorina. Ugorine su nepravilnosti koje karakteriziraju oštre udubine uz zavar. Prema normi ISO 10042, pogreška 2012, jednoliko raspoređena poroznost, iznosi 3 % što je ocijenjeno razinom kvalitete D. Na slici 38. prikazane su najveće poroznosti te je strjelicom označena prisutnost ugorina.



**Slika 38. Makroanaliza uzorka 5.**

Na uzorku 5. također je vidljiva nepravilna geometrija zavora što je i prikazano na slici 39. i tablici 13. Iznosi geometrije zavora izmjereni su pomoću programa ImageJ.

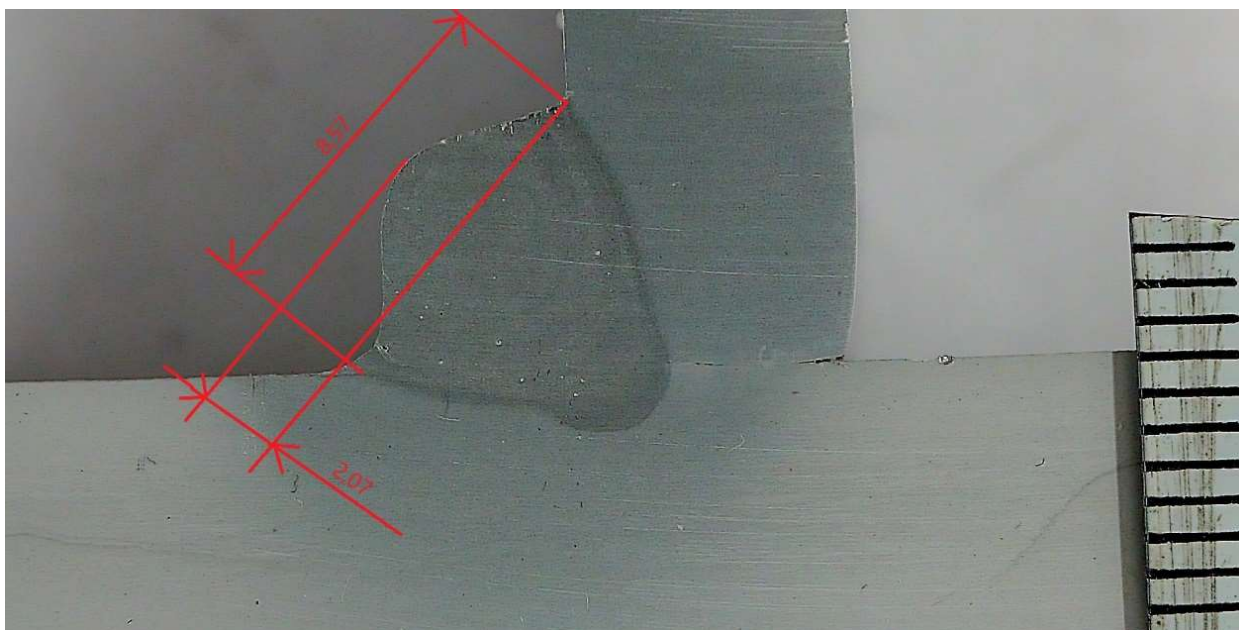


**Slika 39. Geometrija zavora uzorka 5.**

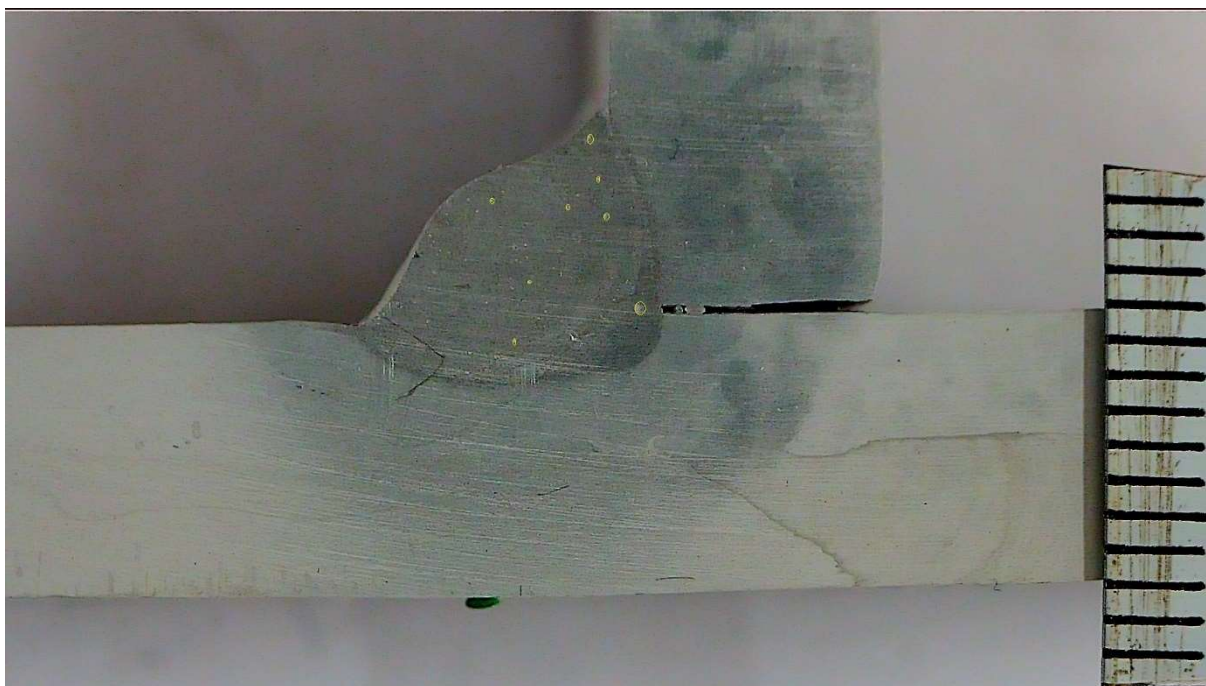
**Tablica 13. Geometrija zavora uzorka 5.**

Z <sub>1</sub> , mm	7,18
Z <sub>2</sub> , mm	5,68
Z <sub>3</sub> , mm	9,17

Pogreška 503, prevelika konveksnost zavora, zadovoljava ograničenja razine B. Izmjerene vrijednosti prikazane su na slici 40.

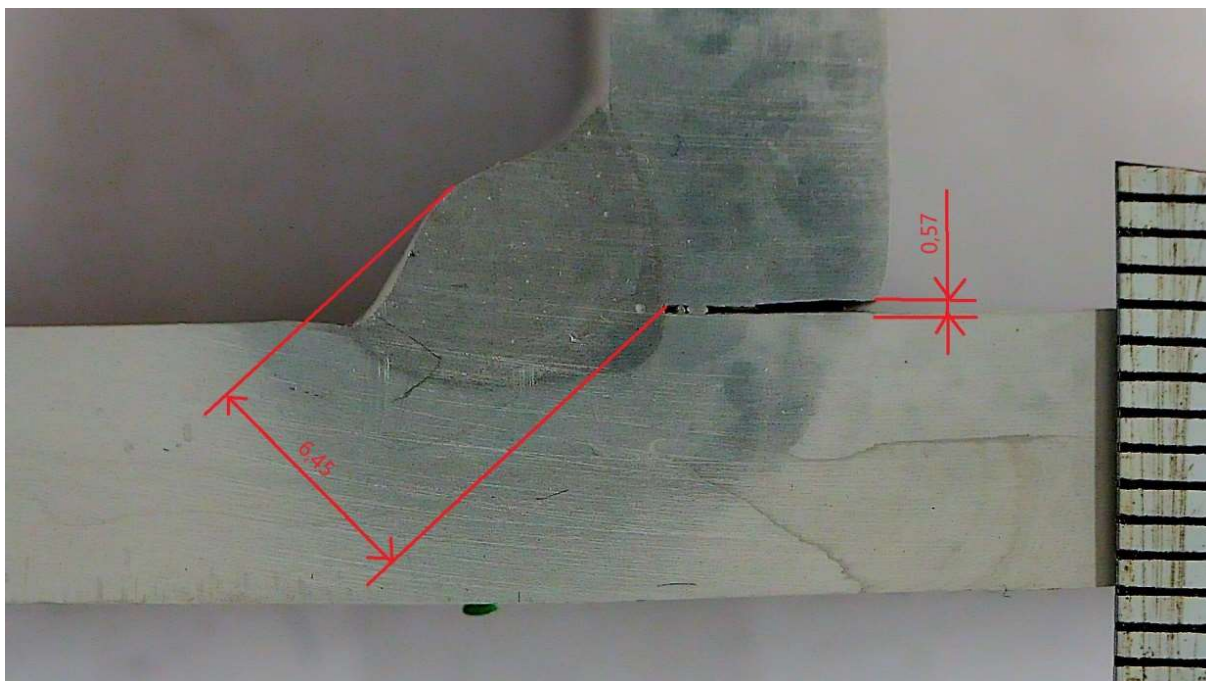
**Slika 40. Vrijednosti nadvišenja zavora uzorka 5.**

