

# MIG zavarivanje aluminijskih legura primjenom dvostrukog pulsa

---

Špehar, Jelena

Master's thesis / Diplomski rad

2021

*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:235:667354>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-08-09**

*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **DIPLOMSKI RAD**

**Jelena Špehar**

Zagreb, 2021.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# DIPLOMSKI RAD

Mentor:

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

Student:

Jelena Špehar

Zagreb, 2021.

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

Zahvaljujem mentoru prof. dr. sc. Ivici Garašiću na pruženom znanju i stručnim savjetima koje sam dobila tijekom izrade rada, ali i tijekom cijelog studija. Također, zahvaljujem se asistentici dr.sc. Maji Jurici i asistentu Ivanu Juriću na izdvojenom vremenu i pomoći pri izradi ovog rada.

Zahvaljujem svojoj obitelji i prijateljima za svu podršku koju su mi pružili tijekom studiranja, u onim lijepim i manje lijepim trenucima. Zahvaljujem svom Robiju na svojoj podršci, strpljenju i motivaciji pruženoj tijekom svih ovih godina.

Najveće hvala ide mojim dragim roditeljima Višnji i Marku na beskrajnom strpljenju i ljubavi koju su mi pružili. Ovo je za vas.

Jelena Špehar



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



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

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum:	Prilog:
Klasa:	602 - 04 / 21 - 6 / 1
Ur. broj:	15 - 1703 - 21 -

## DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **JELENA ŠPEHAR** Mat. br.: 0035197960

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **MIG zavarivanje aluminijskih legura primjenom dvostrukog pulsa**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Double pulse MIG welding of aluminum alloys**

Opis zadatka:

U teorijskom dijelu rada potrebno je proučiti primjenu i zavarljivost aluminijskih legura serije 5000 i 6000, te navesti i opisati sve značajke MIG postupka pri zavarivanju istih. Potrebno je analizirati moguće načine prijenosa metala u električnom luku kod MIG postupka pri zavarivanju aluminijske legure te posebno opisati primjenu dvostrukog pulsa. Usporediti dinamičku karakteristiku  $u_i=f(t)$  za konvencionalno pulsno zavarivanje i opciju dvostruke razine pulsne struje.

U eksperimentalnom dijelu rada potrebno je, za odgovarajuću debljinu limova aluminijske legure serije 5000 ili 6000, definirati parametre zavarivanja koristeći prijenos metala dvostrukim pulsom i konvencionalnim pulsom strujama. Za zavarene spojeve provesti razorna i nerazorna ispitivanja sukladno normi HRN EN ISO 15614-2. Na temelju rezultata provesti komparativnu analizu te istaknuti prednosti i nedostatke dvostrukog pulsa u odnosu na konvencionalno zavarivanje pulsom strujama.

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

Zadatak zadan:  
12. studenog 2020.

Rok predaje rada:  
14. siječnja 2021.

Predviđeni datum obrane:  
18. siječnja do 22. siječnja 2021.

Zadatak zadao:  
prof. dr. sc. Ivica Garašić

Predsjednica Povjerenstva:  
prof. dr. sc. Biserka Runje

**SADRŽAJ**

POPIS SLIKA .....	III
POPIS TABLICA .....	V
POPIS KRATICA .....	VII
SAŽETAK .....	IX
SUMMARY .....	X
1. UVOD .....	1
2. ALUMINIJ .....	2
2.1. Povijest aluminija .....	2
2.2. Svojstva aluminija .....	3
2.3. Proizvodnja aluminija .....	5
2.3.1. Boksit .....	7
3. ALUMINIJSKE LEGURE .....	9
3.2. Serija 5XXX .....	14
3.2.1. Primjena legura serije 5XXX .....	16
3.3. Serija 6XXX .....	18
3.3.1. Primjena legura serije 6XXX .....	21
4. ZAVARLJIVOST ALUMINIJA I NJEGOVIH LEGURA .....	23
4.1. Poroznost u zavaru .....	23
4.2. Problemi nastali zbog oksidnog filma .....	26
4.3. Nastanak toplih pukotina .....	28
4.4. Smanjenje čvrstoće uslijed zavarivanja .....	30
4.4.1. Metal zavara .....	30
4.4.2. Zona utjecaja topline .....	31
4.5. Zavarljivost aluminijskih legura serije 5XXX i 6XXX .....	33
5. ELEKTROLUČNO ZAVARIVANJE TALJIVOM ELEKTRODOM U ZAŠTITI INERTNOG PLINA (MIG) .....	36
5.1. Oprema za MIG zavarivanje .....	38
5.1.1. Izvor struje za zavarivanje .....	38
5.1.2. Sustav za dobavu žice .....	39
5.2. Načini prijenosa metala prilikom MIG zavarivanja .....	39
5.2.1. Prijenos kratkim spojem .....	40
5.2.2. Prijenos prijelaznim lukom .....	42
5.2.3. Prijenos štrcajućim lukom .....	43
5.2.4. Impulsno zavarivanja (P-GMAW) .....	44
5.2.5. Zavarivanje dvostrukim impulsom (DP-GMAW) .....	45
5.3. Izbor zaštitnog plina .....	47
5.4. Tehnika zavarivanja .....	49
6. DINAMIČKA KARAKTERISTIKA IZVORA STRUJE .....	50
7. EKSPERIMENTALNI DIO RADA .....	52
7.1. Ispitivanje dinamičke karakteristike .....	53

---

7.1.1.	Oprema za zavarivanje i mjerni uređaji .....	53
7.1.2.	Osnovni i dodatni materijal .....	55
7.1.3.	Postupak izrade .....	57
7.1.4.	Dobiveni rezultati.....	58
7.2.	Izrada zavara konvencionalnim puls postupkom i postupkom s duplim pulsom.....	63
7.2.1.	Oprema za zavarivanje .....	63
7.2.2.	Osnovni i dodatni materijal .....	64
7.2.3.	Postupak izrade .....	65
7.2.4.	Analiza zavara .....	69
7.2.5.	Analiza makroizbrusaka .....	72
8.	ZAKLJUČAK.....	82

## POPIS SLIKA

Slika 1.	Količine materijala i energije potrebne za dobivanje 1000 kg aluminija [4] .....	7
Slika 2.	Al-Mg dijagram ravnoteže [15] .....	15
Slika 3.	Fazni dijagram Al-Mg <sub>2</sub> Si[15] .....	19
Slika 4.	Dijagram topljivosti vodika u aluminiju [1] .....	24
Slika 5.	Prikaz poroznosti na sučeljenom spoju ploča - ploča debljine 6 mm [1].....	24
Slika 6.	Oksidni film u kutnom zavaru [1] .....	27
Slika 7.	Prikaz odabira struje za zavarivanje i mehanizma odstranjivanja oksidnog filma [1] .....	28
Slika 8.	Prikaz tople pukotine nastale pri zavarivanju TIG postupkom [1] .....	29
Slika 9.	Utjecaj koncentracije legiranih elemenata na osjetljivost na pojavu pukotina[1] ...	30
Slika 10.	Utjecaj zavarivanja na legure očvrstnute hladnom deformacijom[1] .....	32
Slika 11.	Utjecaj zavarivanja na precipitacijski očvrstnute legure[1].....	32
Slika 12.	Elektrolučno zavarivanje taljivom elektrodom u zaštiti inertnog plina (MIG) [20], [21] .....	36
Slika 13.	Prikaz terminologije vezane uz MIG zavarivanje [19] .....	37
Slika 14.	Prikaz opreme potrebne za MIG zavarivanje[20],[21].....	38
Slika 15.	Odnos promjera žice i struje zavarivanja ovisno o načinu prijenosa metala[1] ...	40
Slika 16.	Prijenos metala kratkim spojem[22] .....	41
Slika 17.	Prijenos metala prijelaznim lukom[22] .....	42
Slika 18.	Prijenos metala štrcajućim lukom[22].....	43
Slika 19.	Prijenos metala pulsnim zavarivanjem[22] .....	44
Slika 20.	Grafički prikaz impulsnog načina prijenosa metala[24] .....	45
Slika 21.	Prikaz krivulje struje postupka DP-GMAW ovisno o vremenu [27].....	46
Slika 22.	Promjena brzine dobave žice ovisno o promjeni iznosa struje zavarivanja kod DP-GMAW postupka [28].....	47
Slika 23.	Utjecaj izbora plina na protaljivanje kod navarivanja aluminija [29].....	48
Slika 24.	Utjecaj izbora zaštitnog plina na izgled obostranog zavara aluminijske legure i iznosa struje i napona [30].....	48
Slika 25.	Položaj zavarivanja aluminijskih legura MIG postupkom [1].....	49
Slika 26.	Izgled dinamičke karakteristike izvora struje kod pulsnog zavarivanja (gore) i zavarivanja duplim pulsom (dolje) [34] .....	51
Slika 27.	Welbee P500L, Daihen Varstroj .....	53
Slika 28.	Uređaj za automatsko upravljanje Bugo System .....	54
Slika 29.	Osciloskop Tektronix TDS 210 .....	55
Slika 30.	Shematski prikaz sustava za mjerenje dinamičke karakteristike [36].....	55
Slika 31.	Specifikacije žice AlMg5 korištene za navarivanje i zavarivanje [37].....	56
Slika 32.	Boca zaštitnog plina Argon 5.0.....	57
Slika 33.	Prikaz dobivenih navara .....	58
Slika 34.	Dinamička karakteristika izvora struje, P-GMAW, 0,1 s.....	59
Slika 35.	Dinamička karakteristika izvora struje, DP-GMAW, 0,1 s.....	59
Slika 36.	Dinamička karakteristika izvora struje, P-GMAW, 1 s.....	60
Slika 37.	Dinamička karakteristika izvora struje, DP-GMAW, 1s.....	60
Slika 38.	Fronius MagicWave 230i EF.....	63
Slika 39.	Osnovni materijal, aluminijska legura 5086.....	64
Slika 40.	Boca zaštitnog plina Argon 4.8.....	65



Slika 41.	Prikaz položaja komada za TIG zavarivanje .....	65
Slika 42.	Prikaz položaja ploča i pištolja prije MIG zavarivanja .....	66
Slika 43.	Prikaz položaja ploča i pištolja prije MIG zavarivanja .....	66
Slika 44.	Zavar napravljen MIG postupkom duplim pulsom .....	67
Slika 45.	Prikaz zavara nakon zavarivanja duplim pulsom i klasičnim pulsom .....	68
Slika 46.	Prikaz cijelog zavara (lijevo-pulsno, desno-duplo pulsno) .....	69
Slika 47.	Prikaz deformacije zavara.....	69
Slika 48.	Sredstva korištena prilikom ispitivanja penetrantima .....	70
Slika 49.	Zavar nakon nanošenja penetranta i razvijaača .....	71
Slika 50.	Penetrantska metoda provedena na zavaru nastalom MIG zavarivanjem duplim pulsom .....	71
Slika 51.	Penetrantska metoda provedena na zavaru nastalom konvencionalnim zavarivanjem pulsnim strujama .....	72
Slika 52.	Strojno rezanje makroizbrusaka na tračnoj pili .....	73
Slika 53.	Otopina korištena za postupak nagrizanja uzoraka .....	73
Slika 54.	Makroizbrusci nakon postupka nagrizanja .....	74
Slika 55.	Uzorak zavaren postupkom DP-GMAW.....	74
Slika 56.	Detalj uzorka zavarenog postupkom DP-GMAW .....	75
Slika 57.	Uzorak zavaren P-GMAW postupkom .....	75
Slika 58.	Detalj uzorka zavarenog P-GMAW postupkom .....	76
Slika 59.	Analiza geometrije zavara dobivenog postupkom DP-GMAW .....	76
Slika 60.	Analiza geometrije zavara dobivenog P-GMAW postupkom .....	77
Slika 61.	Prikaz konture zavara (DP-GMAW-lijevo, P-GMAW- desno).....	78
Slika 62.	Slika detalja pogreške u zavaru, DP-GMAW .....	79
Slika 63.	Slika detalja pogreške u zavaru, P-GMAW .....	79
Slika 64.	Pogreške u zavaru, P-GMAW.....	80

**POPIS TABLICA**

Tablica 1. Osnovna fizikalna i mehanička svojstva aluminija [2],[3] .....	3
Tablica 2. Numeričke oznake legura aluminija[8],[10],[11].....	10
Tablica 3. Prikaz oblika proizvoda i najčešćih primjena serija aluminijskih legura[1].....	11
Tablica 4. Utjecaj elemenata u tragovima na svojstva Al legura [16].....	20
Tablica 5. Uzroci i prevencija poroznosti u zavaru [1].....	26
Tablica 6. Tehničke karakteristike uređaja Welbee P500L[35] .....	53
Tablica 7. Kemijski sastav legure 5083 .....	56
Tablica 8. Svojstva legure 5083 .....	56
Tablica 9. Parametri prilikom navarivanja.....	57
Tablica 10. Unos topline prilikom navarivanja pulsnim i duplim pulsnim strujama .....	61
Tablica 11. Specifikacije uređaja Fronius MagicWave 230i EF [38] .....	63
Tablica 12. Kemijski sastav aluminijske legure 5086 .....	64
Tablica 13. Aluminijska legura 5086 .....	64
Tablica 14. Parametri zavarivanja .....	67
Tablica 15. Prikaz veličina izmjerenih na uzorku zavarenom DP-GMAW postupkom .....	77
Tablica 16. Prikaz veličina izmjerenih na uzorku zavarenom P-GMAW postupkom .....	77
Tablica 17. Usporedba površina metala zavara.....	78
Tablica 18. Dimenzije pogrešaka u zavaru dobivenom zavarivanjem duplim pulsom .....	79
Tablica 19. Dimenzije pogrešaka u zavaru dobivenom pulsnim strujama zavarivanja.....	79

**POPIS OZNAKA**

<b>Oznaka</b>	<b>Mjerna jedinica</b>	<b>Opis oznake</b>
$c$	$\text{J kg}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$	Specifični toplinski kapacitet
$E$	MPa	Modu elastičnosti
$I$	A	Jakost struje
$P$	W	Snaga
$Q$	J	Unos topline
$R$	$\Omega$	Ohmov električni otpor
$R_m$	$\text{N/mm}^2$	Vlačna čvrstoća
$t$	s	Vrijeme
$T_t$	$^\circ\text{C}$	Temperatura tališta
$U$	V	Napon struje
$\alpha$	$10^{-6}/\text{K}$	Koeficijent linearnog istezanja
$\lambda$	W/mK	Toplinska vodljivost
$\rho$	kg/m <sup>3</sup>	Gustoća
$\sigma_{0,2}$	$\text{N/mm}^2$	Granica razvlačenja

**POPIS KRATICA**

<b>Kratika</b>	<b>Značenje</b>
AC	<i>Alternating Current</i> - izmjenična struja
Ag	Srebro
Al(OH) <sub>3</sub>	Gipsit
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Aluminijev oksid
Al <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (OH) <sub>4</sub>	kaolinit
Ar	Argon
B	Bor
Be	Berilij
Bi	Bizmut
Cd	Kadmij
Co	Kobalt
Cr	Krom
Cu	Bakar
DC	<i>Direct Current</i> - istosmjerna struja
DP-GMAW	<i>Double-Pulsed Gas Metal Arc Welding</i> - Duplo-pulsno elektrolučno zavarivanje taljivom elektrodom u zaštiti neutralnog plina
EN	Europske norme
EPP	Elektrolučno zavarivanje pod praškom
Fe	Željezo
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Hematit
FeO(OH)	Getit
GMAW	<i>Gas Metal Arc Welding</i> - Elektrolučno zavarivanje taljivom elektrodom u zaštiti plina
He	Helij
HRN	Hrvatski zavod za norme
ISO	<i>International organization for standardization – Međunarodna organizacija za standardizaciju</i>
Li	Litij
MAG	<i>Metal Active Gas</i> - Elektrolučno zavarivanje taljivom elektrodom u zaštiti aktivnog plina
Mg	Magnezij
Mg <sub>2</sub> Al <sub>3</sub>	Magnezijev aluminid
MIG	<i>Metal Inert Gas</i> - Elektrolučno zavarivanje taljivom elektrodom u zaštiti neutralnog plina
Mn	Mangan
Na	Natrij
Na <sub>3</sub> AlF <sub>6</sub>	Kriolit
NaAlO <sub>2</sub>	Natrijev aluminat
NaOH	Natrijev hidroksid
Ni	Nikal

---

PA	Vodoravni položaj zavarivanja
Pb	Olovo
P-GMAW	<i>Pulsed Gas Metal Arc Welding</i> - Pulsno elektrolučno zavarivanje taljivom elektrodom u zaštiti neutralnog plina
REL	Ručno elektrolučno zavarivanje
Si	Silicij
SiO <sub>2</sub>	Silicijev oksid
Sn	Kositar
Sr	Stroncij
Ti	Titaniј
TIG	<i>Tungsten Inert Gas</i> - Elektrolučno zavarivanje netaljivom elektrodom u zaštiti neutralnog plina
TiO <sub>2</sub>	Titaniјev oksid
V	Vanadiј
Zn	Cink
Zr	Cirkonij
ZUT	Zona utjecaja topline
$\alpha$ -AlO(OH)	Dijaspor
$\gamma$ - AlO(OH)	Bemit
$\eta_{Si}$	Siliciјski modul

## **SAŽETAK**

U okviru ovog diplomskog rada prikazane su osnovne karakteristike i primjena aluminijskih legura s naglaskom na legure serije 5XXX i 6XXX. Prikazane su osnovne značajke zavarljivosti aluminijskih legura kao i pogreške koje mogu nastati prilikom njihova zavarivanja. Također u sklopu teoretskog dijela rada prikazane su osnovne značajke MIG postupka s naglaskom na načine prijenosa metala prilikom zavarivanja aluminijskih legura. Dodatno je opisana primjena konvencionalnih pulsniha struja i prijenosa metala duplim pulsom, kao i dinamičke karakteristike tih dvaju metoda.

U eksperimentalnom dijelu rada određena je dinamička karakteristika izvora struje pri zavarivanju aluminijske legure 5083 korištenjem pulsnog prijenosa i prijenosa duplim pulsom. Uz to izvedeni su kutni zavari aluminijskih ploča legure 5086 primjenom dvaju spomenutih načina prijenosa metala, nakon čega su provedena ispitivanja propisana normom HRN EN ISO 15614-2. Na temelju dobivenih rezultata provedena je komparativna analiza konvencionalnog pulsnog postupka i postupka duplim pulsom.

Ključne riječi: Al legure, MIG, dinamička karakteristika izvora struje, pulsno zavarivanje, zavarivanje duplim pulsom

## **SUMMARY**

Within this thesis, aluminium alloys' basic characteristics and application emphasising alloys of series 5XXX and 6XXX are presented. The essential weldability characteristics of aluminium alloys and the errors that can occur during their welding are shown. Also, as part of the theoretical part of the paper, the basic features of the MIG process are presented, with an emphasis on the methods of metal transfer during welding of aluminium alloys. The application of conventional pulse currents and double-pulse metal transfer is additionally described with the dynamic characteristics of these two methods.

In the experimental part of the paper, the current source's dynamic characteristic during welding of aluminium alloy 5083 was determined using pulse transmission and double pulse transmission. Besides, angular welds of aluminium plates of alloy 5086 were performed using the two mentioned metal transfer methods after which the tests prescribed by the standard HRN EN ISO 15614-2 were performed. A comparative analysis of the conventional pulse procedure and the double pulse procedure was performed based on the obtained results.

Key words: Al alloys, MIG, dynamic characteristic of a welding power source, pulsed welding, double pulsed welding

## **1. UVOD**

Tijekom razvoja industrije, uvijek je postojala potreba da se za nove primjene pronadu novi, što prikladniji materijali koji ce zadovoljiti sve zahtjeve takve primjene. Upravo zbog toga, inženjerstvo materijala ima veliku ulogu u razvoju industrije. Tijekom godina, aluminij, a kasnije i njegove legure postale su jedan od najbitnijih materijala u raznim granama primjene. Upravo zbog svojih mehaničkih i kemijskih svojstava, aluminijske legure su jedna od najbitnijih skupina građevnih materijala. Aluminijska mala gustoća, a time i masa, predstavlja jednu od najvažnijih prednosti tog materijala, a dodatnim legiranjem s drugim elementima postižu se i druga kvalitetna mehanička i kemijska svojstva koja omogućuju široku primjenu aluminijskih legura. Tijekom godina razvijen je veliki broj aluminijskih legura, ovisno o raznim potrebama za zadovoljavanjem uvjeta primjene.

Danas aluminijske legure predstavljaju jedan od osnovnih materijala u industrijama proizvodnje putničkih prijevoznih sredstava kao što su zrakoplovstvo, brodogradnja i automobilska industrija. Mogućnost postizanja visoke čvrstoće, uz dobru korozijsku postojanost i iznimno malu masu, čini ove legure idealnima za takvu primjenu.

Razvojem aluminijskih legura postojala je potreba za adekvatnim postupcima njihova spajanja. Kada je riječ o spajanju, najčešće se radi o zavarivačkim tehnikama o kojima ce biti više riječi u nastavku. Određene karakteristike aluminijskih legura čine njihovo zavarivanje relativno izazovnim. S obzirom na težnju da se postignu zavari što bolje kvalitete, uz što veću produktivnost, tijekom godina je razvijen niz postupaka zavarivanja aluminijskih legura. Jedan od najvažnijih postupaka je MIG s nekoliko načina prijenosa metala o kojima ce biti riječ kasnije u radu.



## 2. ALUMINIJ

### 2.1. Povijest aluminija

Postojanje aluminija kao materijala prvi je pretpostavio Humphrey Davy, britanski kemičar i izumitelj, u prvom desetljeću 19-og stoljeća. Međutim, metal je prvi izolirao fizičar i kemičar Hans Christian Oersted 1825. godine. Idućih 30 godina ideja je ostala unutar prostorija laboratorija, a prvi začeci komercijalne upotrebe aluminija u proizvodnji krenuli su 1886. godine kada je aluminij ekstrahiran iz njegove rude, boksita. Postupak izlučivanja razvijen je udruženim snagama francuskog znanstvenika Paul Heroult i američkog izumitelja Charles M. Halla, a osnovni postupak se koristi i u današnjoj proizvodnji. Zbog svoje reaktivne prirode, aluminij se ne nalazi u metalnom stanju u prirodi, ali u zemljinoj kori je prisutan u obliku različitih spojeva, kojih je nekoliko stotina. Najvažniji je boksit, koji obiluje aluminijem. Postupak izlučivanja sastoji se od dvije odvojene faze, prva je odvajanje aluminijevog oksida  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (glinice) iz rude, a druga je elektrolitička redukcija glinice pri temperaturama između  $950\text{ }^\circ\text{C}$  i  $1000\text{ }^\circ\text{C}$  u kriolit ( $\text{Na}_3\text{AlF}_6$ ). Takav postupak daje aluminij koji sadrži oko 5-10 % nečistoća poput silicija (Si) i željeza (Fe), koji se zatim rafiniraju (pročiste) daljnjim elektrolitičkim postupkom ili postupkom otapanja zone nakon kojih se čistoća približi ka 99,9 %. Dobiveni, čisti metal relativno je male čvrstoće i kao takav rijetko se koristi, posebno u konstrukcijskim primjenama. Kako bi se povećala mehanička čvrstoća, aluminij se uglavnom legira elementima kao što su bakar (Cu), mangan (Mn), magnezij (Mg), silicij (Si) i cink (Zn). Jedna od prvih proizvedenih legura bila je legura aluminija i bakra.

Oko 1910. godine, prilikom korištenja u novonastaloj zrakoplovnoj industriji, otkrivena je pojava otvrdnjavanja starenjem (precipitacijsko očvršćivanje) ove skupine legura. Nakon toga razvijen je široki raspon legura s izdržljivošću koja može parirati ugljičnim čelicima, ali uz tri puta manju težinu. Veliki poticaj razvoju aluminijevih legura dali su oba Svjetska rata, posebno Drugi svjetski rat jer je aluminij tada korišten u proizvodnji konstrukcijskih dijelova zrakoplova. Upravo je u tom razdoblju došlo i do razvoja proizvodnje s aluminijevim legurama u pogledu zavarivanja te je razvijen proces zavarivanja aluminija pod zaštitnim plinom, MIG i TIG postupkom. To je omogućilo zavare visoke izdržljivosti. Nakon završetka Drugog svjetskog rata postojala je industrija koja je prekapacitirana i koja je tražila 'svježih' tržišta u kojima bi mogla prodati svoje proizvode. S obzirom da je postojala potreba za

izgradnjom jeftinih, dostupnih stambenih prostora, razvila se montažna proizvodnja, pa je upravo aluminij od prerađenih ostataka vojnih zrakoplova, poslužio za izgradnju bungalova i na taj način pronašao svoju upotrebu. Istovremeno je porasla upotreba aluminijskih posuda, cestovnih vozila, brodova i konstrukcija.

Zapadna Europa godišnje proizvodi preko 3 milijuna tona primarnog aluminijskog (iz rude) i gotova 2 milijuna tona sekundarnog ili recikliranog aluminijskog, a godišnji uvoz iznosi oko 2 milijuna tona. Aluminij danas čini prosječno oko 80 % težine komercijalnog putničkog zrakoplova i 40 % težine osobnog automobila. Intenzivno se koristi u izgradnji nadgrađa brodova za prijevoz rasutih tereta i prijevoz kontejnera, te u klasi brzih trajekata za nadgrađa i trup. Još neke od primjena su i u izradi namještaja, cjevovoda, posuda pod tlakom, u građevini i u industriji ambalaže gdje se preko 400 000 tona aluminijskog godišnje koristi za proizvodnju folija. Ova široka paleta namjena daje naznake o širokom spektru legura koje su danas dostupne u proizvodnji. To upućuje i na sve veći spektar problema s kojima se zavarivačka industrija svakodnevno susreće i sve veću količinu znanja koja je potrebna za što uspješniju sveobuhvatnu proizvodnju u metalurgiji i zavarivanju. [1]

## 2.2. Svojstva aluminijska

U Tablici 1 navedena su osnovna fizikalna i mehanička svojstva aluminijska.

**Tablica 1. Osnovna fizikalna i mehanička svojstva aluminijska [2],[3]**

SVOJSTVO	MJERNA JEDINICA	VRJEDNOST
$\rho$ - Gustoća	kg/m <sup>3</sup>	2700
$T_t$ - Temperatura tališta	°C	660
$R_m$ - Vlačna čvrstoća	N/mm <sup>2</sup>	40...180
$\sigma_{0,2}$ - Granica razvlačenja	N/mm <sup>2</sup>	20...120
$\alpha$ - Koeficijent linearnog istezanja (0 °C-100 °C)	10 <sup>-6</sup> /K	23,8
$c$ - Specifični toplinski kapacitet (0 °C-100 °C)	J kg <sup>-1</sup> °C <sup>-1</sup>	920
$\lambda$ - Toplinska vodljivost (0 °C-100 °C)	W/mK	240
$E$ - Modul elastičnosti (20 °C)	MPa	6900

U nastavku su navedene glavne fizikalne i kemijske karakteristike aluminijska te su neke od njih uspoređene s karakteristikama čelika, jednim od najčešće korištenih industrijskih materijala. Osnovne karakteristike aluminijska, od kojih neke utječu i na njegovu zavarljivost su [1]:

- razlika tališta aluminijskog oksida i oksidnog sloja koji čini 'opnu' na površini aluminijskog oksida. Aluminijski oksid otapa se na temperaturi od oko 2060°C, što je 1400°C iznad točke taljenja aluminijskog oksida. Upravo ta činjenica predstavlja veliki problem za postupke zavarivanja, o čemu će biti riječ kasnije u radu
- aluminij posjeduje povoljan omjer čvrstoće i gustoće ( $R_m/\rho$  tzv. specifična čvrstoća). Gustoća mu je oko 3 puta manja od čelika što ga čini odličnim materijalom za proizvodnju zrakoplova, vozila itd.
- oksidni film na aluminiju vrlo je izdržljiv i otporan, a ima i sposobnost samoobnove, stoga aluminijskim legurama daje izvrsnu otpornost na koroziju i omogućuje im upotrebu u raznim uvjetima. Ova otpornost na koroziju može se dodatno poboljšati eloksiranjem – stvaranjem oksidnog filma kontrolirane debljine
- koeficijent toplinskog širenja aluminijskog oksida je približno dvostruko veći od koeficijenta toplinskog širenja kod čelika što može dovesti do izvijanja i iskrivljenja tijekom zavarivanja
- koeficijent toplinske vodljivosti aluminijskog oksida je šest puta veći od željeza. Posljedica toga je da izvor topline prilikom zavarivanja aluminijskog oksida mora biti intenzivniji i koncentriraniji nego prilikom zavarivanja čelika. To je posebno bitno kod zavarivanja debljih komada gdje zbog prebrzog odvođenja topline može doći do pojave uključaka u zavaru
- specifični toplinski kapacitet (količina topline potrebna za podizanje temperature) aluminijskog oksida dvostruko je veći od čelika
- aluminij posjeduje visoku električnu vodljivost što predstavlja problem prilikom elektrootpornog točkastog zavarivanja gdje se toplina potrebna za zavarivanje proizvodi električnim otporom materijala
- za razliku od čelika, aluminij ne mijenja boju zagrijavanjem na više temperature. To može predstavljati problem zavarivaču jer je teško prosuditi kada će doći do taljenja, stoga je nužna obuka prije prelaska na zavarivanje aluminijskog oksida
- aluminij je nemagnetičan (nije feromagnetičan) što znači da ne dolazi do problema magnetskog puhanja električnog luka prilikom zavarivanja

- modul elastičnosti aluminijsa je tri puta veći nego kod čelika zbog čega se deformira pri većim opterećenjima, ali s druge strane može apsorbirati više energije pri udarnom opterećenju
- činjenica da aluminij ima plošno centriranu kubnu kristalnu strukturu znači da može doći do smanjenja žilavosti uslijed smanjenja temperature. Ovakva kristalna struktura također znači da je oblikovljivost vrlo dobra što omogućuje proizvodnju postupcima kao što su istiskivanje i duboko vučenje
- aluminij ne mijenja svoju kristalnu strukturu prilikom zagrijavanja i hlađenja, za razliku od čelika koji prolazi fazne promjene (kristalne transformacije)

Aluminij je dostupan u kovanom i lijevanom obliku. Kovani proizvodi dolaze kao toplo ili hladno valjani limovi, ploče, šipke, žice i folije. Dobra duktilnost i obradivost aluminijsa omogućavaju proizvodnju složenih i dugačkih oblika kao što su grede I i H profila, kanali, T presjeci i cijevi. Hladno i toplo kovanje je brza i ekonomična tehnologija proizvodnje jednostavnih oblika, a precizno kovanje je posebno pogodno za postizanje dobre površinske kvalitete točnih tolerancija i eliminacije dodatne obrade. Kada je riječ o lijevanju, četiri najčešće tehnike lijevanja korištene kod aluminijsa su: pješčani lijev, lijevanje u pune kalupe, lijevanje u stalne kalupe (kokile) i tlačno lijevanje. Lijevanje u pune kalupe i tlačni lijev daje proizvode glatkih površina i visoke tolerancijske točnosti, a često se koriste u proizvodnji za svemirsku industriju. [1]

### 2.3. Proizvodnja aluminijsa

S obzirom na činjenicu da se aluminij u zemljinoj kori nalazi isključivo u spojevima, za proizvodnju čistog aluminijsa potrebno je provesti postupak njegova izlučivanja iz ruda. Kako bi se neku rudu moglo smatrati aluminijevom rudom, ona mora zadovoljiti navedene uvjete [4]:

- potrebno je da ruda sadrži dovoljnu količinu aluminijevog oksida  $Al_2O_3$ , što omogućava ekonomičnu preradu
- potrebno je da se  $Al_2O_3$  nalazi u obliku koji omogućava njegovo izlučivanje u čistom obliku
- i naposljetku da se u prirodi nalazi u obliku velikih rudnih ležišta.

