

# USPOREDBA MIG SYNCHRO PULSE I MIG PULSE POSTUPKA PRI ZAVARIVANJU ALUMINIJNA I ALUMINIJEVIH LEGURA

---

**Balenović, Dominik**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2024**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Slavonski Brod / Sveučilište u Slavskom Brodu**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:262:386429>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-02-23**



*Repository / Repozitorij:*

[repository.unisb.hr](https://repository.unisb.hr) - [The digital repository is a digital collection of works by the University of Slavonski Brod.](#)



SVEUČILIŠTE U SLAVONSKOM BRODU  
STROJARSKI FAKULTET U SLAVONSKOM BRODU

# **DIPLOMSKI RAD**

**sveučilišnog diplomskog studija**

**Dominik Balenović**

0302030333

Slavonski Brod, 2023.

SVEUČILIŠTE U SLAVONSKOM BRODU  
STROJARSKI FAKULTET U SLAVONSKOM BRODU

# DIPLOMSKI RAD

sveučilišnog diplomskog studija

**Dominik Balenović**

0302030333

Mentor diplomskog rada:

**prof. dr. sc. Marko Dunder**

Slavonski Brod, 2023.

# I. AUTOR

Ime i prezime: **Dominik Balenović**

Mjesto i datum rođenja: Nova Gradiška, 10.11.1999. g.

Adresa: Srednji Lipovac 185, Srednji  
Lipovac, Hrvatska

## STROJARSKI FAKULTET U SLAVONSKOM BRODU

### II. DIPLOMSKI RAD

Naslov: Usporedba MIG synchro pulse i MIG pulse postupka zavarivanja aluminija i aluminijskih legura

Naslov na engleskom jeziku: Comparison of MIG synchro pulse and MIG pulse of aluminum and aluminum alloy welding process

Ključne riječi: MIG, aluminij, zavarivanje, legure, synchro pulse

Ključne riječi na engleskom jeziku: MIG, aluminum, welding, alloys, synchro pulses

Broj stranica: 50 slika: 27 tablica: 8 priloga: 0 bibliografskih izvora: 22

Ustanova i mjesto gdje je rad izrađen: STROJARSKI FAKULTET U SLAVONSKOM BRODU

Stečen akademski naziv: **Sveučilišni magistar inženjer strojarstva**

Mentor rada: prof. dr. sc. Marko Dunder

Obranjeno na **Strojarskom fakultetu** u Slavonskom Brodu

dana: \_\_\_\_\_

Oznaka i redni broj rada: \_\_\_\_\_

# ZADATAK RADA

SVEUČILIŠTE U SLAVONSKOM BRODU  
POVJERENSTVO ZA DIPLOMSKI ISPIT

Slavonski Brod, 18. siječnja 2023.

## DIPLOMSKI ZADATAK br. 2022-2023

Pristupnik: **Dominik Balenović (0302030333)**  
Studij: Strojarstvo  
Smjer: Strojarske tehnologije

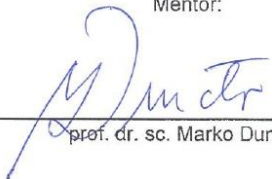
Zadatak: **USPOREDBA MIG SYNCHRO PULSE I MIG PULSE POSTUPKA PRI  
ZAVARIVANJU ALUMINIJNA I ALUMINIJEVIH LEGURA**

Opis zadatka:

1. UVOD. OPĆENITO O ZAVARIVANJU AL I AL LEGURA
2. OPS MIG SYNCHRO PULSE I MIG PULSE POSTUPKA ZAVARIVANJA (SKICA, PREDNOSTI I NEDOSTATCI, PRIMJENA, PRINCIP RADA)
3. EKSPERIMENTALNI DIO (IZRADA UZORAKA, ISPITIVANJE UZORAKA)
4. ANALIZA REZULTATA
5. ZAKLJUČAK

Zadatak uručen pristupniku: 18. siječnja 2023.  
Rok za predaju rada: 18. srpnja 2023.

Mentor:

  
\_\_\_\_\_  
prof. dr. sc. Marko Dunđer



Predsjednik povjerenstva za  
diplomski ispit:

  
\_\_\_\_\_  
prof. dr. sc. Ivica Kladarić

## IZJAVA

Izjavljujem da sam diplomski rad radio samostalno, koristeći se vlastitim znanjem stečenim na Strojarskom fakultetu u Slavonskom Brodu i literaturom navedenom na kraju rada.

U izradi ovoga rada pomogao mi je mentor završnog rada prof. dr.sc. Marko Dunđer te mu iskreno zahvaljujem. Uz njega mi je veliku pomoć pri izradi eksperimentalnog dijela dao dr.sc. Dejan Marić i ovim mu se putem također zahvaljujem. Također zahvaljujem svim osobama koje su mi dobrovoljno pomogle na bilo koji način pri izradi ovoga rada.



---

Dominik Balenović

## SAŽETAK

Zavarivanje je postupak kojim se spajaju dva ili više materijala koji mogu biti istorodni ili raznorodni uz pomoć taljenja ili uz pritisak, bez ili sa dodatnim materijalom da se dobije zavareni spoj bez pogreške. Najčešći korišteni postupci zavarivanja aluminija i aluminijskih legura su MIG (eng. Metal Inert Gas) i TIG (eng. Tungsten Inert Gas), oni su najčešće korišteni jer je kod njih osigurana inertna zaštitna atmosfera. Kroz ovaj rad će se nastojati opisati nešto više o zavarivanju aluminija MIG synchro pulse postupkom i MIG puls postupkom zavarivanj. U teorijskom dijelu rada će biti napisano nešto više o aluminiju i aluminijskim legurama te važnim svojstvima pri zavarivanju aluminija. Isto tako će se pisati općenito o MIG zavarivanju te nakon toga o MIG synchro pulse zavarivanju i MIG puls postupku zavarivanja i tehnikama rada pri tom zavarivanju, pištolju kojim se zavaruje, zaštitnim plinovima, izvoru struje, parametrima zavarivanja, primjeni MIG postupka te prednostima i nedostacima. Nakon toga će se kroz praktični dio rada prikazati na temelju uzoraka prikazati zavarivanje aluminija MIG synchro pulse postupkom i MIG puls postupkom zavarivanja.

Ključne riječi: MIG, aluminij, zavarivanje, legure, synchro pulse, puls

## **ABSTRACT**

Welding is a process by which two or more materials that can be identical or diverse with the help of melting or with pressure, without or with additional material to obtain a welded joint without error. The most commonly used welding procedures for aluminum and aluminum alloys are MIG (eng. Metal Inert Gas) and TIG (eng. Tungsten Inert Gas), they are most commonly used because they provide a protective atmosphere. Through this work, one will try to describe something more about welding aluminum MIG synchro pulse by process. In the theoretical part of the paper, something more will be written about aluminum and aluminum alloys and important properties in aluminum welding. It will also be written in general about MIG welding and thereafter about MIG synchro pulse welding and techniques of operation in that welding, welded gun, protective gases, current source, welding parameters, application of the MIG procedure and advantages and disadvantages. After that, through the practical part of the work, the welding of aluminum with the MIG synchro pulse will be shown on the basis of samples.

Key words: MIG, aluminum, welding, alloys, synchro pulses, pulses



## SADRŽAJ

|   |           |
|---|-----------|
| <b>1 UVOD.....</b>  | <b>1</b>  |
| 1.1 OPĆENITO O ALUMINIJU I ALUMINIJSKIM LEGURAMA.....                   | 2         |
| 1.2 VAŽNA SVOJSTVA ALUMINIJA KOD ZAVARIVANJA .....                      | 5         |
| 1.3 ZAVARLJIVOST ALUMINIJA .....  | 6         |
| 1.3.1 Poroznost zaostalih plinova .....                                 | 6         |
| 1.3.2 Odstranjivanje oksidnog sloja prilikom provedbe zavarivanja ..... | 8         |
| 1.3.3 Pojave toplih pukotina .....                                      | 9         |
| 1.4 ZAVARIVANJE ALUMINIJA TIG POSTUPKOM.....                            | 12        |
| <b>2 MIG SYNCHRO PULSE I MIG PULSE POSTUPAK ZAVARIVANJA .....</b>       | <b>14</b> |
| 2.1 OPIS MIG POSTUPKA ZAVARIVANJA .....                                 | 14        |
| 2.2 TEHNIKA RADA.....   | 17        |
| 2.3 PIŠTOLJ ZA ZAVARIVANJE .....  | 18        |
| 2.4 ZAŠTITNI PLINOVI .....  | 18        |
| 2.5 IZVOR STRUJE .....  | 19        |
| 2.6 PARAMETRI ZAVARIVANJA .....   | 19        |
| 2.7 ZAVARIVANJE RAZNORODNIH ALUMINIJSKIH LEGURA.....                    | 21        |
| 2.8 PREDNOSTI I NEDOSTACI.....  | 22        |
| 2.9 PRIMJENA MIG POSTUPKA.....  | 23        |
| <b>3. ZAVARIVANJE DVOSTRUKIM PUSLONOM.....</b>                          | <b>24</b> |
| 3.1 TEHNIKA ZAVARIVANJA.....  | 25        |
| <b>4 EKSPERIMENTALNI DIO.....</b>                                       | <b>26</b> |
| 4.1 OPREMA ZA ZAVARIVANJE .....   | 29        |
| 4.2 USPOREDBA ZAVARIVANJEM OBIČNIM PULSOM I DUPLIM PULSOM.....          | 33        |
| 4.3 PRIMJENA PMC PROCESA ZAVARIVANJA.....                               | 37        |
| <b>5 ANALIZA USPOREĐENIH POSTUPAKA ZAVARIVANJA .....</b>                | <b>41</b> |
| <b>6 ZAKLJUČAK.....</b>   | <b>44</b> |
| <b>7 LITERATURA .....</b>   | <b>45</b> |

## **PREGLED VELIČINA, OZNAKA I JEDINICA**

MIG - elektrolučno zavarivanje taljivom žicom u zaštiti neutralnog plina

TIG - elektrolučno zavarivanje netaljivom elektrodom u zaštiti inertnog plina

Al - aluminij

Si - silicij

Mg - magnezij

Ar - argon

ZUT - zona utjecaja topline

## 1 UVOD

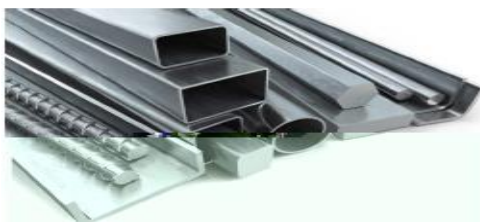
Zavarivanje je postupak spajanja dvaju ili više istorodnih ili raznorodnih materijala pomoću taljenja ili pritiska. Tek je krajem 19. stoljeća došlo do pravog razvoja zavarivanja, do tada je postojalo samo kovačko zavarivanje gdje su kovači uz pomoć željeza i ugljika zagrijavanjem i udaranjem čekića pravili spojeve. Elektrolučno i plinsko zavarivanje kisikom su bili prvi postupci koji su razvijeni u 20. stoljeću. Poslije toga dolazi do razvoja mnogih procesa, ali onaj koji je najzastupljeniji je ručno elektrolučno zavarivanje. Mnogobrojni faktori imaju utjecaj na zavarivanje i čvrstoću zavara, tu se uključuje proces zavarivanja, toplina, materijal, obloga te skup svih faktora u međusobnom odnosu. Kod nekih materijala se traži korištenje specifične tehnike i procesa zavarivanja. Često se pri zavarivanju nastoji uz glavni materijal staviti i dodatne materijale koji budu sličnog sastava kao osnovni materijal te se time formira homogeni spoj, ali isto tako postoje i slučajevi kao što je krhko lijevano željezo kod kojeg se koristi punila koja imaju različiti sastav i svojstva. Takve se zavare još naziva i heterogenim zavarenim spojevima [1].

Najčešći korišteni postupci zavarivanja aluminija i aluminijskih legura su MIG (eng. Metal Inert Gas) i TIG (eng. Tungsten Inert Gas), oni su najčešće korišteni jer je kod njih osigurana zaštitna atmosfera. TIG je postupak koji se pretežno koristi za zavarivanja materijala manjih debljina (1 - 5 mm), dok se MIG postupak koristi za zavarivanje debljih materijala. MIG postupak koristi metalnu taljivu elektrodu koja se topi i služi kao dodatni materijal za zavarivanje. Ovaj postupak se odvija u zaštitnoj atmosferi koju omogućuje inertni plin, najčešće argon (Ar) ili mješavina argona i helija (Ar + He). Kasnije su razvijene moderne varijante MIG postupka zavarivanja, kao što su MIG Pulse postupak i MIG Synchro Pulse postupak. Cilj ovog diplomskog rada je usporediti MIG Pulse i MIG Synchro Pulse postupke zavarivanja. Analizirati će se njihove prednosti, nedostaci, opisati primjena i princip rada. Isto tako kroz ovaj diplomski rad će biti prikazan aluminij i njegove legure te na koji način se one zavaruju [1].

## 1.1 OPĆENITO O ALUMINIJU I ALUMINIJSKIM LEGURAMA

Aluminij je materijal koji ima relativno krutu i mekanu strukturu, ima srebrno bijelu boju te je mekan. Isto tako ovaj materijal se može kovati i lagan je te ga je moguće valjati u jako tanke listiće i izvući u obliku finih niti. Prema plastičnosti se smatra trećim, a prema kovnosti šestim od tehnički vrlo bitnih metala. On je dosta dobar vodič topline i električne energije, bez obzira na to što se nalazi u skupini metala koji nisu plemeniti, otporan je na utjecaj korozivnih tvari kao što je dušična kiselina, organsko otapalo, voda te brojni drugi utjecaji iz atmosfere. Njegova postojanost dolazi od stvaranja tankih oksidnih slojeva na površini metala koji se ne ljušte i štite metal od daljnjih oksidacija. Umjetna pasivizacija površine provodi se kroz postupak elektrolitičke oksidacije koja je još poznata i pod nazivom eloksiranja. Aluminij nema otrovna svojstva, no s druge strane nema posebne biološke funkcije. Pri sobnoj temperaturi dolazi do njegovog lakog otapanja u lužini gdje nastaje aluminat, dok se kod neoksidirajuće kiseline pojavljuje sol. S obzirom na sva navedena svojstva, aluminij posjeduje široku primjenu na području građevine, metalurgije, strojogradnje i nekih drugih grana industrije. Elementarni aluminij posjeduje puno manji opseg primjene jer ima krutu i meku strukturu. Ova vrsta aluminija se koristi pri glatkim ploham gdje dolazi do stvaranja visoko reflektirajućeg sloja, stoga se koristi kod nanošenja na teleskopska zrcala i druge reflektirajuće plohe. Aluminijske legure se u pravilu mogu podijeliti u dvije skupine, a to su one koje su toplinski obradive i one koje su toplinski neobradive. Većinom je ukupnih broj svih legirnih elemenata ispod 10%. Očvršćivanje aluminijske legure koja nije kaljiva postiže se uz Mn, Si, Fe, Mg, uz hladnu deformaciju i žarenje. Pri tome u krutoj otopini dolazi do disperzijskog otvrdnuća intermetalnog spoja (čisti aluminij). Osnovni elementi za legiranje aluminijskih legura koje imaju strukturno očvrsnute su: Si, Mg, Zn, Li, Cu. Takvi elementi posjeduju ograničenu topljivost u aluminiju, dok je maksimalna topljivost u rasponu temperature od 460 do 520 °C, no ona brzo opada kada se smanji temperatura. Očvrsnuće takvih legura se može postići uz otapajuće žarenje, brzo hlađenje te naknadno prirodno ili umjetno starenje. Kod nekih aluminijskih legura takav postupak očvrstnuća toplinskim obrađivanjem može biti kombiniran uz postupak deformacijskog starenja [2].