Slika 41. prikazuje uzorak 6. kod kojeg je vidljiv veliki udio poroznosti, te su najveće poroznosti i prikazane. Prema normi, pogreška 2012, jednoliko raspoređena poroznost, iznosi 4 % što je ocijenjeno razinom kvalitete D. Također, došlo je do odvajanja ploča, a razlog tomu nedovoljna priprema prije samog postupka zavarivanja. Odvajanje ploča ima za posljedicu smanjenu čvrstoću zavora.



**Slika 41. Makroanaliza uzorka 6.**

Nepravilnost 607, netočan razmak za kutni spoj ocijenjen je kvalitetom B. Na slici 42. su prikazane izmjerene vrijednosti.



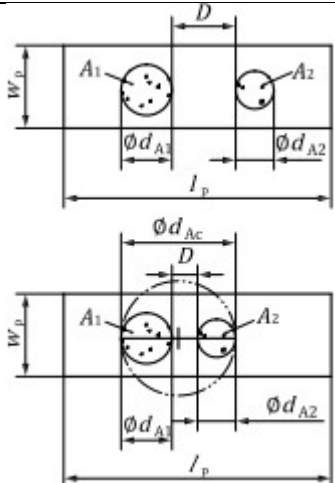
**Slika 42. Izmjerene vrijednosti uzorka 6.**

---

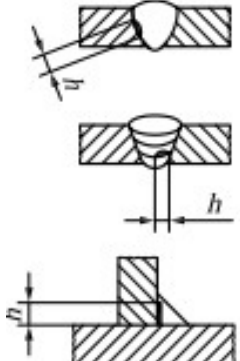
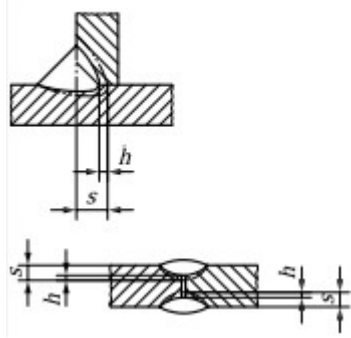
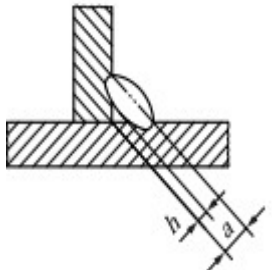
**5.5. Specificiranje nepravilnosti prema normi HRN ISO 10042:2005**

Ocjenjivanje kvalitete zavara provedeno je prema normi ISO 10042:2005. Ocjenjivanje se provodi u 3 razine kvalitete, gdje razina B predstavlja najvišu kvalitetu zavara. Ova norma odnosi se na nepravilnosti zavara kod aluminija i njegovih legura dobivenih elektrolučnim postupkom zavarivanja. U tablicama 14., 15. i 16. uzorci su specificirani prema navedenoj normi.