Pod aluminijevim rudama smatra se boksite, nefeline, alunite, kaoline i gline.

Proizvodnja aluminija sastoji se od dvije glavne faze [4]:

1. Proizvodnja glinice (aluminijevog oksida) iz čistih aluminijevih ruda
2. Elektrolitička redukcija glinice i dobivanje aluminija

Početak industrijske proizvodnje aluminija predstavlja otkriće postupka proizvodnje glinice iz boksita, glavne rude za dobivanje aluminija. Upravo zbog aluminijeve velike zastupljenosti u zemljinoj kori, tijekom godina je razvijen veliki broj postupaka za proizvodnju glinice. S obzirom na to da se 95 % ukupne proizvodnje glinice odnosi na bazne postupke, odnosno na Bayerov postupak, upravo će o tom postupku biti više riječi u nastavku.

Bayerov postupak ime je dobio po Carl Josef Bayeru, kemičaru koji je zaslužan za njegov razvoj. Najzastupljeniji je postupak zbog svoje ekonomičnosti, jednostavnosti, ali i činjenice da osigurava proizvodnju glinice visoke kvalitete. Ovaj postupak temelji se na topljivosti aluminijeve komponente iz boksita u vrućoj otopini natrijevog hidroksida (NaOH), prilikom čega nastaje natrijev aluminat ( $\text{NaAlO}_2$ ) i netopljivi ostatak tzv. "crveni mulj". Sami proces sastoji se od nekoliko faza: pripreme boksita za raščlanjivanje, raščlanjivanja (luženje), razblaživanja, odvajanja i ispiranja crvenog mulja, taloženja  $\text{Al}(\text{OH})_3$  te na kraju procesa dehidracije i kalcinacije  $\text{Al}(\text{OH})_3$  i dobivanja glinice kao  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ .

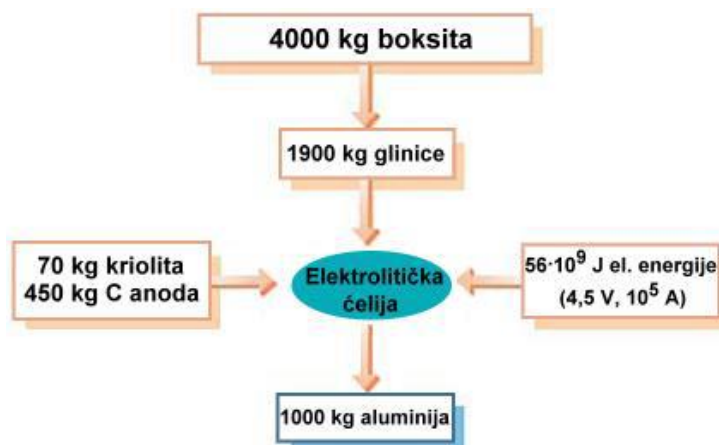
Prvi korak postupka je ispiranje i drobljenje boksita na granulaciju manju od 30 mm, koji se zatim miješa s otopinom NaOH. Mješavina se mokro melje u kugličnim mlinovima radi postizanja promjera manjeg od 315  $\mu\text{m}$ . Nakon toga slijedi proces raščlanjivanja ili luženja gdje se točno određeni omjer samljevenog boksita (gibsit, bemit i dijaspor) i vruće otopine povratne baze NaOH odvodi centrifugalnom pumpom u autoklave, gdje se boksit, zavisno od mineraloškog sastava, raščlanjuje s NaOH pri temperaturi 150 - 250 °C. Pri tome aluminij prelazi u otopinu kao aluminat (prezasićena otopina natrijevog aluminata) dok neizreagirani ostatak čini crveni mulj. [4]

Prikladnost boksita, kao sirovog materijala, za proizvodnju aluminija uvjetovana je sadržajem aluminijevog oksida  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , ali i sadržajem  $\text{SiO}_2$ . Za što bolju kvalitetu boksita poželjna je što veća količina  $\text{Al}_2\text{O}_3$  i što manja količina  $\text{SiO}_2$ . Odnos sadržaja tih dvaju spojeva prikazuje se tzv. silicijskim modulom ( $\eta_{Si}$ ) koji se izražava kao postotni odnos  $\text{Al}_2\text{O}_3$  i  $\text{SiO}_2$ . Boksit s omjerom 8 ili više smatra se dovoljno kvalitetnim za preradu dok prerada kod onih s omjerom manjim od 8 nije ekonomski opravdana. [4]

Druga faza proizvodnje aluminija je elektrolitička redukcija aluminijevog oksida, glinice  $\text{Al}_2\text{O}_3$  u rastaljenom kriolitu  $\text{Na}_3\text{AlF}_6$ . Postupak elektrolize provodi se pomoću ugljičnih

elektroda (anodne i katodne). Postupak je poznat i kao elektroliza u talini ili Hall-Héroultov proces.

Na Slici 1 prikazan je omjer količine boksita i energije potrebne za dobivanje jedne tone aluminija.



**Slika 1. Količine materijala i energije potrebne za dobivanje 1000 kg aluminija [4]**

### 2.3.1. Boksit

Boksit je smjesa minerala slična glini, bjelkaste boje kada u sastavu prevladava silicijev dioksid ili crvenkaste kada je u većoj mjeri prisutan oksid željeza. Jedna je od najvažnijih ruda aluminija iz koje se dobiva gotovo čitava svjetska proizvodnja glinice i aluminija, a nastala je u prirodi, vremenskim trošenjem eruptivnih ili sedimentnih stijena. Ime je dobila po mjestu otkrića Les Baux-de Provence u južnoj Francuskoj. Prema kemijskom sastavu, boksiti su složene polikomponentne sirovine koje se sastoje od aluminijevog oksida, željeza, silicija, titanija, kalcija i magnezija, s tim da udio aluminijevog oksida ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) iznosi između 55 i 65%. [5], [4]

Boksit se sastoji od idućih minerala: gibsita [ $\text{Al}(\text{OH})_3$ ], bemita i/ili dijaspora [ $\text{AlO}(\text{OH})$ ], uz prisustvo nečistoća kao što su kaolinit [ $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ ], hematit ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), getit [ $\text{FeO}(\text{OH})$ ], titanijev oksid ( $\text{TiO}_2$ ) i silicijev oksid ( $\text{SiO}_2$ ). Uz navedene minerale boksit često sadrži i tragove drugih netopivih oksida kao što su cirkonij, vanadij, galij, krom i magnezij. [6]

Aluminij je u boksitu najčešće prisutan u obliku aluminijevih hidroksidnih minerala [4]:

- hidrargilit (gibsit)  $\text{Al}(\text{OH})_3$  ili  $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$
- bemit  $\gamma$ -  $\text{AlO}(\text{OH})$  ili  $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$

- dijaspor  $\alpha$ - AlO(OH) ili  $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$

Ovi oblici znatno se razlikuju u svojstvima što igra bitnu ulogu kod izbora za preradu u tehnički  $\text{Al}_2\text{O}_3$  namijenjen za proizvodnju primarnog aluminija. [4]

### 3. ALUMINIJSKE LEGURE

Legiranje aluminija provodi se prvenstveno sa svrhom poboljšanja mehaničkih svojstava čistog aluminija, posebno vlačne čvrstoće i tvrdoće, a zatim i krutosti, rezljivosti, livljivosti i žilavosti. Osim legiranjem, svojstva se kasnije mogu poboljšati i postupkom precipitacijskog očvršćivanja. Glavni legirni elementi za aluminijske legure su bakar (Cu), magnezij (Mg), silicij (Si), cink (Zn) i mangan (Mn), a kao primjesa mogu biti prisutni željezo (Fe), krom (Cr) i titanij (Ti). Kompleksnije legure mogu se dobiti kombiniranjem, a moguće je i legiranje drugim legirnim elementima koji poboljšavaju svojstva osnovnih legura. Dodatni elementi koji se koriste za legiranje su: kobalt (Co), nikal (Ni), srebro (Ag), litij (Li), vanadij (V), cirkonij (Zr), kadmij (Cd), kositar (Sn), olovo (Pb), berilij (Be), bizmut (Bi), bor (B), natrij (Na) i stroncij (Sr). [7]

#### 3.1. Podjela i označavanje aluminijskih legura

Osnovne tri podjele aluminijskih legura su [8]:

- podjela prema postupku proizvodnje, pa se tako legure dijele na one dobivene lijevanjem i one dobivene gnječenjem (kovanjem/ekstrudiranjem)
- prema toplinskoj obradivosti gdje se legure dijele na one koje se toplinski tretira i one koje se toplinski ne tretira
- prema njihovu kemijskom sastavu.

Postoji nekoliko različitih načina označavanja aluminijskih legura, a sve se temelje ili na bročanom označavanju ili na korištenju kemijskih simbola. U europskom sustavu koristi se osnovna podjela na gnječene i lijevane legure.

Označavanje gnječenih aluminijskih legura definirano je normama HRN EN 573-1:2008 i HRN EN 573-2:2008. Serije gnječenih aluminijskih legura imaju prefiks EN koji predstavlja oznaku europske norme, a iza njega, razmakom odvojena stoji oznaka A koja predstavlja aluminij, te oznaka W koja govori da se radi o gnječenom materijalu (od eng. *wrought*). Prvi broj oznake označava seriju kojoj legura pripada, a serije su raspoređene prema glavnom legirnom elementu. Kod slučaja čistog aluminija odnosno skupine 1XXX, druga znamenka predstavlja modifikaciju legure, a zadnje dvije znamenke označavaju minimalan udio Al (npr.



1060 označava leguru s minimalno 99,6% Al). Kod ostalih skupina posljednje tri znamenke koriste se kao oznaka određene legure. [9],[8]

Označavanje lijevanih aluminijskih legura provodi se prema normama: HRN EN 1780-1:2008, HRN EN 1780-2:2008 i HRN EN 1780-3:2008. Kod lijevanih aluminijskih legura također se koristi prefiks EN, ali uz njega dolazi AX gdje A predstavlja aluminij, a sufiks X predstavlja oblik proizvodnje koji može biti [8]:

- B – legirni aluminijski ingoti namijenjeni za pretaljivanje
- C – lijevani proizvodi
- M – glavne legure

Kao i kod podjele gnječenih legura, u prvoj skupini gnječenih legura druga i treća znamenka označavaju minimalni udio Al (npr. 15000 predstavlja gnječenu leguru s minimalnim udjelom Al od 99,50%), dok u ostalim skupinama gnječenih legura te znamenke predstavljaju određenu leguru. Za definiranje osnovnih metalurških stanja aluminija i njegovih legura namijenjenih gnječenju, primjenjuje se standard EN 515. Ovim standardom metalurško stanje legura označava se slovnim simbolima iza kojih slijedi brojana oznaka do tri znamenke, što ovisi o vrsti legure aluminija. [9],[8]

Označavanje legura prikazano je u Tablici 2.

**Tablica 2. Numeričke oznake legura aluminija[8],[10],[11]**

<b>Gnječene aluminijske legure</b>		
EN AW 1XXX	komercijalno čisti Al (>99% Al)	ne očvršćuju starenjem
EN AW 2XXX	Al-Cu-(Mg)	očvršćuju starenjem
EN AW 3XXX	Al-Mn	ne očvršćuju starenjem
EN AW 4XXX	Al-Si	samo neke očvršćuju starenjem
EN AW 5XXX	Al-Mg	ne očvršćuju starenjem
EN AW 6XXX	Al-Mg-Si	očvršćuju starenjem
EN AW 7XXX	Al-Zn-(Mg)-(Cu)	očvršćuju starenjem
EN AW 8XXX	Al-(Li, Sn, Zr ili B)	samo neke očvršćuju starenjem
EN AW 9XXX	nekorištena serija	
<b>Lijewane aluminijske legure</b>		
EN AX 1xxxx	komercijalno čisti Al (>99% Al)	ne očvršćuju starenjem
EN AX 2xxxx	Al-Cu	očvršćuju starenjem

EN AX 3xxxx	Al-Si-Cu ili Al-Mg-Si	neke legure ove serije su pogodne za očvršćivanje starenjem
EN AX 4xxxx	Al-Si	ne očvršćuju starenjem
EN AX 5xxxx	Al-Mg	ne očvršćuju starenjem
EN AX 6xxxx	nekorištena serija	
EN AX 7xxxx	Al-Mg-Zn	očvršćuju starenjem
EN AX 8xxxx	Al-Sn	ne očvršćuju starenjem
EN AX 9xxxx	nekorištena serija	

Također uz navedene oznake, koriste se i dodatne koje označuju stanje u kojem se legura nalazi. Dodatne oznake se sastoje od slova koja označavaju dodatnu obradu, a može im biti pridružen i broj koji dodatno opisuje vrstu dodatne obrade. Oznake koje se koriste su [9]:

- F – proizvod u primarnom (isporučenom) stanju
- O – žareno stanje
- T – toplinski obrađeno stanje
- W – homogenizirano stanje
- H – proizvod očvrstnut hladnom deformacijom

Uz navedene oznake, kod lijevanih aluminijskih legura koriste se i dodatne oznake pojedinog postupka lijevanja [12]:

- D – tlačno lijevanje
- K – lijevanje u trajne kalupe ili kokile
- L – precizni ili tlačni lijev
- S – lijevanje u pješčane kalupe.

U Tablici 3 prikazana je osnovna primjena i oblik legura prema ranije navedenoj podjeli.

**Tablica 3. Prikaz oblika proizvoda i najčešćih primjena serija aluminijskih legura[1]**

Seriya legura	Oblik proizvoda	Primjena
1XXX (Čisti aluminij)	Folija, valjane ploče, ekstrudirani proizvodi	Pakiranje, krovišta, plovila i spremnici s nižim zahtjevima na korozivnu otpornost
2XXX (Al-Cu)	Valjane ploče, ekstrudirani proizvodi, otkivci	Dijelovi pod velikim naprezanjima, dijelovi u zrakoplovstvu, teški otkivci,

		kotači teških teretnih vozila, glave cilindra, klipovi
3XXX(Al-Mn)	Valjane ploče, ekstrudirani proizvodi, otkivci	Pakiranje, krovopokrivanje, oblaganje, spremnici kemikalija, oprema za preradu i rukovanje hranom
4XXX (Al-Si)	Žice, odljevci	Dodatni materijal za zavarivanje, glave cilindra, blokovi motora, dijelovi ventila, upotreba u arhitekturi
5XXX (Al-Mg)	Valjane ploče, ekstrudirani proizvodi, otkivci, cjevovodi	Oblaganje, trupovi broda, konstrukcijski elementi, plovila i spremnici, vozila, vagoni, arhitektonske svrhe
6XXX (Al-Si-Mg)	Valjane ploče, ekstrudirani proizvodi, otkivci, cjevovodi	Konstrukcijski dijelovi visoke čvrstoće, vozila, vagoni, primjena u morskim uvjetima, arhitektonske svrhe
7XXX (Al-Mg-Zn)	Valjane ploče, ekstrudirani proizvodi, otkivci	Konstrukcijski dijelovi visoke čvrstoće, otkivci teških dijelova zrakoplova, oklopne ploče, teretna vozila i vagoni

Čisti aluminij bez ikakvih legirnih elemenata premalene je čvrstoće za tehničku uporabu, zbog čega ga je potrebno legirati drugim elementima. Samim legiranjem poboljšavaju se mehanička svojstva, korozijska postojanost, tvrdoća, čvrstoća i zavarljivost. Legure aluminija označavaju se brojkama, a prva brojka označava legirne elemente u leguri [13],[14]:

- 1XXX legure sadrže 99 %-tni udio aluminija. 1XXX seriju aluminijskih legura često se ne smatra legurama, već čistim aluminijem s određenim postotkom nečistoća od kojih su najčešći željezo i silicij. Ova skupina posjeduje relativno malu čvrstoću, ali vrlo dobru oblikovljivost. Relativno je otporna na koroziju. Jedino ako u svome sastavu imaju veći udio željeza postoji mogućnost nastanka rupičaste korozije, posebno u vodenim otopinama koje sadrže kloride.

- 2XXX legure aluminija s bakrom kao osnovnim legirnim elementom, čiji postotak može doseći i do 10 %. Uz bakar, česti legirni elementi su magnezij ili mangan, te u manjim postocima litij, srebro i nikal. Na legurama 2XXX provodi se toplinska obrada u svrhu ojačavanja. Uporaba ovih legura rasprostranjena je u zrakoplovnoj industriji zbog male mase i velike čvrstoće. Prisutnost bakra smanjuje otpornost ove legure na opću i rupičastu koroziju.
- 3XXX legure aluminija sadrže do 1,5 % mangana i do 1,5 % magnezija. Koriste se primarno za očvršćivanje deformiranjem. Mangan ne utječe značajno na povećanje čvrstoće, međutim, povećava oblikovljivost i korozijsku otpornost.
- 4XXX legure aluminija sadrže do 14 % silicija. Imaju nisko talište i često se koriste kod primjene u kojoj je potrebno zavarivanje, a jedne su i od najčešće korištenih legura za izradu dodatnog materijala za zavarivanje. Ova serija legura nema veliku otpornost na atmosfersku koroziju.
- 5XXX legure aluminija su one koje sadrže do 6 % magnezija. Moguća je pojava i mangana u nekim legurama. Legure ove serije deformacijski očvršćuju, a uglavnom se proizvode u obliku limova i ploča. Legure serije 5XXX pružaju izvrsnu otpornost na koroziju stoga se često koriste u građevinarstvu, kemijskoj industriji i prehrambenoj industriji. Također, zbog dobre otpornosti na morsku atmosferu česta je i primjena u brodogradnji. Dodavanje magnezija u leguru povećava otpornost na koroziju u morskoj atmosferi, međutim kod legura koje sadrže više od 3% magnezija može doći do osjetljivosti kada su izložene umjereno povišenim temperaturama ili ako su duži vremenski period (više godina) na sobnoj temperaturi. U tom slučaju dolazi do senzibilizacije, odnosno dolazi do selektivnog taloženja beta faza  $Mg_2Al_3$  duž granica zrna. Beta je visoko anodna u odnosu na aluminijsku matricu i kada je izložena umjereno povišenim temperaturama tvori kontinuiranu mrežu granica zrna. Jednom kada se beta formira, materijal postaje vrlo osjetljiv na interkristalnu koroziju, a ovisno o specifičnoj leguri i strukturi zrna, i na ljuštenje i napetosnu koroziju. Vrijeme potrebno za formiranje osjetljivosti mikrostrukture ovisi o sadržaju magnezija, karakteru legure, temperaturi izlaganja i obradi. Neke legure 5XXX mogu se termički obraditi da bi se uklonila značajna količina magnezija tijekom izrade, čime se znatno smanjuje sklonost senzibilizaciji. Zbog toga se radna temperatura legura s visokim udjelom magnezija mora ograničiti na maksimalno 65 °C.

- 6XXX legure sadrže prvenstveno magnezij i silicij, uz eventualni dodatak bakra ili magnezija (< 1,2%). Ova skupina legura ojačava se precipitacijskim očvršćivanjem, s primarnim precipitatom  $Mg_2Si$ . To su legure uglavnom dobre korozijske otpornosti. One sa sadržajem bakra imaju nešto slabija korozijska svojstva. Većina 6XXX legura pruža izvrsnu otpornost na rupičastu koroziju, a otpornost na interkristalnu koroziju može varirati. Legure s niskim udjelom bakra, poput 6061, sa stehiometrijskom ravnotežom Mg i Si, pružaju dobru otpornost na sve oblike korozije. Legure s viškom silicija (odnosno više nego što je potrebno za stvaranje  $Mg_2Si$ ), imaju tendenciju biti osjetljive na interkristalnu koroziju.
- 7XXX legure aluminijske su one koje sadrže 8 % cinka te bakar i magnezij samo u manjim količinama. Ova kombinacija legiranih elemenata osigurava najveću čvrstoću u usporedbi sa svim drugim komercijalnim serijama. Korozijska postojanost 7XXX legura je smanjena zbog legiranja bakrom koji omogućava stvaranje rupičaste i opće korozije.
- 8XXX legure aluminijske sadrže željezo i to manje od 10 %. Većina tih legura se koristi u prehrambenoj industriji za pakiranje hrane. Zbog izbjegavanja kontaminacije hrane ove legure jedne su od najbolje korozijski postojanih legura među legurama aluminijske. Dodavanjem litija legurama 8XXX smanjuje se njihova gustoća zbog čega se koriste u svemirskoj industriji.

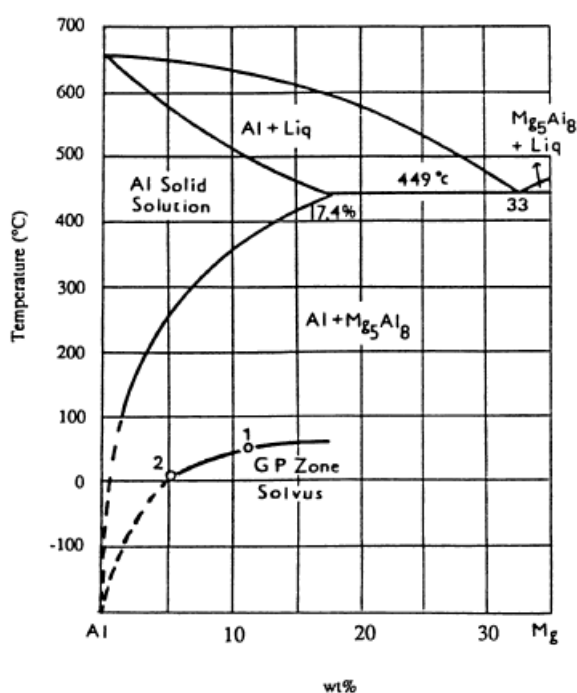
### 3.2. Serija 5XXX

Glavni legirni element ove serije aluminijskih legura je magnezij (Mg), dok su sporedni legirni elementi mangan, krom i titan. Legure aluminijske serije 5XXX predstavljaju najvažnije komercijalne legure koje ne očvršćuju precipitacijom ili starenjem. Iako su na propisanim radnim temperaturama čvrste i stabilne, njihov rad na povišenim radnim temperaturama ograničen je zbog opasnosti od taljenja. Glavna primjena ove serije legura je u situacijama gdje se zahtijeva korozijska otpornost kao kod čistog aluminijske, ali gdje su ujedno i viši zahtjevi za čvrstoćom. Široku primjenu pronalaze u zrakoplovstvu, brodogradnji, prometu i industriji kovanih dijelova. Kod proizvoda za kovanje, udio Mg ne bi trebao prelaziti 5-6% jer su legure s višim udjelom Mg nepraktične za oblikovanje, a sklone su i interkristalnoj, napetostnoj i pitting koroziji. Legure veće čvrstoće pokazuju dobra zavarivačka svojstva s

učinkovitošću zavarivanja 80-90% žarene čvrstoće što ih čini često korištenim materijalom u inženjerskim konstrukcijama, posudama pod tlakom i kemijskim postrojenjima. [15]

Atom Mg približno je 12% veći od atoma Al i deformacija rešetke znatno pridonosi očvršću legure. Dodatna prednost je i smanjenje težine u odnosu na čisti aluminij za 9,7 kg m<sup>-3</sup> na svaki dodani maseni postotak Mg. U binarnom sustavu Al-Mg, topljivost Mg u Al varira od približno 1,5 masenog % na sobnoj temperaturi do 17,5 masenog % pri 450°C. [15]

Na Slici 2 prikazan je Al-Mg binarno-fazni dijagram.



**Slika 2. Al-Mg dijagram ravnoteže [15]**

Unatoč značajnoj topivosti krute tvari Mg u Al-u, ne dolazi do značajnijeg precipitacijskog očvršćivanja kod udjela Mg ispod 7%. Legure ispod ovog udjela obično se koriste kao poluproizvod koji karakterizira značajno supstitucijsko jačanje čvrste otopine i visokog stupnja očvršćivanja deformacijom. Količina Mg topljivog na temperaturi žarenja za legure poput 5456 i 5083, veća je od one zadržane u krutoj otopini na sobnoj temperaturi. Dugo skladištenje na sobnoj temperaturi ili izlaganje povišenim temperaturama rezultira taloženjem duž granica zrna ili duž ravnina klizanja. Taj talog potiče interkristalne reakcije i pucanje uslijed naprezanja u korozivnoj atmosferi. Postupci koji se najčešće koriste za kovane proizvode su metoda za ublažavanje naprezanje ili niskotemperaturno žarenje za stabiliziranje strukture. Na taj se način eliminira pojava korozije i ljuštenja. [15]

Mikrostrukture u lijevanom stanju i homogenizirane lijevane mikrostrukture ovise o uvjetima očvršćivanja i sastavu legure, a one se mogu razmatrati s obzirom na dva morfološka oblika; dendritički i eutektički ili u nekim slučajevima kao kombinacija ovih dvaju morfologija. Najčešće mikrostrukture su[15]:

- 1.) Čisti aluminij koji skrućuje na dendritički način
- 2.) Čvrsta dendritička otopina
- 3.) Dendriti s interdendritičkim eutektikom
- 4.) Eutektik

U praksi su glavna mikrostrukturna svojstva komercijalnih legura Al složenija zbog dodataka legiranih elemenata ili nečistoća Fe i Si s velikim brzinama hlađenja. Kao rezultat toga, komponente mikrostrukture često se sastoje od čvrste otopine prezasićene s Mn, Cr, Fe i Si, mješavine degeneriranog eutektika i raznih taloga u interdendritičkim regijama. Prisutnost ovih sekundarnih faza proizlazi iz nekoliko mehanizama. Neki od najčešćih su neuravnoteženo očvršćivanje, reakcije u čvrstom stanju (reakcije taloženja i fazne promjene) te izravna disperzija. [15]

### **3.2.1. Primjena legura serije 5XXX**

Kao rezultat navedenih svojstava, legure iz serije 5XXX svoju primjenu pronalaze u građevinarstvu, cestogradnji, mostogradnji, proizvodnji spremnika i posuda pod tlakom, proizvodnji kriogenih tankova i sustava za korištenje i pri temperaturama do  $-270\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Najčešće korištene legure iz ove skupine su 5052, 5086 i 5083. [14]

Neke od značajnijih aluminijskih legura iz serije 5XXX i njihova primjena [10]:

- legura 5005 - ova legura sadrži do 0,6% Mg i zamijenila je legure 1050A i 1200 u svim primjenama u kojima se traže bolja mehanička svojstva. Anodizirane ploče ove legure često se koriste u građevinarstvu
- legura 5657- ima dekorativan izgled, te se zbog toga također primjenjuje u građevinarstvu te proizvodnji aluminijske ambalaže
- legura 5052 s 2,5% Mg i dodatkom kroma, ima dobar odnos između mehaničkih svojstava, oblikovljivosti, otpornosti na koroziju i otpornosti na zamor materijala. Veliku primjenu pronalazi u prehrambenoj industriji, automobilske industriji te u proizvodnji prometnih znakova

- legura 5049 je vrlo slična leguri 5052, ali ne sadrži krom. Koristi se za proizvodnju dijelova za toplinsku izolaciju i izradu ploča
- legure 5454, 5754 i 5154, sadrže magnezij u rasponu od 2,5 do 4% uz prisustvo male količine Mn i Cr. Česta primjena ovih legura je u građevinarstvu, industriji proizvodnje prijevoznih sredstava i industriji strojeva
- legura 5154 koristi se za proizvodnju aluminijskih zakovica i zaštitnih prozorskih mreža
- legure 5086 i 5083 sadrže između 3,5 i 5% Mg uz prisustvo Mn i Cr. Posjeduju najbolja mehanička svojstva od svih legura iz serije 5XXX, čak i pri vrlo niskim temperaturama. Vrlo su otporne na koroziju u morskoj atmosferi, a pogodne su i za zavarivanje. Njihova primjena je sve veća, posebno u industriji proizvodnje prijevoznih sredstava, vojnoj industriji te u brodskoj industriji. Najčešće korištena legura za izradu brodskih trupova je legura 5083, a jedan od najboljih primjera takve primjene je putnički brod Queen Elizabeth 2 gdje je ugrađeno oko 1000 tona ove legure
- legura 5182 sadrži između 4 i 5% Mg, uz manji sadržaj silicija i željeza. Ova legura ima dobar odnos mehaničke otpornosti i oblikovljivosti na povišenim temperaturama. Najčešće se primjenjuje u automobilskoj industriji i u proizvodnji limenki za skladištenje pića
- legura 5019 s 5% Mg koristi se u prehrambenoj industriji te u proizvodnji zakovica.



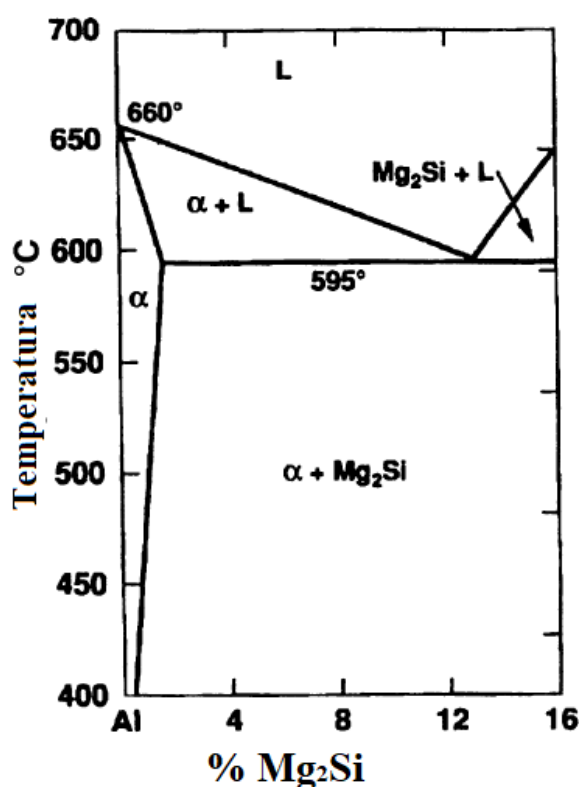
### 3.3. Serija 6XXX

Legure skupine 6XXX su široko korištene kao konstrukcijske legure srednje čvrstoće, a najčešću primjenu pronalaze u konstrukciji transportnih sredstava i u konstrukciji arhitektonskih rješenja. Upravo zbog njihove široke primjene u automobilskoj industriji, ova je skupina aluminijskih legura bila predmet raznih istraživanja u posljednjih 20-tak godina. Ova skupina legura u automobilskoj industriji često se obrađuje istiskivanjem i savijanjem, stoga je poželjna dobra oblikovljivost. Nakon istiskivanja dijelovi odlaze na bojenje nakon čega se podvrgavaju sušenju boje u trajanju od oko 30 min na temperaturi oko 180 °C. Prilikom tog procesa dolazi do precipitacijskog očvršćivanja materijala što mu daje dovoljnu čvrstoću i krutost koja omogućava zaštitu putnika. [11]

Svojstva serije ovise o mikrostrukturi metala i legure, a konačni cilj legure je postizanje idealne mikrostrukture koja zadovoljava traženu čvrstoću i žilavost, zajedno s drugim svojstvima kao što su otpornost na koroziju, pucanje, puzanje itd.