Kod čistog aluminija se smanjuje kvaliteta mehaničkih svojstava, a to dovodi do uvjetovanja uporabe aluminijskih legura. Najbolje fizikalne i mehaničke karakteristike se dobivaju tako da se aluminiju doda cink, bakar, magnezij, mangan i silicij. Legiranjem aluminija se prvotno postižu bolja mehanička svojstva, tu se prvo postiže bolja vlačna čvrstoća i tvrdoća, nakon toga krutost, žilavost te bolja rezljivost i livljivost. Aluminijske legure koriste se kada su u gnječenom i u lijevanom stanju. Puno takvih legura može postići bolja mehanička svojstva kroz precipitacijsko očvrnuće i poboljšavanje. Velika količina legiranih elemenata aluminija koristi se kod izrade automobila i ostalih prijevoznih sredstava. Legure mogu dovesti do boljih kovnih i lijevanih svojstava aluminija. Npr. kada se govori o izradi zrakoplova, aluminij se u tom trenutku zbog svoje manje gustoće i otpornosti na koroziju uzima kao materijal koji je nezamjenjiv, a s obzirom na sve veći razvoj tehnologija zavarivanja sve više se koristi u automobilskoj industriji te proizvodnji vagona i vlakova kao neizostavan materijal u izradi. Aluminij u kombinaciji s brojnim drugim metalima stvara slitinu, a to se uz već navedena ostala svojstva smatra razlogom zašto se toliko koristi. S obzirom da je čisti aluminij mekan, skoro pa više od pola njegove proizvodnje prerađuje se dalje u legure. Najveći proizvođači aluminija u svijetu su Rusija, SAD i Kina, dok su najvažnija nalazišta boksita na području Kine, Indije, Australije, Brazila, Jamajke i Gvineje. Aluminij se najviše koristi kod transportne industrije za aparate, posude i rezervoare, pri kemijskim i prehrambenim postrojenjima, za kuhinjsko posuđe i druge metalne proizvode u širokoj potrošnji, kod graditeljstva za krovove, izradu žljebova i ukrasa, za pakiranje folija, tuba, limenki, za elektroničke vodiče, kod membrana za zvučnike i dr. Aluminij se ne pojavljuje u prirodi u elementarnom stanju zbog toga jer je visoko reaktivan, no vrlo velike količine njega se nalaze u mineralima i drugim rudama. Prema procjenama se smatra da bi kroz zamjenu 1,5 kg čelika jednom kg aluminija automobil kroz vozni vijek smanjio količine štetnih plinova preko 25 kg jer se tada manje troši gorivo. Kada se promatraju vlakovi ta brojka raste na čak 220 kg. Aluminij koji ima visoku čistoću i odgovarajuću završnu obradu i poliranje postiže visokoreflektirajući sjaj, kao takav često koristi kod nebodera za zrcala [2]. U nastavku na slici 1.1 prikazane su cijevi i šipke od aluminija.



Slika 1.1 Cijevi i šipke od aluminija [2]

U nastavku su kroz tablicu 1.1 prikazana fizikalna i mehanička svojstva aluminija.

Tablica 1.1 *Fizikalna i mehanička svojstva aluminija* [2]

|                         |                     |           |
|-------------------------|---------------------|-----------|
| Gustoća                 | kg/m <sup>3</sup>   | 2700      |
| Talište                 | °C                  | 660       |
| Modul elastičnosti      | N/mm <sup>2</sup>   | 69000     |
| Toplinska rastezljivost | 10 <sup>-6</sup> K  | 23,8      |
| Električna vodljivost   | m/ Ωmm <sup>2</sup> | 36...37,8 |
| Granica razvlačenja     | N/mm <sup>2</sup>   | 20...120  |
| Vlačna čvrstoća         | N/mm <sup>2</sup>   | 40...180  |
| Istezljivost            | %                   | 50...4    |

\*ovisno o stanju

U nastavku je u tablici 1.2 prikazan kemijski sastav aluminijskih legura.

Tablica 1.2 *Kemijski sastav aluminijskih legura* [2]

| Vrste legura | Sadržaj legirnih elemenata, maseni udio u % |      |     |      |      |     |       |       |     |   |        |
|--------------|---|------|-----|------|------|-----|-------|-------|-----|---|--------|
|              | Zn  | Mg   | Cu  | Mn   | Cr   | Zr  | Fe    | Si    | Li  | O | Ostali |
| 2024         | -   | 1,5  | 4,4 | 0,6  | -    | -   | 0,50* | 0,50* | -   | - | -      |
| 2224         | -   | 1,5  | 4,1 | 0,6  | -    | -   | 0,15* | 0,12* | -   | - | -      |
| 2324         | -   | 1,5  | 4,1 | 0,6  | -    | -   | 0,12* | 0,10* | -   | - | -      |
| 7050         | 6,2   | 2,25 | 2,3 | -    | -    | 0,1 | 0,15* | 0,12* | -   | - | -      |
| 7150         | 6,4   | 2,35 | 2,2 | -    | -    | 0,1 | 0,15* | 0,12* | -   | - | -      |
| 7175         | 5,6   | 2,5  | 1,6 | -    | 0,23 | -   | 0,20  | 0,15* | -   | - | -      |
| 6013         | -   | 1,0  | 0,8 | 0,35 | -    | -   | 0,30* | 0,80  | -   | - | -      |
| 8090         | -   | 0,9  | 1,3 | -    | -    | 0,1 | 0,30* | 0,20* | 2,4 | - | -      |

\*maksimum, kod većine aluminijskih legura se dodatno pojavljuje oko 0,05 - 0,1 % Ti

## 1.2 VAŽNA SVOJSTVA ALUMINIJA KOD ZAVARIVANJA

Pojavljaju se mnogobrojne razlike između čelika i aluminija koje imaju utjecaj na zavarivanje [3]:

- Razlike kod točaka taljenja dva metala i njihovih oksida. Oksidi kod željeza će se rastopiti blizu ili ispod točki tališta dok će se kod aluminija to dogoditi pri temperaturi od 2060 °C, oko 1300 °C iznad tališta aluminija. Takva pojava ima vrlo bitan utjecaj na zavarivanje jer je važno ukloniti i raspršiti sloj oksida prije i prilikom zavarivanja da bi se postiglo dobru kvalitetu zavarenog spoja.
- Film oksida kod aluminija se obnavlja sam i dosta je izdržljiv. Takav proces daje legurama aluminija visoku otpornost na koroziju, to im daje mogućnost korištenja pri izloženoj atmosferi bez dodatne zaštite. Otpornost na koroziju moguće je kroz anodizaciju dodatno povećati - stvara se oksidni film koji ima kontroliranu debljinu.
- Kod aluminija se pojavljuje dvostruko veća toplinska rastezljivost nego što je to slučaj kod čelika, a to može dovesti do neprihvatljivih izvijanja i iskrivljenja tijekom postupka zavarivanja.
- Toplinska provodljivost aluminija je čak šest puta veća nego što je to kod čelika. Rezultat takve pojave je potreba za puno intenzivnijim i koncentriranijim izvorom topline pri zavarivanju nego što se koristi kod čelika.
- Specifična količina topline koja je potrebna da bi se podigla temperatura tvari u aluminiju je dvostruko veća nego što je to slučaj kod čelika.
- Aluminij posjeduje veliku električnu vodljivost, to se smatra nedostatkom kada toplinu za zavarivanje treba proizvesti uz električnu otpornost.
- Za razliku od čelika kod aluminija ne dolazi do promjene boje s povećanjem temperature. Takav postupak može dovesti zavarivača u teže uvjete rada jer ne može točno prosuditi kada dolazi do taljenja, zbog toga se zavarivači moraju prekvalificirati kada prelaze sa zavarivanja čelika na aluminij.

### 1.3 ZAVARLJIVOST ALUMINIJA

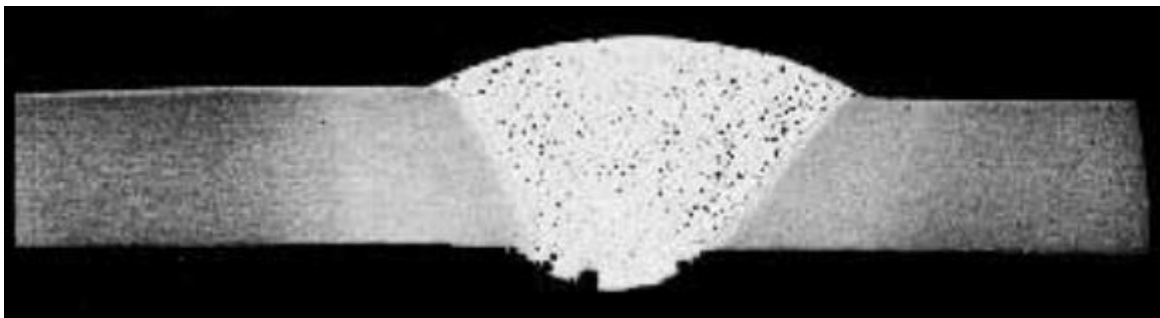
Kod idealnog slučaja zavarivanja dolazi do cjelovitog spoja koju sadržava materijal za zavarivanje, zonu gdje dolazi do utjecaja topline i susjedni osnovni materijal - moraju imati jednaka svojstva kao kod osnovnog materijala. Pojavljuje se niz problema koji se vezuju uz zavarivanje aluminijskih legura i aluminijskih legura jer oni otežavaju idealno zavarivanje [4].

Značajke i nedostaci koji imaju utjecaj na gubitak svojstava obuhvaćene su kroz [4]:

- poroznosti (zaostale plinove),
- oksidne spojeve,
- toplu pukotinu,
- manju čvrstoću zavara i zone toplinskog utjecaja,
- nepostojanje fuzije,
- manju otpornost na koroziju,
- manju električnu otpornost.

#### 1.3.1 Poroznost zaostalih plinova

Poroznost se smatra problemom koji se ograničava samo na materijal koji se zavaruje. Pojavljuje se iz otopljenog plina koji dolazi iz rastaljenog metala te takav plin bude zarobljen u skrućenom materijalu tako da se formiraju mjehurići u zavaru koji je čvrst. Kod poroznosti se pojavljuju variranja od vrlo sitnih mikroporoznosti pa sve do grube pore od 4 mm kod promjera. Kod aluminijskih legura se za takav postupak krivim smatra vodik jer on posjeduje visoku topljivost pri rastaljenom stanju aluminijskih legura, ali isto tako postoji jako slaba topljivost u čvrstom aluminijskom materijalu [4]. U nastavku je na slici 1.2 prikaz fino raspršene poroznosti pri čeonom spoju aluminijskih legura.



Slika 1.2 Prikaz fino raspršene poroznosti pri čeonom spoju aluminijskih legura debljine 6mm [4]



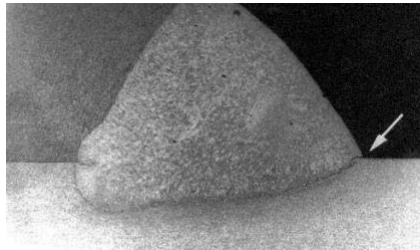
Korištenjem dodatnog materijala dolazi do povećanja razine poroznosti zbog toga što se pojavljuje onečišćenje na žici. Od postupaka koji su konvencionalni načini spajanja samo kod TIG-a se pojavljuje niža razina poroznosti zbog toga što kod njega dolazi do onečišćenja žice vodikom. Kada se poveća jakost struje dolazi do povećanja temperature taline, a samim time se i brzina apsorpcije vodika u rastaljenom metalu povećava. Sastav legure može imati utjecaj na poroznu količinu kada dođe do promjene topivosti vodika, najbolji utjecaj dobiva se magnezijem. Smatra se kako magnezij dovodi do povećanja topljivosti i smanjenja apsorpiranja vodika za čak dvostruko na 6 % magnezija, dok s druge strane bakar i silicij dovode do suprotnog učinka. Zaključak koji se može dobiti prema tome je da kada se pojavi poroznost, korištenje Al - Mg kao dodatnih materijala može dovesti do smanjenja problema. Postoji pretpostavka kako je takav dodatni materijal prihvatljiv za određene namjene. Izvori vodika su razni i ima ih puno, ali se smatraju primarnom zalihom (potrošni materijal za zavarivanje pod praškom). Korišteni plin u postupku zaštićenom plinom još je izvor vlage koji lako može biti zanemaren. Idealni uvjeti su korištenje plina uz rosište (temperaturu do koje je potrebno hladiti vlažan zrak, pri konstantnom tlaku, da dođe do kondenziranja vode) manje od  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Kako bi se postiglo višu čistoću, potrebno je kupovanje plina koji ima zajamčenu nižu točku rosišta. Isto tako je vrlo bitno da plin zadržava viši stupanj čistoće kada se dovodi u talinu. Sustav opskrbe plinom bi trebalo redovito provjeravati jer često može doći do toga da plin negdje pušta. Bez obzira na najveće napore dobavljača plina nije uvijek moguće dati potpunu čistoću svake bočice osim uz velike troškove. Materijali za opskrbu su u većini slučajeva velike kvalitete. Daljnji izvori kontaminacije mogu se pojaviti i od samog plinskog crijeva. Mnogi plastični spojevi koji se koriste za izradu plinskog crijeva su porozni prema vodi koja je prisutna na zraku. Mnogobrojna izvješća u zadnje vrijeme prikazuju kako je veliki problem propusnost plastičnog crijeva. Tu se može uočiti kako samo mali broj crijeva odražava plin čistim. Najbolje sustav za protok plina je metalni sustav. U skladu prema primjeni, plastične cijevi bi trebale biti kratke i uz manje promjere. Isto tako vrlo bitna činjenica je to da vlažnost dovodi do skupljanja crijeva i tijekom razdoblja kad se ono ne koristi. Ispiranje crijeva dovodi do manje poroznosti kada se koristi „torch trigger“. Žica za zavarivanje treba se očistiti krpom koja ne ostavlja dlake i dobro ju je potrebno odmastiti sredstvom prije primjenjivanja. Nakon što se žica očisti, ne treba ju dirati rukama nego koristiti par rukavica, odložiti žicu na čistu površinu i započeti zavarivanje kroz kratko vremensko razdoblje nakon čišćenja [5].

Čistoću kod osnovnog metala se smatra vrlo važnom da bi se postigla niska razina poroznosti - nije moguće dovoljno naglasiti koliko je taj segment bitan. Osnovna potreba je za temeljnim odmašćivanjem, poslije toga dolazi do mehaničkog čišćenja kao što je uklanjanje spoja oksida sa žice uz pomoć četke. Nakon što se očisti žicu i osnovni materijal se odmasti, osnovni materijal treba zavariti u što kraćem vremenskom razdoblju. Posljednjim izvorom poroznosti smatra se vodit koji je otopljen u aluminiju. Iako je topivost niska kod krute faze, moguće je da zbog toga u osnovnom metalu dođe do problema pri zavarivanju. To nije česta pojava kada se zavaruju kovani proizvodi, ali do toga može doći kada se zavaruju odljevci ili sinterirani proizvodi. Izbjegavanje poroznosti u trenutku kada u osnovnom metalu ima vodika je nemoguće [5].