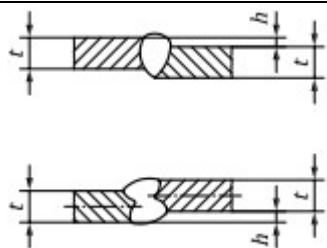
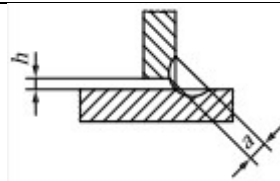
Tablica 14. Specificiranje unutarnjih nepravilnosti [22]

Unutarnje nepravilnosti		Uzorci					
Nepravilnost	Napomene	1.	2.	3.	4.	5.	6.
Pukotina	Sve vrste pukotina izuzev krater pukotina	B	B	B	B	B	Nije dopušteno
Mikropukotina	Pukotine vidljive jedino pod mikroskopom (x50)	B	B	B	B	B	B
Plinski mjehurić – pora	Maksimalna dimenzija: B kvaliteta: 4 mm C kvaliteta: 5 mm D kvaliteta: 6 mm	B	B	B	B	B	B
Jednoliko raspoređena poroznost	Primjeri dani u Dodatku A	D	C	B	C	D	D
Lokalizirana poroznost	 <p>B kvaliteta: <math>d_A \leq 15 \text{ mm}</math> ili <math>d_{A \text{ max}} \leq w_p</math>  C kvaliteta: <math>d_A \leq 20 \text{ mm}</math> ili <math>d_{A \text{ max}} \leq w_p</math>  D kvaliteta: <math>d_A \leq 25 \text{ mm}</math> ili <math>d_{A \text{ max}} \leq w_p/2</math></p>	B	B	B	B	B	B
Linearna poroznost	/	B	B	B	B	B	B
Izduženi plinski uključak	/	B	B	B	B	B	B

Tablica 15. Specificiranje unutarnjih nepravilnosti [22]

Unutarnje nepravilnosti		Uzorci					
Nepravilnosti	Napomene	1.	2.	3.	4.	5.	6.
Uključak oksida	/	B	B	B	B	B	B
Uključak stranog metala	/	B	B	B	B	B	B
Nepotpuno staljivanje	 <p>Kvaliteta B: nije dopušteno Kvaliteta C: <math>h = \max 2 \text{ mm}</math> Kvaliteta D: <math>h = \max 3 \text{ mm}</math></p>	B	B	B	B	B	B
Nepotpuna penetracija	 <p>Kvaliteta B: nije dopušteno Kvaliteta C: <math>h = \max 2 \text{ mm}</math> Kvaliteta D: <math>h = \max 3 \text{ mm}</math></p>	D	B	B	B	B	B
Nepotpuna penetracija korijena kod kutnih zavora	 <p>Kvaliteta B: nije dopušteno Kvaliteta C: <math>h = \max 2 \text{ mm}</math> Kvaliteta D: <math>h = \max 3 \text{ mm}</math></p>	/	/	/	B	B	B

Tablica 16. Specificiranje nepravilnosti u geometriji spoja [22]

Nepravilnosti u geometriji spoja		Uzorci					
Nepravilnosti	Napomene	1.	2.	3.	4.	5.	6.
Linearno odstupanje (neporavnatost)	 Kvaliteta B: $h = \max 2 \text{ mm}$ Kvaliteta C: $h = \max 4 \text{ mm}$ Kvaliteta D: $h = \max 8 \text{ mm}$	B	C	B	/	/	/
Netočan razmak za kutni spoj	 Kvaliteta B: $h = \max 3 \text{ mm}$ Kvaliteta C: $h = \max 2 \text{ mm}$ Kvaliteta D: $h = \max 3 \text{ mm}$	/	/	/	B	B	B