Ova serija aluminijskih legura sadrži glavne legirne elemente silicij i magnezij, u omjeru Mg/Si koji iznosi 1,73, a koji je potreban za formiranje magnezij silicida ( $Mg_2Si$ ).

Legure pritom najčešće sadrže ili višak Si ili višak Mg. Prisustvo viška Si povećava čvrstoću i smanjuje ekstrudibilnost, ali istovremeno povećava mogućnost pojave interkristalne korozije. Smatra se kako je gubitak duktilnosti posljedica taloženja Si i  $Mg_2Si$  na granicama zrna. Uz to, gubitak žilavosti može se kontrolirati dodavanjem mangana i/ili kroma. Kod proizvoda s visokim udjelom Si moguća je pojava tamnih mrlja na površini kao posljedica taloženja silicija. S druge strane višak Mg povećava otpornost na koroziju, ali istovremeno smanjuje oblikovljivost i čvrstoću. Taloženje  $Mg_2Si$  dovodi do stvaranja jednostavnog eutektičkog sustava s aluminijem. Na povišenoj temperaturi otopljeni element se rastvara u čvrstoj otopini, ali uslijed smanjenja, na nižim temperaturama stvara se talog  $Mg_2Si$  koji očvršćuje starenjem. Kao što je prikazano u faznom dijagramu na Slici 3, maksimalna topivost  $Mg_2Si$  u aluminiju iznosi 1,86 %, pri temperaturi od 600 °C. Povećanje udjela  $Mg_2Si$  rezultira povišenjem vlačne čvrstoće, ali ujedno smanjenjem ekstrudibilnosti pa je tako u slučaju povećanja udjela sa 0,5 na 0,95% ili 1,35 %, brzinu ekstrudiranja potrebno smanjiti za 40 %, odnosno 70%. Međutim kada se gleda ukupna proizvodnja, povećanje udjela  $Mg_2Si$  može ju povećati smanjenjem potrebnog vremena stajanja između postupka ekstrudiranja i postupka umjetnog starenja materijala. [15], [16]



Slika 3. Fazni dijagram Al- $Mg_2Si$ [15]

Legure skupine 6XXX očvršćuju na nekoliko načina [16] :

- 1.) jačanjem granica zrna
- 2.) precipitacijskim očvršćivanjem
- 3.) očvršćivanjem deformacijom.

Dodatak bakra (Cu) u leguri doprinosi otapanju suhe tvari i precipitacijskom očvršćivanju. U prisustvu magnezija i silicija, bakar omogućuje precipitacijsko očvršćivanje već na sobnim temperaturama. Njegovo dodavanje smanjuje zavarljivost i otpornost na koroziju, a povećava težinu legure. Smanjenje otpornosti na koroziju dodavanjem bakra posebno je izraženo kod legura s viškom silicija.

Moguće je da struktura aluminijske legure sadrži tragove i ostalih elemenata (posljedica procesa dobivanja aluminijske legure iz glinice) kao što su: Fe, Na, Li, Ca, Ti, V, Cr te spojeva kao što su oksidi, nitridi, boridi, karbidi. Tragovi ovih elemenata nisu posebno štetni za kvalitetu legure. Štoviše, neki od tih elemenata poboljšavaju njena svojstva stoga ih se nekad namjerno dodaje. Neki od elemenata koji poboljšavaju svojstva su: Cr, Ti i Li. Dodavanjem Cr, Mn, Zr i Sc može se ograničiti omekšavanje nastalo prilikom deformacije pri povišenim temperaturama. Sitnozrnata struktura osigurava jačanje granicama zrna i očvršćivanje deformacijom. Elementi

u tragovima mogu igrati značajnu ulogu u fizikalnim, mehaničkim i korozijskim svojstvima legure kako je i prikazano u Tablici 4. [16]

**Tablica 4. Utjecaj elemenata u tragovima na svojstva Al legura [16]**

Element	Koncentracija (mas %)	Svojstvo
H	0,0001	Stvaranje poroznosti nakon skrućivanja Prisustvo S, Mg i Li povećava apsorpciju H, dok je Si, Sn, Su i Be smanjuju
Fe i Si	0,1-1	Stvaranje $Al_3Fe$ i $AlFeSi$ , spojeva druge faze, koji smanjuju zamor i lom Al legura
Na, Li i Ca	< 0,01	Poboljšavaju eutektičku strukturu Al-Si što rezultira većom čvrstoćom. Također može otežati valjanje legure zbog tendencije stvaranja pukotina na rubovima. Li povećava čvrstoću na visokim temperaturama, pritom održavajući nisku gustoću.
Ti, V, Cr, Mn	0,001-0,05	Omogućuje usitnjavanje zrna prilikom skrućivanja i usporava rekristalizaciju prilikom deformacije. Mn također korigira oblik precipitata koji sadrže Fe.
Ga	0,001-0,02	Mijenja korozijska ponašanja, nagrizanje i posvjetljivanje nekih legura.

Različiti legirni elementi različito utječu na svojstva legura serije 6XXX, a neki od njih su navedeni u nastavku:

- magnezij – smanjuje obradivost gnječenjem značajnim povećanjem sile istiskivanja, bez obzira na sadržaj silicija. Također povećava otpornost na koroziju, ali smanjuje čvrstoću .
- silicij – ako je u višku, kao i magnezij, smanjuje obradivost gnječenjem, ali u manjoj mjeri nego magnezij. Služi kao vrlo dobro sredstvo za povećanje čvrstoće, posebno s udjelom do 0,4 %. S velikim omjerom Si/Mg<sub>2</sub>Si legura ima dobru obradivost, nižu osjetljivost na gašenje (kaljenje) i veću čvrstoću u odnosu na legure s niskim viškom Si. Silicij smanjuje i duktilnost i žilavost taloženjem elementarnog silicija na granicama zrna
- željezo – ima zanemariv učinak na ekstrudibilnost, osjetljivost na gašenje i čvrstoću.

Duktilnost i žilavost poboljšat će se pri niskim koncentracijama dok će pri višim

koncentracijama smanjiti žilavost. Općenito je štetno za površinsku obradivost i tijekom homogenizacije mora se voditi računa da se ovaj čimbenik svede na minimum

- bakar - u većini legura serije 6XXX sadržaj bakra je ispod 0,1 % i kao takav se tretira kao sporedni element. Ima vrlo mali utjecaj na obradivost gnječenjem ili druga svojstva kao što su čvrstoća ili žilavost

### 3.3.1. Primjena legura serije 6XXX

Legure 6XXX serije posjeduju sljedeće kvalitete: dobru korozivnu otpornost, kvalitetan površinski sloj, dobru oblikovljivost, te srednju čvrstoću. Takva svojstva ovu seriju aluminijskih legura čine pogodnom za primjenu u konstrukcijama ili u svrhu izrade dekorativnih arhitektonskih rješenja. Stvaranje stehiometrijskog spoja, magnezijevog silicida ( $Mg_2Si$ ), čini legure serije 6XXX pogodnima za toplinsku obradu i postizanje srednje čvrstoće pod T6 uvjetima. Veliku ulogu u primjeni ove serije legura igra njena dobra oblikovljivost što omogućava izradu vrlo složenih oblika iz jednog komada. To omogućuje i izradu komada koji će biti ojačani, odnosno veće debljine, upravo na onim dijelovima koji su opterećeni najvećim vlačnim i tlačnim naprezanjima.

Najčešće korištene legure serije 6XXX su [14], [17]:

- legura 6061 - nešto veće čvrstoće, a primjenjuje se u zavarenim konstrukcijskim elementima poput okvira kamiona i brodova, željezničkih vagona i cjevovoda
- legura 6063 - iznimno je pogodna za ekstrudiranje, a proizvođači ovu leguru nude s različitim mogućnostima sadržaja magnezij silicida. Moguće su sa 1%, 0,8% i 0,7% ovisno je li potrebna legura visoke čvrstoće, opće namjene ili dobrih svojstava za ekstrudiranje. Upotrebljava se u izradi arhitektonskih i građevinskih rješenja. Uz to čestu primjenu pronalazi i u autoindustriji i mostogradnji te izradi cjevovoda. Upravo je ova legura možda i najčešće korištena legura ove serije
- legura 6013 - jedan je od idealnih materijala za primjenu u autoindustriji u izradi karoserije vozila. Njena pogodnost za takvu primjenu leži u dobroj kombinaciji mehaničkih svojstava, korozivne otpornosti, oblikovljivosti i zavarljivosti. Zbog svojstva očvrstnuća starenjem moguće je u uz dobru oblikovljivost postići i vrlo visoku čvrstoću.

Još neke od korištenih legura su: 6066-T6 koja se koristi u izradi otkivaka, 6070 koja pruža najveću raspoloživu čvrstoću prilikom ekstrudiranja kada je riječ o legurama iz serije 6XXX,

zatim legura 6201 koja se koristi u izradi električnih sabirnica i žica električnog vodiča. Uz navedene značajna je primjena i legura: 6351, 6005, 6082, 6016 i 6111. [14]

## 4. ZAVARLJIVOST ALUMINIJA I NJEGOVIH LEGURA

Postupci koji su pogodni za zavarivanje aluminijskih legura su: TIG, MIG, elektrootporno zavarivanje, lasersko zavarivanje, hladno zavarivanje, eksplozijsko zavarivanje, zavarivanje magnetskim pulsom, zavarivanje trenjem i ultrazvučno zavarivanje. [11]

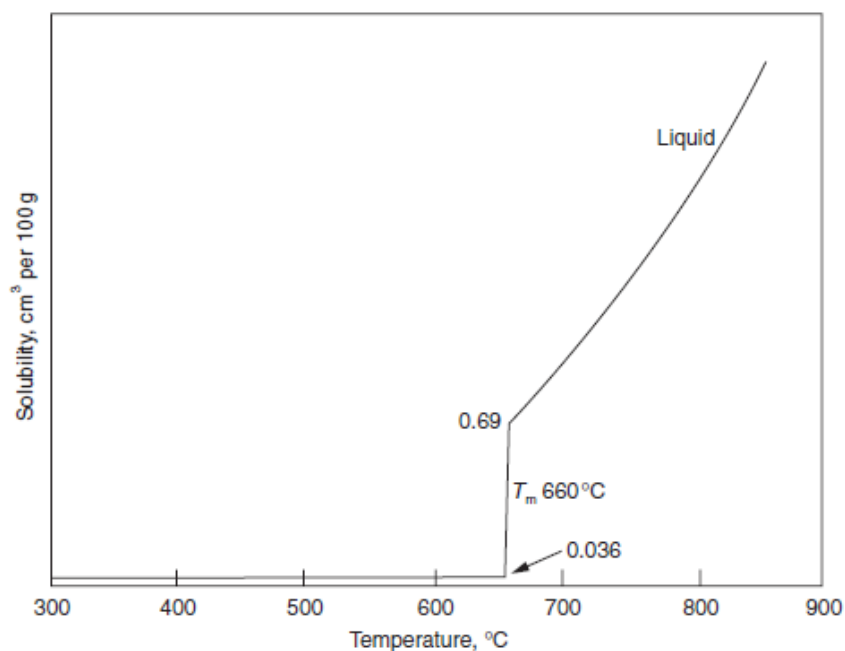
Pod pojmom idealnog zavara podrazumijeva se spoj koji obuhvaća metal zavara, zonu utjecaja topline (ZUT) i osnovni materijal, a gdje sva tri dijela imaju jednaka svojstva. U slučaju aluminijskih legura postoji niz problema povezanih sa zavarivanjem, a koji otežavaju postizanje idealnog zavara. Neki od problema koji se javljaju su [1]:

- plinska poroznost
- uključci oksida i oksidnog filma
- pucanje prilikom otvrdnjavanja ili tople pukotine
- smanjenje čvrstoće metala zavara i smanjenje čvrstoće u zoni utjecaja topline
- nedovoljno miješanje
- smanjenje otpornosti na koroziju
- smanjenje električnog otpora.

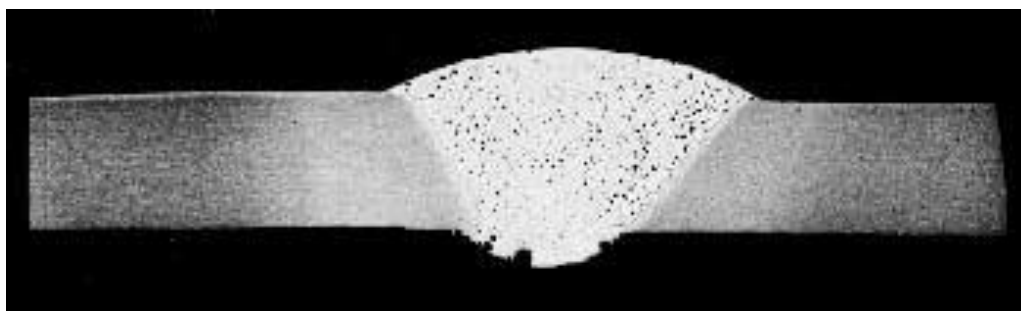
S obzirom na činjenicu da postoji nekoliko mehanizama ojačavanja aluminijskih legura, kao što su legiranje, otvrdnjavanje i toplinska obrada, jasno je kako će upravo ti mehanizmi imati i veliki utjecaj na sam proces zavarivanja, a u konačnici i na kvalitetu zavara. U nastavku su prikazani najčešći problemi koji nastaju pri zavarivanju aluminijskih legura. [1]

### 4.1. Poroznost u zavaru

Poroznost je problem koji se javlja u metalu zavara. Nastaje tako što mjehurići otopljenog plina ostanu zarobljeni u metalu dok otvrdnjava i na taj način tvore mjehuriće u zavaru. Poroznost može varirati od izrazito sitne mikroporoznosti, do izrazito velikih pora, promjera 3-4 mm. U slučaju aluminijskih legura za to je odgovoran ugljik koji ima visoku topljivost u rastaljenom aluminiju, ali vrlo nisku topljivost u krutini, kao što je prikazano na Slici 4. Smanjenje topljivosti toliko je izraženo da je izuzetno teško postići zavar aluminijskih legura bez poroznosti. Na Slici 5 prikazan je primjer zavara kod kojeg je došlo do pojave velikog broja poroznosti. [1]



**Slika 4. Dijagram topljivosti vodika u aluminiju [1]**



**Slika 5. Prikaz poroznosti na sučeljenom spoju ploča - ploča debljine 6 mm [1]**

Pojava poroznosti je najmanja prilikom autogenog zavarivanja. Kada se koristi dodatni materijal, razine poroznosti imaju tendenciju povećanja zbog onečišćenja iz žice. Od konvencionalnih postupaka zavarivanja, TIG postupak ima nižu razinu poroznosti od MIG-a, zbog onečišćenja žice vodikom. Povećavanje struje luka zavarivanja povećava temperaturu taline, a time povećava brzinu apsorpcije vodika u rastaljenom metalu. S druge strane, u položenom položaju zavarivanja (PA), povećanje unosa topline može smanjiti poroznost kada brzina istjecanja plina iz zavara prelazi brzinu apsorpcije - usporavanje brzine hlađenja zavara omogućuje eliminiranje vodika iz zavara. Isti se efekt može postići smanjenjem brzine zavarivanja. Povećanje napona i/ili duljine luka povećava izloženost taline nečistoćama, a time se i znatno povećava mogućnost pojave poroznosti. Na količinu poroznosti također utječe i sastav legure tako što se sastavom mijenja topivost vodika, dok magnezij ima pozitivan učinak. Smatra se da pri udjelu Mg od 6% dolazi do smanjenja apsorpcije vodika

za dva puta, dok bakar i silicij imaju suprotan učinak. Zaključak koji se može izvući je da se poroznost može smanjiti korištenjem Al-Mg dodatnog materijala za zavarivanje. To podrazumijeva da je takav dodatni metal pogodan za određenu primjenu. [1]

Izvori vodika mogu biti različiti, ali najčešće je to iz dodatnog materijala za zavarivanje. U postupcima s upotrebom pijeska, odnosno u postupcima gdje nastaje šljaka, poput ručnog elektrolučnog zavarivanja i zavarivanja pod praškom, pojava vlage je sastavni dio zaštitnog praška ili obloge elektrode. Tijekom zavarivanja ta vlaga u luku se raspada dajući vodik koji potom prouzroči problem velike količine poroznosti u zavaru. To je jedan od razloga zašto se ti postupci (EPP i REL) ne primjenjuju često kod zavarivanja aluminija. [1]

Problem se može pojaviti i kod procesa zavarivanja pod zaštitnim plinom jer upravo plin može biti izvor vlage. Idealno bi bilo koristiti plin s točkom rosišta ispod  $-50^{\circ}\text{C}$ . Iz tog je razloga potrebno često provjeravati sustav za dovod plina i njegovu čistoću. Dodatni izvor onečišćenja može doći i iz samih crijeva za dovod plina. Često su polimerni materijali koji se koriste pri zavarivanju Al legura porozni prema vlazi što rezultira kondenzacijom vlage na unutrašnjosti crijeva, a time i dodatnim unošenjem vlage u zavar. Od polimernih crijeva koja se koriste najporoznija su neoprenska guma, a najmanje porozna politrifluoro-kloroetilen. Također je važno uzeti u obzir i činjenicu da se vlaga skuplja u crijevu tijekom vremenskog razdoblja kada plin ne protječe. Posljedica toga je da ako oprema za zavarivanje ostaje u praznom hodu dulji vremenski period, prvih nekoliko zavara koji se zavaruju mogu sadržavati neprihvatljivu količinu poroznosti. U tom je slučaju korisno prije početka rada 'isprati' crijevo kratkim puštanjem plina. Kada je riječ o TIG postupku, prije zavarivanja potrebno je žicu prije početka rada odmastiti i očistiti i koristiti u kratkom vremenu nakon čišćenja. Kod MIG postupka su dostupni uređaji koji se mogu postaviti oko žice u jedinici za uvlačenje žice, a koji će očistiti žicu prilikom prolaska. [1]

Za postizanje kvalitetnih zavara bez poroznosti, iznimno je važno dobro očistiti i osnovni materijal prije zavarivanja. Temeljno odmašćivanje je neophodno, a nakon toga slijedi mehaničko čišćenje poput četkanja četkom od nehrđajućeg čelika kako bi se uklonio oksidni sloj. Nakon odmašćivanja i četkanja potrebno je u što kraćem vremenu izvršiti zavarivanje. Period koji se smatra prihvatljivim je 4 sata nakon čišćenja. [1]

Posljednji izvor poroznosti može biti vodik otopljen u aluminiju. Iako je topljivost vodika u čvrstoj fazi mala, može biti dovoljna da stvori probleme prilikom zavarivanja. To se ne



dogođa često kod lijevanja, ali je puno češća pojava kod zavarivanja i sinteriranja, stoga kupci često navode u narudžbi ograničenje vodika, a najčešće je to na 2ppm-a. [1]

U Tablici 5 nalazi se prikaz osnovnih uzroka pojave poroznosti u zavaru, ali i način prevencije istih.

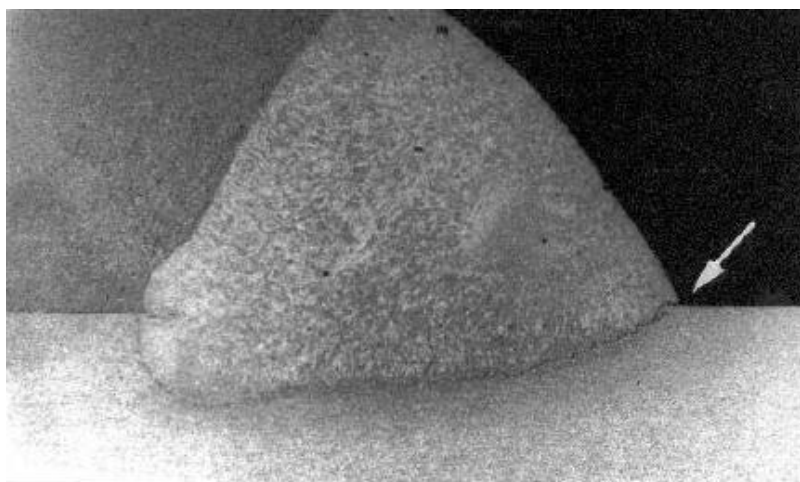
**Tablica 5. Uzroci i prevencija poroznosti u zavaru [1]**

Mehanizam nastanka poroznosti	Mogući uzroci	Korektivne mjere
Zarobljeni vodik	Oksidni film i masnoća na žici; oksidi, masnoća, prljavštine na osnovnom materijalu; kontaminirani plin	Čišćenje žice, korištenje plina visoke kvalitete, zamjena crijeva, zaštita žice od nečistoća, zamjena sapnice, čišćenje materijala
Zarobljeni zrak/plin	a) Turbulentno miješanje u talini uslijed velikog iznosa struje b) Plin koji se širi iz korijena nepotpunog provara/kutnog zavara	a) Korištenje manjih struja, smanjenje brzine zavarivanja, promjena nagiba pištolja za zavarivanje b) Dopustiti razmak korijena kutnog zavara, koristiti veći unos topline
Zarobljeni plin uslijed brzog hlađenja	Premali unos topline, prebrzo odvođenje topline, viskoznost taline, hladna podložna pločica	Povećati struju, smanjiti brzinu zavarivanja, razmotriti predgrijavanje, predgrijati podložnu pločicu, zamijeniti plin Ar sa He
Nepravilna dobava žice	Zapetljano, blokirano ili pogrešno crijevo za dobavu žice, loši ili pogrešno podešeni valjci za dobavu žice, oštećen vrh sapnice, nestabilna dobava energije	Izravnati cijev za dobavu žicu, zamijeniti vrh sapnice, podesiti valjke za izvlačenje žice, izabrati pravilnu cijev za dobavu žice

#### 4.2. Problemi nastali zbog oksidnog filma

U prethodnom poglavlju je već spomenuta važnost uklanjanja oksidnog filma s površine aluminijskog zbog pojave poroznosti, međutim to je iznimno bitno i zbog problema nedovoljnog protaljšivanja i pojave oksidnih uključaka u zavaru.

Na Slici 6 prikazan je utjecaj oksidnog filma na protaljšivanje, a koji bi imalo veliki utjecaj na čvrstoću spoja.



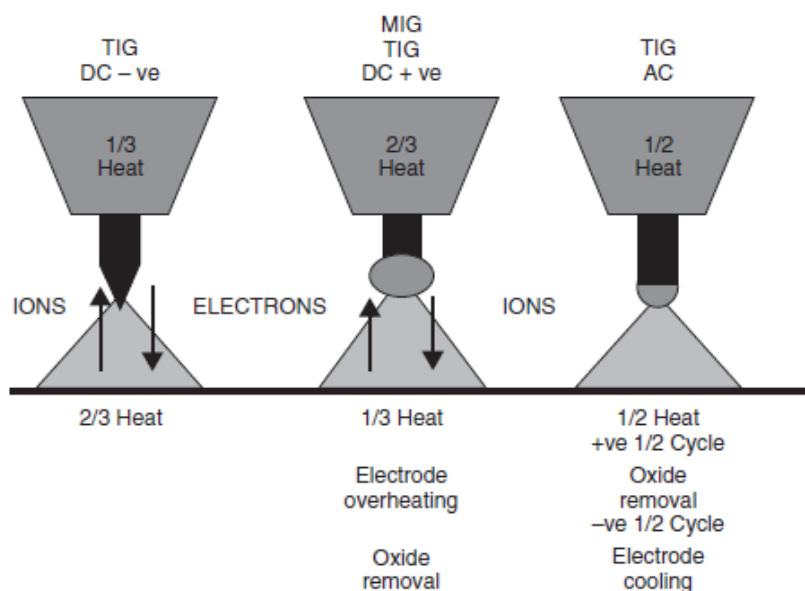
**Slika 6. Oksidni film u kutnom zavaru [1]**

Aluminijev oksid ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) vrlo je žilav i brzo obnovljiv oksid koji je zaslužan za aluminijevu iznimnu otpornost na koroziju. Talište aluminijevog oksida je  $2060^\circ\text{C}$ , dok je talište čistog metala aluminija na  $660^\circ\text{C}$ . Oksidni slojevi većine drugih metala tale se na temperaturama nižim od tališta njihova metala ili na istim temperaturama i uslijed zavarivanja izbijaju na vrh taline i formiraju trosku. Zagrijavanjem aluminija do točke taljenja, a bez prethodnog uklanjanja oksidnog filma, dobije se talina aluminija zarobljena ispod sloja oksida. [1]

Kod postupaka zavarivanja pod zaštitom plina dolazi do pojave koja se naziva katodno čišćenje, a koja se može primijeniti u svrhu postizanja dobre kvalitete zavara. Kada je elektroda spojena na pozitivan pol izvora napajanja, a koristi se istosmjerna (DC) struja, dolazi do strujanja elektrona u smjeru obradak – elektroda skupa s ionima koji 'bombardiraju' površinu obratka. To 'bombardiranje' potiče raspadanje i raspršivanje oksidnog filma i dopušta metalu zavara da se razlijeva i stapa s osnovnim metalom. Kod MIG postupka koristi se isključivo DC+ pol jer kod negativnog pola dolazi do nestabilnosti luka, nestabilnog prijenosa metala i loše kvalitete zavara. Stoga je uklanjanje oksidnog filma na takav način sastavni dio MIG postupka.[1]

S druge strane TIG postupak, uobičajeno koristi DC- koji ako se koristi na aluminiju može rezultirati lošom kvalitetom zavara. U slučaju korištenja DC+ dolazi do pregrijavanja volframove elektrode (uobičajeno pravilo za ravnotežu topline u TIG luku je dvije trećine na + polu, a jedna trećina na – polu. To, međutim, uvelike varira u ovisnosti o zaštitnom plinu, struji, duljini luka itd.). To može uzrokovati taljenje elektrode i neplaniran završetak

zavarivanja. Stoga je postignut kompromis primjenom AC pomoću koje se uklanjanje oksidnog filma odvija na pozitivnom polu, a hlađenje elektrode na negativnom polu (Slika 7). [1]



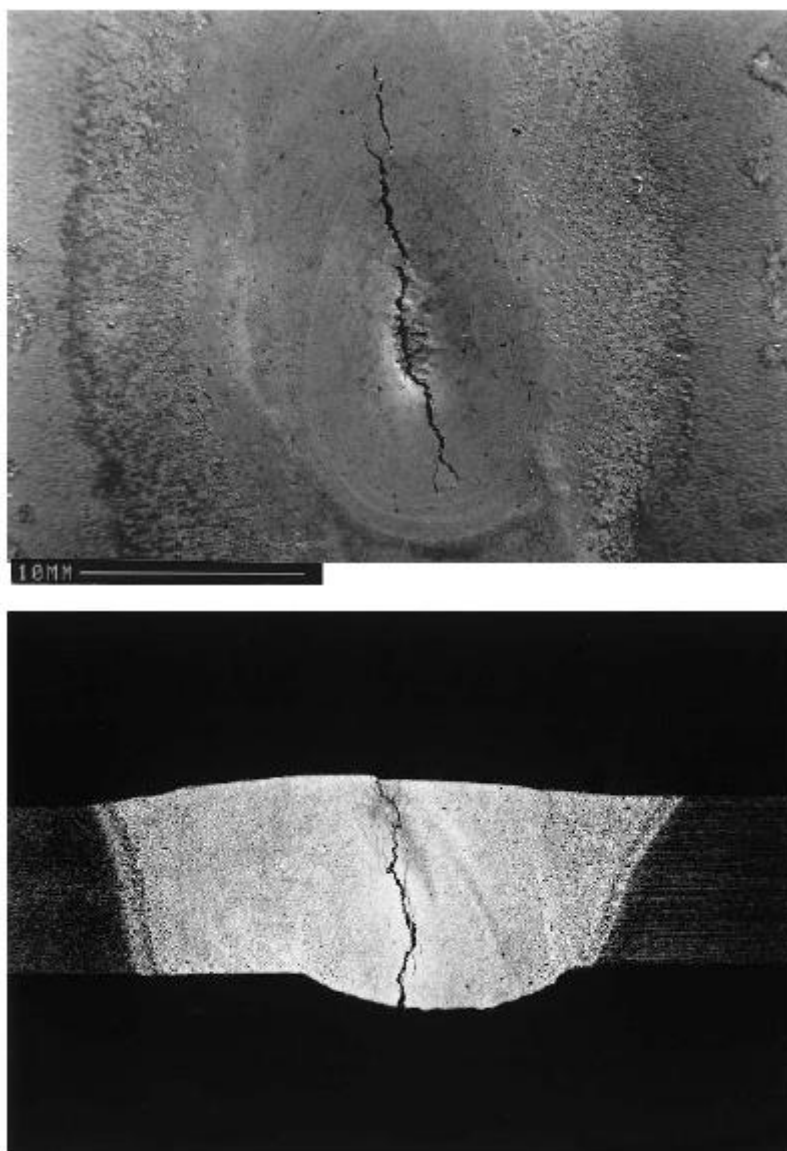
**Slika 7. Prikaz odabira struje za zavarivanje i mehanizma odstranjivanja oksidnog filma [1]**

#### 4.3. Nastanak toplih pukotina

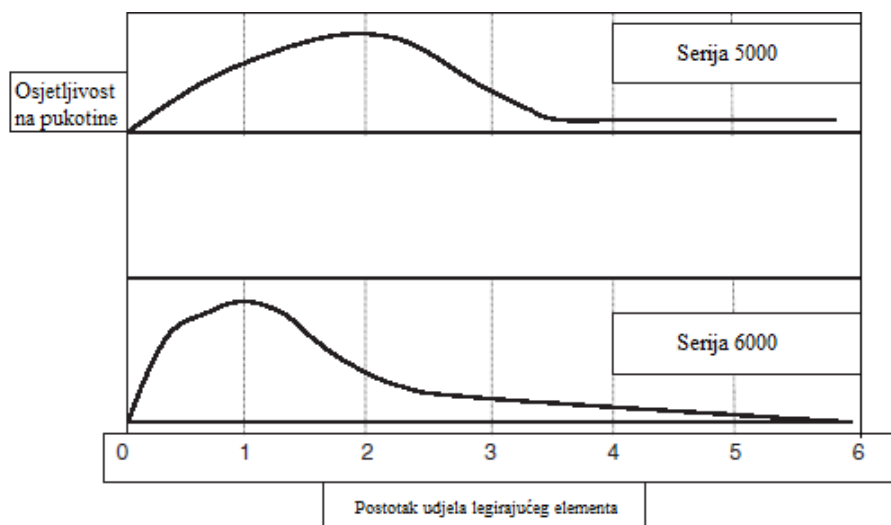
Tople pukotine su problem koji se obično ne javlja kod čistih metala već kod određenih legura. Tople pukotine pojavljuju se u aluminijevim legurama, čelicima te u legurama nikla i bakra. Osnovni mehanizam pojave pukotina je isti kod svih metala, a ovisi o načinu skrućivanja legure. Dodavanje legirnih elemenata čistom metalu prouzročit će promjenu temperature skrućivanja legure i može rezultirati nastankom brojnih faza kao što su: čvrsta otopina, eutektik, intermetalni spoj itd. Za prikaz stanja i udjela faza koriste se fazni dijagrami. Komponenta u leguri koja ima najniže talište naziva se eutektički sastav. Prilikom skrućivanja, te komponente posljednje su koje skrućuju te su potisnute na granice zrna krutih čestica. Ostale komponente skrućuju se u određenom rasponu temperatura, a prvo skrutnjuju one koje imaju najvišu točku tališta. Prva komponenta koja skrućuje djeluje kao jezgra na koju se naknadno vežu atomi čineći na taj način dendrit. Dendrit se povećava sve dok se zbog veličine ne počne sudarati sa susjednim dendritima. Na taj način između dvaju dendrita stvara se granica. Posljedica ovakvog načina skrutnjavanja je da dolazi do zarobljavanja komponente legura s najnižom točkom taljenja između susjednih dendrita tj. duž granice zrna. Ako je

razlika u talištu eutektika i već skrutnutog metala dovoljno velika može doći do razdvajanja upravo po tim granicama zrna prilikom hlađenja. [1]

U većini metala takvo pucanje uzrokovano je zalutalim elementima ili nečistoćama. Međutim, kod aluminija, eutektike čine namjerno dodani elementi s točkama skrućivanja znatno nižima od osnovnog metala. Upravo zbog toga su sve legure aluminija podložne nastanku toplih pukotina, jedino se osjetljivost na nastanak pukotina razlikuje od legure do legure. Osjetljivost legura na ovu vrstu pukotina mjeri se izvođenjem ispitivanja na pucanje prilikom kojih su uzorci pri kontroliranim uvjetima poprečno opterećeni. Slika 8 prikazuje izgled zavara na kojem je došlo do pojave toplih pukotina, dok Slika 9 prikazuje utjecaj udjela legirnih elemenata na osjetljivost na tople pukotine za legure serije 5XXX i 6XXX.