### 1.3.2 Odstranjivanje oksidnog sloja prilikom provedbe zavarivanja

Aluminijev oksid vrlo je čvrsto povezan i brzo stvara oksid koji daje aluminiju dobru otpornost na koroziju. Takav oksid posjeduje jako visoku točku tališta, 2060° C u odnosu na čisti aluminij koji se otapa pri 660 °C. Oksidi velikog broja ostalih metala tale se na istoj temperaturi i tijekom zavarivanja dolazi do plutanja na vrhu zavara u obliku rastaljene troske. Slojevi oksida mogu ostati zarobljeni u zavaru, a to dovodi do lošijih svojstava čvrstoće zavara. Vrlo je teško ukloniti takve slojeve postupcima zavarivanja koji koriste prašak ili obložene elektrode jer moraju biti jako agresivni kako bi se uklonio oksidni sloj. Kod plinskog zavarivanja postoji katodno čišćenje koje se koristi da bi se postiglo željene rezultate. U trenutku kada je elektroda spojena na pozitivan pol izvora koji se koristi za napajanje i prođe istosmjerna struja, postoji prolazak elektrona od komada koji se zavaruje do elektrode sa iona koji putuju u suprotnom smjeru prema površini radnog komada koju „bombardiraju“. Takav postupak dovodi do razbijanja i raspršenja oksidnih slojeva i daje mogućnost stvaranja taline i spajanja komada. Kod mig postupka se koristi samo DC elektrode, ako se koristi negativnu DC elektrodu to dovodi do luka koji nije stabilan i nepravilno se prenosi metal i slaba je kvaliteta zavarenog spoja. Stoga se uklanjanje sloja oksida smatra vrlo bitnim dijelom kod zavarivanja MIG postupkom. S druge strane kod TIG zavarivanja se koristi DCEN, kod aluminija može dovesti do slabije kvalitete zavarenog spoja. Kada se koristi DCEP, to dovodi do prevelikog zagrijavanja volframove elektrode [6].

Takav postupak može dovesti do toga da se otopi elektroda i dođe do završetka zavarivanja prije željenog roka. Kompromis se nastoji postići tako da se koristi izmjenična struja gdje se uklanja oksidni sloj prilikom pozitivnog poluciklusa – spaja se na pozitivan pol izvora, a hlađenje elektrode na negativnom poluciklusu spaja se na negativan pol izvora. Stoga se provedba zavarivanja izvodi uz izmjeničnu struju iako postoji određeni broj tehnika kod kojih se koristi istosmjerna struja [6]. U nastavku je na slici 1.3 prikazan oksidni sloj zarobljen u zavaru.



Slika 1.3 Oksidni sloj koji je zarobljen u zavaru [6]

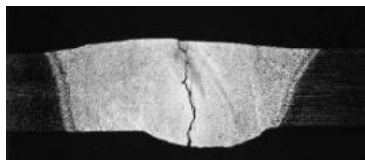
### 1.3.3 Pojave toplih pukotina

Pojava toplih pukotina je problem pri zavarivanju do kojeg ne dolazi kod čistih metala ali se može pronaći kod nekih legura. Ne ograničava se samo na aluminij nego se može pojaviti u čeličnoj, niklenoj i bakrenoj leguri. Kada se dodaju legirni elementi u čiste metale dolazi do promjene temperature na kojoj se metali skrućuju. Prvom čvrstom tvari koja se oblikuje smatraju se čestice koje imaju djelovanje jezgre na koju se vezuju atomi te se tada formira dendrit. Do povećanja dendrita dolazi sve dok se ne počne sudarati sa svojim susjedima koji se pojavljuju na gotovo jednak način. Mjesto kod kojeg se događa takav sudar smatra se granicom između susjednih dendrita i granica zrna. Posljedica skrućivanja je takva da se spoj koji ima najnižu temperaturu taljenja stavlja ispred skrućenog dendrita sve dok ne bude zarobljen između susjednih dendrita odnosno duž granica zrna. Kod većine metala do takvog učinka dolazi zbog nečistoća. Sumpor kod čelika i legura nikla odličan je primjer gdje se stvara eutektik sumpora uz niske točke taljenja. Kod aluminijskih legura je to namjerno dodani legirani element koji tvori niz spojeva uz niže točke taljenja od glavnog metala. Ukoliko su razlike temperatura taljenja između glavnog metala i legirnog elementa velike, dolazi do pojave tekućeg sloja duž granica zrna te može doći do razdvajanja na granicama zrna kako se taj tekući sloj skupi i ohladi. Tada se može doći do određenih pretpostavki da su aluminijske legure osjetljive na određeni stupanj takvog oblika pucanja, a oni se razlikuju prema stupnju osjetljivosti [7].

Kroz testove pucanja određen je raspon unutar kojeg legure imaju visoku rizičnost od pojave tople pukotine. Takvi testovi napravljeni na način da se zavari opterećuju poprečno kroz kontrolirane uvjete da dođe do pojave pukotine, dužina pukotine će se smatrati mjerom za osjetljivost pucanja legura koje se testiraju. Praktična posljedica toga je da na osjetljivost zbog pucanja utjecaj ima bilo kakva promjena u sastavu metala koji će biti zavaren. Kod puno situacija pri zavarivanju legura aluminijski dodatni materijal nije bio dobar za osnovni materijal [7].

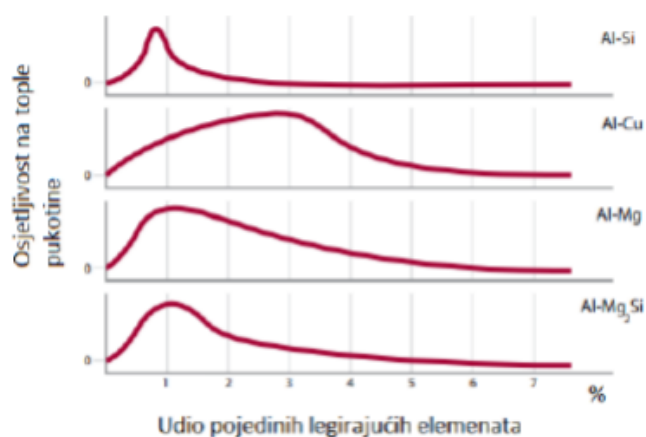
Ukoliko dođe do pojave tople pukotine, takav problem se može ukloniti na razne načine [7]:

- Smanjiti veličinu zrna, otkriveno je kako se uz mali dodatak elemenata (npr. titana, cirkonija ili skandija) koji će imati djelovanje kao jezgra za formu vrlo sitnih zrna prilikom skrućivanja. Isto tako je to moguće postići uz dodatni materijal legiran s cirkonijem ili titanom.
- Potrebno je kontrolirati sastav zavara tako da se dodaje dodatni materijali i proizvede legura koja nije sklona toploj pukotini.
- Treba koristiti pripremu spoja i razmak među komadima da bi se dodalo dovoljnu količinu dodatnog materijala da se provede zavareni spoj van zone tople pukotine.
- Treba koristiti najveće brzine zavarivanja jer se velikim brzinama smanjuje vrijeme pri kojem se zavareni spoj nalazi u rasponu temperatura tople pukotine. Visoka brzina zavarivanja isto tako dovodi do smanjenja ZUT-a te manjeg naprezanja pri skrućivanju.
- Odabir zavarivačke i montažne sekvence koja minimizira ograničenje i zaostalo naprezanje.
- Primjena vanjske sile da bi se održavao zavar uz tlačno opterećenje dok se nalazi u rasponu tople pukotine.
- Odabir dodatnog materijala koji ima temperaturu taljenja blizu one od osnovnog materijala. U nastavku na slici 1.4 prikazana je topla pukotina kod aluminijskog dodatnog materijala.



Slika 1.4 Prikaz tople pukotine kod aluminijskog dodatnog materijala [7]

Pri zavarivanju Al - Si legure osjetljivost na pukotinu je izražena pri sadržaju Si od 0,5 do 2 %. Kod sadržaja silicija u iznosi većem od 3 %, osjetljivost na pukotinu smatra se vrlo niskom. Pri zavarivanju Al - Cu legura izražava se osjetljivost pri sadržaju bakra od 1,5 do 3 %. Preko 6 % sadržaja bakra osjetljivost se smatra vrlo niskom. Kod udjela magnezija od 0,5 do 3 % metal zavarenog spoja počinje biti osjetljiv na pojavu pukotina. Isto tako uz sadržaj magnezija manji od 3 %, Al - Mg legura može se zavariti s Al - Si žicom ili Al - Mg žicom, ovisno o tome koje su performanse potrebne. Kod sadržaja magnezija veće od 3 % ne postoji mogućnost dobrog zavarivanja Al - Si žicom jer se stvara  $Mg_2Si$  koji dovodi do smanjenja žilavosti i povećanja osjetljivosti na pukotinu. Potrebno je obratiti pažnju i kod zavarivanja Al - Mg - Si kod kojih se dopušta do 1%  $Mg_2Si$  zbog posebne osjetljivosti na pukotinu. Zbog toga je poželjno da se koriste dodatni materijali serije Al - Si ili Al - Mg [8]. Na slici 1.5 u nastavku je prikazan utjecaj legirnih elemenata na nastajanje tople pukotine.



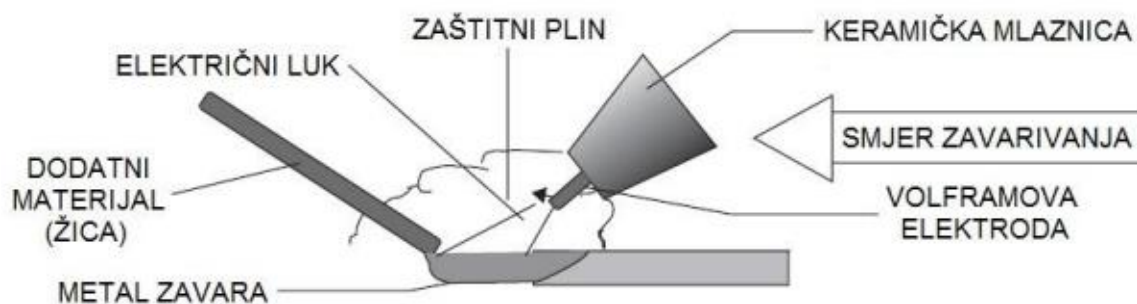
Slika 1.5 Utjecaj legirnih elemenata na nastanak toplih pukotina [8]

Mehanizam koji dovodi do nastajanja tople pukotine [8]:

- Skrućivanje metala zavara počinje od hladne strane žlijeba ka sredini zavara, dok se razdvojeni dio popuni talinom.
- Pri završnoj fazi skrućivanja, tanki film taline ostaje između zrna skrućenog metala zavara.
- Kod područja skrućenog metala dolazi do skupljanja u smjeru suprotnom od smjera skrućivanja jer se na takav način stvara veliko naprezanje.
- Ako se pri procesu skrućivanja i skupljanja dogodi prevladavanje skupljanja, zrna materijala su odvojena, kod toplog stanja dolazi do pojave toplih pukotina.

#### 1.4 ZAVARIVANJE ALUMINIJA TIG POSTUPKOM

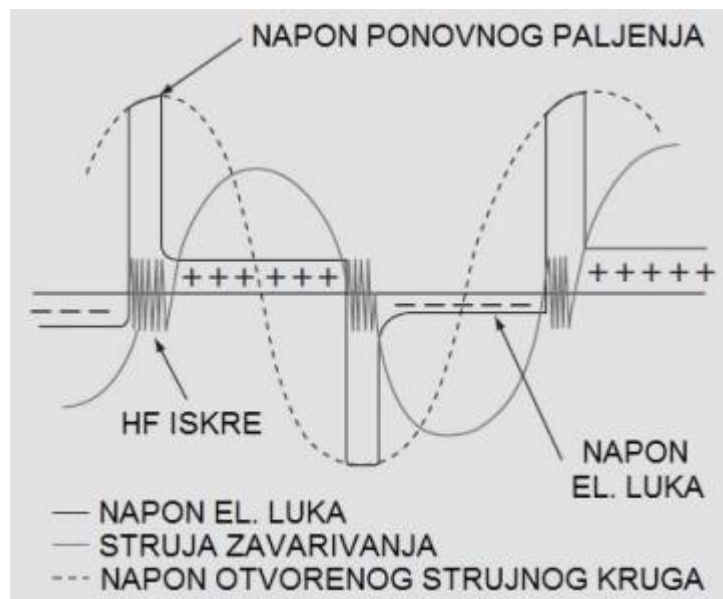
Zavarivanje TIG postupkom se smatra elektrolučnim postupkom zavarivanja pri kojem se koristi netaljivom elektrodom i inertnim plinom koji ima zadaću da zaštiti elektrodu, električni luk i metal zavara. Ovaj postupak je prikazan u radu jer isto tako se koristi da bi se zavarivalo aluminij kao što je to slučaj s MIG postupkom. Na slici 1.6 u nastavku shematski je prikaz TIG postupka zavarivanja [9].



Slika 1.6 Prikaz sheme TIG zavarivanja [9]

Izvor topline za ovaj postupak dobiva se preko električnog luka. Inženjeri zavarivanja donose odluku hoće li za postupak biti korišten dodatni materijal ili ne. Metalom zavara se jednostavno upravlja te se zbog toga mogu izrađivati korijenski zavari bez podložne pločice. Električni luk stabilan je i pri maloj struji zavarivanja, to omogućava zavarivanja tankog lima. Ovakvim postupkom zavarivanja mogu se postizati visoke kvalitete metala zavara, no isto tako su za taj pothvat potrebni iskusniji zavarivači. Kada se napravi usporedba s MIG postupkom ovaj postupak zavarivanja ima manju brzinu zavara, a isto tako i depozit dodatnog materijala te takve činjenice čine ovaj postupak manje ekonomski isplativ. Pri zavarivanju aluminija TIG postupkom debljina lima aluminija u većini slučajeva je do 6 mm, to je iz razloga što se ovim postupkom postiže manja dubina zavara u odnosu na MIG postupak zavarivanja. Da bi se zavarivalo s TIG postupkom kod većine materijala potrebno je koristiti istosmjernu struju s elektrodom koja je spojena na - pol (DCEN), no takav postupak ne uklanja oksidni film s površine aluminija te se taj postupak provodi izmjeničnom strujom (AC). Tada se na pozitivnoj polovici ciklusa provodi uklanjanje oksidnog filma, dok se na negativnoj polovici radi hlađenje elektrode i vrši postupak zavarivanja [9].

Na slici 1.7 u nastavku prikazan je utjecaj visokofrekventne struje na napon i struju zavarivanja.