Prema normi ISO 10042 gledajući unutarnje nepravilnosti te nepravilnosti u geometriji spoja, kod sučeljenih spojeva, uzorak 1. ocijenjen je najlošijom kvalitetom, dok je kod kutnih spojeva uzorak 6. ocijenjen najlošijom kvalitetom. Uzorak 2. kod sučeljenih spojeva te uzorak 4. kod kutnih spojeva ocijenjeni su kao najbolji uzroci, odnosno uzorci s najmanje nepravilnosti. Prilikom zavarivanja aluminija i aluminijevih legura neke od nepravilnosti, poput poroznosti, gotovo je nemoguće u potpunosti izbjeći. Uočljivo je kako pri većim brzinama zavarivanja dolazi do nastanka većeg broja nepravilnosti u zavarenom spoju. Zaključno tomu, rizično područje parametara za pojavu nepravilnosti kod MIG zavarivanja izmjeničnom strujom je:

- Sučeljeni spoj: Nazivna struja : 244 A  
     Nazivni napon: 24,6 V  
     Brzina zavarivanja: 56 cm/min  
     Frekvencija wave pulsa: 3 Hz  
     Brzina žice: 15 m/min



- Kutni spoj: Nazivna struja: 200 A

Nazivni napon: 23,5 V

Brzina zavarivanja: 48 cm/min

Frekvencija wave pulsa: 3 Hz

Balans: -30 %

## 6. ZAKLJUČAK

Aluminijeve legure imaju širok spektar uporabe zahvaljujući maloj gustoći, dobroj toplinskoj vodljivosti te dobroj obradljivosti. Zahvaljujući aluminijevom oksidu imaju dobru otpornost na koroziju, no istovremeno on predstavlja problem pri zavarivanju, s obzirom da mu je talište znatno iznad tališta samog aluminijsa. Kao posljedicu toga, važno je ukloniti aluminijev oksid prije postupka zavarivanja. Prilikom zavarivanja teži se postizanju sličnih svojstava i u osnovnom materijalu i u dodatnom materijalu. Aluminijeve legure predstavljaju problem pri zavarivanju jer dolazi do niza problema povezanih sa zavarljivošću. Najčešće nepravilnosti koje se pojavljuju te samim time i narušavaju kvalitetu zavarenog spoja su: poroznost, tople pukotine te uključci oksida. Poroznost nastaje kao posljedica prisutnosti vodika u zavarenom spoju te ju je gotovo nemoguće izbjeći. U eksperimentalnom dijelu određeno je rizično područje parametara za pojavu nepravilnosti pri MIG zavarivanju izmjeničnom strujom. Zavarena su 3 sučeljena spoja te 3 kutna spoja s različitim parametrima. Svakom od uzorka analizirana je pojava nepravilnosti sukladno normi ISO 10042, te je svakom uzorku pridodana odgovarajuća razina kvalitete. Svi uzorci sadržavali su određeni udio poroznosti. Također, uočen je značajan utjecaj brzine zavarivanja kod pojave nepravilnosti. Uzorci čije su brzine zavarivanja bile više, imali su i viši udio nepravilnosti. Kod sučeljenih spojeva, na prvom uzorku uočeno je nedovoljno protaljšivanje korijena zavara, dok je na drugom uzorku došlo do formiranja prevelikog korijena zavara te je došlo do prevelikog smicanja ploča. Treći uzorak ocijenjen je najvišom kvalitetom, te je sadržavao vrlo nizak udio poroznosti. Uspoređujući kutne spojeve, četvrti uzorak ocijenjen je najboljom kvalitetom iako sadržava određeni udio poroznosti. Peti uzorak karakterizira prisutnost poroznosti i ugorina. Posljednji uzorak (6.) ocijenjen je najlošijom kvalitetom. Razlog tomu je visok udio poroznosti, pojava pukotine te odvajanje ploča prilikom zavarivanja što ima utjecaj i na čvrstoću zavara. Kako bi se dodatno uvidjela razlika između primjenjivanih parametara, preporučuje se provesti dinamička ispitivanja zavarenih spojeva. Na taj način bi se zavarene spojeve izložilo sličnim uvjetima kojima su podložni u stvarnom svijetu. Parametri AC MIG zavarivanja imaju značajan utjecaj u proizvodnji, no važno je poznavati i druge čimbenike koji također utječu na kvalitetu zavarenog spoja. Optimalni parametri, održavanje opreme te poznavanje svojstava materijala koji se zavaruju omogućit će postizanje zadovoljavajuće kvalitete zavarenih spojeva.