**Slika 8. Prikaz tople pukotine nastale pri zavarivanju TIG postupkom [1]**



**Slika 9. Utjecaj koncentracije legirnih elemenata na osjetljivost na pojavu pukotina[1]**

#### 4.4. Smanjenje čvrstoće uslijed zavarivanja

Da bi se postigao zavar, komponente koje se spajaju prilikom zavarivanja zagrijavaju se na temperaturu iznad temperature taljenja. Toplina koja se oslobađa postupkom zavarivanja provodi se kroz osnovni materijal, a ovisno o utjecaju, svaki zavar dijeli se na tri osnovna dijela: metal zavara, zonu utjecaja topline (ZUT) te osnovni metal.

S obzirom da zona utjecaja topline (ZUT) može proći kroz nekoliko ciklusa zagrijavanja, u njenom području dolazi do značajnih promjena svojstava u odnosu na osnovni materijal. Do toga značajnije dolazi u onim legurama očvrnutih precipitacijskim očvršćivanjem. Upravo zbog aluminijeve dobre vodljivosti, zona utjecaja topline u legurama aluminija može biti značajna. Jedino u slučajevima kada je legura u lijevanom ili žarenom stanju svojstva ZUT-a odgovaraju onima u osnovnom metalu. [1]

##### 4.4.1. Metal zavara

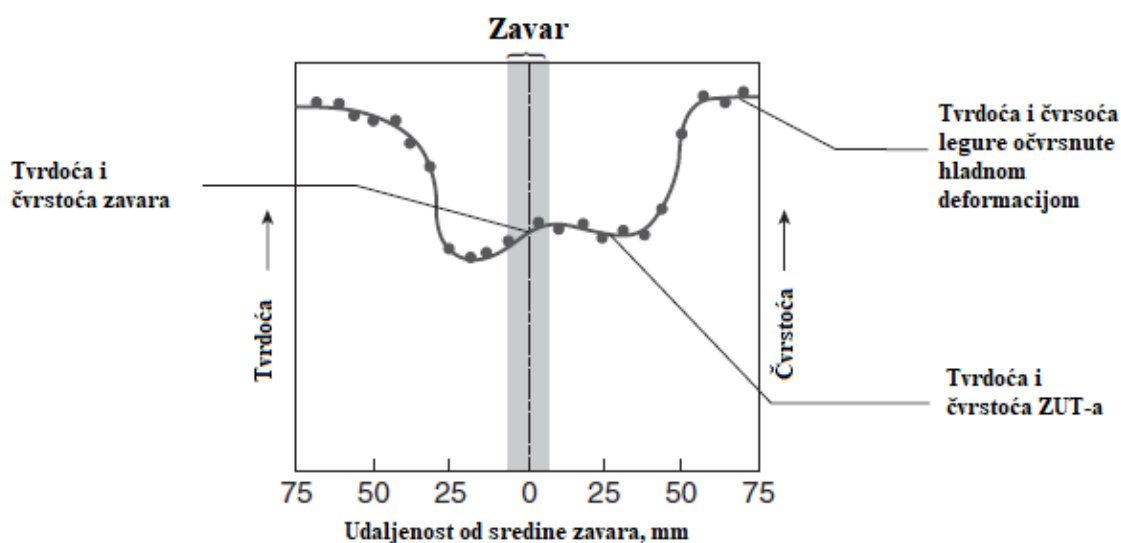
Kod zavarivanja taljenjem, metal zavara je odlivena struktura koja se sastoji od smjese osnovnog i dodatnog materijala. Svojstva zavara ovise o sastavu, kvaliteti i veličini zrna dodatnog materijala. Izbor dodatnog materijala, pa u konačnici i svojstva dodatnog materijala ovise o sastavu osnovnog i dodatnog materijala, brzini taljenja, kvaliteti postupka zavarivanja i zavarivaču te, na kraju, o brzini skrućivanja. Izuzev nekoliko žica izrađenih iz legura iz serije 2XXX, većina raspoloživih metala ne može se očvrnuti, iako miješanje s osnovnim

materijalom može omogućiti određeno precipitacijsko očvršćivanje. Veće brzine skrućivanja dat će sitniju veličinu zrna, a time i bolja mehanička svojstva od manjih brzina skrućivanja. Manje kapljice prilikom zavarivanja stoga imaju općenito bolja svojstva od velikih kapljica, a pritom pružaju veću otpornost pojavi toplih pukotina. Međutim problem može nastati kod zavara malih presjeka zbog potrebe za podnošenjem konstrukcijskih naprezanja. Vrlo se malo može utjecati na kvalitetu svojstava zavara. Jačanje čvrste otopine može biti korisno, a odabir odgovarajućeg dodatnog materijala može značajno pridonijeti visokoj čvrstoći zavara. Metal zavara se podudara sa svojstvima osnovnog metala samo kad je sam osnovni metal u lijevanom ili žarenom stanju. Kada se precipitacijsko očvršćivanje koristi kao postupak povećanja čvrstoće osnovnog materijala, teško ga je uskladiti s precipitacijskim očvršćivanjem zavara. Kod nekih legura za precipitacijsko očvršćivanje, može se naknadnom obradom starenjem postići veća čvrstoća metala zavara, pod uvjetom da metal zavara sadrži legirne elemente koji omogućuju precipitacijsko očvršćivanje. Učinkovitost ove toplinske obrade ovisit će o sastavu i miješanju dodatnog materijala. Na primjer, jednoprolazni AC-TIG zavar legure serije 6061 izrađen s dodatnim materijalom 4043 dat će krajnju vlačnu čvrstoću od oko  $300 \text{ N/mm}^2$  u odležanom stanju nakon zavarivanja. MIG zavar s više prolaza izrađen od 4043 dodatnog materijala dat će približno  $230 \text{ N/mm}^2$ . Zamjenom dodatnog materijala legure 4043 s dodatnim materijalom serije 4643, koji sadrži samo 0,2% magnezija, poboljšat će se čvrstoća postignuta postupkom starenja koji se provodi kako bi se postigla čvrstoća koja se podudara s čvrstoćom postignutom nakon autogenog AC-TIG zavara. Ovi primjeri pokazuju koliko je važan pravilan odabir dodatnog materijala i kontrola postojanosti tijekom zavarivanja aluminijskih legura. [1]

#### **4.4.2. Zona utjecaja topline**

Legure u lijevanom ili žarenom stanju moguće je zavariti bez značajnog gubitka čvrstoće u ZUT-u i da pritom čvrstoća zavara odgovara čvrstoći osnovnog metala. Kod legura ojačanih hladnim radom ili precipitacijskim očvršćivanjem, u ZUT-u može doći do značajnog gubitka čvrstoće. Kod legura očvrstnutih hladnim radom dolazi do gubitka čvrstoće uslijed rekristalizacije u ZUT-u. Rekristalizacija započinje kada temperatura ZUT-a pređe preko  $200 \text{ }^\circ\text{C}$  i raste s punim žarenjem koje se odvija na temperaturama iznad  $300 \text{ }^\circ\text{C}$ . [1]

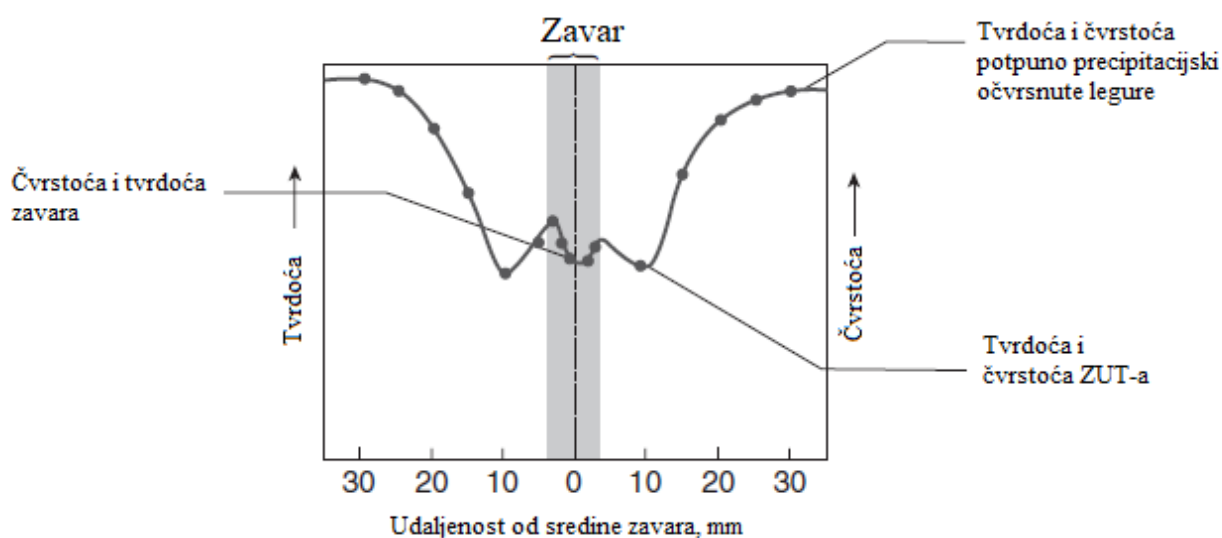
Na Slici 10 prikazan je utjecaj zavarivanja na tvrdoću i čvrstoću zavara i ZUT-a legure iz serije 5XXX, zavarene TIG postupkom.



Slika 10. Utjecaj zavarivanja na legure očvrstnute hladnom deformacijom[1]

Slično se može vidjeti i kod legura koje očvršćuju precipitacijski. Kod njih je situacija nešto složenija, ali dolazi do sličnih gubitaka vlačne čvrstoće. Gubitak se događa uslijed otapanja taloga kod legura serije 2XXX i povećanja zrna ili prekomjernog taloženja kada je riječ o legurama iz serije 6XXX i 7XXX. [1]

Na Slici 11 prikazan je utjecaj zavarivanja na tvrdoću i čvrstoću zavara i ZUT-a legure 6061, precipitacijski očvrstnute u T6 uvjetima.



Slika 11. Utjecaj zavarivanja na precipitacijski očvrstnute legure[1]

Uz sve navedeno treba spomenuti kako postoji mogućnost potencijalnog gubitka legiranih elemenata iz zavara, koji može rezultirati smanjenjem čvrstoće. Neki od legiranih elemenata, a najčešće je to Mg s niskim vrelištem ili Li koji je vrlo reaktivan s kisikom, mogu se izgubiti ili oksidirati tijekom zavarivanja. Gubitak Mg je najveći kod MIG zavarivanja, što rezultira taloženjem čađe koja se povremeno vidi s gornje ili s donje strane duž zavara. Pažljiv odabir zaštitnog plina i njegovog protoka može umanjiti ovaj problem. Međutim, u tom području su nužna dodatna istraživanja kako bi se počeo smatrati problemom prilikom zavarivanja. [1]

#### **4.5. Zavarljivost aluminijskih legura serije 5XXX i 6XXX**

##### **4.5.1. Serija 5XXX**

Kod legura serije 5XXX, gdje je glavni legirni element Mg, moguće su promjene mikrostrukture uslijed zagrijavanja prilikom zavarivanja. Primjerice kod sučeljenog spoja legura 5083, zavarenog žicom 5356 osnovni materijal nakon zavarivanja imat će sitnozrnatu mikrostrukturu koja se sastoji od matrice čvrste otopine magnezija u aluminiju, disperzije ojačane finim talogom spoja  $Mg_2Al_3$  zajedno s grubim česticama Al-Fe-Si-Mn. U ZUT-u, gdje je temperatura povišena na temperaturu oko 250 °C nastat će  $Mg_2Al_3$  koji se može spajati i stvarati veće zrno. Ondje gdje je temperatura bliže 400 °C dio  $Mg_2Al_3$  ponovno se otapa, a bliže zavarenom mjestu gdje je temperatura dosegla oko 560 °C dolazi do djelomičnog taljenja, što uzrokuje određeno kavitacijsko skupljanje. Zavar je struktura prezasićene otopine magnezija u aluminiju s česticama netopivih intermetalnih kristala kao što je  $Mg_2Si$ . Brzine hlađenja metala za zavarivanje uglavnom su dovoljno velike da spriječe taloženje  $Mg_2Al_3$ . Čvrstoća zavara Al-Mg legura vrlo je slična čvrstoći žarenog osnovnog materijala istog sastava i nije teško postići čvrstoću spoja barem jednaku žarenom stanju. Kod sučeljenog zavara osnovnog materijala s udjelom Mg većim od 4 %, zavar može biti niže čvrstoće od žarenog osnovnog materijala. Kod MIG postupka zavarivanja to smanjenje čvrstoće može biti zbog gubitka Mg u luku stoga se u nekim slučajevima preporuča korištenje visokolegiranih žica poput 5556 (AlMg5.2Cr). [1]

Općenito kod zavarivanja legura iz serije 5XXX, osim kod legure 5052, odabire se dodatna žica serije 5XXX s nešto većim udjelom Mg nego kod osnovnog metala koji se zavaruje. Kod legure 5052 koristi se dodatna žica izrađena iz legure serije 4XXX. Kod ostalih legura se izbjegava upotreba dodatne žice serije 4XXX jer kombinacija visokog udjela Mg iz legure



osnovnog metala i visokog udjela Si iz dodatnog metala rezultira visokim udjelom  $Mg_2Si$ , krhkih intermetalnih spojeva koji će zavaru dati lošu žilavost. [18]

Legura 5083 najčešće se zavaruje žicama sličnog sastava jer veći sadržaj Mg povećava rizik od pucanja uslijed napetosne korozije. Neprekinuta mreža  $Mg_2Al_3$  duž granice zrna može leguru učiniti osjetljivijom na napetosnu koroziju u obliku interkristalne korozije. Legura može postati osjetljivija duljim izlaganjem na temperaturama iznad  $80\text{ }^\circ\text{C}$ . U slučaju rada na toj ili višim temperaturama trebalo bi ograničiti sadržaj Mg na najviše 3%. Legure za rad u takvim uvjetima su legure 5251 ili 5454 zavarene žicom 5554 ( $AlMg_3$ ). Kod obostranih zavora s više prolaza, može se koristiti dodatni materijal s 5% Mg za korijenski prolaz kako bi smanjio rizik od vrućih pukotina, a ostatak odnosno popunjavanje zavora, korištenjem žice 5554. Legure 5XXX koje sadrže između 1% i 2,5% Mg mogu biti osjetljive na vruće pucanje ako se zavare autogeno ili s dodatnim materijalom jednakog sastava. Rješenje je upotreba visokolegirano dodatnog materijala koji sadrži više od 3,5% magnezija. [1]

#### **4.5.2. Serija 6XXX**

Legure serije 6XXX osjetljive su na pucanje metala zavora, posebno kada je metal zavora bogat osnovnim metalom, kao što je to kod korijenskog prolaza zavora. Na sreću, takvo se pucanje može lako spriječiti korištenjem dodatnog materijala koji sadrži veći udio Si kao što je 4043 ili, uz malo povećan rizik od vrućih pukotina, legura s većim udjelom Mg kao što je 5356. Kod ovih toplinski obradivih legura promjene u mikrostrukturi i mehaničkim svojstvima složene su i jako ovise o uvjetima prilikom zavarivanja. Zavarivanje bez dodatnog materijala ili s dodatnim materijalom sastava jednakog osnovnom metalu rijetko se izvodi zbog rizika od nastanka vrućih pukotina u metalu zavora. Dodatnim materijalom za zavarivanje sastava bliskog sastavu osnovnog materijala može se precipitacijski očvrnuti metal zavora kako bi se postigla čvrstoća koja se približava, ali nikada ne podudara sa čvrstoćom precipitacijski očvrnutog osnovnog materijala. U pregrijanoj zoni ZUT-a najbližeg liniji miješanja dolazi do djelomičnog topljenja granica zrna. Temperature su bile dovoljno visoke, a brzine hlađenja dovoljno velike da omogući određenu obradu taline te na taj način omogući određeno precipitacijsko očvršćivanje nakon zavarivanja. Uz to se nalazi zona djelomičnog rastaljivanja, gdje su neki precipitati otopljeni i povećavaju očvršćuće nakon zavarivanja, ali oni precipitati koji nisu otopljeni postat će grubi. Pored toga nalazi se zona pretjerano precipitacijski očvrsnuta u kojoj dolazi do grubljenja precipitata i velikog pada čvrstoće. Smanjenje čvrstoće kod legura serije 6XXX manje je kod prirodno

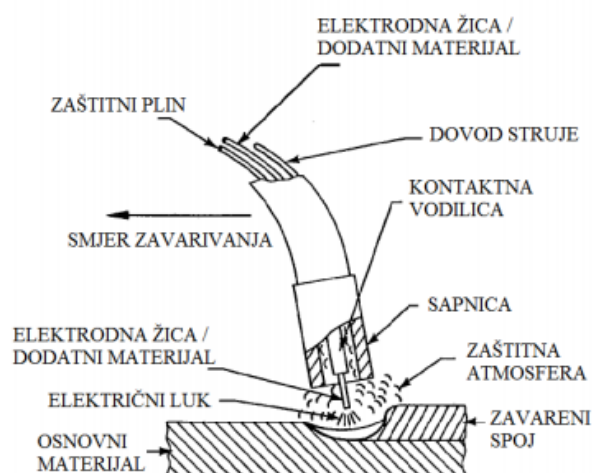
precipitacijski očvrnutog metala nego kod umjetno očvrnutih legura. Čvrstoća zavara i ZUT-a kod umjetno očvrnutog stanja opada kako bi se prilagodila prirodno očvrnutoj leguri protaljene zone i pretjerano očvrsnute zone izvan nje, a što je slabije od T6 stanja. Kod kontroliranih postupaka zavarivanja, kod kojih je unos topline niži, čvrstoća zavara neće pasti na onu žarene strukture, već će biti blizu one u T4 stanju. [1]

Neki od najčešće korištenih žica za zavarivanje su legura 4043 i 5356, a odabir ovisi o nizu faktora. Legura 4043 je jednostavnija za korištenje, jednostavnije se razlijeva i otpornija je na pucanje. S druge strane dodatni materijal 5356 bolje popunjava zavar i daje zavare koji su jači (posebno kod rubnih i preklopnih zavara) i duktilniji. Legura 5356 se koristi kada se legura serije 6XXX zavaruje na bilo koju leguru serije 5XXX, a legura 4043 za zavarivanje na seriju 3XXX. [18]

## 5. ELEKTROLUČNO ZAVARIVANJE TALJIVOM ELEKTRODOM U ZAŠTITI INERTNOG PLINA (MIG)

Elektrolučno zavarivanje elektrodom u zaštiti inertnog plina (GMAW ili MIG) je postupak koji koristi sustav automatske kontinuirane dobave žice i zaštitnog plina. Upravo iz razloga što sustav koristi automatsku dobavu žice, ovaj proces spada pod poluautomatizirani postupak. Sustav za dobavu žice gura elektrodu kroz sapnicu, gdje uspostavlja električni kontakt s bakrenom kontaktnom vodilicom, koja dobavlja struju od izvora napajanja. Osnovni dijelovi sustava za MIG zavarivanje čine sklop pištolja za zavarivanje, polikabeli, sustav za dobavu žice, izvor napajanja i spremnik zaštitnog plina. MIG postupak postao je komercijalno dostupan 1940-ih i pružio je značajno poboljšanje u kontekstu učinka taljenja, čineći tako zavarivanje učinkovitijim postupkom izrade nego ikad prije. Primjenom MIG postupka smanjeno je ukupno vrijeme zavarivanja iz razloga što nije potrebno stalno zaustavljanje postupka i zamjena elektrode. Zbog velikih brzina zavarivanja, učinka taljenja i mogućnosti prilagodbe automatizaciji, široko je primjenjiv postupak u automobilskoj industriji, industriji proizvodnje velike opreme, u zavarivanju konstrukcija, cijevi, posuda pod tlakom i postupaka oblaganja. MIG postupak izuzetno je fleksibilan i može se koristiti za zavarivanje gotovo svih metala. U usporedbi s ručnim elektrolučnim zavarivanjem (REL), oprema za MIG postupak nešto je skuplja zbog potrebe za mehanizmom za dobavu žice, složenije sapnice i potrebe za zaštitnim plinom, stoga se smatra relativno "skupim" postupkom zavarivanja. [19]

Na Slici 12 prikazan je detalj MIG zavarivanja koji prikazuje značajke postupka.

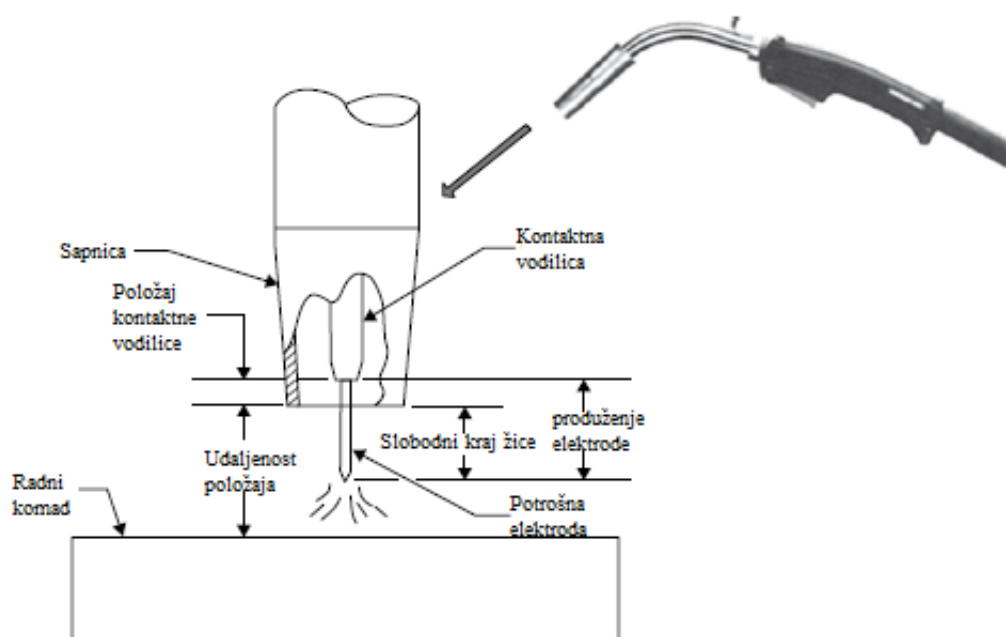


**Slika 12. Elektrolučno zavarivanje taljivom elektrodom u zaštiti inertnog plina (MIG)**  
[20], [21]

MIG postupak omogućuje održavanje konstantne dužine luka, što se obično postiže korištenjem napajanja s konstantnim naponom iako su moderni strojevi sposobni postići regulaciju i na druge načine. Mogućnost samoregulacije konstantne dužine luka čini ovaj postupak idealnim za mehanizirane i robotizirane primjene. U slučaju bilo kakve nagle promjene luka stroj će zabilježiti promjenu napona i reagirati brzom promjenom struje. Brza promjena struje utječe na promjenu brzine taljenja elektrode što onda prilagođava duljinu luka dokle god se napon luka ne vrati na zadanu vrijednost. [19]

Na Slici 13 prikazana je terminologija vezana za položaj sapnice, odnosno duljinu luka. Jedan od najvažnijih termina je produženje elektrode, a ona predstavlja duljinu žice između završetka kontaktne vodilice i kraja žice. Produženje elektrode utječe na zavarivanje na način da što je produženje veće povećava se zagrijavanje otporom što može negativno utjecati na zavarivanje. Pri jakim strujama ili velikim duljinama produženja, može doći do toga da se više energije iz napajanja koristi za zagrijavanje žice nego za zagrijavanje električnim lukom. Duži slobodni kraj žice uzrokuje zavar veće širine i manje dubine protaljivanja.

Uz osnovne parametre zavarivanja kao što su napon, struja i brzina zavarivanja, kod MIG zavarivanja još je jedan parametar vrlo bitan, a radi se o brzini dobave žice. Brzina dobave žice utječe na količinu depozita, ali i na struju zavarivanja. Jačina struje potrebna za određenu brzinu dobave žice ovisi o promjeru žice, pa tako veći promjer žice zahtijeva veću struju zavarivanja.



**Slika 13. Prikaz terminologije vezane uz MIG zavarivanje** [19]



### 5.1.2. Sustav za dobavu žice

Tri osnovne izvedbe sustava za dobavu žice su push, pull i push-pull. S obzirom na veliku fleksibilnost aluminijskih elektroda, korištenje push sustava za dobavu žice ograničeno je na veće promjere žica. Kod žica manjih promjera postoji velika vjerojatnost za 'gužvanje' i zapinjanje žice te se iz tog razloga izbjegava. S druge strane pull izvedbu moguće je koristiti i kod žica manjih promjera. Ograničenje ovih dvaju izvedbi je duljina polikabela koja je ograničena na 3,5 m. Za veće duljine koristi se push-pull izvedba [1].

Unatoč tome ne preporuča se upotreba polikabela duljine veće od 3,6 m. Uz to preporuča se korištenje polikabela izrađenih od teflona, najlona ili nekog drugog prikladnog plastičnog materijala. [18]

Zbog činjenice da je aluminij relativno mekan materijal koji se lako deformira, potrebno je obratiti pozornost i na izbor valjaka za dobavu žice. U slučaju korištenja neadekvatnih valjaka može doći do pretjeranog pritiska na elektrodu i njenog zapinjanja u sapnici. Valjci za uvlačenje moraju biti polirani, ožljebljeni ili u kombinaciji jedan ravni, drugi s utorom [1]. Uz to prilikom zavarivanja aluminijske žice potrebno je odabrati i posebne kontaktne vodilice. Naime, prilikom zagrijavanja, aluminijska se žica širi te je potrebno koristiti nešto veće kontaktne vodilice prilagođene toplinskom širenju aluminijske žice, stoga vodilice za čelične žice nisu prikladne za zavarivanje aluminijskim žicama. [18]

## 5.2. Načini prijenosa metala prilikom MIG zavarivanja

Način prijenosa metala električnim lukom kod MIG zavarivanja igra veliku ulogu i upravo ono čini ovaj postupak vrlo raznolikim. Mehanizam kojim se rastaljeni metal prenosi s kraja elektrode na obradak značajno utječe na karakteristike zavara. Četiri osnovna načina prijenosa metala su: kratkim spojem, prijelaznim lukom, štrcajućim lukom te impulsno zavarivanje koje je varijacija štrcajućeg luka. Uz četiri osnovna postoje i dodatne varijacije. [22]

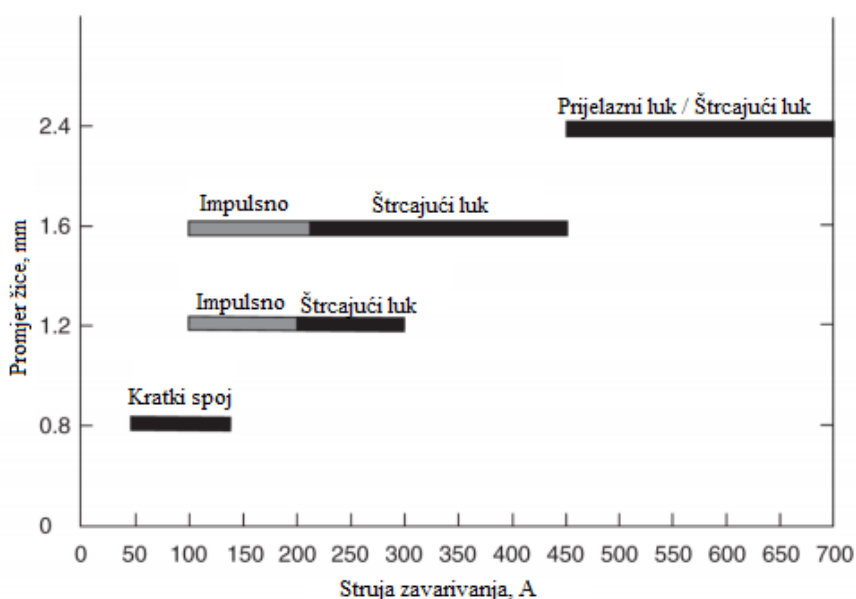
Na postizanje određenog načina prijenosa metala utječu brojni čimbenici, a neki od njih su [22]:

- sastav elektrode i zaštitnog plina
- promjer elektrode
- iznos struje i napona zavarivanja
- električni polaritet

- oblik izlaznog vala izvora napajanja i način upravljanja
- duljina slobodnog kraja žice

Način prijenosa metala utječe na mnoge aspekte procesa, a neke od njih su: depozit materijala, brzina kretanja, unos topline u komad koji se zavaruje, mogućnost različitih položaja zavarivanja i debljina komada koju je moguće zavariti. [19]

Slika 15 prikazuje kako na prijenos metala utječe kombinacija struje zavarivanja i promjera žice.