Slika 1.7 Utjecaj visokofrekventne struje na struju zavarivanja [9]

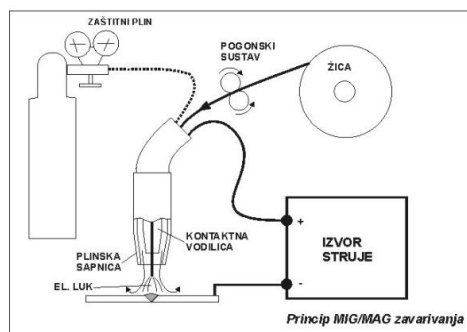
Aluminij ima slabo emitiranje elektrona, a to dovodi do znatno težeg ponovnog uspostavljanja električnog luka na elektrodi pri pozitivnoj polovici ciklusa. Kod slučaja pojave zakašnjenja u uspostavi električnog luka, manja količina struje bi tekla u kod pozitivne polovice ciklusa, a veći dio kod negativne polovice ciklusa. Takvo stanje se još naziva i djelomičnim ispravljanjem, a ono može dovesti do potpunog ispravljanja, a to znači da kod pozitivne polovice ciklusa uopće ne teče struja. Ta pojava bi unijela nestabilnost u električni luk, došlo bi do gubitka mogućnosti za uklanjanje oksidnog filma i pojave istosmjerne struje u sekundarnom strujnom krugu izvora struje, sve to na kraju dovodi do pregrijavanja transformatora. Za zavarivanje aluminija i aluminijskih legura se preferira argon kao zaštitni plin, no isto tako se koristi helij te mješavina helija i argona. Kada se koristi argon onda se dobiva plitak i široki srebrnasti zavareni spoj. Najlakše uspostavljanje i najveća stabilnost električnog luka može se postići tako da se koristi argon kao zaštitni plin [9].

## 2 MIG SYNCHRO PULSE I MIG PULSE POSTUPAK ZAVARIVANJA

### 2.1 OPIS MIG POSTUPKA ZAVARIVANJA

MIG zavarivanje je elektrolučno zavarivanje metalnom taljivom elektrodom u zaštitnoj atmosferi plinova gdje se električki luk uspostavlja i održava između taljive žice i radnog komada koji se zavaruje. Ono spada u postupke zavarivanja taljenjem. Ovo je jedna od najčešće korištenih metoda zavarivanja, a prvi put je korištena u SAD-u sredinom 1940-ih godina. Od tada ovaj proces zavarivanja se koristi u širokom rasponu industrija od proizvodnje automobila do cjevovoda. Ovaj postupak zavarivanja se odvija u zaštitnoj atmosferi inertnih plinova, najčešće argon ili mješavine argona i helija. Ti plinovi štite zavareni spoj od zagađenja atmosferskim zrakom [9].

Prilikom zavarivanja koristi se kontinuirano dodavanje žice koja služi kao elektroda i kao dodatni materijal. Zbog utjecaj topline električnog luka, topi se metalna elektroda (žica) i osnovni materijal na mjestu zavarivanja, čime se ostvaruje zavareni spoj. Nudi prednosti visokih brzina zavarivanja, odlično uklanjanje oksidnog sloja tijekom zavarivanja, manje zone utjecaja topline od TIG zavarivanja i sposobnost zavarivanja u svim pozicijama. To su razlozi zašto je MIG zavarivanje najrasprostranjenije elektrolučno zavarivanje za spajanje aluminija. MIG postupak zavarivanja u pravilu koristi istosmjernu struju sa elektrodom spojenom na pozitivni pol izvora energije. Kao što je već spomenuto, ovo rezultira vrlo dobrim uklanjanjem oksidnog sloja. Većina topline razvijene u luku se generira na pozitivnom polu, u slučaju MIG zavarivanja to je na elektrodi, što rezultira velikim trošenjem žice i učinkovitim prijenosom topline u toplinu zavarenog spoja [9]. U nastavku je na slici 2.1 grafički prikaz principa MIG zavarivanja.



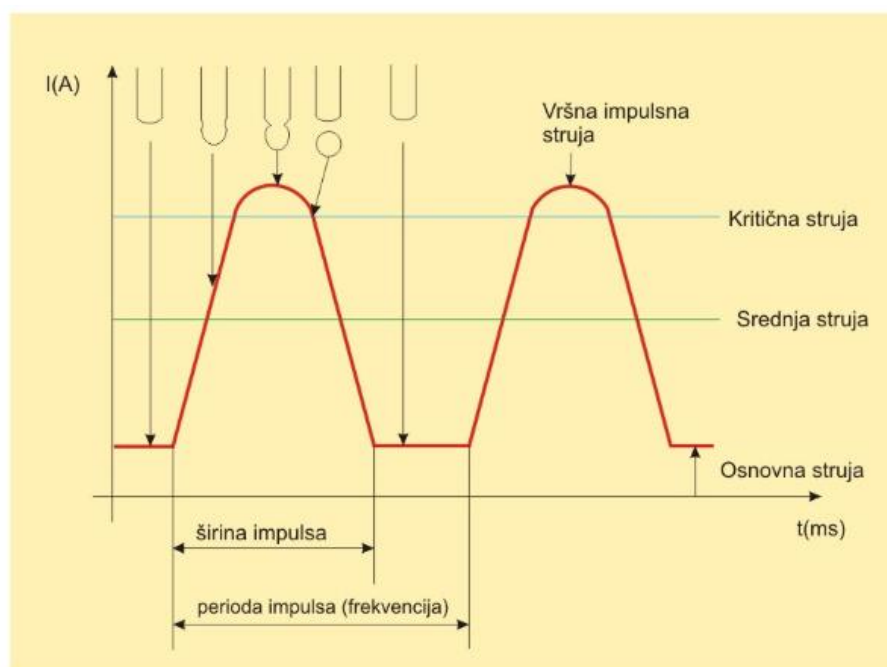
Slika 2.1 Grafički prikaz principa MIG zavarivanja [9]



U MIG postupku zavarivanja, način prijenosa metala električnim lukom ovisi o nekoliko faktora, a to su: polaritet elektrode, jakost struje zavarivanja, napon zavarivanja, vrsta zaštitnog plina, kemijski sastav žice i karakteristike izvora struje zavarivanja. Ovisno o jakosti struje i naponu električnog luka, prijenos metala može se odvijati na četiri načina: kratki luk, prijelazni (miješani) luk, štrcajući luk i impulsni luk [10].

MIG Pulse postupak koristi dvije struje zavarivanja – visoku i nisku osnovnu. Postupak radi na način da izvor napajanja prebacuje između visokog strujnog impulsa i niskog osnovnog između 30 do 400 puta u sekundi. Tijekom tog prebacivanja, impuls jake struje utječe na odvajanje određenog broja i veličina kapljice pri čemu je poželjna jedna kapljica po impulsu te ju tjera prema spoju za zavarivanje. Istovremeno, niska osnovna struja održava luk [10].

MIG Pulse ili MIG impulsni postupak zavarivanja predstavlja varijantu MIG postupka koja koristi pulsirajući prijenos metala tijekom zavarivanja. U odnosu na klasični postupak zavarivanja ovog materijala, kod kojeg se prijenos metala od elektrode do taline provodi štrcajućim lukom, pri impulsnom načinu postiže se prenošenje slobodnim letom kapljica pri nižoj struji. Pulsiranje struje omogućuje bolju kontrolu toplinskog utjecaja, što rezultira visokokvalitetnim zavarenim spojevima [10]. U nastavku je na slici 2.2 grafički prikaz impulsnog postupka i načina otkidanja pločice.



Slika 2.2 Grafički prikaz impulsnog postupka i načina otkidanja kapljice [10]

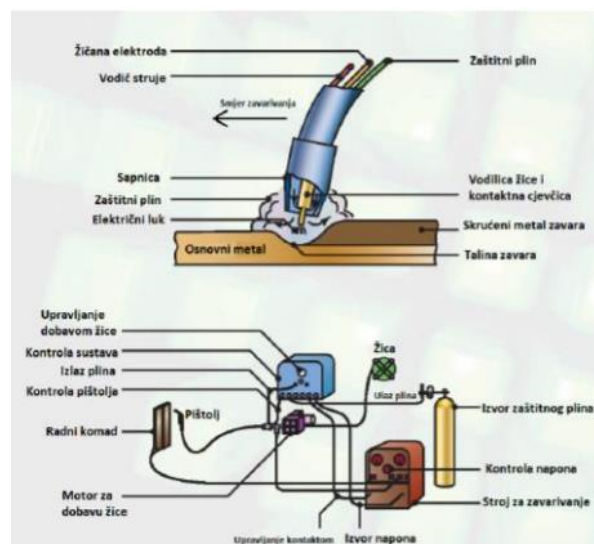
Primjenom ovog postupka osigurava se stabilan i miran električni luk s minimalnim raspršivanjem. Napredak u razvoju ovog postupka omogućilo je korištenje digitalno upravljanih

tranzistorskih izvora koji omogućuju stvaranje strujnih impulsa proizvoljnog oblika. To znači da se može utjecati na način odvajanja kapljica i kontrolirati njihova veličina [10].

Postoji pet ključnih parametara koji utječu na rad i stabilnost prijenosa metala kroz električni luk pri impulsnom zavarivanju [10]:

1. Visoka impulsna struja: Ovaj parametar se određuje prema vrsti osnovnog materijala, promjeru žice i mješavini zaštitnog plina. Obično se kreće u rasponu od 250A do 650A.
2. Osnovna struja: Ova struja sprječava gašenje luka nakon prestanka impulsa. Cilj je postaviti što nižu vrijednost, obično u rasponu od 20A do 50A. Veća struja povećava stabilnost, ali i unesenu energije i dužinu luka.
3. Širina impulsa: Odabire se tako da omogući odvajanje samo jedne kapljice tijekom trajanja impulsa. Obično se kreće u rasponu od 1ms do 3ms.
4. Frekvencija: Ovaj parametar predstavlja broj kapljica u sekundi i odabire se tako da se osigura stabilno odvajanje kapljica kod određene brzine žice. Podešava se u rasponu od 20Hz do 300Hz.

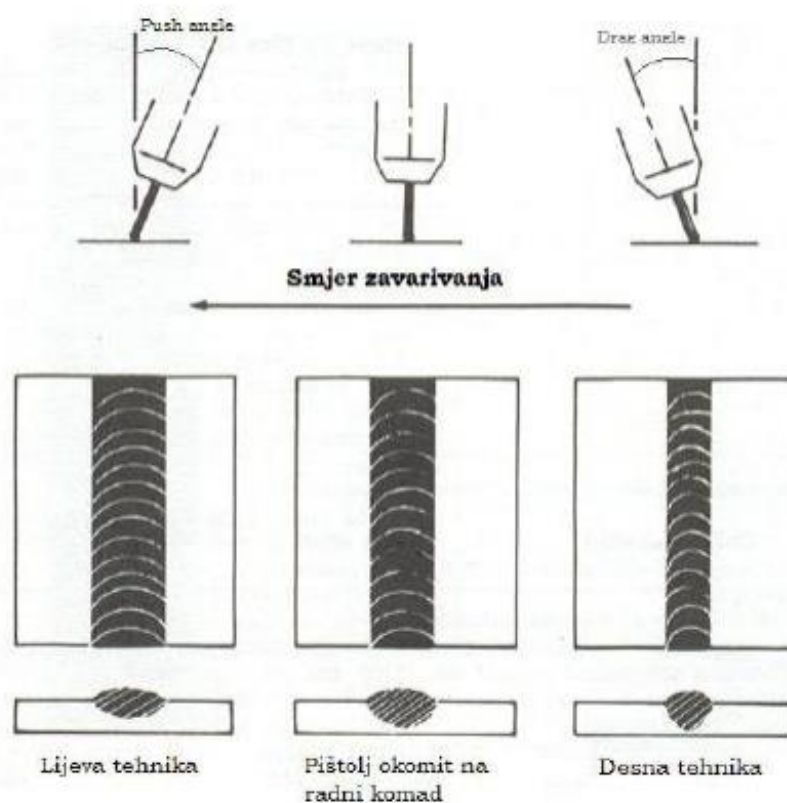
Brzina žice: Ovaj parametar određuje količinu taljenog materijala i ostali parametri ovise o njemu. Ovisno o promjeru žice, kreće se u rasponu od 2m/min do 15m/min. U nastavku je na slici 2.3 prikazan MIG postupak zavarivanja.



Slika 2.3 Mig postupak zavarivanja [10]

## 2.2 TEHNIKA RADA

Kod tehnika rada se pojavljuju desna i lijeva tehnika, lijevu tehniku se koristi pri zavarivanju tanjih limova (prvo dolazi do napredovanja dodatnog materijala, a nakon toga slijedi plamen i koristi se za lim do 3mm), dok se kod debljih limova koristi desnu tehniku. Kada se zavaruju aluminijske legure vrlo je bitno da se održi kut zavarivanja  $5 - 10^\circ$ . Pri održavanju pištolja pod kutom naziva „drag angle“, odnosno zavarivanja desnom tehnikom, postoji mogućnost odsutnosti zaštitnih plinova pri talini. Kao rezultat takvog proces se javlja površinski sivi ili crni zavar. Pred kraj zavarivanja postoji mogućnost pojave onečišćenosti na površini ili rubu zavara zbog otapanja aluminijevog oksida i magnezija. Posebno se onečišćenosti očekuju kada se koristi dodatni materijal iz 5XXX serije jer udio magnezija je velik, a on je pogodan za stvaranje onečišćenosti. Nastanak onečišćenosti može dovesti do toga da je potrebno ponovo podesiti tehniku kojom se zavaruje [11]. U nastavku na slici 2.4 prikazana je širina i penetracija zavara kao posljedica izbora tehnike zavarivanja i pozicije elektrode.



Slika 2.4 Širina i penetracija zavara kao posljedica pozicioniranja elektrode i izbora tehnike zavarivanja [11]

### 2.3 PIŠTOLJ ZA ZAVARIVANJE

Pištolj kod MIG postupka zavarivanja povezan je s sistemom pogona žice preko polikabela. On se koristi kao vod za dodatne materijale, zaštitne plinove i električnu energiju. Građa polikabela ovisi o tome kakve je konfiguracija strujnog izvora koji se koristi kod zavarivanja odnosno koristi li se pištolji koji se hladi vodom ili samo zračnim hlađenjem. Veća fleksibilnost polikabela moguća je uz fino namotano sitno vlakno. Polikabel uz navedene segmente za hlađenje sadržava i dovod za plin, žicu i novu funkciju kao što je kontrola i zaslon pri modernim pištoljima za zavarivanje [11]. Pištolj za zavarivanje je prikazan u nastavku kroz sliku 2.5.



Slika 2.5 *Pištolj za zavarivanje* [11]

### 2.4 ZAŠTITNI PLINOVI

Zaštitni plinovi koji se koriste pri zavarivanju aluminija i njegovih legura su argon ili mješavina argona i helija. Plin koji se preporučuje pri zavarivanju aluminija i njegovih legura debljine do 12,5 mm je čisti stopostotni argon. Kada se zavaruju dijelovi koji imaju debljinu veću od te i kod kojih je potrebno koristiti veću toplinu za taljenje metala, većinom se koristi mješavina argona i helija (75 % argona i 25 helija ili 25 % argona i 75 % helija). Argon se koristi je daje mogućnost uporabe električnog luka bez pojave štrcanja. Šavovi dobiveni zavarivanjem argonom koji posjeduje uvjete zavarivanja s toplinskom vodljivosti koja je niska, širok je pri gornjem dijelu, dok se kod donjeg dijela spoja sužava. S druge strane kada se koristi helij, on ostavlja širi šav zavarenog spoja i ostvaruje bolju penetraciju. Čisti helij kod zavarivanja MIG postupkom ne koristi se često nego je njegova upotreba u većini slučajeva kao mješavina uz njegov sadržaj 30 - 70 %. Kod zaštitnog plina sadržaj helija ovisan je o zahtjevima penetracije. Kada se koriste tanki materijali ne postoji potreba za velikom penetracijom i zbog toga je sadržaj helija manji, dok svojstva kao što je niža toplinska vodljivost i veći toplinski kapacitet daju mogućnost veće brzine zavarivanja i veće učinkovitosti [12].