**LITERATURA**

- [1] Mathers, G.: The welding of aluminium and its alloys, Woodhead Publishing Ltd., Cambridge, England, 2002.
- [2] Vručinić, G.: Zavarivanje i zavarljivost aluminija i legura, 5.Seminar DTZI, Pula, 2008
- [3] Filetin, T., Kovačiček, F., Indof, J.: Svojstva i primjena materijala, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2006.
- [4] P.G. Sheasby and R. Pinner: The Surface Treatment and Finishing of Aluminum and Its Alloys, 6th Edition
- [5] [www.geology.com](http://www.geology.com), dostupno 14.12.2022.
- [6] E. Balomenos, C. Kemper, P. Diamantopoulos, D. Panias, I. Paspaliaris, B. Friedrich, Enexal: Novel Technologies for Enhanced Energy and Exergy Efficiencies in Primary Aluminium Industry, MJOM, 15 (2009)
- [7] N. L. Sukiman; X. Zhou; N. Birbilis; A.E. Hughes; J. M. C. Mol; S. J. Garcia, X. Zhou; G. E. Thompson, Durability and corrosion of aluminium and its alloys: overview, property space, techniques and developments, Aluminium alloys - new trends in fabrication and applications, Chicago, INTECH, 2012
- [8] Živković D., Anzulović B., Delić D.: Utjecaj morske korozije na kugličareni sloj aluminijske slitine, 2005.
- [9] Ferraris, S., Volpone, L.M.: Aluminium alloys in third millennium shipbuilding: Materials, technologies, perspectives, The Fifth International Forum on Aluminum Ships, Tokyo, 2005
- [10] K. Weman i G. Linden, MIG welding guide, Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 2006
- [11] Gojić, M.: Tehnike spajanja i razdvajanja materijala, Metalurški fakultet, Sisak, 2008.
- [12] Garašić. I., MIG/MAG-prezentacije, Zagreb, 2022.
- [13] [www.aedmetals.com](http://www.aedmetals.com), dostupno 5.1.2023.
- [14] <https://unimig.com.au/spool-gun-vs-push-pull-gun/>, dostupno 11.2.2023.
- [15] Više autora: Gas metal arc welding, Product and procedure selection, The Lincoln Electric Company, 2004.
- [16] Garašić, I., Kožuh, Z.: Priručnik iz kolegija strojevi i oprema za zavarivanje, FSB, Zagreb, 2016.
- [17] Više autora: A Study on the Effect of Current Waveform on Intermetallics Formation and the Weldability of Dissimilar Materials Welded Joints (AA5052 Alloy—GI Steel) in AC Pulse GMAW, 2021.

- 
- [18] <https://weldingmastermind.com/understanding-ac-and-dc-for-mig-welding/>, dostupno 7.1.2023.
- [19] Priručnik za upotrebu Welbee Inverter W400, AC/DC Pulsed MIG Welding Power Source
- [20] Više autora: The Effect of EN Ratio and Current on Microstructural and Mechanical Properties of Weld Joined by AC-GMAW on Square Groove Butt Joints, 2017
- [21] Dubovečak L.: Primjena aluminijskih legura u brodogradnji, Završni rad, FSB, 2021.
- [22] Norma HRN ISO 10042
- [23] [www.azom.com](http://www.azom.com), dostupno 2.2.2023.