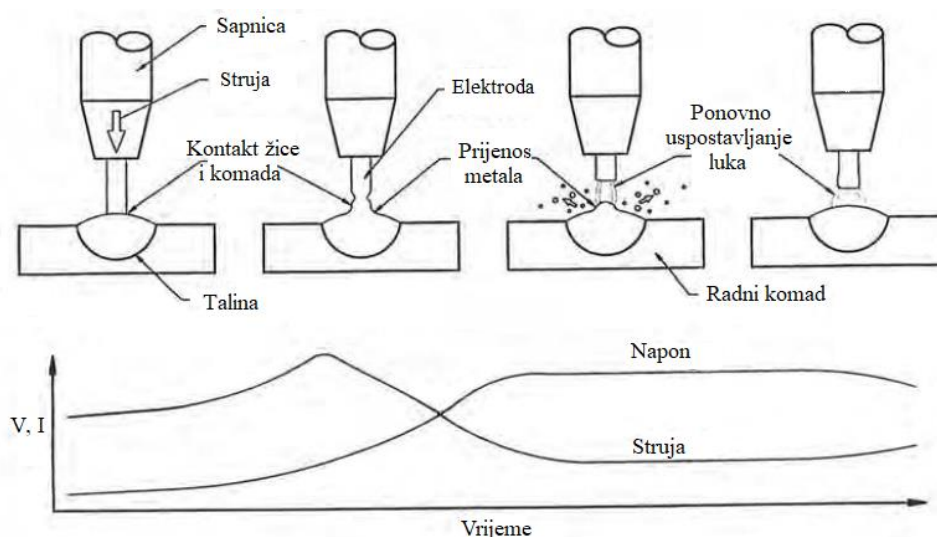
**Slika 15. Odnos promjera žice i struje zavarivanja ovisno o načinu prijenosa metala[1]**

### 5.2.1. Prijenos kratkim spojem

Prijenos metala kratkim spojem događa se na najnižim rasponima iznosa struja i napona te prilikom takvog zavarivanja najčešće se koriste najmanji promjeri elektroda. Zbog malih struja i malih unosa topline ovakav postupak pogodan je za zavarivanje tankih dijelova, premošćivanje velikih korijenskih otvora i za zavarivanje u različitim položajima. S druge strane nizak unos topline rezultira relativno malim taljenjem i može predstavljati problem prilikom zavarivanja debljih dijelova zbog nedovoljnog protaljivanja. Kod ovakvog načina, do prijenosa metala ne dolazi preko električnog luka već do njega dolazi isključivo kada elektroda odnosno žica dotakne osnovni komad ili rastaljeni metal s kojim zatvori strujni krug. Prilikom tog kontakta dolazi do zagrijavanja žice i njenog taljenja. Kada se uspostavi kratki spoj, dolazi do brzog rasta struje što dovodi do taljenja metala i njegovog odvajanja.

Taljenjem dijela žice koji je u doticaju s taljevinom dolazi do ponovnog uspostavljanja luka i postupak se nastavlja. Stabilnost prijenosa metala ovisi o brzini i razini porasta struje. Porast struje mora biti dovoljno velik da pospješi prijenos metala, ali ne prevelik kako ne bi došlo do naglog odvajanja i nepoželjnog prskanja. Izvedba i postavke izvora napajanja za zavarivanje u velikoj mjeri određuju trenutnu izlaznu snagu i stabilnost prijenosa. U konvencionalnim izvorima napajanja s konstantnim naponom, napon otvorenog kruga i induktivitet izvora napajanja utječu na trenutnu razinu i brzinu porasta struje. Optimalna postavka induktiviteta ovisi o električnoj impedanciji kruga i karakteristikama taljenja žice. Najnovije tehnologije izvora napajanja koriste sofisticirane metode upravljanja. Umjesto da se oslanjaju na prirodni električni odziv transformatora izvora energije, ovi sustavi prepoznaju karakteristike luka i kratkog spoja te aktivno kontroliraju izlazni val struje i napona. U nekim se slučajevima kontrola struje i napona zavarivanja sinkronizira s pulsiranjem napajanja žice. Rezultat je poboljšana stabilnost procesa i proširenje procesnih mogućnosti izvan onoga što je moguće postići konvencionalnim prijenosom kratkog spoja. Također, osim o izvoru napajanja, na radne karakteristike luka, taljenje žice i dubinu protaljivanja utječe i izbor zaštitnog plina. Kod zavarivanja kratkim spojem koriste se male struje i naponi uz manje promjere žice stoga je i depozit manji. Promjeri žica koji se koriste kod zavarivanja kratkim spojem kreću se između 0,6 mm i 1,2 mm. [19],[22]

Na Slici 16 nalazi se shematski prikaz prijenosa metala kratkim spojem.



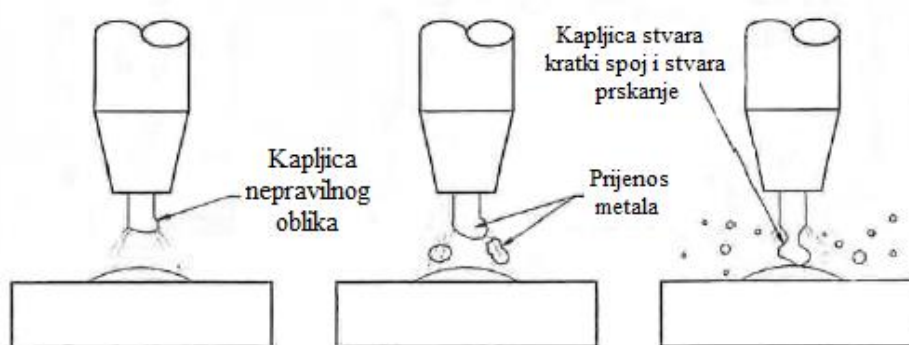
**Slika 16. Prijenos metala kratkim spojem[22]**



### 5.2.2. Prijenos prijelaznim lukom

Prijenos prijelaznim lukom karakterizira stvaranje velikih, nepravilnih kapljica metala koje su najčešće veće od promjera elektrode. Ciklus započinje stvaranjem kapi na vrhu žice koja raste kako se tali žica, a kada postane dovoljno velika odvoji se od elektrode. U slučaju premalog razmaka između elektrode i radnog komada, odvajanje i pad kapljice može povremeno premostiti razmak i stvoriti kratki spoj. Kada dođe do kratkog spoja, kap se pregrijava što uzrokuje njenu eksploziju i prskanje. S obzirom da kod ovog načina prijenosa veliku ulogu ima gravitacija, on je uglavnom ograničen na vodoravne položaje zavarivanja. Prijenos prijelaznim lukom odvija se na nešto višim iznosima struja i napona nego kod prijenosa kratkim spojem. Rasponi struje zavarivanja i napona koji proizvode globularni prijenos ovise o karakteristikama elektrode. Kod upotrebe čeličnih elektroda i vrlo inertnog plina do prijelaznog luka dolazi pri strujama koje su tek nešto veće od onih koje se koriste kod kratkog spoja. Međutim, prilikom upotrebe ugljičnog dioksida kao zaštitnog plina iznosi struja su znatno veći. Najčešće korišten plin prilikom zavarivanja prijelaznim lukom je CO<sub>2</sub>. U usporedbi s prijenosom štrcajućim lukom, prijelazni luk koristi niže iznose struje i dovodi do manjeg zagrijavanja komada, ali proizvodi značajne količine prskanja. Prskanje luka se može djelomično smanjiti metodom luka "zakopanog" ispod površine rastaljenog osnovnog metala. [19],[22]

Slika 17 prikazuje shemu prijenosa metala prijelaznim lukom.

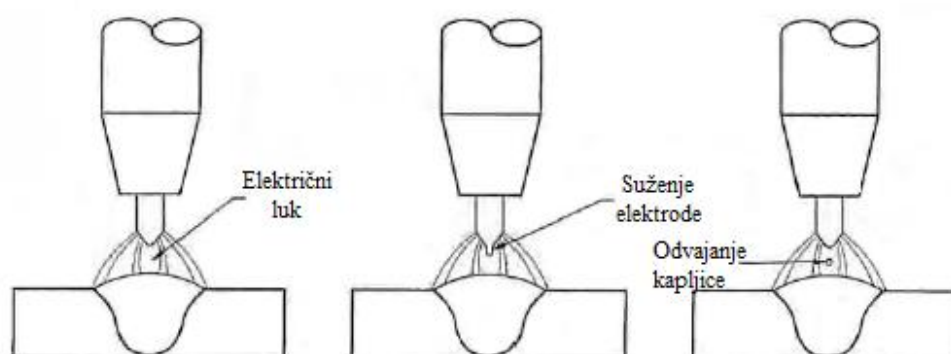


Slika 17. Prijenos metala prijelaznim lukom[22]

### 5.2.3. Prijenos štrcajućim lukom

Način prijenosa štrcajućim lukom čest je izbor kod potrebe za visokoproduktivnim zavarivanjem. U odnosu na prijenos kratkim spojem i prijenos prijelaznim lukom, ovaj način koristi najveće iznose struja. Kapljice su uglavnom manje od promjera elektrode, a kapljice se stvaraju frekvencijom većom od 100 puta u sekundi. Prijenos štrcajućim lukom zahtijeva upotrebu DC+ polariteta, a struje moraju biti iznad kritične vrijednosti prijelazne struje. Iznos prijelazne struje ovisi o promjeru i sastavu žice, sastavu zašitnog plina i u manjoj mjeri o duljini slobodnog kraja žice. Porastom promjera žice i povećanjem udjela CO<sub>2</sub> u zašitnom plinu raste i prijelazna struja. Štrcajući luk karakterizira sitna i usmjerena raspodjela kapljica koja ne rezultira stvaranjem kratkog spoja, što omogućava manje prskanje u odnosu na ostale načine. Ovakav način prijenosa omogućava veće dubine protaljivanja i velike učinke taljenja. Ovaj način prijenosa povezan je s pojavom poznatom kao "pitching" efekt. Oko bilo kojeg vodiča koji provodi struju stvara se magnetsko polje. Kako se povećava gustoća struje, tako se i sila magnetskog polja stišće prema unutra. Ta sila djeluje na kapljicu koja nastaje na kraju žice i istiskuje ju. To objašnjava zašto su kod prijenosa štrcajućim lukom potrebne veće gustoće struje. Prijenos štrcajućim lukom pogodan je za zavarivanje u svim položajima. Način prijenosa štrcajućim lukom moguć je isključivo pri upotrebi plina koji se sastoji od najmanje 80 % argona. Iako je ovaj način prijenosa pogodan za deblje komade zbog mogućnosti veće dubine protaljivanja, upravo zbog velikih iznosa struje može biti problematičan kod zavarivanja tanjih komada. [19],[22]

Slika 18 shematski prikazuje prijenos metala štrcajućim lukom.

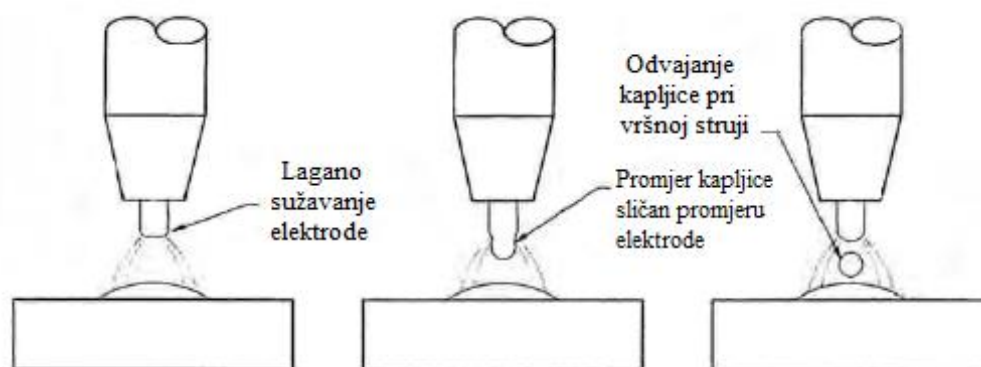


Slika 18. Prijenos metala štrcajućim lukom[22]

#### 5.2.4. Impulsno zavarivanje (P-GMAW)

Impulsno ili pulsno zavarivanje modifikacija je prijenosa metala štrcajućim lukom. Ovaj način prijenosa metala izumljen je sredinom 1960-ih i omogućio je svladavanje negativnih strana prijenosa prijelaznim lukom, a pritom pružajući prednosti prijenosa štrcajućim lukom. Ovaj način prijenosa karakterizira pulsiranje struje između osnovnih i vršnih impulsnih struja, na način da je srednja struja uvijek ispod granice štrcajućeg luka. Svrha osnovne struje je održavanje luka, dok vršna impulsna struja osigurava odvajanje rastaljene kapljice. Osim smanjenja unosa topline, pulsno zavarivanje pruža i druge prednosti kao što su: manje deformacije i mogućnost regulacije veličine kapljica, mogućnost korištenja žica velikih promjera što dovodi do smanjenja poroznosti zbog manjeg omjera površine i volumena, veće brzine zavarivanja. Ova varijacija izvedbe štrcajućeg luka omogućuje zavarivanje tanjih komada i omogućava korištenje postupka u različitim položajima. Za impulsno zavarivanje potrebne su posebne izvedbe uređaja izvora struje. [22], [23]

Na Slici 19 shematski je prikazan postupak prijenosa metala pulsним strujama.



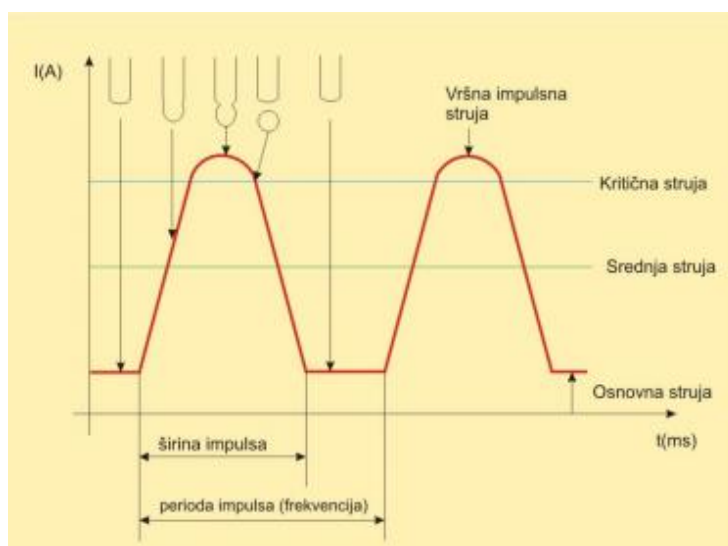
**Slika 19. Prijenos metala pulsним zavarivanjem[22]**

Osnovni parametri koji definiraju način i stabilnost prijenosa metala kod impulsnog zavarivanja su [24]:

- vršna struja koja ovisi o vrsti osnovnog materijala, promjeru žice u mješavini zaštitnog plina. Njena vrijednost kreće se između 250 A i 650 A
- osnovna struja koja osigurava stabilnost luka nakon prestanka impulsa. Iznosi osnovnih struja podešavaju se na što nižu vrijednost, a kreću se između 20A i 50A. Veći iznosi omogućuju bolju stabilnost, ali pritom povećavaju količinu unesene energije i dužinu luka

- trajanje impulsa koje se određuje tako da omogući odvajanje jedne kapljice za vrijeme trajanja impulsa, a najčešće iznosi između 1 ms i 3 ms
- frekvencija koja se određuje prema određenoj brzini žice na način da odvajanje bude stabilno. Frekvencija označava broj kapljica u jednoj sekundi, a podešava se između 20 Hz i 300 Hz
- brzina žice koja određuje količinu rastaljenog metala, a ovisi o promjeru žice. Kreće se između 2 m/min i 15 m/min.

Slika 20 prikazuje izgled dinamičke karakteristike kod zavarivanja pulsnim strujama. Na slici je prikazano i u kojem trenutku dolazi do odvajanja rastaljene kapljice dodatnog materijala ovisno o struji.



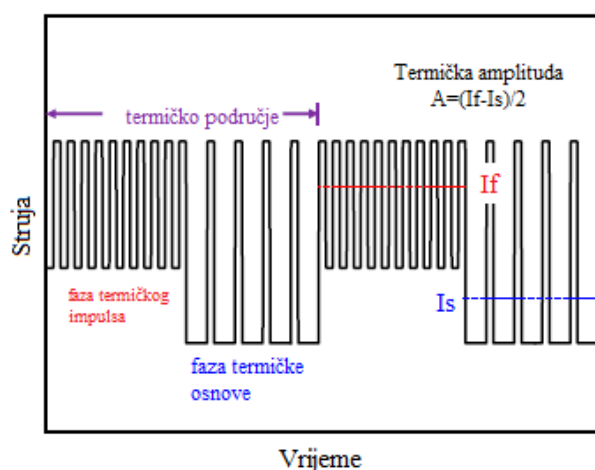
Slika 20. Grafički prikaz impulsnog načina prijenosa metala[24]

### 5.2.5. Zavarivanje dvostrukim impulsom (DP-GMAW)

Iako je razvoj impulsnog zavarivanja (P-GMAW) doprinio kvaliteti zavara, negativna strana takvog postupka je ograničenost primjene postupka na zavarivanje komada manjih debljina. Također, zbog rada na nižim frekvencijama prilikom impulsnog zavarivanja još uvijek je česta pojava nestabilnosti luka i lošeg miješanja metal. Upravo zbog tih nedostataka postojala je potreba za razvojem dodatnog poboljšanja što je dovelo do razvoja postupka zavarivanja dvostrukim pulsom (DP-GMAW). Važni parametri zavarivanja dvostrukim pulsom su visoka frekvencija, brzina dobave žice i intermitencija. Podešavanjem frekvencije omogućava se prijenos jedne kapljice po impulsu, brzina dobave žice utječe na veličinu kapljice, a iznos intermitencije utječe na oblik kapljice metala što utječe na izgled zavara. [25]

Ova metoda omogućava kontrolu iznosa i trajanja vršne struje prijenosa kapljice, putem termičkog impulsa. Frekvencija impulsa u fazi termičkog impulsa veća je od one u fazi termičke osnove, a osnova struje u fazi termičkog impulsa veća je od one u fazi termičke osnove što je vidljivo na Slici 21. Osim manjeg unosa topline, ovaj postupak omogućuje popunjavanje većih razmaka kod korijena zavora, a to posebno dolazi do izražaja kod zavarivanja većim brzinama. Također omogućuje usitnjavanje zrna efektom miješanja u metalu zavora, poboljšavajući tako mehanička i metalurška svojstva legure aluminija. [26]

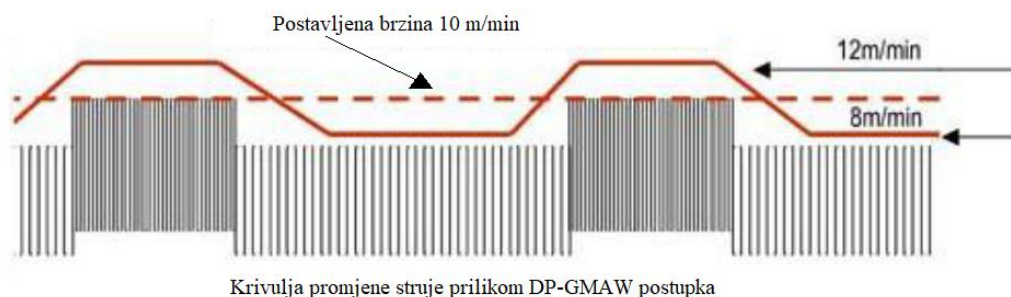
Neke od osnovnih prednosti ovog postupka u odnosu na druge načine prijenosa metala su: smanjena učestalost pojave poroznosti u zavoru i osjetljivosti na pukotine nastale prilikom očvršćivanja. Slika 21 prikazuje dijagram valnog prikaza struje prilikom zavarivanja dvostrukim pulsom. Strujni se val sastoji od ritmičke faze termičke osnove i faze termičkog impulsa koji su zaduženi za regulaciju raspodjele topline, a da pri tome ne dolazi do mijenjanja količine unosa topline. Zbroj vremena faza termičke osnove i termičkog impulsa naziva se termičko razdoblje, a termička frekvencija definirana je kao recipročna vrijednost termičkog razdoblja. Termička amplituda jednaka je polovici vrijednosti razlike između srednje struje termičkog impulsa i prosječne struje faze termičke osnove. Faza termičke osnove i faza termičkog impulsa sadrže nekoliko strujnih impulsa (vršna i osnovna struja), koji se koriste za stvaranje velike magnetske sile. [27]



**Slika 21. Prikaz krivulje struje postupka DP-GMAW ovisno o vremenu [27]**

Prilikom faze termičkog impulsa, istovremenim povećanjem struje dolazi i do povećanja napona zavarivanja, a time i do većeg unosa topline. U toj fazi, postupkom DP-GMAW unosi se više energije nego konvencionalnim pulsним zavarivanjem, a ujedno je i količina

nataljenog materijala veća. Povećanjem i smanjenjem unesene energije mijenja se i brzina dodavanja žice prilikom zavarivanja. Upravo zbog većeg unosa topline u toj fazi dolazi i do boljeg protaljivanja i penetracije, dok u fazi termičke osnove uslijed smanjenja iznosa struje i napona dolazi do smanjenja unosa topline što sprječava progaranje materijala. [28] Prikaz promjene brzine dodavanja žice ovisno o fazi DP-GMAW postupka nalazi se na Slici 22.



**Slika 22. Promjena brzine dobave žice ovisno o promjeni iznosa struje zavarivanja kod DP-GMAW postupka [28]**

Zavarivanje dvostrukim impulsom jedna je od novijih tehnika zavarivanja u proizvodnji, a čestu primjenu pronalazi u zavarivanju aluminijskih legura jer daje estetski lijep zavar sličan TIG-u, uz bolju produktivnost i jednostavniju automatizaciju. [28]

### 5.3. Izbor zaštitnog plina

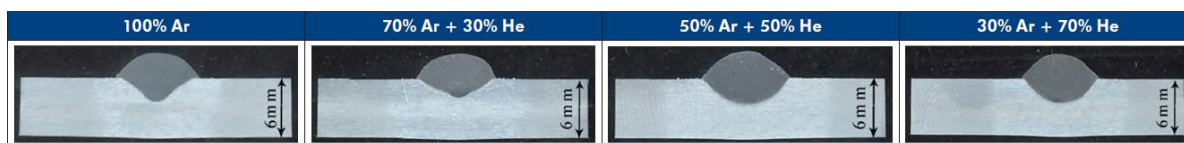
Kao zaštitni plinovi kod MIG zavarivanja aluminijskih legura koriste se inertni plinovi argon i helij ili njihova kombinacija. Najčešće korišteni plin je argon koji se koristi i za ručno i automatizirano zavarivanje. Argon je osjetno jeftiniji plin od helija, a omogućava stabilan električni luk i gladak zavar s dobrim protaljivanjem tanjih komada. S druge strane argon daje i najmanji unos topline, a time i sporije brzine zavarivanja. Zbog niskog unosa topline može doći do nedovoljnog protaljivanja te poroznosti kod zavarivanja debljih komada. Nakon zavarivanja u zaštiti argona, na površini zavara ostaje crna naslaga čađe koju je potrebno ukloniti žičanim četkama. [1]

Helij s druge strane, u usporedbi s argonom, povećava napon luka za čak 20 %, što rezultira većim unosom topline koja omogućava bolje protaljivanje i širi zavar. Zbog većeg unosa topline i sporijeg hlađenja taline, omogućava difuziju vodika iz taline što smanjuje pojavu poroznosti u zavaru. Još jedna pozitivna strana većeg unosa topline je i mogućnost zavarivanja i nekoliko puta većim brzinama nego u zaštiti argona. Ipak zbog visoke cijene i

nestabilnijeg luka, primjena čistog helija uglavnom je rezervirana za automatiziranu proizvodnju. Uz čiste plinove česta je i upotreba mješavina ovih dvaju plinova. Miješanjem Ar i He moguće je postići kombinaciju prednosti jednog i drugog plina. Mješavina ovih plinova često se koristi kod zavarivanja komada veće debljine kod kojih je potreban veći unos topline. Isto tako kombinacijom Ar i He postiže se veća brzina zavarivanja što poboljšava produktivnost postupka. Vrlo je bitna činjenica da plinovi moraju biti minimalne čistoće od 99,997 % i pritom moraju imati nisku razinu vlage, idealno s rosištem manjim od  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$  (manje od 39 ppm  $\text{H}_2\text{O}$ ). [1]

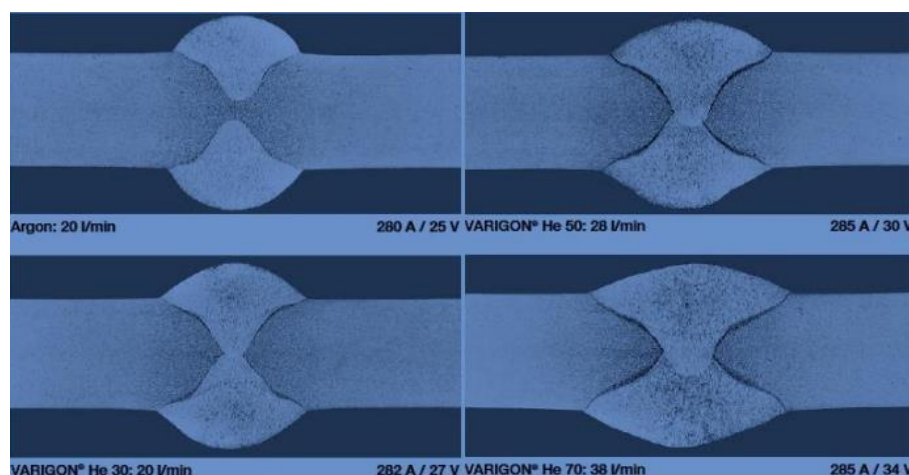
Preporuke su korištenje 100 % Ar za zavarivanje ploča debljine do 12,7 mm, a za zavarivanje debljih ploča potreban je veći unos topline pa se preporuča korištenje kombinacije Ar i He. Uz to protok plina uglavnom se kreće između 14 i 47 l/min, a veći protoci uglavnom se koriste kod većih promjera žice ili kod kombinacije Ar i He s većim udjelom He. [18]

Slika 23 prikazuje kako izbor kombinacije Ar i He utječe na navarivanje aluminijske ploče debljine 6 mm.



**Slika 23. Utjecaj izbora plina na protaljšivanje kod navarivanja aluminijske ploče [29]**

Slika 24 također prikazuje utjecaj izbora plina na izgled zavarivanja, ali i na iznos struje i napona prilikom zavarivanja. U ovom slučaju radi se o obostranom zavarivanju. Vidljivo je da porastom udjela He u zaštitnom plinu znatno raste i protaljšivanje legure, ali i da dolazi do laganog rasta struje i napona zavarivanja.

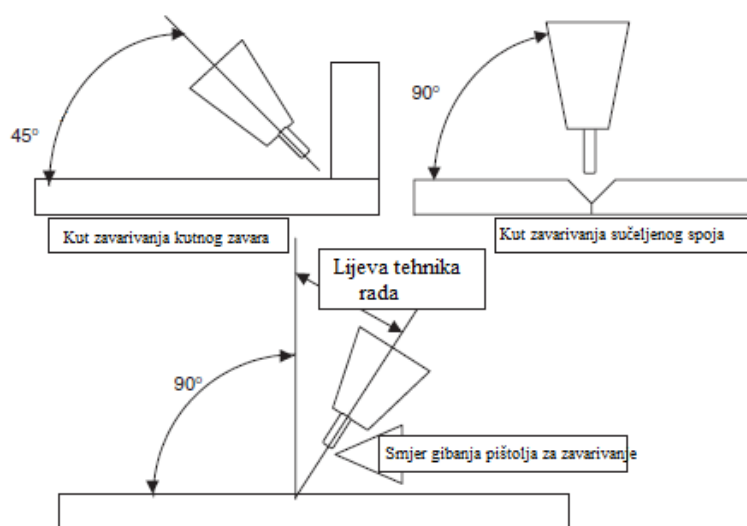


**Slika 24. Utjecaj izbora zaštitnog plina na izgled obostranog zavarivanja aluminijske legure i iznosa struje i napona [30]**

#### 5.4. Tehnika zavarivanja

Preporuka za položaj pištolja prilikom zavarivanja aluminija je  $5^\circ$  do  $10^\circ$  nagiba s lijevom tehnikom rada s kojom se postiže 'guranje' taline prema naprijed. Kod desne tehnike zavarivanja talina se 'vuče' i tada zaštitni plin ne pokriva adekvatno talinu što nakon hlađenja rezultira sivim ili crnim zavarom. Također potrebno je pažljivo gašenje luka jer u slučaju naglog gašenja luka dolazi do stvaranja dubokog kratera u kojem može doći do stvaranja pukotina uslijed skupljanja. To se može izbjeći postupnim povećanjem brzine zavarivanja i okretanjem smjera sapnice pred kraju zavara. Također moguće je i korištenje dodatnih pločica na krajevima ploče kako bi se izbjegli problemi uslijed započinjanja i gašenja luka. [18]

Na Slici 25 prikazan je preporučeni položaj zavarivanja aluminijskih legura.