## 2.5 IZVOR STRUJE

Električni luk pri zavarivanju moguće je održavati uz izmjeničnu ili istosmjernu struju, ovisno o tome koji izvori struje su dostupni. Kada se provodi standardni MIG postupak zavarivanja uglavnom se koristi istosmjernu struju uz elektrodu koja je spojena na plus pol strujnog izvora. Kako bi se postiglo bolje uspostavljanje stabilnog električnog luka pri zavarivanju aluminija uspostavlja se izvor ravnih statičkih karakteristika uz konstantni napon električne struje. Primjena ravne statičke karakteristike usko je poveza uz poluautomatski postupak kao što je MIG zavarivanje. Kod impulsnog MIG zavarivanja koristi se specijalne izvore uz sinergijsku kontrolu. Kod takvog sistema kontrola je utemeljena kroz jedan parametar, dok se ostali parametri automatski odabiru. Uz ravne izlazne karakteristike tu se dodaje i strmopadajuća statička karakteristika. Takva izvedba izvora struje razvijena je kako bi se održao iznos jakosti električne struje istim, dok je s druge strane iznos napona električne struje promjenjiv skupa s visinom električnog luka. Strmopadajuću statičku karakteristiku se smatra prikladnom kod izvora struje koji se primjenjuju za ručno zavarivanje te se zbog variranja geometrije luka koji posjeduje negativni utjecaj na kvalitetu zavarenog spoja ne koristi da bi se zavarilo aluminij [13].

## 2.6 PARAMETRI ZAVARIVANJA

Odabir parametara pri MIG zavarivanju u nekim situacijama može biti kompliciran. Takav proces ovisan je o debljini materijala koji se zavaruje, opremi koja je raspoloživa, uvjetima pri kojima se provodi zavarivanje, tehnološkim uvjetima, zavarivačevom iskustvu, stupnju mehanizacije i dr. Stručna literatura, neke programske aplikacije za zavarivanje i standardi korištenja u većini slučajeva određuju parametre za primjenu, a kod njih je potrebno provesti atestiranje [13].

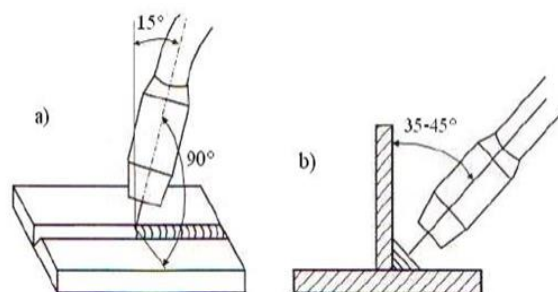
Najvažniji parametri pri MIG postupku zavarivanja su [13]:

- jačina struje pri zavarivanju,
- napon kod električnog luka,
- toplina električnog luka,
- brzina kojom se zavaruje,

- duljina slobodnog kraja žice te količina korištenog zaštitnog plina.

Optimalna jačina struje pri zavarivanju ovisna je o tome kakav je oblik spoja koji se zavaruje, promjeru žice, vrsti materijala koji se zavaruje i njegovoj debljini te položaju u kojem se zavaruje. Kada se povećava jačina struje zavarivanja tada dolazi i do povećane penetracije i protaljivanja. Iz toga razloga nije preporučljivo praviti veliki porast jačine struje zavarivanja jer na takav način dolazi do većeg rasprskavanja [13].

U trenutku kada se previše poveća napon ili duljina električnog luka smanjuje se zaštita materijala koji je rastaljen, a to dovodi do slabijih mehaničkih svojstava zavarenog spoja. Uspostavljanje optimalnog odnosa između količine taline i brzine kojom se zavaruje je vrlo važan segment. Korištenjem male brzine zavarivanja i velike količine taline i obratno dovodi do pojave naljepljivanja, a to je jedna od karakteristika pri zavarivanju aluminija. U trenutku kada se provodi zavarivanje sučeljenog spoja, pištolj se nalazi pod kutom nagiba  $15^\circ$  uz odnosnu na okomitu os, dok je kada se zavaruje kutni spoj taj kut između  $35$  i  $45^\circ$ . Prema takvom nagibu osigurava se bolje taljenje žice i kontroliranje taline. Preveliki nagibi pištolja za zavarivanja dovode do manjeg provara i većeg štrcanja materijala. Tada dolazi do mogućnosti kontakta rastaljenog metala za zrakom, a to može dovesti do pojave poroznosti [14]. U nastavku je na slici 2.6 prikazan nagib pištolja kod sučeljenog i kutnog zavara.



2.6 Nagib pištolja kod sučeljenog i kutnog zavara [13]

## 2.7 ZAVARIVANJE RAZNORODNIH ALUMINIJSKIH LEGURA

Kod brojnih aluminijevih legura postoji osjetljivost na tople pukotine. Takva sklonosti dosta ovisi o tome kakav je kemijski sastav legure. Legure serije 6XXX dosta su osjetljive na tople pukotine u odnosu na one legure iz serije 5XXX. Sklonost nastajanja solidifikacijske pukotine moguće je smanjiti tako da se odabere odgovarajući dodatni materijal. Zbog toga su legure Al-Mg često zavarivane uz dodatni materijal ER5356 (AlMg<sub>5</sub>). Pri provedbi zavarivanja različitih legura aluminijske potrebno je veliku pozornost pridodati mogućnosti nastanka tople pukotine, nego što je to slučaj kod zavarivanja istih legura aluminijske. Kada se zavaruje različite aluminijske legure tada se mogu pojaviti nepovoljni sastavi zavarenog spoja koji su osjetljivi na tople pukotine. Izbjegavanje tople pukotine postiže se tako da se koristi dodatne materijale oznaka ER4043 i ER5356 za sve debljine materijala. Zbog razlika u toplinskoj vodljivosti aluminijevih legura teško je dobiti taljenje žlijeba oba materijala istovremeno [14].

Postavljenjem pištolja za zavarivanje na sredinu utora, aluminijske legure koje imaju nižu toplinsku vodljivost taliti će se prije nego što je to slučaj kod legura koje imaju višu toplinsku vodljivost. Rješavanje ovog problema postiže se na takav način da se elektrodu postavi točno iznad ruba materijala koji ima veću toplinsku vodljivost. Još jedan od problema koji se pojavljuje je nedovoljno protaljivanje legure AA6060 na korijenu zavara. Kod zavarenog spoja radi izostanka čvrstih strukturnih veza dolazi do pojave naljepljivanja. Samo je na mikroskopu su vidljive metalne veze između osnovnog metala i metala zavara. Tijekom postupka vlačnog ispitivanja ne pojavljuje se pucanje u korijenu zavara. No u trenutku kada se poveća debljina ploče aluminijevih legura, tada je potrebno obaviti smanjenje brzine zavarivanja. Kod ploče koja ima debljinu 1,5 mm koristi se brzinu zavarivanja od 300 do 530 mm/min, s druge strane kada je ploča debljine 5 mm tada se koristi brzinu zavarivanja između 100 i 300 mm/min [14].

## 2.8 PREDNOSTI I NEDOSTACI

Glavna karakteristika kod ovog postupka je bez kontaktni prijenos taline iz žice u zonu zavara. Kroz sinergiju preko duplog impulsnog unosa energije, ovakav postupak MIG zavarivanja posjeduje sljedeće prednosti [15]:

- osnovna prednost ovog postupak je zavarivanje uz male unose topline tijekom procesa, to daje mogućnost primjene i kod tanjih obradaka,
- može se jednostavno zavarivati i kod položaja koji nisu prirodni,
- moguće je reguliranje unosa topline u materijale,
- štedi se na dodatnom materijalu i zaštitnom plinu, uglavnom se radi o argonu,
- postoji mogućnost zavarivanja na velikim brzinama taloženja kod svakog položaja u kojem nije moguće nanošenje raspršivanjem ili umakanjem,
- električni luk je stabilan bez obzira na duljinu obratka koji je zavaruje,
- može se postići veću brzinu zavarivanja pri istim vrijednostima i jakostima struje u odnosu na konvencionalni MIG postupak,
- gotovo pa je potpuno uklonjena mogućnost pojave prskotine i dima.

Zbog većeg stupnja kontroliranja električnog luka i manje potrošnje energije, proces toplinskog učinka u načelu je optimiziran, dok su negativni faktori smanjeni. Pri MIG postupku, impulsno zavarivanje dovodi do veće učinkovitosti topljenja uz iste tehničke i operativne parametre opreme u odnosu na konvencionalnu metodu zavarivanja. Cjelokupno kontroliranje procesa zavarivanja ne ogleda se samo kroz reguliranje prskanja i automatiziranje određenih funkcija, nego i kroz podržavanje velikog broja opcija zaštite uz mogućnost isključivanja kada dođe do pregrijavanja. Inovativni proizvođači izvora struje za napajanje doveli su do savršenstva funkciju synchro pulse tako što su uveli parametre zavarivanja kod radnog ciklusa uz pomoć kojeg operater ima mogućnost određivanja trajanja impulsne faze visoke struje proporcionalno ciklusu rada. Operateri mogu samostalno obavljati reguliranje i kontrolu unosa topline u materijal te tako i operateri s manje iskustva mogu napraviti zavareni spoj koji ima iznimno visoku kvalitetu i estetiku, bez obzira na položaj. Kod ovog postupka zavarivanje sinkronizirano se mijenjaju ili osciliraju parametri zavarivanja sve do krajnje točke, takvo obilježje posebno je korisno pri zavarivanja materijala koji su različitih debljina [15].



Uz sve navedene prednosti, ovaj postupak ima i nedostatke, bez obzira na činjenicu što su osigurani bolji uvjeti zavarivačima te veći standardi kvalitnosti zavarenih spojeva, očiti problem kod ovog postupka zavarivanja se može ogledati kroz visoku cijenu inicijalnih ulaganja u opremu. Isto tako je bitno istaknuti da se kod ovog postupka ne mora imati radnika nego inženjera koji ima iskustva i odlično poznaje parametre zavarivanja. Ovu metodu se smatra visoko specijaliziranom i prikladnom samo za pojedine operacije uz posebno određene uvjete. Nedostatom ove metode se može smatrati i dugi pomoćni i pripremno završni vremenski period. Funkcija synchro pulse MIG postupka zavarivanja često se koristi da bi se zavarivalo aluminij i aluminijeve legure te će se u nastavku kroz ovaj rad u eksperimentalnom dijelu i provesti taj postupka [15].

## 2.9 PRIMJENA MIG POSTUPKA

Neke od najčešćih industrija koje se najviše koriste MIG postupkom zavarivanja su:

- automobilska industrija - jednostavna i učinkovita opcija za proizvodnju automobila,
- graditeljstvo - kod visokih zgrada se koristi za spajanje više komada čelika,
- zrakoplovna industrija - kvalitetni varovi su vrlo bitne komponente aviona, stoga se koristi ovaj kvalitetan oblik zavarivanja,
- željeznički promet - koristi se za formiranje sustava tračnica,
- pomorski sektor - kod izrade brodova,
- visokoproduktivna proizvodna postrojenja [16].

U nastavku je na slici 2.6 prikazan zavar dobiven MIG synchro pulse zavarivanjem.



Slika 2.6 Zavar dobiven MIG synchro pulse zavarivanjem [16]

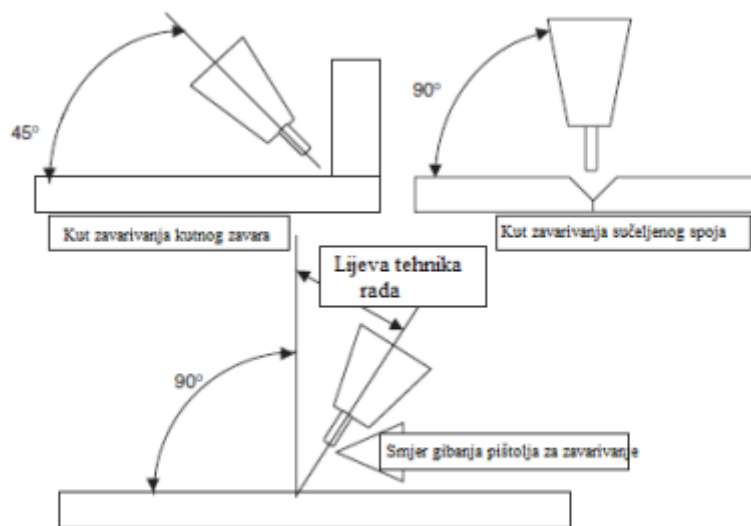
### 3. ZAVARIVANJE DVOSTRUKIM PUSLOM

Bez obzira na to što je razvijanje impulsnog zavarivanja dalo doprinos kvaliteti zavarivanja, negativna strana pri takvom postupku je ograničena primjena postupka zavarivanja komada manje debljine. Isto tako pri radu na nižoj frekvenciji pri impulsnom zavarivanju još uvijek se često pojavljuje nestabilan luk i lošije miješanje metala. Zbog takvih nedostataka se pojavila potreba za razvijanjem dodatnih poboljšanja te je to dovelo do razvijala postupka dvostrukog pulsa (DP-GMAW). Kod zavarivanja dvostrukim pulsom parametri su sljedeći, visoka frekvencija, intermitencija, brzina dobavljanja žice. Podešavanjem frekvencije dolazi do prijenosa jedne kapljice po impulsu, brzina dovođenja žice ima utjecaj na veličinu kapljica, a isto tako iznos intermitencije utječe na oblik kapljice metala što ima utjecaj na izgled zavarenog spoja. Takva metoda daje mogućnost kontrole iznosa i trajanje vršne struje prijenosa kapljica, to se provodi termičkim impulsom. Uz manji unos topline, kod ovog postupka postoji mogućnost popunjavanja većeg razmaka pri korijenu zavara, a to se posebno vidi pri zavarivanju veće brzine. Isto tako se kroz ovaj postupak omogućuje usitnjavanje zrna preko efekta miješanja u metalu zavara, na takav način se poboljšava metalurška i mehanička svojstva aluminijskih legura [17].

Određene prednosti pri ovom postupku u odnosu na druge načine prijenosa metala su: manja učestalost pojave poroznosti kod zavara i osjetljivost na pojavu nastalih pukotina pri očvršćivanju. Strujni val sastavljen je od ritmičke faze termičke osnove i faze termičkog impulsa koji se brinu za reguliranje toplinske raspodjele, a pri tome se ne mijenja količina unošenja topline. Faza termičke osnove i termičkog impulsa skupa se nazivaju termičkim razdobljem, a termička frekvencija definira se kao recipročna vrijednost termičkog razdoblja. Termička amplituda jednaka je kao polovica vrijednosti razlika između srednje struje termičkih impulsa i prosječnih strujnih faza termičke osnove. U sklopu faze termičke osnove i faze termičkog impulsa pojavljuje se nekoliko impulsa struje te se oni koriste da bi se stvorila velika magnetska sila. Pri fazi termičkog impulsa, u isto vrijeme se povećava struja i dolazi do povećanja napona zavarivanja, a isto tako dolazi i do povećanog unosa topline. Pri takvoj fazi postupka duplog pulsa dolazi do unosa više energije nego što je to slučaj kod konvencionalnih pulsnih zavarivanja, a istovremeno se povećava i količina nataljenog materijala. Povećanje ili smanjenje unosa energije dovodi do promjene brzine dodavanja žice tijekom zavarivanja [17].

## 3.1 TEHNIKA ZAVARIVANJA

Preporuka za položaj pištolja pri zavarivanju aluminija je od  $5^{\circ}$  do  $10^{\circ}$  nagiba uz lijevu tehniku rada kojom se postiže guranje taline unaprijed. Pri desnoj tehnici zavarivanja talinu se vuče i tada zaštitni plin ne pokriva talinu adekvatno i to nakon hlađenja dovodi do sivog ili crnog zavara. Isto tako je potrebno pažljivo gasiti luk jer kada se naglo gasi luk tada može doći do stvaranja dubokih kratera pri kojima se pojavljuju pukotine zbog skupljanja. To se može izbjeći kroz postupno povećanje brzine zavarivanja i okretanje smjera sapnice pred kraj zavara. Moguće je i korištenje dodatne pločice na kraju ploče da bi se izbjeglo probleme pri početku i gašenju luka [17]



Slika 3.1 Položaji zavarivanja aluminijskih legura kod dvostrukog MIG pulsa [17]

## 4 EKSPERIMENTALNI DIO

Ekperimentalni dio rada sastoji se od dva osnovna dijela. U prvom dijelu prikazane su karakteristike aluminijske legure 5083 i karakteristike uređaja za zavarivanje, odnosno metode MIG postupka konvencionalnog impulsnog zavarivanja (P-GMAW) i zavarivanja duplim impulsom (DP-GMAW). Nakon toga je u drugom dijelu prikazana usporedba tih postupaka.

Aluminijska legura 5083 primjenjuje se u industriji petrokemije, zrakoplovnoj industriji, brodogradnji i slično, a sve to zbog njegove visoko specifične čvrstoće, izvrsne otpornosti na koroziju i dobre obradivosti. Zavarivanje MIG postupkom smatra se vrlo važnom proizvodnom tehnologijom, odnosno nezamjenjivim postupkom pri spajanju legura aluminijske. Neka od bitnih ponašanja ovog materijala ili mehanizmi pri procesu zavarivanja ne mogu se izravnije promatrati ili opisivati precizno jer su ograničene metode za takve eksperimente. Stoga se kod velikog broja postupaka prihvaćaju numeričke simulacije [18].

Kod aluminijskih legura mehanička svojstva se u velikoj mjeri smanjuju zbog toplinskog utjecaja uvedenog postupkom zavarivanja. Kritično je to za legure koje pripadaju seriji 5083, a takve legure se u većini slučajeva koriste kod pomorske industrije i njihova mehanička svojstva dodjeljuju se glavnom legirnom elementu, magneziju, dok su zaostala naprezanja nastala kroz određeno stvrdnjavanje hladnim radom. Dokumentacija procesa zavarivanja MIG postupkom i prijenosa impulsnog spreja ograničava se takvim vrstama aluminijskih legura za primjenu u morskim uvjetima. Pojava pora i diskontinuiteta pripisana je korištenju plinske smjese, nedostatku kvalificiranih zavarivača koji su tehnički osposobljeni za ovu vrstu materijala te slabije ažuriranje standardne vještine za aplikaciju s MIG pulse postupkom. Aluminijska legura posjeduje izvrsne mehaničke karakteristike i dobru otpornost na koroziju, dok je njena primjena u brodogradnji dovela do manjeg trošenja goriva i ulaganja u održavanje brodova. Proces MIG zavarivanja može biti automatski ili poluautomatski postupak kod kojeg se električni luk održava između čvrste žičane elektrode i komada koji se zavaruje. Takav postupak ima razne načine na koje se može prenositi masa [18].

Oznaka za aluminij i njegove legure utemeljena je kroz kvalitetu lijevanog ili kovanog proizvoda. Tablica 4.1 prikazuje sustav za označavanje kovanih legura.

Tablica 4.1 *Oznake kovanih aluminijskih legura* [19]

| OZNAKA | ELEMENTI LEGURA              |
|--------|------------------------------|
| 1XXX   | Ništa, minimum 99% aluminija |
| 2XXX   | Bakar                        |
| 3XXX   | Mangan                       |
| 4XXX   | Silicij                      |
| 5XXX   | Magnezij                     |
| 6XXX   | Magnezij i silicij           |
| 7XXX   | Cink                         |
| 8XXX   | Ostale komponente            |
| 9XXX   | Ne koristi se                |

Kroz tablicu su prikazana svojstva potrošnog materijala ili materijala koji se koristi za punjenje pri zavarivanju aluminijske legure 5083 u skladu su sa zahtjevima ABS koda. U nastavku su kroz tablicu 4.2 prikazani zahtjevi za kemijski sastav dodatnog materijala pri zavarivanju aluminija.

Tablica 4.2 *Zahtjevi u kemijskom sastavu dodatnog materijala za zavarivanje aluminija* [19]

| Legura | Sastav u maksimalnom postotku, osim ako nije prikazan kao raspon |         |                   |       |           |          |           |      |           |               |        | Aluminij |
|--------|--|---------|-------------------|-------|-----------|----------|-----------|------|-----------|---------------|--------|----------|
|        | Silicij  | Željezo | Silicij i željezo | Bakar | Mangan    | Magnezij | Krom      | Cink | Titan     | Ostale stavke |        |          |
|        |  |         |                   |       |           |          |           |      |           | Svaki         | Ukupno |          |
| 4043   | 4,5-6,0  | 0,8     | 0,5               | 0,3   | 0,05      | 0,05     | -         | 0,1  | 0,2       | 0,05          | 0,15   | Ostatak  |
| 5183   | 0,4  | 0,4     | 0,4               | 0,1   | 0,5-1,0   | 4,3-5,2  | 0,05-0,25 | 0,25 | 0,15      | 0,05          | 0,15   | Ostatak  |
| 5356   | -  | -       | 0,4               | 0,1   | 0,05-0,20 | 4,5-5,5  | 0,05-0,20 | 0,1  | 0,60-0,20 | 0,05          | 0,15   | Ostatak  |

Isto tako u nastavku su kroz tablicu 4.3 prikazana mehanička svojstva legure 5083.

Tablica 4.3 *Mehanička svojstva legure 5083* [20]

| Mehanička svojstva                | Vrijednost |
|-----------------------------------|------------|
| Potezna čvrstoća $R_{p0.2}$ (Mpa) | 110        |
| Vlačna čvrstoća $R_m$ (Mpa)       | 270        |
| Istezanje A (%)                   | 12         |
| Istezanje $A_{50}$ (%)            | 10         |
| Tvrdoća po Brinellu (HB)          | 75         |

S druge strane je kroz tablicu 4.4 prikazan kemijski sastav legure 5083.

Tablica 4.4 *Kemijski sastav za leguru 5083* [20]

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

Navarivanje i zavarivanje odrađuje se žicom promjera 1,2 mm izrađene od aluminijske legure  $AlMg_5$  proizvođača Elektroda Zagreb, dok su na slici 4.1 prikazane karakteristike žice za zavarivanje

| EZ - MIG $AlMg_5$   |                            |     |                    |      |           |
|---|----------------------------|-----|--------------------|------|-----------|
| <b>NORME</b>  |                            |     |                    |      |           |
| HRN EN ISO<br>18723   | AWS / ASME<br>SFA-5.10     |     | W. Nr.             |      |           |
| 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 zavara relativno visoke čvrstoće, korozijski postojan u morskoj atmosferi. Pogodna za zavarivanje dijelova namijenjenih eloksiranju. |                            |     |                    |      |           |
| <b>MEHANIČKA SVOJSTVA ČISTOG METALA ZAVARA</b>  |                            |     |                    |      |           |
| $R_{p0.2}$<br>N/mm <sup>2</sup>   | $R_m$<br>N/mm <sup>2</sup> |     | $A_5$<br>%         |      |           |
| 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>  |                            |     |                    |      |           |
| I1 (Ar)   |                            |     |                    |      |           |
| <b>PAKIRANJE</b>  |                            |     |                    |      |           |
| Promjer žice<br>mm  |                            |     | Namotaj            |      |           |
| 0,8; 1,0; 1,2; 1,6; 2,0   |                            |     | Žica do žice (S-S) |      |           |
| 7 kg - žičani kokut   |                            |     |                    |      |           |

Slika 4.1 *Žica koja se koristi za navarivanje i zavarivanje* [20]

#### 4.1 OPREMA ZA ZAVARIVANJE

Za postupak navarivanja i zavarivanja, korišten je uređaj TPS 320i proizvođača Fronius prikazan na slici 4.1 u nastavku.



Slika 4.1 Uređaj TPS 320i [21]

Kao izvor struje i oprema za provođenja se koristi Fronius TPS 320i koji je dizajniran i proizveden od istoimene tvrtke, sigurno je jedan od najpoznatijih proizvođača opreme i strojeva potrebnih za provedbu zavarivanja. Ovaj tip uređaja posjeduje u potpunosti digitalizirani mikroprocesor koji se koristi pri zavarivanju. Takav uređaj nudi vrlo dinamični zavarivački postupak uz vrlo stabilan električni luk i jako malu količinu prskotine. Isto tako izvor struje i oprema koja se koristi kroz zavarivanje daje kontinuirano reguliranje unosa topline što dovodi do veće brzine zavarivanja i šireg raspona primjene uz visoki standard kvalitete zavarivačkog postupka. U nastavku na slici 4.2 je prikazano podešavanje promjera žice za zavarivanje [21].



Slika 4.2 Promjena promjera žice za zavarivanje [21]

Izvor struje pri MIG postupku može biti serije TPS320i, TPS 400i, TPS 500i i TPS 600i te su se oni potpuno digitalizirali, mikroprocesor postiže upravljanje izvorima struje. Modularno dizajniranje i fleksibilne funkcije daju mogućnost rada i prilagodbe kod svake situacije [21]. Prikaz promjene jakosti struje na Fronius TPS 320i uređaju prikazan je na slici 4.3.



Slika 4.3 Prikaz promjene jakosti struje [21]

Parametri brzine zavarivanja iskazuju linearnu brzinu koju ima električni luk prilikom kretanja po zavaru. Ako se parametar za brzinu zavara poveća, tada dolazi do manjeg unosa topline, toplinskog toka te depotiza dodatnih materijala prema duljini zavara, a to ima za posljedicu manju dimenziju zavara. Isto tako na slici 4.4 u nastavku je prikazano na koji način se podešava brzinu kod zavarivanja MIG postupkom [21].



Slika 4.4 Podešavanje brzine zavarivanja [21]



Također se kroz ovaj uređaj može uz obični postupak MIG zavarivanja provoditi i postupak zavarivanja synchropulseom, stoga je kroz sliku 4.5 u nastavku prikazano kako se omogućuje takav rad uređaja.



Slika 4.5 Prikaz omogućavanja synchropulse postupka [21]

Isto tako je pri korištenju ovog uređaja moguće podešavati visinu luka pod kojim se zavaruje te je u nastavku na slici 4.6 prikazano kako se to radi.



Slika 4.6 Podešavanje visine luka zavarivanja [21]

Osnovni materijal koji se koristio kod ovog dijela eksperimenta je bio lim od aluminijske legure 5083 ((AlMg4,5Mn0,7)) debljine 3 mm. Limove se rezalo po dužini na jednake pravokutne dijelove za što se koristilo tračnu pilu Bernardo EBS 180H koja je prikazana na slici 4.7 u nastavku.



Slika 4.7 Tračna pila Bernardo EBS 180H

Nakon rezanja pravokutnih uzoraka, fini brusni papir korišten je za čišćenje spoja kutnog zavora. Listovi su raspoređeni okomito jedan na drugi kako bi se pripremili za spoj kutnog zavora. Nije bilo razmaka između plahti. Kako bi se spriječilo savijanje uzrokovano toplinom tijekom zavarivanja, izrezane ploče su stegnute na radni stol. Nakon pripreme zavarenog spoja podešene su postavke zavarivanja. Zavarivanje je obavljeno jednostrano na osamnaest pari limova istosmjernom strujom (DC) prema navedenom slijedu i specifikacijama. Prethodno objašnjenje parametara jasno definira koji su parametri promjenjivi (promjena brzine dodavanja žice, frekvencije, radnog ciklusa), a koji fiksni (jačina struje zavarivanja, napon zavarivanja, brzina zavarivanja, promjena brzine žice, korekcija luka). Uzorci su izrezani na pili za u skladu s normom, a zatim su brušeni u presjeku. Proces brušenja započeo je brusnim papirom razreda 60, a završio brusnim papirom kvalitete 1200. Kada je završen postupak brušenja, prvo uz hrapavi, a nakon toga i fini brusni papir, uzorci se uranjaju u Kellerov reagens koji je uz svoje nagrizajuće djelovanje dao kontrast između metala zavora i osnovnog materijala. Kellerov reagens je vrsta otopine koja ima sastav od 2,5ml HNO<sub>3</sub>, odnosno 1,5 ml klorovodična kiselina, 1 ml Fluorovodična kiselina i 95 ml destilirana voda.

#### 4.2 USPOREDBA ZAVARIVANJEM OBIČNIM PULSOM I DUPLIM PULSOM

Tijekom provedbe postupka mjerenja dinamičkih karakteristika prikazane su zavarene linije uz konvencionalni impulsni postupak, a nakon toga i uz dupli impuls kako bi se moglo usporediti ta dva postupka. Brzina kretanja sustava za zavarivanje postavljena je na 60 cm/min kod svakog slučaja. Kroz tablicu 4.5 u nastavku se može vidjeti odnos parametara tijekom postupka između pulsnog i dvostrukog pulsnog navarivanja.