Slika 25. Položaj zavarivanja aluminijskih legura MIG postupkom [1]



## 6. DINAMIČKA KARAKTERISTIKA IZVORA STRUJE

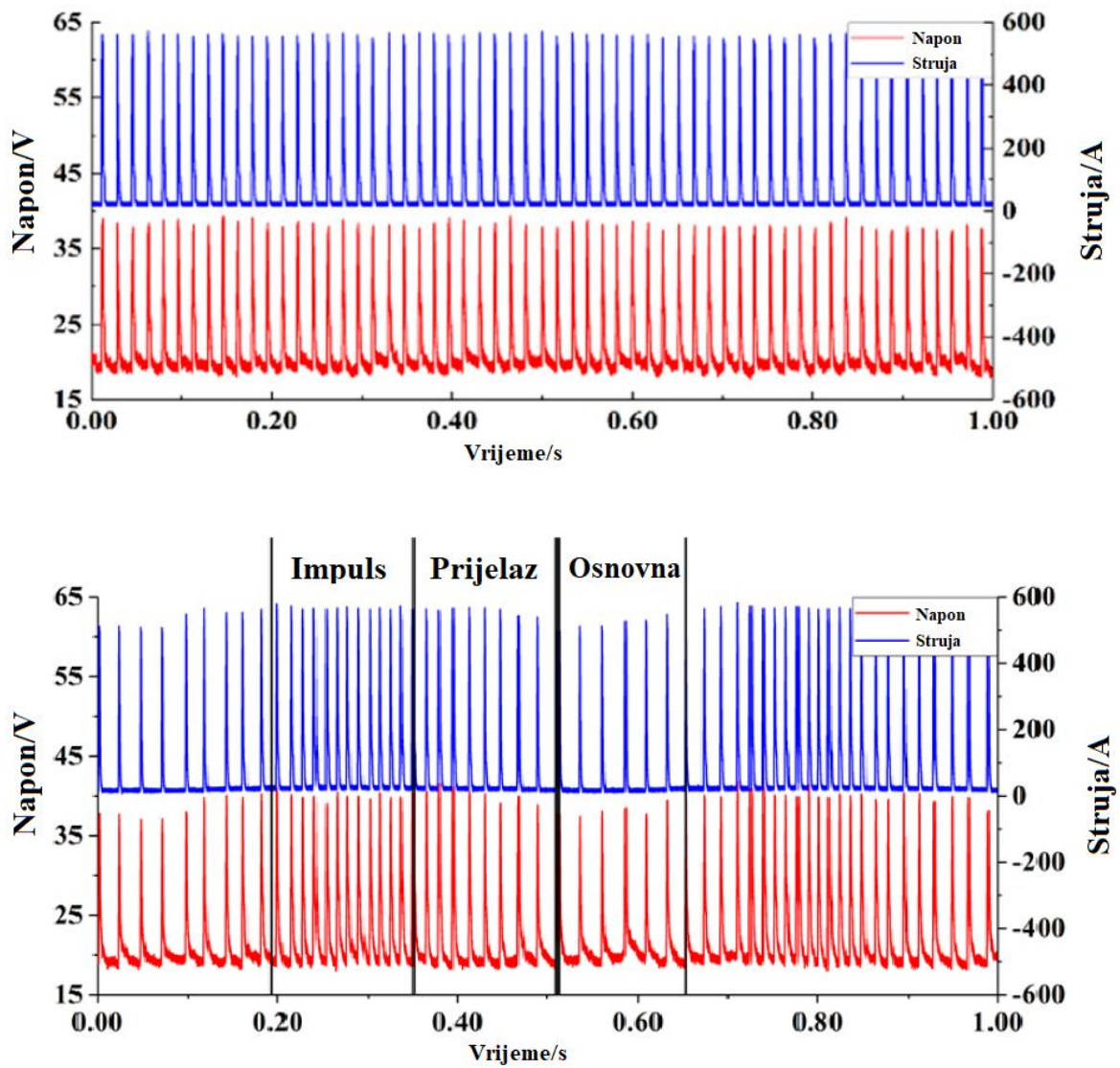
Dinamička karakteristika izvora napajanja jedna je od ključnih stavki kada se govori o uspješnosti zavarivanja. Zbog manjih promjena u duljini slobodnog kraja žice, a time i duljini luka, tijekom zavarivanja dolazi do promjena i nestabilnosti u iznosima struja i napona. Dinamička karakteristika prikazuje trenutne promjene odnosa napona i struje zavarivanja uzrokovane promjenom prijenosom metala, parametara zavarivanja, parametara izvora napajanja kao što su otpor, induktivitet i kapacitivnosti, a određuje stabilnost procesa. Dinamička karakteristika značajno se razlikuje ovisno o načinu upravljanja prijenosom metala.[31]

Elektrolučno zavarivanje zahtijeva unos značajne količine topline u vrlo kratkom vremenu. U električnom vodiču toplina se emitira kao rezultat protoka struje, a proporcionalna je kvadratu njegove vrijednosti prema Jouleovom zakonu  $Q = R * I^2 * t$ . Dvostruko smanjenje struje uzrokuje četverostruko smanjenje unosa topline. Električna snaga izražena je kao umnožak napona i struje  $P = U * I$ , a prenosi se pri visokom naponu i nižim strujama upravo zbog smanjenja gubitka topline. Kod postupka zavarivanja potrebno je suprotno, velika struja pri niskom naponu kako bi se povećala emisija topline. Zadaću prilagođavanja struje i napona potrebama postupka zavarivanja obavljaju izvori struje za zavarivanje, odnosno električni pretvarači. Izvori za zavarivanje napajaju se iz mreže sa sinusnih jednofaznih 230 V ili trofaznih 380 V. Crpe struju od nekoliko do nekoliko desetaka ampera, generirajući istosmjernu ili izmjeničnu struju od nekoliko stotina ampera, pri naponu od nekoliko do nekoliko desetaka volti. [32]

Svaki postupak elektrolučnog zavarivanja ima niz osobina i parametara koji se mijenjaju, ali i načina prijenosa metala, a time i zahtijeva za statičkom i dinamičkom karakteristikom izvora struje.[32]

Na tržištu postoje razne izvedbe uređaja za mjerenje parametara zavarivanja koji u istraživanjima bilježe utjecaj na konačna svojstva zavara, a time i potrebe za prilagođavanje mjernih uređaja. Mjerenje dinamičke karakteristike najčešće se povezuje sa MIG/MAG postupkom, upravo zbog velikog broja varijacija tog postupka.[33]

Slika 26 prikazan je izgled dinamičke karakteristike MIG zavarivanja korištenjem pulsniha struja i duplih pulsniha struja. Na grafovima je plavom bojom prikazana krivulja struje zavarivanja, a crvenom linijom promjena napona tijekom zavarivanja.



Slika 26. Izgled dinamičke karakteristike izvora struje kod pulsnog zavarivanja (gore) i zavarivanja duplim pulsom (dolje) [34]

## **7. EKSPERIMENTALNI DIO RADA**

Eksperimentalni dio rada sastoji se od dva osnovna dijela. U prvom dijelu određena je dinamička karakteristika uređaja za zavarivanje pri elektrolučnom zavarivanju taljivom elektrodom u zaštiti inertnog plina (MIG). Pritom je određena dinamička karakteristika dvaju metoda MIG postupka: konvencionalnog impulsnog zavarivanja (P-GMAW) i zavarivanja duplim impulsom (DP-GMAW). Nakon toga uspoređeni su iznosi unosa topline dobiveni analitičkom metodom iz podataka očitanih s uređaja za zavarivanje i podataka dobivenih snimanjem dinamičke karakteristike izvora struje.

Drugi dio eksperimentalnog dijela rada sastoji se od zavarivanja uzorka konvencionalnim MIG postupkom i duplim pulsom. Na dobivenom zavaru napravljena su ispitivanja prema normi HRN EN ISO 15614-2 (Specifikacija i kvalifikacija postupaka zavarivanja za metalne materijale -- Ispitivanje postupka zavarivanja -- 2. dio: Elektrolučno zavarivanje aluminija i njegovih legura) te je napravljena komparativna analiza ovih dvaju postupaka.

Prema normi HRN EN ISO 15614-2, za kutni zavar propisane su vizualna, penetrantska, makroskopska te mikroskopska metoda ispitivanja.

Eksperimentalni dio rada napravljen je u Laboratoriju za zavarivanje i Laboratoriju za zaštitu materijala, Fakulteta strojarstva i brodogradnje, Sveučilišta u Zagrebu.

## 7.1. Ispitivanje dinamičke karakteristike

### 7.1.1. Oprema za zavarivanje i mjerni uređaji

Za postupak navarivanja, korišten je uređaj Welbee P500L proizvođača Daihen Varstroj prikazan na Slici 27, te sustav za automatsko upravljanje Bugo System (Slika 28) na koji je pričvršćen pištolj za zavarivanje.



**Slika 27. Welbee P500L, Daihen Varstroj**

U Tablici 6 nalazi se popis tehničkih karakteristika uređaja Welbee P500L.

**Tablica 6. Tehničke karakteristike uređaja Welbee P500L[35]**

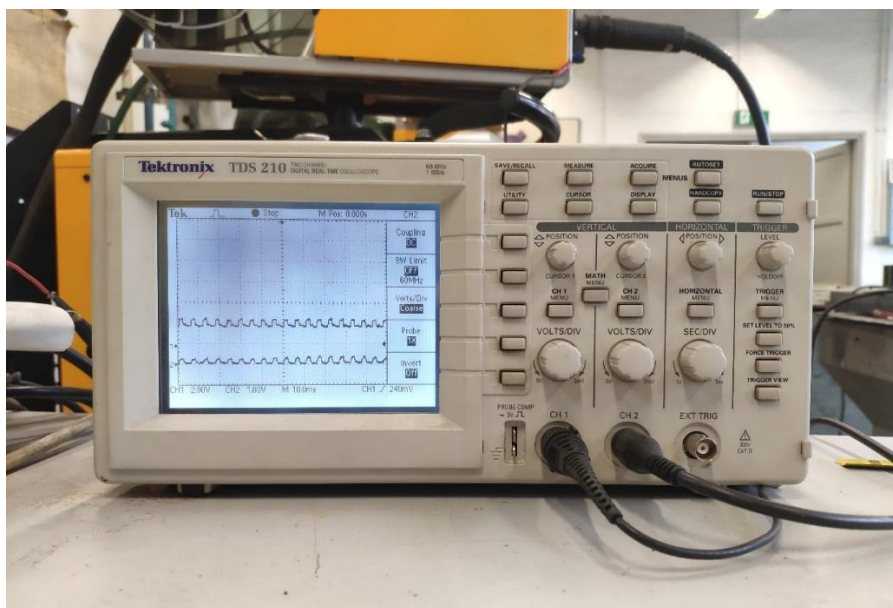
Mrežni napon , V	400 (+/- 15 %)
Broj faza	3
Potrošnja snage, kW	22,9
Intermitencija, A	410
Nazivna izlazna struja, A	DC : 500 A / Puls: 400 A
Nazivni izlazni napon, V	DC : 39 V / Puls : 34 V
Raspon struje zavarivanja, A	30 A – 500 A

Raspon napona zavarivanja, V	12 V – 45 V
Radna temperatura, °C	-10 do 40
Težina uređaja, kg	83
Dimenzije uređaja Š / D / V, mm	395 / 710 / 762



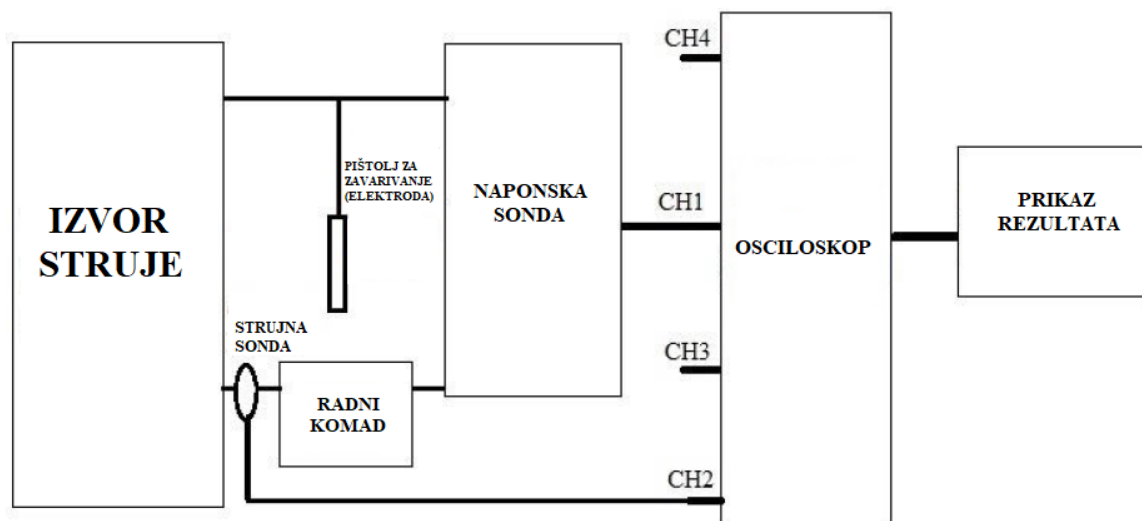
**Slika 28. Uređaj za automatsko upravljanje Bugo System**

Prilikom postupka navarivanja praćena je i snimana dinamička karakteristika uređaja za zavarivanje. Dinamička karakteristika uređaja snimljena je osciloskopom TDS 210 proizvođača Tektronix (Slika 29), uz pomoć strujnih kliješta, a podaci dobiveni snimanjem obrađeni su pomoću računalnog programa Wavestart.



Slika 29. Osciloskop Tektronix TDS 210

Na Slici 30 shematski je prikazan način spajanja osciloskopa s dijelovima sustava za zavarivanje.



Slika 30. Shematski prikaz sustava za mjerenje dinamičke karakteristike [36]

### 7.1.2. Osnovni i dodatni materijal

Kao osnovni materijal u prvom dijelu eksperimenta korištena je ploča aluminijske legure 5083, debljine 10 mm. Kemijski sastav i svojstva legure 5083 prikazani su u Tablicama 7 i 8.

**Tablica 7. Kemijski sastav legure 5083**

Kemijski element	Mg	Mn	Si	Fe	Zn	Ti	Cu	Cr
Udio, %	4,0-4,9	0,4-1,0	0,4	0,4	0,25	0,15	0,1	0,05-0,25

**Tablica 8. Svojstva legure 5083**

Gustoća, g/cm <sup>3</sup>	2,65
Temperatura taljenja, °C	588
Modul elastičnosti, GPa	70-80
Poissonov faktor	0,33
Toplinska provodnost, W/mK	127 (25 °C)
Toplinsko širenje, 10 <sup>-6</sup> /°C	23,9 (20 °C – 100 °)

Navarivanje, a u drugom drugom dijelu eksperimenta i zavarivanje odrađeno je žicom promjera 1,2 mm izrađene od aluminijske legure AlMg5 proizvođača Elektroda Zagreb, čije su karakteristike prikazane na Slici 31.

EZ - MIG AlMg5						
<b>NORME</b>						
HRN EN ISO	AWS / ASME		W. Nr.			
18723	SFA-5.10					
S Al 5356 / Al Mg5Cr(A)	ER5356		3.3556			
<b>SVOJSTVA I PODRUČJE PRIMJENE</b>						
Aluminijska žica za MIG zavarivanje legirana s 5% magnezija. Namijenjena za zavarivanje Al-Mg i Al-Mg-Si legura. Metal zvara relativno visoke čvrstoće, korozijski postojan u morskoj atmosferi. Pogodna za zavarivanje dijelova namijenjenih eloksiranju.						
<b>MEHANIČKA SVOJSTVA ČISTOG METALA ZAVARA</b>						
R <sub>e0,2</sub>	R <sub>m</sub>		A <sub>5</sub>			
N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>		%			
120	260		> 25			
<b>ORIJENTACIJSKI KEMIJSKI SASTAV ŽICE</b>						
Al	Mg	Mn	Cr	Si	Fe	
%	bal.	5,0	0,15	0,10	0,05	0,15
<b>ZAŠTITNI PLIN</b>						
11 (Ar)						
<b>PAKIRANJE</b>						
Promjer žice			Namotaj			
mm			Žica do žice (S-S)			
0,8; 1,0; 1,2; 1,6; 2,0						
7 kg - žičani kolut						

**Slika 31. Specifikacije žice AlMg5 korištene za navarivanje i zavarivanje [37]**

Kao zaštitni plin korišten je plin trgovačkog naziva Argon 5.0, čiji volumni udio argona iznosi 99,999 % (Slika 32). Protok plina prilikom navarivanja iznosio je 26 l/min.



**Slika 32. Boca zaštitnog plina Argon 5.0**

### 7.1.3. Postupak izrade

Prilikom postupka mjerenja dinamičke karakteristike navarivane su linije konvencionalnim impulsnim postupkom, a zatim i linije duplim impulsom. Brzina kretanja automatiziranog sustava Bugo System postavljena je na 60 cm/min za oba slučaja.

U Tablici 9 prikazani su parametri navarivanja prilikom kojih je snimana dinamička karakteristika izvora struje. Na Slici 33 prikazani su navari prilikom čijeg je navarivanja snimana dinamička karakteristika izvora struje. Postupak je izveden pomoću automatski upravljanog sustava Bugo System (Slika 28).

**Tablica 9. Parametri prilikom navarivanja**

	<b>Pulsno</b>	<b>Dvostruki-puls</b>
Zaštitni plin	100 % Argon	100 % Argon
Jakost struje, A	170	170
Srednja vrijednost napona, V	21,6	22,6
Brzina zavarivanja, cm/min	60	60





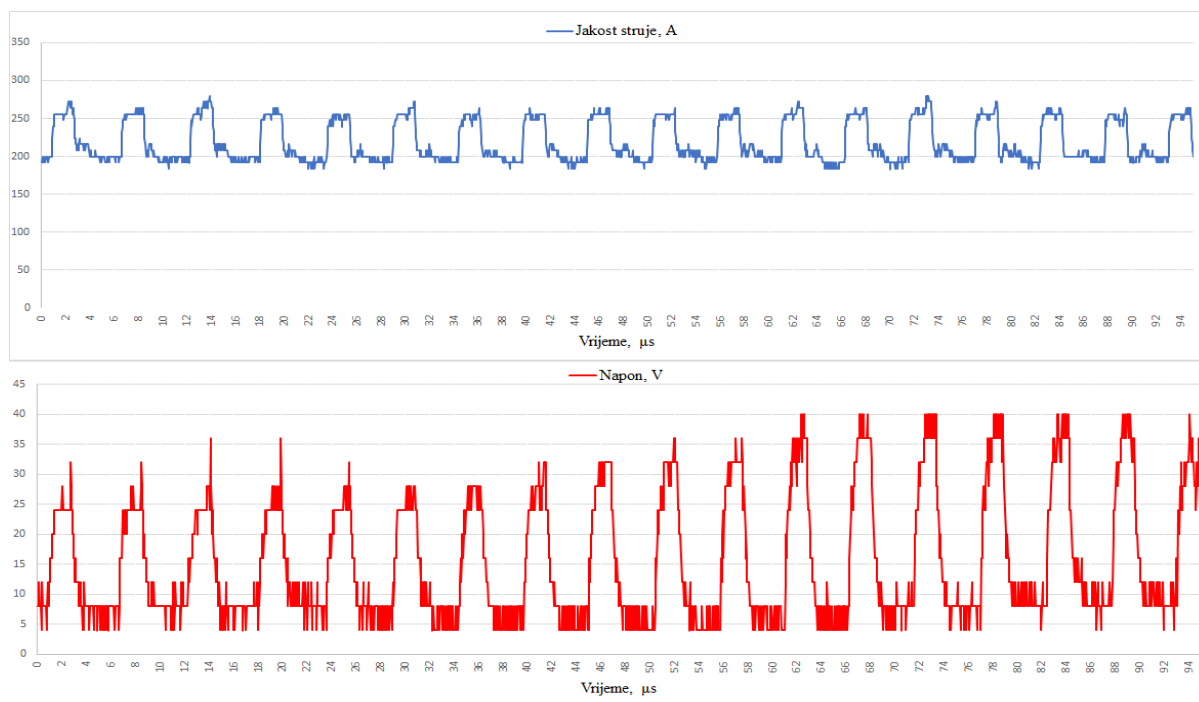
**Slika 33. Prikaz dobivenih navara**

#### **7.1.4. Dobiveni rezultati**

Cilj praćenja dinamičke karakteristike izvora struje za zavarivanje je usporedba količine unesene topline prilikom zavarivanja ovisno o načinu prijenosa metala. Također, cilj je i usporedba izračunatog iznosa unesene topline koristeći parametre zadane na uređaju i koristeći srednju vrijednost parametara dobivenih snimanjem dinamičke karakteristike izvora struje. Postupak snimanja dinamičke karakteristike proveden je za oba postupka za vremenski interval od 0,1 s i 1 s. Odabirom različitih vremenskih intervala želi se utvrditi utjecaj na srednji iznos unesene topline ovisno o vremenskoj skali. Naime kako je spomenuto u poglavlju 5.2.5, iznosi struja i napona kod DP-GMAW postupka razlikuju se ovisno radi li se o termičkoj fazi osnove ili o termičkoj fazi impulsa. Upravo uzimanjem manjeg i većeg vremenskog intervala želi se vidjeti utjecaj na iznos dobivenog srednjeg unosa topline. Snimanje dinamičke karakteristike izvora odrađeno je pomoću već spomenutog osciloskopa (Slika 29), a u zadanom vremenskom periodu snimljeno je 2500 točaka u formatu (I, t) i (U, t), odnosno 2500 vrijednosti iznosa struje i napona.

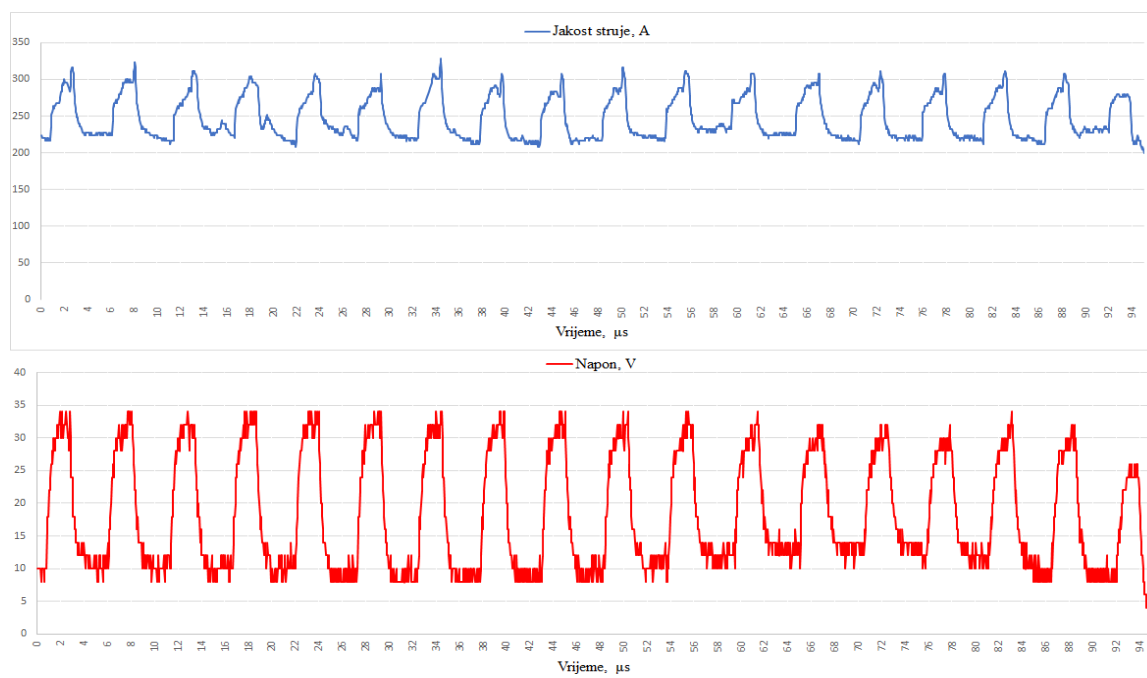
U prikazu dinamičkih karakteristika, plava linija predstavlja promjenu iznose struja u vremenu, dok crvena linija predstavlja promjenu iznosa napona u vremenu.

Na Slici 34, prikazana je snimka dinamičke karakteristike pri pulenom zavarivanju u vremenskom intervalu od 0,1 s.



**Slika 34. Dinamička karakteristika izvora struje, P-GMAW, 0,1 s**

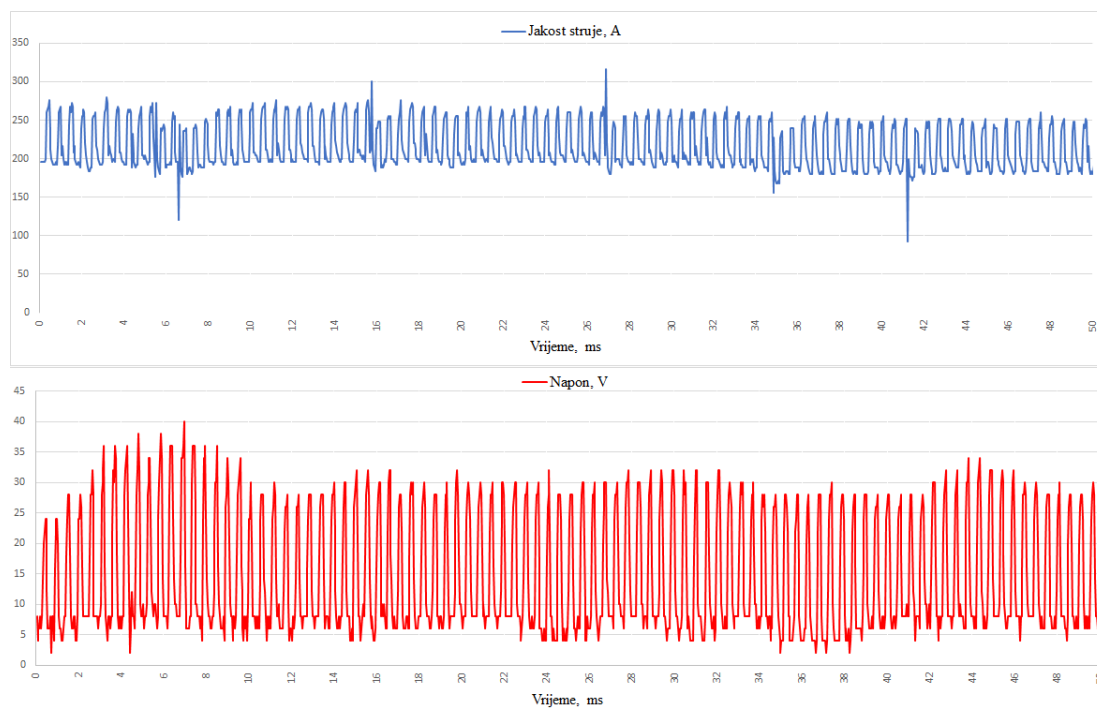
Slika 35 prikazuje dinamičku karakteristiku izvora struje pri zavarivanju duplim pulsним strujama. Vremenski interval u kojem je snimana dinamička karakteristika iznosi 0,1 s.



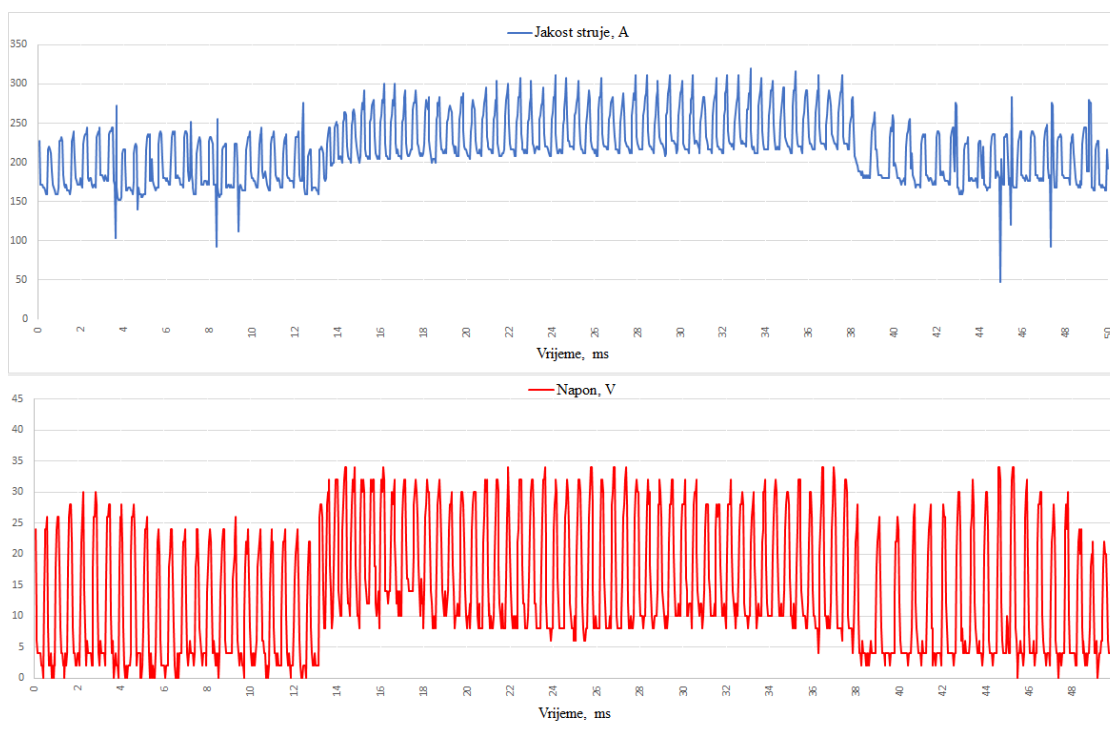
**Slika 35. Dinamička karakteristika izvora struje, DP-GMAW, 0,1 s**

Kako bi rezultati snimki dinamičke karakteristike za intervale od 1s bile što preglednije, na grafovima Slika 36 i 37 prikazan je period od 0,5 s, odnosno period jednog termičkog

područja DP-GMAW postupka. Slika 36 prikazuje dinamičku karakteristiku izvora struje pri zavarivanju konvencionalnim pulsним strujama, a Slika 37 pri zavarivanju duplim pulsним strujama.



**Slika 36. Dinamička karakteristika izvora struje, P-GMAW, 1 s**



**Slika 37. Dinamička karakteristika izvora struje, DP-GMAW, 1 s**

U svrhu analize unosa topline, za svaki postupak zavarivanja unos je izračunat tri puta. Prvi iznos unosa topline dobiven je klasičnim analitičkim uvrštavanjem vrijednosti očitanih na izvoru struje u formulu (1). Za izračun ovog unosa topline korišteni su podaci iz Tablice 9. Druga dva iznosa dobivena su pomoću računalnog programa Excel, odnosno uvrštavanjem iznosa struja i napona za svih 2500 točaka u formulu (2). Za svaki postupak izračunat je srednji iznos unosa topline za interval od 0,1 s i 0,1 s prema normi HRN EN 1011-1.2009 .