Tablica 4.5 *Parametri tijekom postupka navarivanja*

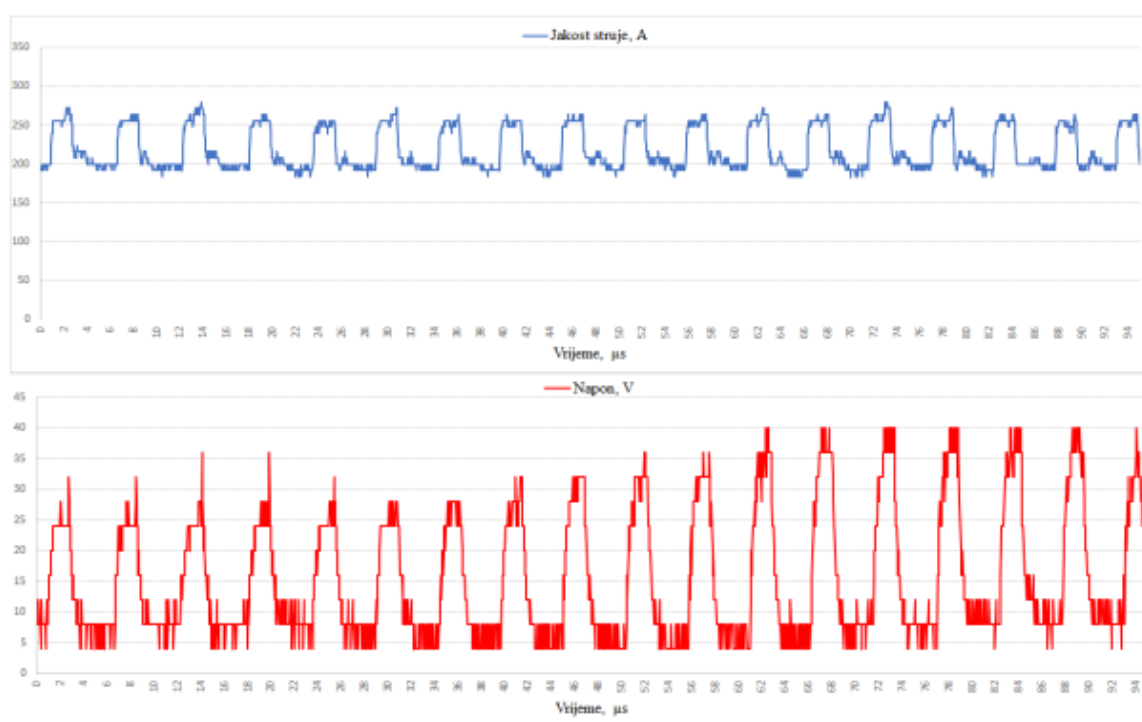
|                               | Pulsno     | Dvostruki – puls |
|-------------------------------|------------|------------------|
| Zaštitni plin                 | 100% Argon | 100% Argon       |
| Jačina struje, A              | 170        | 170              |
| Srednje vrijednosti napona, V | 21,6       | 22,6             |
| Brzine zavarivanja, cm/min    | 60         | 60               |

Kroz sliku 4.8 u nastavku se može vidjeti kako izgledaju navarivanja kroz oba postupka.



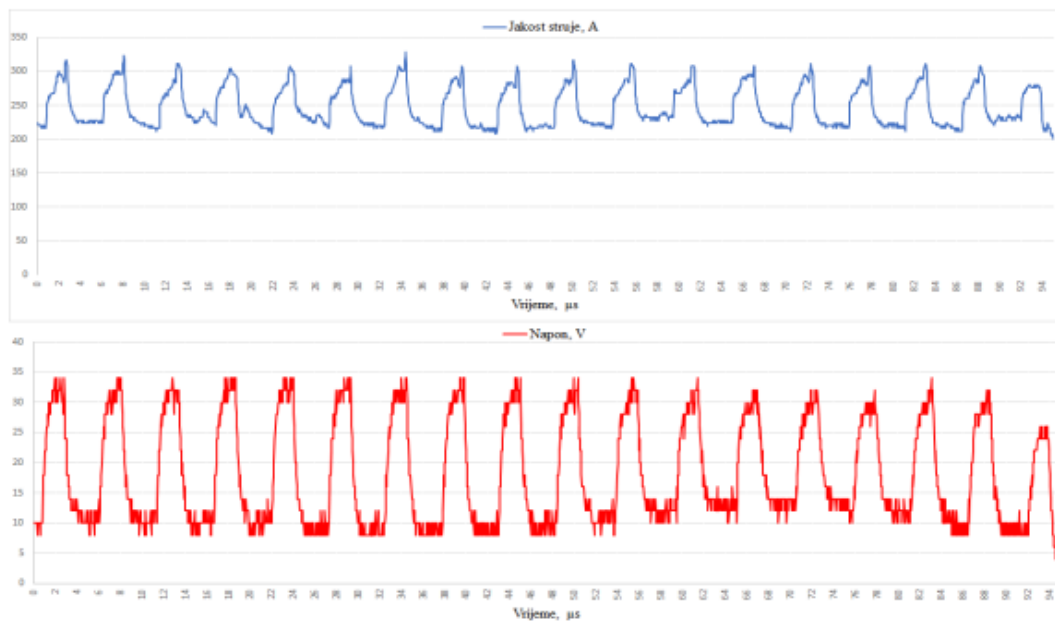
Slika 4.8 *Navarivanje postupkom običnog MIG pulsa i duplog pulsa [22]*

Glavni cilj koji je bio postavljen kada se obavljalo dinamičke karakteristike izvora struje za zavarivanje je usporedba količine unosa topline tijekom zavarivanja ovisno o tome na koji način se obavlja prijenos metala. Isto tako za cilj je određeno i uspoređivanje izračunatih iznosa unesene topline kroz parametre koji su zadani uređajem i korištenjem srednje vrijednosti parametara koji su dobiveni snimanjem dinamičke karakteristike strujnog izvora. Pri postupku snimanja dinamičkih karakteristika kod usporedbe ova dva postupka koristio se vremenski interval od 0,1s i 1s. S obzirom na to da su odabrani različiti vremenski intervali želi se utvrditi utjecaj na srednji iznos toplinskog unosa ovisno o vremenu. Kako je i ranije navedeno, iznos struje i napon pri pulsnom zavarivanju razlikuje se ovisno o tome radi li se kroz termičku fazu osnove ili termičku fazu impulsa. Iz toga razloga se kroz manji i veći vremenski interval prikazuje utjecaj unosa topline. Takvi podaci dobiveni kroz dinamičku karakteristiku mogu se vidjeti preko osciloskopa, a kroz taj vremenski period snimljeno je 2500 vrijednosti iznosa napona i struje. Kod prikaza usporedbe preko dinamičkih karakteristika plave linije predstavljaju promjene unosa struje kroz vrijeme, dok se na crvenim linijama može vidjeti promjenu iznosa napona kroz vrijeme. U nastavku je na slici 4.9 prikaz dinamičkih karakteristika izvora struje običnim MIG pulse zavarivanjem [22].



Slika 4.9 Dinamička karakteristika izvora struje običnim MIG pulse postupkom [22]

S druge strane na slici 4.10 prikazane su dinamičke karakteristike izvora struje kod zavarivanja duplim pulsom. Vrijeme u kojem se snimalo dinamičke karakteristike je 0,1 s.



Slika 4.10 Dinamičke karakteristike izvora struje kod zavarivanje duplim pulsom [22]

U grafovima je vidljivo kako kod zavarivanja običnim pulse zavarivanjem jakost struje ne prelazi 300 A, dok je kod zavarivanja duplim pulsom to slučaj gotovo u svakom intervalu. Također je zanimljivo da napon pri zavarivanju duplim pulsom nigdje ne prelazi 35  $\mu/s$ , dok je kod zavarivanja običnim pulsom to slučaj u gotovo svakom vremenskom intervalu [22].

Kako bi se analiziralo unošenje topline, svaki postupak zavarivanja zahtjeva izračun tri puta. Prvi unos topline dobiva se preko klasične analitičke metode tako da se uvrsti vrijednosti očitane na izvoru struje u zadanu formulu. U nastavku će kroz tablicu 4.6 biti prikazani podaci za unos topline kod pulsnog i duplog pulsnog zavarivanja. Druga dva načina su uz pomoć računalnog programa Excel, odnosno tako da se uvrsti iznos napona i struje za svaku od 2500 točaka u zadanu formulu. Kod svakog postupa se računa srednji iznos topline koji je određen prema normi HR EN 1011-1 [22].

Tablica 4.6 *Unos topline prilikom zavarivanja duplim pulsним postupkom i običnim pulsним postupkom [22]*

|  | Puls   | Dupli puls | Razlika |
|--|--------|------------|---------|
| Unos topline prema zadanom parametru                                   | 293,75 | 307,35     | 4,41 %  |
| Proračunati iznos topline kroz dinamičke karakteristike ( $t = 0,1s$ ) | 291,35 | 381,75     | 23,76 % |
| Proračun iznosa preko dinamičkih karakteristika ( $t = 1s$ )           | 270,15 | 266,56     | 1,34 %  |

Prema rezultatima se može vidjeti velika razlika unošenja topline ovisno o tome prema kojem načinu se računa. Pri običnom pulsnom zavarivanju, iznos dobiven unošenjem vrijednosti očitane na stroju nema velika odstupanja u odnosu na vrijednost koja je dobivena prema dinamičkoj karakteristici snimljenoj u intervalu od 0,1 s. No dolazi do toga da ta dva iznosa imaju značajne razlike kada se pogledaju vrijednosti koje su dobivene kroz dinamičke karakteristike uz interval od 1 s. Kada se radi o većim vremenskim intervalima, tada se pojavljuje i veća mogućnost za nepravilnosti kod iznosa struje i napona koji su snimljeni. Takve oscilacije mogu dovesti do razlike u unosu topline prilikom zavarivanja. Kada se uspoređi snimak dinamičkog ispitivanja može se vidjeti kako kod običnog pulsnoг zavarivanja dolazi do većih količina proboja iznosa struje i napona te se zbog toga pojavljuju razlike u toplini. Dok je kod postupka zavarivanja duplim pulsom određena razlika između svake vrijednosti pa je stoga iznos napona i struje najmanji, dok je unos topline dobiven kroz interval 0,1 s najveći. Uzrokom takve velike razlike se smatra razlika iznosa struje i napona ovisno o tome kakva je termička faza duplog pulsnoг zavarivanja [22].

Izračun unosa topline iz dinamičkih karakteristika pokazuje značajnom manje iznose koji su puno bliži vrijednostima dobivenim proračunom uz parametre očitane s uređaja. Da bi se dodatno utvrdilo kakav je utjecaj ova dva postupka na unos topline kod provedbe zavarivanja, potrebno je ispitivanje provesti određeni broj puta i uz razne parametre zavarivanja. Isto tako bilo bi dobro da se dodatno obrati pozornost na kvalitetu korištenog materijala koji je osnovni i one materijale koji se koriste kao dodatni te konstantu brzine zavarivanja [22].

### 4.3 PRIMJENA PMC PROCESA ZAVARIVANJA

PMC (Pulse Multi Control) smatra se vrstom zavarivanja uz pulsni luk. PMC MIG/MAG postupak zavarivanja nudi kod zavarivanja puno veću brzinu u odnosu na ostale postupke zavarivanja i pogodno odvajanje kapljica tijekom provedbe pulsno zavarivanja uz vrlo dobru penetraciju. Ovakav postupak smatra se idealnim rješenjem za provođenje automatiziranog i poluautomatiziranog postupka zavarivanja. Kod primjera u ovom radu se koristilo poluautomatskog zavarivanja. PMC kroz proces zavarivanja daje mogućnost da se kontrolira pulsirajuće kratke spojeve za povećavanje brzina zavarivanja, prodora u osnovne materijale te stabilnost kod luka pri zavarivanju [22].

Konstantno prodiranje može biti postavljeno i prilagođeno uz pomoć parametra koji se naziva stabilnim parametrom te on dovodi do konstantnog ponašanja struje pri radu. Prednosti su to koje se mogu koristiti kada se zavaruje u teško dostupnim područjima kod kojih se duljina slobodne žice može mjenjati kada se kontaktnu cijev pomiče dalje od ili bliže mjestu zavarivanja, a to dovodi do trenutnih promjena na zadane parametre [22].

Budući da softver koji pokreće PMC proces stalno prati stanje luka, kada dođe do promjene udaljenosti (pomak ili približavanje vrha žice za taljenje) tijekom zavarivanja, bilo ručno ili automatski, dinamika brzine izvlačenja žice trenutno se podešavaju kako bi duljina luka ostala konstantna. To zauzvrat osigurava veliku stabilnost luka i dosljedne visoke performanse zavarivanja. Unutar PMC-a mogu se dodatno korigirati tzv. parametrima pod nazivom 'Pulsna korekcija'. Dakle, proces PMC zavarivanja je stvarno dobar jer softver predlaže najbolje izmjene parametara kako bi proces bio što učinkovitiji.




PMC tehnika nam omogućuje precizno upravljanje unosom topline. Zbog mogućnosti brze obrade postiže se dobra stabilnost luka, što omogućuje velike brzine i jednostavan rad s manje energije po jedinici duljine, što zavarivanje s njim čini iznimno isplativim. PMC metoda je prikladna za sve uobičajene zavarene spojeve. Čelik, aluminij, nehrđajući čelik i razni drugi materijali. Nizak unos topline ne ukazuje na značajne deformacije. Zbog kontrole luka velike brzine, PMC rad je brži od tipičnog impulsa [23].



U nastavku je prikazano zavarivanje PMC MIG postupkom koje je provedeno na Strojarskom fakultetu u Slavonskom Brodu, a sve to da bi mogli vidjeti razliku između PMC postupka i synchro pulse. Provedeno je na uređaju za zavarivanje Fronius TPS400i. Zavarivanje je provedeno sloj po sloj navara na aluminijske legure i provedeno je utvrđivanje koji su parametri najkvalitetniji.





U tablici 4.7 je prikaz navara sloj po sloj uz parametre zavarivanja su navari sloj po sloj s parametrima zavarivanja.

Tablica 4.7 *Prikaz navara uz parametre*

|   | $I$<br>[A] | $V$<br>[m/min] | $l$<br>[mm] |
|---|------------|----------------|-------------|
| 1.<br>  | 95         | 30             | 5           |
| 2.<br> | 90         | 30             | 4           |
| 3.<br> | 85         | 30             | 3           |



Nastavak Tablica 4.7 *Prikaz navara uz parametre*

|   |    |    |     |
|---|----|----|-----|
| 4.<br>   | 80 | 35 | 2,5 |
| 5.<br>   | 80 | 35 | 2   |
| 6.<br>  | 75 | 35 | 1,5 |
| 7.<br> | 75 | 38 | 1   |
| 8.<br> | 70 | 38 | 0   |
| 9.<br> | 70 | 38 | -1  |

Pri zavarivanju prosječna brzina dodatnog materijala bila je 4,2 m/min.

Nakon određenog broja prolaza pristupilo se izrezivanju zavarenog dijela te uklanjanju nečistoća uz pomoć čelične četke. Parametri dovode do velikog utjecaja na izgled zavara i njegovu strukturu, a to utječe i na mehaničko svojstvo. Može se doći do zaključka kako je prolaz koji ima veću brzinu zavarivanja dosta tanji i rijediji u odnosu na prolaz koji ima povoljnu brzinu gdje je zavar deblji i gušći te ima bolje mehaničko svojstvo, a to se može i vidjeti na slici 4.11 u nastavku.



Prolaz uz veliku brzinu



Prolaz uz povoljnu brzinu

Slika 4.11 *Prikaz usporedbe zavarivanja s povoljnom i velikom brzinom*

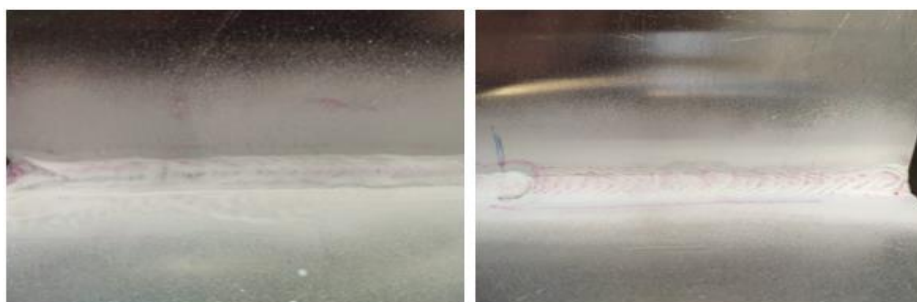
## 5 ANALIZA USPOREĐENIH POSTUPAKA ZAVARIVANJA

Nakon što su zavarivači proveli zavarivanje običnim pulse postupkom i dvostrukim pulse postupkom, uzorak je stavljen na hlađenje pri sobnoj temperaturi te je poslije očišćen i spremljen za analiziranje. Prvim korakom analize se smatra vizualni pregled zavara. Kroz sliku 5.1 u nastavku se vidi jasna razlika u izgledu dijela koji je zavaren običnim pulse postupkom u odnosu na dio zavaren duplim pulsom. Iz slike se može vidjeti kako je zavar dobiven uz obični pulse postupak ima dosta glatku površinu u odnosu na dio zavaren duplim pulsom. Vizualan pregleda zavara ne nudi značajniji prikaz potencijalnih pogrešaka nastalih tijekom zavarivanja. Cijelom duljinom oba zavara može se vidjeti crnu liniju čađe, no takva pojava je česti slučaj kada se zavaruju legure serije 5XXX zbog povećane razine Magnezija [22].



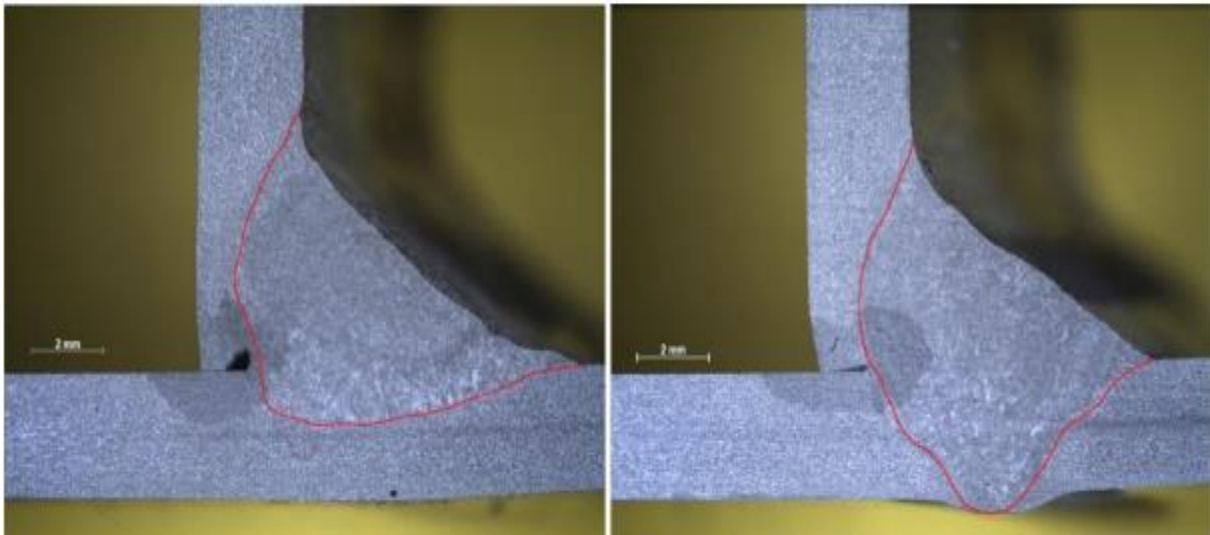
Slika 5.1 Prikaz zavarivanja nakon nanošenja penetranta [22]

Na slikama 5.2 u nastavku će biti prikazano kako kod zavara ne postoje značajne indikacije poroznosti ili nekih drugih pogrešaka u zavarima. Bez obzira na to što kroz cijeli zavar postoje lagane vidljive crvene linije penetranta, to se ne smatra pogreškom jer se nalazi na dijelu u kojem je čađa zbog većih udjela magnezija. Da bi se izbjeglo pojavu takvih indikacija, izratke bi bilo dobro temeljito očistiti uz pomoć čelične četke [22].



Slika 5.2 Penetrantska metoda provedena običnim pulse postupkom (lijevo) i duplim pulsom postupkom (desno) [22]

Provedbom penetranske metode nerazornog ispitivanja sa zavara se očiste sredstva korištenja prilikom ispitivanja. Nakon što je provedena analiza na oba postupka zavarivanja uočene su pogreške. U nastavku na slici 5.3 prikazana su oba postupka zavarivanja kako bi se moglo usporediti pojavu pogrešaka.

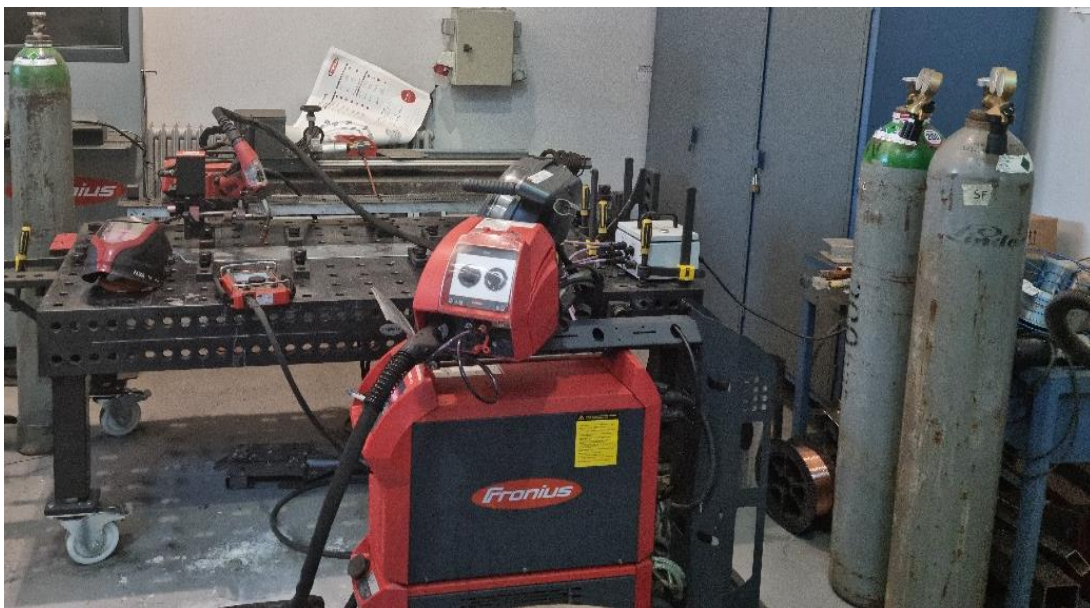


Slika 5.3 Prikaz konture zavara s pogreškama (dupli puls - lijevo, obični puls - desno)[22]

Kada se napravi usporedbu uzoraka nastalih korištenjem ova dva postupka zavarivanja može se vidjeti kako je zavar dobiven duplim pulsним postupkom dosta pravilnije geometrije od zavara dobivenog običnim pulsним postupkom, no s druge strane ima veće pogreške ne protaljenog korijena i pojave poroznosti kod zavara. Kod postupka običnog pulsного zavarivanja uočavaju se dodatne nepravilnosti pri zavaru kao što je uključak i neprotaljeni zavar uslijed pojava oksidnih filmova. Da bi se utvrdilo koji je postupak bolji za zavarivanje legure 5083, svakako se treba provesti dodatno ispitivanje gdje bi se kombiniralo razne parametre zavarivanja, uz poseban naglas na brzinu zavara i iznos struje. Posebno bi trebalo razmotriti da se koristi zaštitni plin uz kombinirani He i Ar s obzirom da He može dati doprinos dubini protaljivanja materijala. Također se treba razmotriti bolju pripremu i čišćenje osnovnih materijala, ali isto tako i izbor kvalitetnijeg i bolje uskladištenog dodatnog materijala.



Isto tako se mogu usporediti i MIG synchro pulse i PMC postupak te se zaključiti da PMC pruža višu razinu automatizacije i kontrole nad procesom zavarivanja zahvaljujući naprednim algoritmima. Synchro Pulse omogućuje veću kontrolu topline kroz dvostruke impulse, ali PMC ide korak dalje s prilagodbom svakog parametra u stvarnom vremenu. Synchro Pulse se češće koristi u situacijama gdje je bitna estetika i kontrola topline (npr. aluminij), dok se PMC koristi u industrijama gdje su ključni stabilnost i brzina zavarivanja na raznim materijalima. PMC može biti produktivniji zbog bolje automatizacije i brže brzine zavarivanja. PMC sustavi su tehnološki napredniji i kompleksniji u pogledu postavljanja i upravljanja, dok Synchro Pulse nudi veću kontrolu u jednostavnijem okruženju. Na kraju se može istaknuti MIG synchro pulse u kontroliranju unosa topline i stvaranju estetski ugodnih zavora, dok je PMC naprednija tehnologija s većom prilagodljivošću i automatizacijom, pružajući visoku produktivnost i konzistentnost [22]. U nastavku je na slici 5.4 prikazan radni prostor i oprema za zavarivanje.



Slika 5.4 Radni prostor i oprema kod zavarivanja

## 6 ZAKLJUČAK

Zavarivanje se smatra jednim od najčešćih postupaka spajanja metala, no njegova definicija je toliko složena iz razloga što uključuje više znanstvenih disciplina, tu možemo ubrojiti elektrotehniku, tehničke materijale, termodinamiku, metalurgiju i dr. Kroz ovaj rad se nastojalo prikazati na koji način se zavaruju aluminijske legure MIG pulse i MIG synchro pulse postupkom. Česta primjena legura aluminija u današnjoj industriji dovela je do potrebe za primjenjivanjem raznih postupaka zavarivanja aluminijskih legura sa svrhom da se postigne zavar sa što boljom kvalitetom. MIG postupak se svakako smatra jednim od najznačajnijim postupkom zavarivanja aluminijskih legura. Kada se zavaruju toplinski obradive aluminijske legure potrebno je izbjegavati dodatni materijal koji sadržava bakar ili magnezij jer oni dovode do povećanja osjetljivosti na pojave pukotine. MIG zavarivanje je elektrolučno zavarivanje metalnom taljivom elektrodom u zaštitnoj atmosferi plinova gdje se električki luk uspostavlja i održava između taljive žice i radnog komada koji se zavaruje. Ono spada u postupke zavarivanja taljenjem. MIG Pulse ili MIG impulsni postupak zavarivanja predstavlja varijantu MIG postupka koja koristi pulsirajući prijenos metala tijekom zavarivanja. U odnosu na klasični postupak zavarivanja ovog materijala, kod kojeg se prijenos metala od elektrode do taline provodi štrcajućim lukom, pri impulsnom načinu postiže se prenošenje slobodnim letom kapljica pri nižoj struji. Razvijanjem impulsnog zavarivanja se dobilo na kvaliteti zavara, no negativna strana pri takvom postupku je ograničena primjena postupka zavarivanja komada manje debljine. S obzirom na usporedbu postupaka MIG zavarivanja s običnim pulsom i dvostrukim pulsom može se doći do zaključka kako kod oba postupka zavarivanja postoje određeni nedostaci. Kako bi se donijelo dodatni zaključak potrebno je provoditi veći broj snimanja dinamičkih karakteristika izvora struje pri raznim parametrima zavarivanja.

## 7 LITERATURA

- [1] M. Gojić: *Tehnike spajanja i razdvajanja materijala*, Metalurški fakultet, Sisak, 2008., 298 str.
- [2] J.G. Kaufman: *Aluminum Alloy Castings: Properties, Processes and Applications*, ASM International, 2004., 340 str.
- [3] T. Filetin, F. Kovačićek, J. Indof: *Svojstva i primjena materijala*, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2006., 302 str.
- [4] G. Mathers: *The welding of aluminium and its alloys*, Woodhead Publishing Limited, Cambridge, England, 2002., 248 str.
- [5] S. Kralj, Š. Andrić: *Zavarivanje i zavarljivost aluminijske i legura*, Savjetovanje, Zavarene aluminijske konstrukcije, Šibenik, 1990.
- [6] M. Rudan: *MIG zavarivanje tankih aluminijskih limova*, 5. SEMINAR, Aluminij i aluminijske legure – rukovanje, priprema, zavarivanje, Pula, 2008.
- [7] G. Meden, A. Pavelić, D. Pavletić: *Osnove zavarivanja*, Sveučilište u Rijeci, Tehnički fakultet, Rijeka, 2000., 261 str.
- [8] I. Juraga, K. Ljubić, M. Živičić: *Pogreške u zavarenim spojevima*, Zagreb, 2007., 188 str.
- [9] Z. Lukačević: *Zavarivanje*, Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Strojarski fakultet, Slavonski brod, 1998., 268 str.
- [10] M. Rudan: *Zavarivanje nehrđajućih čelika MIG impulsnim postupkom*, Pula, Društvo za tehniku zavarivanja Istra, 2007.
- [11] D.H. Phillips : *Welding Engineering, An Introduction*, New Jersey, Sjedinjene Američke Države, Wiley, 2016., 304 str.
- [12] K. Weman, G. Linden: *MIG welding guide*, Woodhead Publishing and Maney Publishing, Cambridge, 2006., 320 str.
- [13] I. Garašić, Z. Kožuh: *Priručnik iz kolegija Strojevi i oprema za zavarivanje*, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb 2015., 226 str.
- [14] T. Luijendijk: *Welding of dissimilar aluminium alloys*, Journal of Materials Processing Technology 103, 2000., 29-35 str.

- [15] K. Y. Benyounis, A.G. Olabi: *Optimization of different welding processes using statistical and numerical approaches – A reference guide*, Dublin, Irska, 2008., 496 str.
- [16] Marvel portable welding  
<https://www.marvelswelding.com/where-is-mig-welding-used/?fbclid=IwAR2OpkBTzmJp4E-5f4EnuvJ-7WNmkwy0yIEZFCYOTLGvX3YNajnRSCzvQcQ> (06.07.2023)
- [17] 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. 2102–2157, Oct. 2015.
- [18] E. Warinsiriruk, J. Greebmalai, M. Sangsuriyun: *Effect of Double Pulse MIG Welding on Porosity Formation on Aluminium 5083 Fillet Joint*, MATEC Web Conf., vol. 269, p. 1002, 2019.
- [19] Study of the weld ability of aluminum alloy 5083 H116 with pulsed arc GMAW (GMAW-P)  
[https://www.researchgate.net/publication/319166725\\_Study\\_of\\_the\\_weld\\_ability\\_of\\_aluminum\\_alloy\\_5083\\_H116\\_with\\_pulsed\\_arc\\_GMAW\\_GMAW-P](https://www.researchgate.net/publication/319166725_Study_of_the_weld_ability_of_aluminum_alloy_5083_H116_with_pulsed_arc_GMAW_GMAW-P) (14.07.2023)
- [20] J. Prakash, S.P. Tewari, 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.
- [21] Eurotehnika, uređaj za MIG zavarivanje  
<https://www.eurotehnika.hr/kategorija-proizvoda/zavarivanje/mig-mag/> (14.07.2023.)
- [22] J. Špehar: *MIG zavarivanje aluminijskih legura primjenom dvostrukog pulsa*, veleučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Završni rad, Zagreb, 2021.