U formulama (1) i (2),  $\eta$  predstavlja stupanj iskoristivosti električnog luka koji je konstantan, a za MIG/MAG postupak iznosi 0,8. Dobiveni podaci prikazani su u Tablici 10.

$$Q = I \times U \times \frac{\eta}{v} \quad (1)$$

$$\tilde{Q} = \frac{\sum_1^{2500} I \times U \times \frac{\eta}{v}}{2500} \quad (2)$$

**Tablica 10. Unos topline prilikom navarivanja pulsним i duplim pulsним strujama**

	Puls	Dupli puls	Razlika
Unos topline izračunat pri zadanim/očitanim parametrima, J/mm	293,76	307,36	4,42 %
Unos topline izračunat preko dinamičke karakteristike (t = 0,1 s), J/mm	291,35	381,74	23,77 %
Unos topline izračunat preko dinamičke karakteristike (t = 1 s), J/mm	270,14	266,57	1,34 %

Rezultati prikazuju velike razlike unosa topline ovisno o načinu računanja iste.

Kod P-GMAW zavarivanja, iznos dobiven unošenjem vrijednosti očitanih na stroju ne odskaače značajno od vrijednosti dobivene dinamičkom karakteristikom snimljenom u intervalu od 0,1 s. Međutim, oba iznosa značajnije odstupaju od vrijednosti dobivenih dinamičkom karakteristikom u intervalu 1 s. S obzirom da se radi o većem vremenskom periodu, prilikom snimanja intervala od 1 s postoji i veća šansa pojave nepravilnosti u iznosima struja i napona koje zatim budu snimljene. Zbog eventualnih nepravilnosti na

osnovnom ili dodatnom materijalu može doći do neočekivanog pada ili porasta struje i napona. Takve oscilacije mogu rezultirati razlikom u unosu topline prilikom zavarivanja.

Usporede li se Slike 34 i 36, postupka P-GMAW, vidljivo je kako je na snimci dinamičke karakteristike za vremenski interval od 1 s vidljiva veća količina proboja u iznosima struje i napona. Upravo to bi mogao biti i razlog razlike unosa topline.

S druge strane kod postupka zavarivanja duplim pulsom, sve tri vrijednosti se relativno puno razlikuju jedna od druge, pa je tako iznos dobiven uvrštavanjem očitano g iznosa struje i napona najmanji, a unos topline dobiven u intervalu 0,1 s najveći.

Uzrok tako velike razlike može se nalaziti u razlici iznosa struje i napona ovisno o termičkoj fazi DP-GMAW postupka. Velika razlika mogla je nastati snimanjem dinamičke karakteristike intervala 0,1 s točno u trenutku dok se električni luk nalazio u fazi termičkog impulsa. Za vrijeme faze termičkog impulsa iznosi struja i napona su veći što može rezultirati većom izračunatom vrijednošću unosa topline. Snimka intervala od 0,1 s čini 1/5 cijelog termičkog područja stoga je jasno da može doći do značajnijih razlika u iznosu unosa topline. Upravo kako bi se izbjeglo takvo, eventualno krivo tumačenje rezultata, snimljena je i dinamička karakteristika uređaja u većem vremenskom periodu, odnosno u intervalu 1 s. Računanje unosa topline iz takve dinamičke karakteristike pokazalo je značajno manji iznos, puno bliži vrijednosti dobivenoj računanjem s parametrima očitanim s uređaja. S obzirom na veće oscilacije napona i struje kod postupka DP-GMAW, očekivane su i veće oscilacije dobivenih unosa topline.

Usporedili se iznos unesene topline izračunat u intervalu 0,1 s za ova dva postupka, može se vidjeti kako je unos topline kod DP-GMAW znatno veći. To potvrđuje tezu navedenu u teoretskom dijelu rada kako je unos topline u fazi termičkog impulsa postupka DP-GMAW, veći od unosa topline pri P-GMAW postupku.

Također, uspoređi li se iznos unosa topline u intervalu 1 s za oba postupka, vidljivo je kako kod postupka DP-GMAW dolazi do manjeg unosa topline, a ta razlika iznosi 1,33%.

Kod oba postupka navarivanja, do razlika u unosu topline moglo je doći i zbog mogućeg variranja brzine automatiziranog sustava Bugo System.

Kako bi se dodatno utvrdio utjecaj ovih dvaju postupaka na unos topline prilikom zavarivanja, ispitivanje bi trebalo provesti nekoliko puta i s različitim parametrima zavarivanja. Također, bilo bi poželjno dodatno obratiti pozornost na kvalitetu osnovnog i dodatnog materijala te na konstantnost brzine zavarivanja.

## 7.2. Izrada zavora konvencionalnim puls postupkom i postupkom s duplim pulsom

### 7.2.1. Oprema za zavarivanje

U drugom dijelu eksperimenta izrađen je i analiziran kutni zavar ploča izrađenih od aluminijske legure 5086. Prije izrade kutnog zavora ploče su očišćene alkoholom trgovačkog naziva Ethanolum 96 % proizvođača KEMIG d. o. o, a kako bi se osigurao okomiti položaj ploča, vrhovi ploča su zavareni TIG postupkom. TIG postupak proveden je uređajem MagicWave 230i EF proizvođača Fronius prikazanim na Slici 38.



**Slika 38. Fronius MagicWave 230i EF**

U Tablici 11 navedene su osnovne specifikacije uređaja Fronius MagicWave 230i EF, korištenog za TIG pripajanje ploča.

**Tablica 11. Specifikacije uređaja Fronius MagicWave 230i EF [38]**

Mrežni napon , V		230V
Intermitencija, A	35 %	230
	60 %	195
	100 %	165
Frekvencije, Hz		50 – 60
Napon otvorenog kruga, V		100 V
Raspon struje zavarivanja , A		3 - 230
Raspon napona zavarivanja, V		10,1 – 19,2 V
Težina uređaja, kg		17
Dimenzije uređaja Š / D / V, mm		210558 / 369

Za osnovni dio postupka zavarivanja kutnog zavora korišten je ranije spomenuti uređaj Welbee P500L proizvođača Daihen Varstroj (Slika 27 i Tablica 6).

### 7.2.2. Osnovni i dodatni materijal

Kao osnovni materijal u eksperimentu korištene su ploče debljine 3mm izrađene od aluminijske legure 5086, sastava prikazanog u Tablici 12.

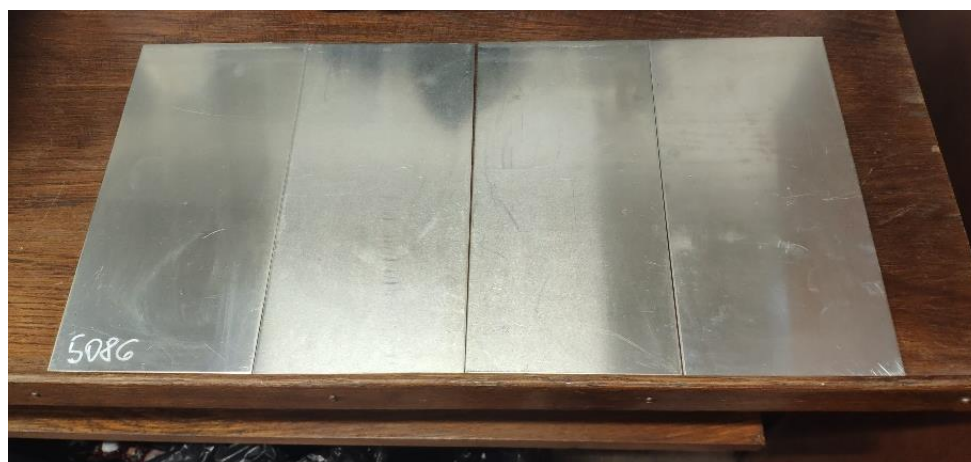
**Tablica 12. Kemijski sastav aluminijske legure 5086**

Kemijski element	Al	Mg	Cr	Mn
Udio, %	95,4	4,0	0,15	0,4

U Tablici 13 prikazana su osnovna svojstva osnovnog materijala, aluminijske legure 5086, a na Slici 39 prikazan je izgled ploča osnovnog materijala korištenih u eksperimentu.

**Tablica 13. Aluminijska legura 5086**

$\rho$ – gustoća, g/cm <sup>3</sup>	2,65
Tt – temperatura taljenja, °C	588
Modul elastičnosti, GPa	70-80
Poissonov faktor	0,33
Toplinska provodnost, W/mK	127 (25 °C)
Toplinsko širenje, 10 <sup>-6</sup> / °C	23,9 (20 °C – 100 °C)



**Slika 39. Osnovni materijal, aluminijska legura 5086**

Kao dodatni materijal u ovom dijelu eksperimentalnog rada korištena je već spomenuta žica AlMg5, promjera 1,2 mm, sastava prikazanog na Slici 31. Kao zaštitni plin za MIG zavarivanje kutnog zavora korišten je već spomenuti Argon 5.0, prikazan na Slici 32, dok je za osiguravanje položaja ploča TIG postupkom korišten plin Argon 4.8 (Slika 40). Volumni udio argona u plinu Argon 4.8 iznosi 99,998%.



**Slika 40. Boca zaštitnog plina Argon 4.8**

### **7.2.3. Postupak izrade**

Prije samog postupka zavarivanja kutnog zavora, ploče su odmašćene i očišćene alkoholom, a položaj ploča je osiguran TIG zavarivanjem krajeva ploča. Na Slici 41 je prikazana priprema, odnosno položaj ploča prije TIG pripajanja ploča.



**Slika 41. Prikaz položaja komada za TIG zavarivanje**

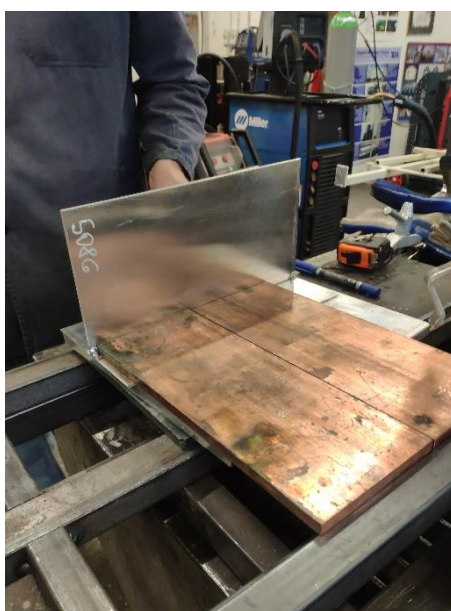


Na Slici 42 prikazane su ploče nakon TIG pripajanja ploča.



**Slika 42. Prikaz položaja ploča i pištolja prije MIG zavarivanja**

Kako bi se osiguralo kvalitetnije odvođenje topline s ploča osnovnog materijala, uz liniju zavora, s druge strane ploče postavljene su bakrene ploče. Zbog male debljine stijenke osnovnog materijala (3mm), postoji mogućnost propaljivanja ploče, što se izbjeglo korištenjem bakra. Bakar, kao vrlo dobar vodič topline, korišten je kako bi dio topline unesene u zavar s aluminijskih ploča prešao na bakrene ploče i kako bi se na taj način spriječilo moguće propaljivanje tankih aluminijskih ploča. Položaj bakrenih ploča prikazan je na Slici 43.



**Slika 43. Prikaz položaja ploča i pištolja prije MIG zavarivanja**

Komad je do pola zavaren duplim pulsom (DP-GMAW), nakon čega je druga polovica zavarena konvencionalnim postupkom pulsnim strujama (P-GMAW). Parametri zavarivanja za oba postupka prikazani su u Tablici 14. Zavarivanje je izvedeno ručno.

**Tablica 14. Parametri zavarivanja**

Zavarivanje pulsom	
Jakost struje, A	150
Napon, V	22,5
Brzina zavarivanja, cm/min	60,5
Protok plina, l/min	26
Zavarivanje duplim pulsom	
Jakost struje, A	150
Napon, V	22,5
Brzina zavarivanja, cm/min	60,1
Protok plina, l/min	26

Na Slici 44 prikazan je zavar nakon zavarivanja MIG postupkom duplim pulsom (DP-GMAW). Nakon što je odrađeno zavarivanje, komad je ostavljen da se ponovno ohladi na sobnu temperaturu kako bi se moglo nastaviti s postupkom zavarivanja.



**Slika 44. Zavar napravljen MIG postupkom duplim pulsom**

Nakon što se komad ohladio na sobnu temperaturu, napravljen je i drugi zavar, konvencionalnim pulsnim zavarivanjem (P-GMAW). Na Slici 45 prikazan je izradak nakon pulsnog zavarivanja.



**Slika 45. Prikaz zavara nakon zavarivanja duplim pulsom i klasičnim pulsom**

#### 7.2.4. Analiza zavara

Nakon zavarivanja uzorak je ostavljen da se ponovno ohladi na sobnu temperaturu nakon čega je očišćen i pripremljen za analizu. Prvi korak analize zavara bio je vizualni pregled zavara. Na zavaru (Slika 46) je vidljiva jasna razlika u izgledu dijela zavarenog pulsnim strujama i dijela zavarenog duplim-pulsom. Vidljivo je kako je zavar dobiven konvencionalnim pulsom znatno glađi nego dio zavara dobiven duplim-pulsom.



**Slika 46. Prikaz cijelog zavara (lijevo-pulsno, desno-duplo pulsno)**

Na Slici 47 vidljivo je kako nije došlo do značajnijih deformacija ploča prilikom zavarivanja. S obzirom da se radi o pločama aluminijeve legure debljine 3 mm postojeće deformacije smatraju se prihvatljivima.



**Slika 47. Prikaz deformacije zavara**

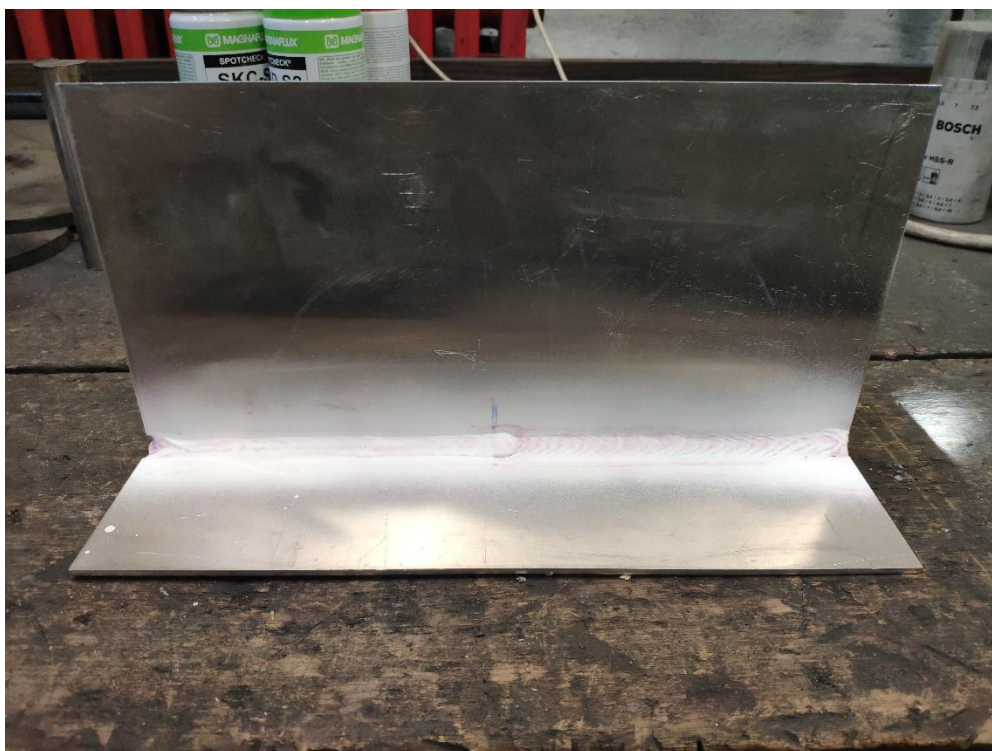
Vizualnim pregledom zavara nisu uočeni značajnije pogreške nastale prilikom zavarivanja. Duž oba zavara vidljiva je crna linija čađe, međutim takva pojava vrlo je česta prilikom zavarivanja legura iz serije 5XXX zbog veće količine Mg.

Nakon vizualnog pregleda zavara provedeno je nerazorno ispitivanje penetrantima prema normi HRN ISO 15614-2. Ispitivanje penetrantima provedeno je u Laboratoriju za zavarivanje. Prilikom ispitivanja penetrantima korištena su sredstva: čistač SKC-S i razvijlač SKD-S2 proizvođača Magnaflux, te crveni penetrant K71B2p proizvođača Elite Flaw-Findr (Slika 48).

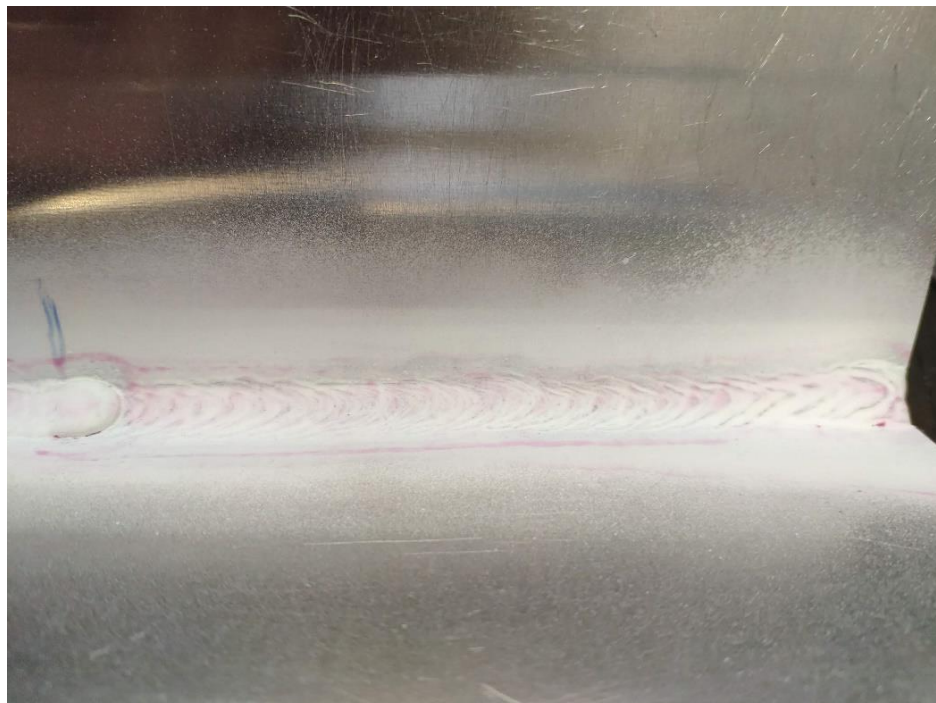


**Slika 48. Sredstva korištena prilikom ispitivanja penetrantima**

Nakon čišćenja površine alkoholom, na površinu zavara nanoseno je dodatno sredstvo za čišćenje SKC-S nakon čega je uzorak ostavljen kako bi se nanoseno sredstvo osušilo. Nakon toga nanosen je crveni penetrant preko cijele dužine zavara. Nakon nanošenja penetranta, zavar je ostavljen nekoliko minuta kako bi se penetrantu dalo dovoljno vremena da djeluje i uđe u moguće pogreške u zavaru. Višak penetranta odstranjen je ispiranjem i brisanjem lagano namočenom krpicom, nakon čega je preko zavara nanoseno sredstvo za razvijanje. Zavar je ostavljen 10-ak minuta kako bi se razvijlač osušio i kako bi eventualne indikacije bile jasno vidljive. Na Slici 49 prikazan je cijeli zavar na koji je nanosen penetrant i razvijlač. Slika 50 prikazuje zavar napravljen postupkom DP-GMAW, dok je na Slici 51 prikazan zavar napravljen postupkom P-GMAW.



**Slika 49. Zavar nakon nanošenja penetranta i razvijajača**



**Slika 50. Penetrantska metoda provedena na zavaru nastalom MIG zavarivanjem duplim pulsom**

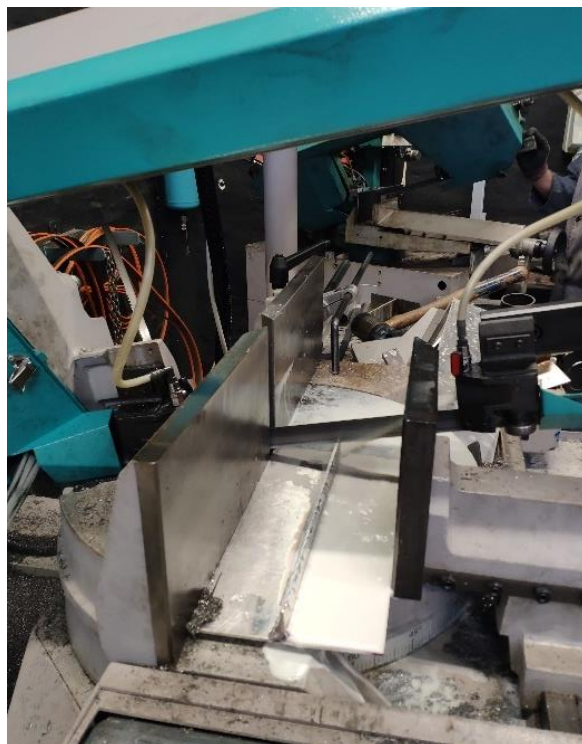


**Slika 51. Penetrantska metoda provedena na zavaru nastalom konvencionalnim zavarivanjem pulsniim strujama**

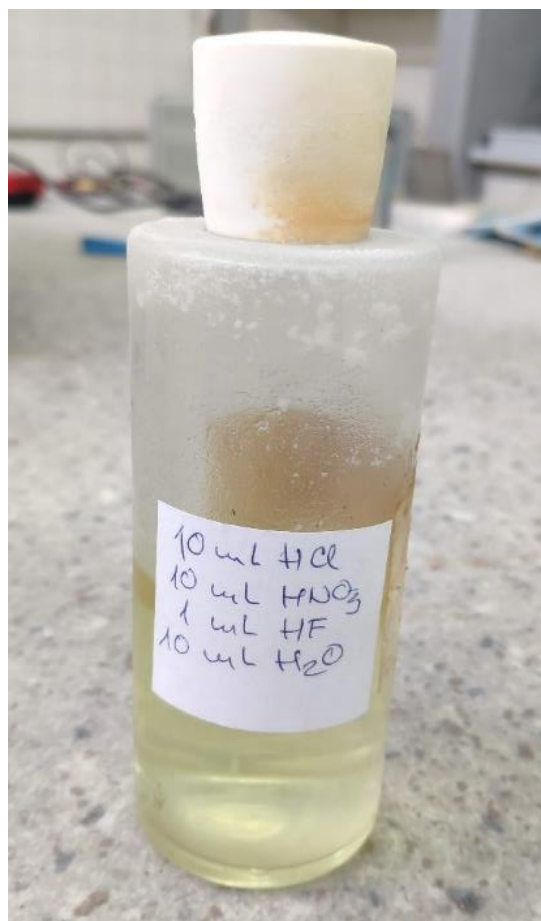
Kao što je vidljivo na Slikama 50 i 51, na zavarima nisu prisutne značajne indikacije poroznosti ili drugih sličnih pogrešaka u zavaru. Iako duž zavara postoji lagano vidljiva crvena linija penetranta, ne smatra se pogreškom jer se nalazi na dijelu pojave čađe kao posljedica većeg udjela Mg. Kako bi se izbjegla ta indikacija, izradak je potrebno temeljitije očistiti čeličnom četkom. Nakon provođenja penetrantske metode neraznog ispitivanja, sa zavara su očišćena sredstva korištena za ispitivanje.

#### **7.2.5. Analiza makroizbrusaka**

Za daljnju analizu zavara bilo je potrebno izrezati i pripremiti makroizbruske. Uzorci su izrezani u Laboratoriju za zavarivanje postupkom strojnog rezanja na tračnoj pili (Slika 52), a zatim su izbrušeni na strojnoj brusilici. Izrezan je po jedan uzorak za svaki od postupaka (DP-GMAW i P-GMAW). Uzorci su zatim u Laboratoriju za zaštitu materijala nagrizeni u otopini: 10 ml HCl, 10 ml HNO<sub>3</sub>, 1ml HF i 10 ml H<sub>2</sub>O prikazanoj na Slici 53. Postupak nagrivanja trajao je 30 sekundi. Nagrivanje se provodi kako bi makrostruktura zavara bila uočljivija.



**Slika 52. Strojno rezanje makroizbrusaka na tračnoj pili**



**Slika 53. Otopina korištena za postupak nagrivanja uzoraka**

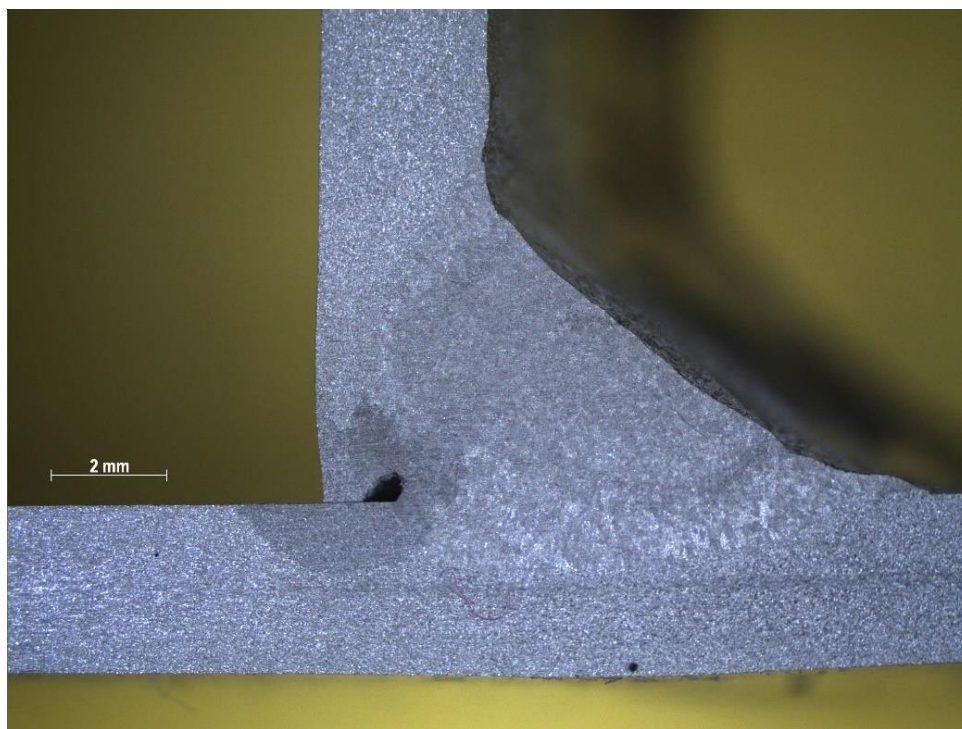


Na Slici 54 prikazani su izrezani makroizbrusci nakon postupka nagrivanja.

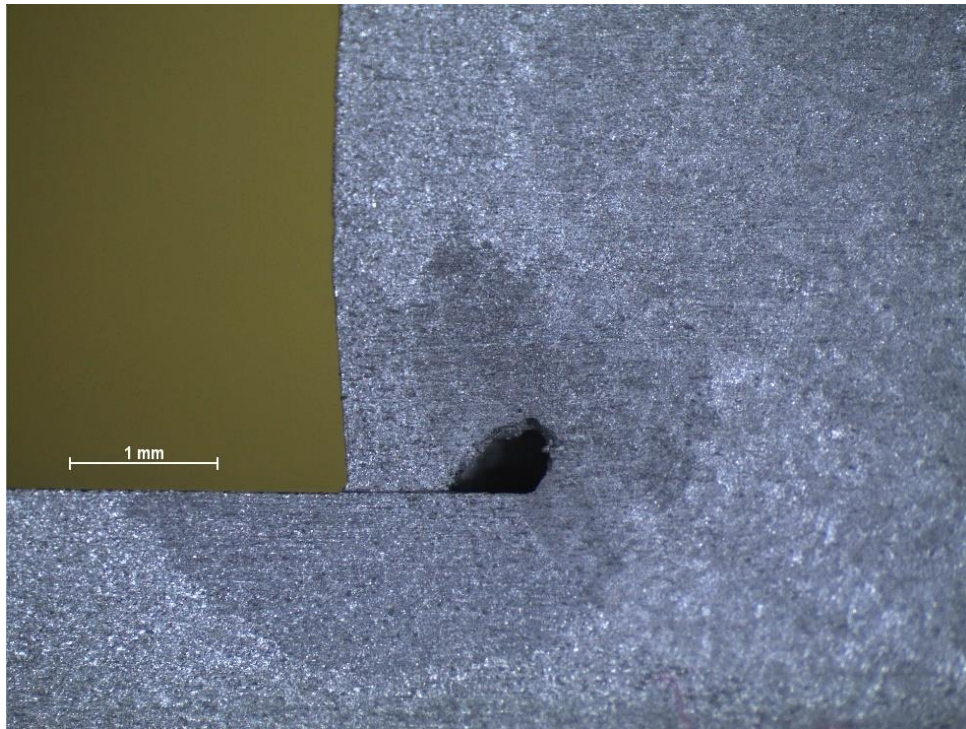


**Slika 54. Makroizbrusci nakon postupka nagrivanja**

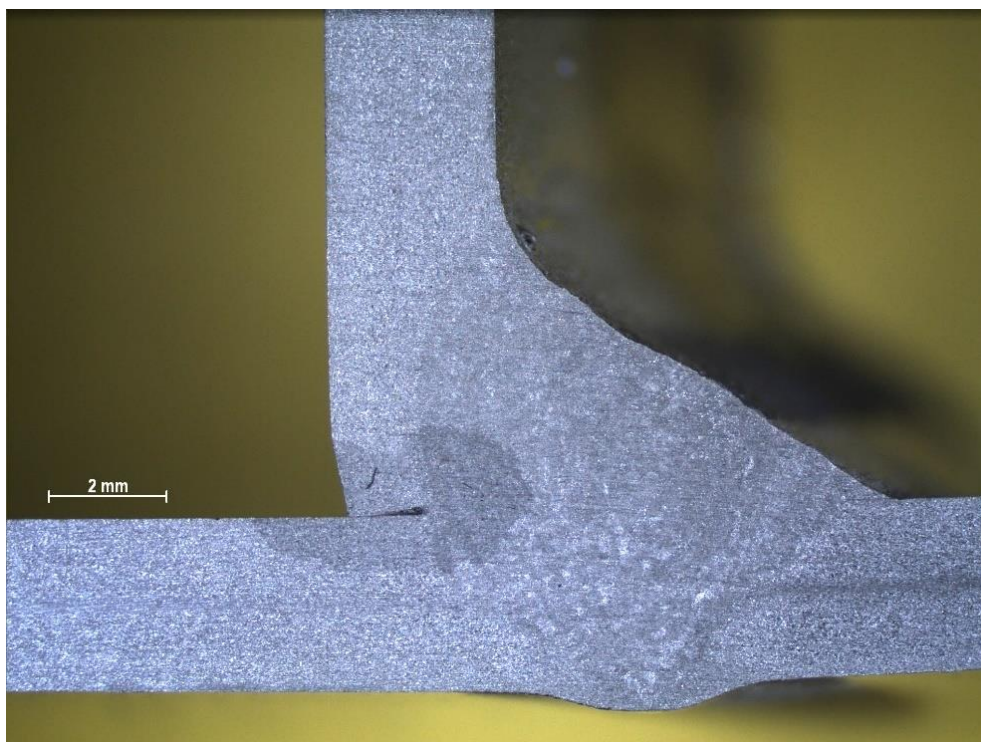
Nakon nagrivanja, mikroizbrusci su snimljeni pomoću stereoskopskog mikroskopa Leica MZ6 u Laboratoriju za zaštitu materijala. Na Slikama 55 i 56 prikazan je uzorak dobiven postupkom zavarivanja s duplim-pulsom, dok se na Slikama 57 i 58 nalazi uzorak dobiven konvencionalnim pulsnim strujama.



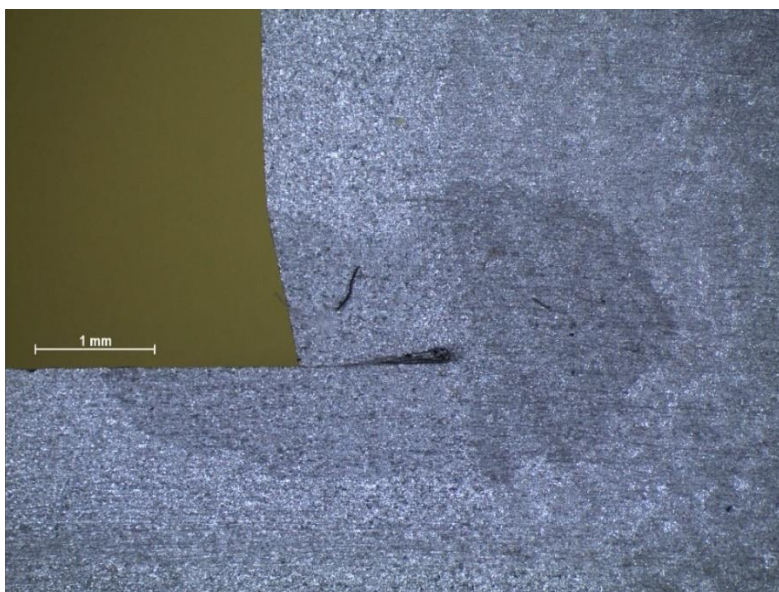
**Slika 55. Uzorak zavaren postupkom DP-GMAW**



**Slika 56. Detalj uzorka zavarenog postupkom DP-GMAW**



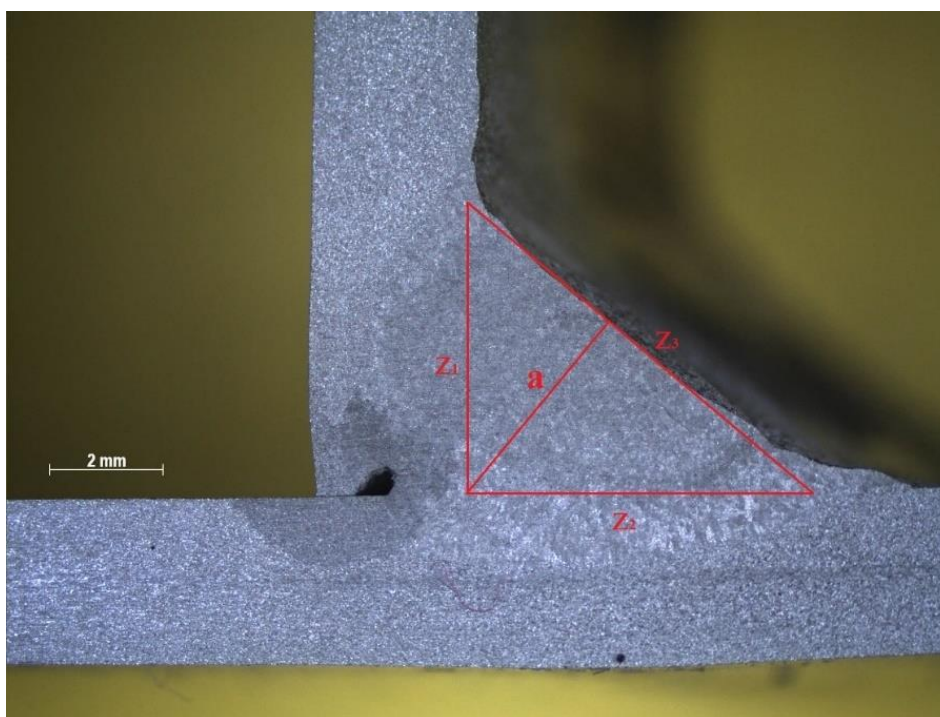
**Slika 57. Uzorak zavaren P-GMAW postupkom**



**Slika 58. Detalj uzorka zavarenog P-GMAW postupkom**

Na slikama je jasno vidljivo kako i jedan i drugi zavar imaju određene greške. Uz pomoć programa ImageJ napravljena je dodatna analiza zavara. Utvrđena je geometrija samog zavara, ali i veličina vidljivih nepravilnosti.

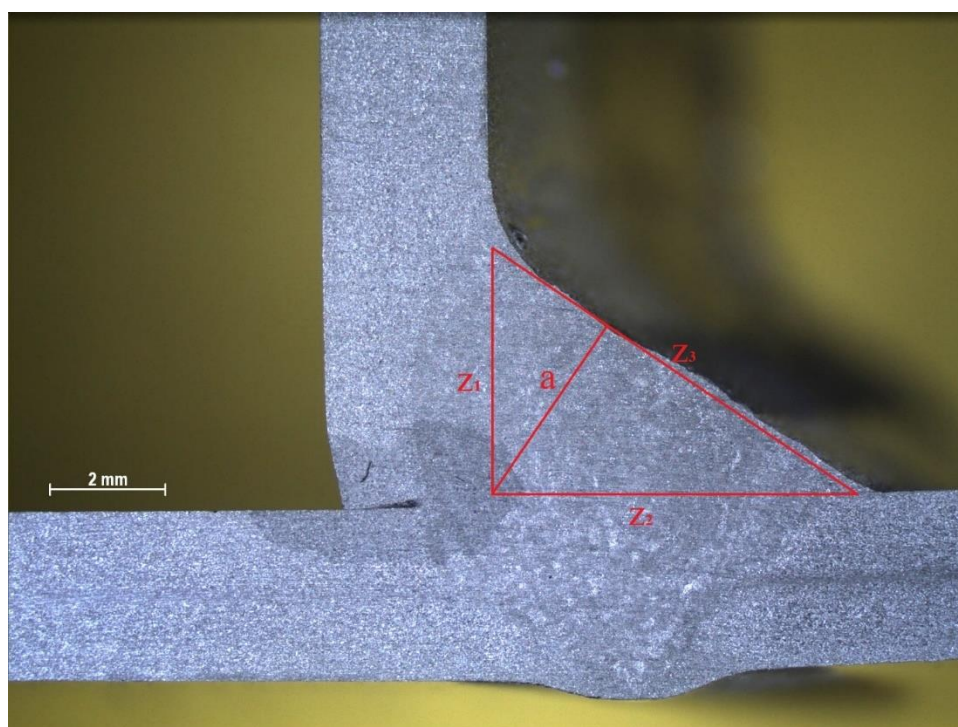
Na Slici 59 i u Tablici 15 prikazana je geometrija zavara dobivenog zavarivanjem duplim pulsom, dok je na Slici 60 i u Tablici 16 prikazan zavar dobiven konvencionalnim pulsним strujama.



**Slika 59. Analiza geometrije zavara dobivenog postupkom DP-GMAW**

**Tablica 15. Prikaz veličina izmjerenih na uzorku zavarenom DP-GMAW postupkom**

$Z_1$	4,906
$Z_2$	5,804
$Z_3$	7,613
a	3,729

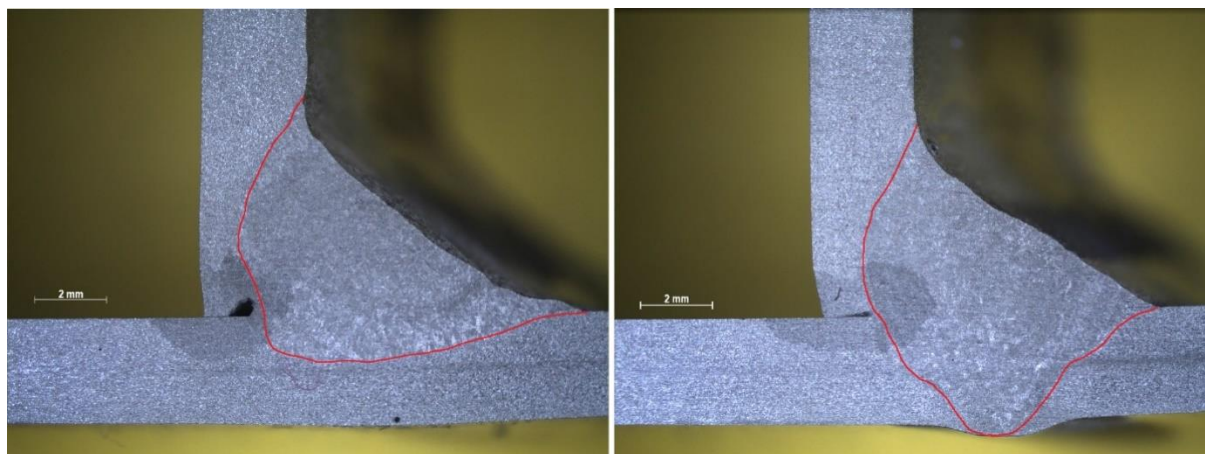
**Slika 60. Analiza geometrije zvara dobivenog P-GMAW postupkom****Tablica 16. Prikaz veličina izmjerenih na uzorku zavarenom P-GMAW postupkom**

$Z_1$	4,278
$Z_2$	6,343
$Z_3$	7,653
a	3,523

Iz tablično prikazanih podataka jasno je vidljivo kako je i kod jednog i kod drugog zvara prisutna pogreška nesimetričnog kutnog zvara. Kod uzorka zavarenog konvencionalnim postupkom pulsni strujama ta je nesimetričnost znatno izraženija, te je na oko vidljivo kako je položena stranica znatno duža od okomite stranice kutnog zvara. Pogreška nesimetričnog

kutnog zavora najčešće je rezultat neispravnog nagiba pištolja prilikom zavarivanja. Kako bi se izbjegle ovakve pogreške valjalo bi razmotriti drugačiji položaj izratka odnosno njegovo naginjanje.

Uz to pomoću računalnog programa ImageJ prikazana je i izmjerena površina metala zavora, a rezultati su prikazani Slikom 61 i Tablicom 17.



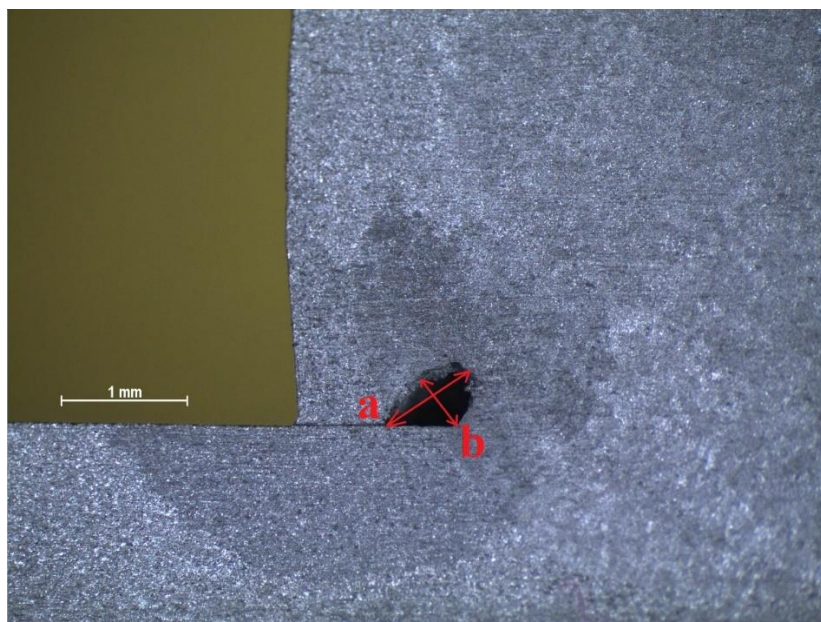
**Slika 61. Prikaz konture zavora (DP-GMAW-lijevo, P-GMAW- desno)**

**Tablica 17. Usporedba površina metala zavora**

Površina metala zavora, mm <sup>2</sup>	
DP-GMAW	P-GMAW
31,022	34,550
Razlika površina	
3,528 mm <sup>2</sup> ≈ 10,676 %	

Iz rezultata prikazanih u Tablici 17, vidljivo je kako je površina zavora dobivenog postupkom P-GMAW, uz korištenje istih parametara, veća od površine metala zavora dobivenog postupkom DP-GMAW, a ta razlika iznosi nešto više od 10 %. Uz to vidljivo je kako je oblik zavora dobivenog DP-GMAW postupkom znatno pravilnijeg oblika nego zavar dobiven P-GMAW postupkom.

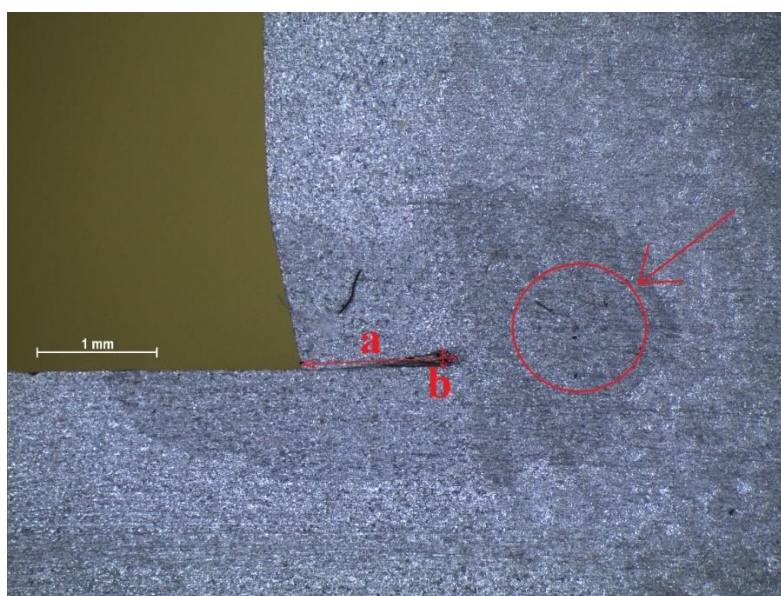
Daljnjom analizom mikroskopskih snimki u programu ImageJ utvrđene su dimenzije većih pogrešaka na zavarima. Slika 62 i Tablica 18 prikazuju dimenzije pogreške nastale pri DP-GMAW zavarivanju, dok Slika 63 i Tablica 19 prikazuju dimenzije pogreške nastale pri P-GMAW postupku.



Slika 62. Slika detalja pogreške u zavaru, DP-GMAW

Tablica 18. Dimenzije pogrešaka u zavaru dobivenom zavarivanjem duplim pulsom

a	0,781 mm
b	0,474 mm



Slika 63. Slika detalja pogreške u zavaru, P-GMAW

Tablica 19. Dimenzije pogrešaka u zavaru dobivenom pulsanim strujama zavarivanja

a	1,269 mm
b	0,153 mm



**Slika 64. Pogreške u zavaru, P-GMAW**

Osim pogreške nesimetričnosti kutnih zavora, na slikama dobivenim mikroskopskim snimanjem vidljive su i dodatne pogreške. Pogreške se kod oba uzorka nalaze na istom mjestu, dok se njihov oblik i veličina razlikuju. S obzirom da se pogreške nalaze točno na spoju dvaju ploča, sa suprotne strane zavora može se zaključiti kako se vjerojatno radi o nedovoljnom protaljivanju. Također, ne može se isključiti niti mogućnost da se radi o poroznosti. S obzirom na oblik greške kod postupka DP-GMAW postoji mogućnost da se radi i o kombinaciji tih dvaju grešaka koje su rezultirale takvom, većom šupljinom. Kod uzorka dobivenog P-GMAW postupkom vidljive su i manje točkice prikazane strelicom na Slici 63. S obzirom na veličinu i izgled, može se zaključiti kako se radi o poroznosti ili uključcima u zavaru. Također, na Slici 64 vidljiva je i greška nedovoljnog protaljivanja. Ovakva greška kod aluminijskih legura najčešće nastaje zbog prisutnosti oksidnog filma na površini legure, a koji prethodno nije dovoljno dobro odstranjen s površine. S obzirom da se sve navedene pogreške nalaze na spoju dvaju ploča, postoji mogućnost da je uzrok takvih grešaka nedovoljno kvalitetna priprema za zavarivanje. Na kvalitetu pripreme moglo je utjecati nedovoljno dobro čišćenje površine zbog čega je moglo doći do uključaka nečistoća u zavaru. Kako bi se izbjegle pogreške neprotaljenog zavora trebalo bi razmotriti mogućnost korištenja jače struje prilikom zavarivanja ili zavarivanje manjom brzinom.

Također, uz navedene pogreške vidljiva je i razlika u boji materijala u području većih nepravilnosti, kod oba zavara. Razlog nastanka takve razlike u boji je zaostalo sredstvo za nagrizanje koje nije dobro isprano te je nakon određenog vremena uzrokovalo promjenu strukture materijala.

Uspoređujući uzorke nastale ovim dvama postupcima zavarivanja može se zaključiti kako zavar dobiven DP-GMAW postupkom ima pravilniju geometriju od zavara dobivenog P-GMAW postupkom, ali s druge strane posjeduje veću pogrešku neprotaljenog korijena/pojave poroznosti u zavaru. S druge strane kod postupka P-GMAW uočene su dodatne nepravilnosti u zavaru kao što su pojava uključaka i neprotaljenog zavara uslijed pojave oksidnog filma.

Kako bi se utvrdilo koji postupak je prikladniji za zavarivanje kutnog zavara legure 5086, svakako bi trebalo provesti dodatna ispitivanja prilikom kojih bi se kombinirali različiti parametri zavarivanja, s velikim naglaskom na iznos struje i brzine zavarivanja. Valjalo bi razmotriti i korištenje zaštitnog plina kombiniranog Ar i He s obzirom da He može doprinijeti dubini protaljivanja materijala. Također trebalo bi razmotriti kvalitetniju pripremu i čišćenje osnovnog materijala, ali izbor kvalitetnijeg i bolje skladištenog dodatnog materijala.



## 8. ZAKLJUČAK

Široka primjena aluminijskih legura u današnjoj industriji potakla je razvoj primjene različitih postupaka zavarivanja Al legura u svrhu postizanja zavara što bolje kvalitete. MIG postupak svakako je jedan od najznačajnijih postupaka zavarivanja Al legura.

U prvom dijelu eksperimentalnog dijela rada, snimanjem dinamičke karakteristike izvora struje za zavarivanje željelo se usporediti iznos unesene topline prilikom zavarivanja Al legure 5083 postupcima MIG zavarivanja konvencionalnim pulsni strujama (P-GMAW) i duplim pulsni strujama (DP-GMAW). Eksperimentom je utvrđeno kako iznos izračunat pomoću parametara očitanih na uređaju prilikom zavarivanja odstupa od iznosa dobivenih računanjem pomoću vrijednosti dobivenih snimanjem dinamičke karakteristike.

Ta odstupanja veća su kod postupka DP-GMAW nego kod postupka P-GMAW, a odstupanja značajno variraju ovisno o izabranom intervalu u kojem je snimana dinamička karakteristika izvora struje. Vidljivo je kako izbor manjeg intervala kod postupka DP-GMAW može rezultirati većim razlikama u iznosu unosa topline upravo zbog izgleda krivulje promjene struje i napona kod tog postupka. Kod snimanja dinamičke karakteristike u intervalu 0,1 s vidljivo je kako je u fazi termičkog impulsa DP-GMAW postupka, iznos unosa topline veći za gotovo 23 % od unosa topline u istom intervalu P-GMAW postupka. S druge strane, kod vremenskog intervala od 1 s koji obuhvaća cijelo termičko područje DP-GMAW postupka, vidljiva je kako je unos topline zavarivanja duplim pulsni strujama manja za 1,34 % od unosa topline prilikom zavarivanja konvencionalni pulsni strujama. Promjene unosa energije, a time i brzine dobave žice između faza termičke osnove i termičkog impulsa DP-GMAW postupka omogućuju bolju kontrolu izgleda zavara i kontrolu prevelikog protaljivanja. Za donošenje dodatnih zaključaka, potrebno je ponoviti snimanje dinamičke karakteristike izvora struje pri različitim parametrima zavarivanja.

Drugim dijelom eksperimentalnog dijela rada željela se usporediti kvaliteta zavara, aluminijske legure 5086, dobivenih postupcima DP-GMAW i P-GMAW. Rezultati eksperimenta pokazali su kako je aluminijske legure serije 5XXX moguće zavariti s oba navedena postupka. Ovisno o odabiru postupka, dobivene su i različite geometrije zavara.

Postupkom DP-GMAW dobiven je zavar bolje simetričnosti nego kod postupka P-GMAW. Uz to, površina metala zavara kod postupka DP-GMAW pravilnijeg je izgleda i manje površine, dok je kod P-GMAW postupka izgled zavara nepravilnog oblika i vidljivo je kako je došlo do protaljivanja donje ploče zavara. Kod DP-GMAW postupka nije vidljivo protaljivanje što je rezultat bolje kontrole unosa energije i brzine dobave žice u usporedbi s P-GMAW postupkom. Iz navedenog se može zaključiti kako je DP-GMAW postupak prikladniji za zavarivanje tanjih limova i kako taj postupak daje veću sigurnost da prilikom njihova zavarivanja neće doći do prekomjernog protaljivanja zavara.

S druge strane oba postupka dala su određene pogreške u zavaru. Na spoju ploča kod oba zavara vidljiva je greška u korijenu zavara, s tim da je dimenzija greške kod DP-GMAW postupka nešto veća nego li je kod P-GMAW postupka. Nastale greške vjerojatno su posljedica prisutnosti nečistoća u materijalu koji se zavaruje, a ne neadekvatnosti postupaka.

U svrhu daljnjeg istraživanja i donošenja dodatnih zaključaka, valjalo bi zavarivanje provesti s više različitih kombinacija parametara zavarivanja, dodatnog materijala, ali i uz kvalitetnije čišćenje osnovnog i dodatnog materijala. Također, postupak bi valjalo ponoviti u zaštiti mješavine plinova Ar i He. Izbor mješavine tih dvaju plinova mogao bi značajno utjecati na oblik zavara i pojavu poroznosti.

Prvi i drugi dio eksperimentalnog rada pokazali su kako su postupci DP-GMAW i P-GMAW prikladni za zavarivanje legura serije 5XXX. Iako su prilikom zavarivanja i jednom i drugom tehnikom rada nastale određene pogreške, ovi postupci bi uz dodatne promjene uvjeta prilikom zavarivanja mogli dati zavare dobre kvalitete i bez pojave grešaka u zavaru.

## LITERATURA

- [1] G. Mathers, "The welding of aluminium and its alloys." CRC Press ; Woodhead Pub., Boca Raton, Fla.; Cambridge, England, 2002.
- [2] T. Filetin, F. Kovačiček, and J. Indolf, *Svojstva i primjena materijala*. Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu, 2013.
- [3] Z. Lukačević, *Zavarivanje*. Slavonski Brod: Sveučilište Josipa Juraja Strossmayera u Osijeku, Strojarski fakultet, Slavonski Brod, 1998.
- [4] N. Dolić, *Metalurgija aluminija*. Sisak: Metalurški fakultet, 2015.
- [5] C. Grard, *Aluminum and Its Alloys: Their Properties, Thermal Treatment and Industrial Application*. Forgotten Books, 2018.
- [6] E. Petrakis, G. Bartzas, and K. Komnitsas, "Grinding Behavior and Potential Beneficiation Options of Bauxite Ores," *Minerals*, vol. 10, no. 4, p. 314, Mar. 2020.
- [7] R. N. Lumley, Ed., *Fundamentals of aluminium metallurgy : production, processing and applications / edited by Roger Lumley*. Cambridge, UK: Woodhead Publishing Ltd, 2011.
- [8] D. Skejić, I. Boko, and N. Torić, "Aluminij kao materijal za suvremene konstrukcije," *Građevinar*, pp. 1075–1085, 2015.
- [9] H. Dong, *Surface engineering of light alloys (Aluminium, magnesium and titanium alloys)*. Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 2010.
- [10] L. Vrsalović, "Studija inhibitorskog djelovanja fenolnih kiselina na koroziju Al-Mg slitina," Doktorska disertacija, Kemijsko tehnološki fakultet, Sveučilište u Splitu, 2008.
- [11] R. Lumley, *Fundamentals of aluminium metallurgy*. Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 2011.
- [12] V. Rede, "Označavanje Al i Al-legura, autorizirani nastavni materijali iz kolegija Izbor materijala." Fakultet strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu, 2018.
- [13] *ASM Handbook Volume 13A: Corrosion: Fundamentals, Testing, and Protection*. ASM International, 2003.
- [14] G. Kaufman, J., *Introduction to Aluminum Alloys and Tempers*. ASM International, 2000.
- [15] T. Sheppard, "Extrusion of Aluminium Alloys." Springer US, Boston, MA, 1999.
- [16] P. Mukhopadhyay, "Alloy Designation, Processing, and Use of AA6XXX Series

- Aluminium Alloys,” *ISRN Metall.*, vol. 2012, pp. 1–15, 2012.
- [17] P. Schulz, J. Berneder, D. Uffelmann, C. Zelger, and C. Melzer, “Advanced 5xxx-, 6xxx- and 7xxx- Aluminium Alloys for Applications in Automotive and Consumer Electronics,” *Mater. Sci. Forum*, vol. 690, pp. 451–454, Jun. 2011.
- [18] “Aluminium GMAW,” 2016.:  
[https://www.lincolnelectric.com/assets/global/Products/Consumable\\_AluminumMIGGMAWWires-SuperGlaze-SuperGlaze5356TM/c8100.pdf](https://www.lincolnelectric.com/assets/global/Products/Consumable_AluminumMIGGMAWWires-SuperGlaze-SuperGlaze5356TM/c8100.pdf). [Dostupno: 01-12-2020].
- [19] D. Phillips H, *Welding Engineerring, An Introduction*. Wiley, 2016.
- [20] O. Brien, Ed., *Welding Handbook, 9th edition, Volume 2, Welding Processes*. Miami: American Welding Society, 2004.
- [21] M. Jurica, “Utjecaj zaštitnog plina i načina prijenosa metala na svojstva zavarenog spoja čelika X80,” Doktorski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Sveučilište u Zagreb, 2015.
- [22] *ASM Handbook Volume 06A Welding Fundamentals and Processes*. Ohio: ASM International, 2011.
- [23] P. Praveen and P. K. D. V Yarlagadda, “Pulse gas metal arc welding ( GMAW-P ) for Newer Challenges in Welding of Aluminum Alloys,” *International Manufacturing Leaders Forum*. Global Competitive Manufacturing, Abelaide, 2005.
- [24] M. Rudan, “Zavarivanje nehrđajućih čelika MIG impulsnim postupkom,” *Društvo za tehniku zavarivanja Istra*, Pula, 2007.
- [25] E. Warinsiriruk, J. Greebmalai, and M. Sangsuriyun, “Effect of Double Pulse MIG Welding on Porosity Formation on Aluminium 5083 Fillet Joint,” *MATEC Web Conf.*, vol. 269, p. 1002, Jan. 2019.
- [26] L. Wang, J. Li, W. Huang, M. Xu, and J. Xue, “Effect of Thermal Frequency on AA6061 Aluminum Alloy Double Pulsed Gas Metal Arc Welding,” *Mater. Manuf. Process.*, vol. 31, pp. 2152–2157, Oct. 2015.
- [27] L. Wang and J. Xue, “Perspective on Double Pulsed Gas Metal Arc Welding,” *Appl. Sci.*, vol. 7, p. 894, Sep. 2017.
- [28] “Strojevi i oprema za zavarivanje, podloge za predavanja.” Fakultet strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu, 2013.
- [29] L. Kolaríc, K. Kovanda, M. Kolaříková, P. Vondrous, and J. Kopriva, “Influence of Shielding Gas on GMA Welding of Al Alloys,” *MM Sci. J.*, vol. 2013, pp. 452–455, Dec. 2013.

- [30] J. Prakash, S. P. Tewari, and B. K. Srivastava, "Shielding Gas for Welding of Aluminium Alloys by TIG / MIG Welding-A Review," *Int. J. Mod. Eng. Res.*, vol. 1, no. 2, pp. 690–699, 2011.
- [31] S. A. Vendan, L. Gao, A. Garg, P. Kavitha, G. Dhivyasri, and R. SG, *Interdisciplinary Treatment to Arc Welding Power Sources*. Singapore: Springer Singapore, 2019.
- [32] K. Skrzyniecki, A. Kolasa, and P. Cegielski, "Study of static and dynamic characteristics of welding power source-arc systems," *Weld. Int.*, vol. 29, pp. 1–3, Mar. 2015.
- [33] Z. Kožuh and I. Garašić, "Priručnik iz kolegija Strojevi i oprema za zavarivanje." Fakultet strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, 2016.
- [34] T. Chen, S. Xue, P. Zhang, B. Wang, P. Zhai, and W. Long, "Investigation on the Dynamic Behavior of Weld Pool and Weld Microstructure during DP-GMAW for Austenitic Stainless Steel," *Metals (Basel)*, vol. 10, no. 6, p. 754, Jun. 2020.
- [35] "Welbee P 500L," *Daihen Varstroj* : [http://www.daihen-varstroj.si/welding-machines\\_ang/mig-mag-welding\\_ang/welbee-varilni-inverterji1\\_ang/welbee-p-500l-eng.html](http://www.daihen-varstroj.si/welding-machines_ang/mig-mag-welding_ang/welbee-varilni-inverterji1_ang/welbee-p-500l-eng.html). [Dostupno: 19-12-2020].
- [36] V. Kumar, S. K. Albert, and N. Chandrasekhar, "Signal processing approach on weld data for evaluation of arc welding electrodes using probability density distributions," *Measurement*, vol. 133, pp. 23–32, 2019.
- [37] "EZ - MIG AlMg5," *Elektroda zagreb*: [https://www.ezg.hr/download/prod/071 EZ - MIG AlMg5.pdf](https://www.ezg.hr/download/prod/071_EZ_MIG_AlMg5.pdf). [Dostupno: 19-12-2020].
- [38] "MagicWave 290, MagicWave 230i, TransTig 230i," *Fronius*: <https://www.rapidwelding.com/files/MagicWave190230TransTig230iUserManual.pdf>. [Dostupno: 19-12-2020].