

# Optimizacija parametara TIG zavarivanja aluminijske legure AW 5083

---

**Vlahović, Marko**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2015**

*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:235:537849>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-10-13**

*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

**Marko Vlahović**

Zagreb, 2014.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Dr. sc. Ivica Garašić, dipl. ing.

Student:

Marko Vlahović

Zagreb, 2014.

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

Zahvaljujem se svom mentoru Dr. sc. Ivici Garašiću na stručnim savjetima i pomoći tijekom izrade završnog rada.

Posebno se zahvaljujem svojim roditeljima Anti i Evi, te braći Hrvoju i Mateju na podršci i razumijevanju tokom studija.

Marko Vlahović



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
**FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE**



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

|  |        |
|--|--------|
| Sveučilište u Zagrebu<br>Fakultet strojarstva i brodogradnje |        |
| Datum  | Prilog |
| Klasa:   |        |
| Ur.broj:   |        |

## ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **MARKO VLAHOVIĆ**

Mat. br.: **0035183510**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **OPTIMIZACIJA PARAMETARA TIG ZAVARIVANJA ALUMINIJSKE LEGURE AW 5083**

Naslov rada na engleskom jeziku: **OPTIMIZATION OF TIG WELDING PARAMETERS FOR AW 5083 ALUMINUM ALLOY**

Opis zadatka:

Analizirati problematiku zavarivanja aluminijskih legura TIG postupkom. Proučiti i opisati utjecaj polariteta na čišćenje površinskog oksida. Opisati proceduru odabira dodatnog materijala kao i prikladnost određenih vrsta volframovih elektroda te pojasniti i utjecaj zaštitnih plinova. Navesti osnovne greške i nepravilnosti koje se javljaju kod TIG zavarivanja aluminijskih legura.

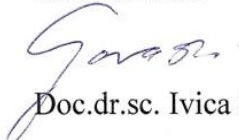
U eksperimentalnom dijelu potrebno je propisati tehnologiju zavarivanja odabrane aluminijske legure TIG postupkom, posebno vodeći računa o parametru frekvencije struje i balansa polariteta. Usporediti utjecaj frekvencije na stabilnost procesa te na geometriju i oblik zavara. Na temelju rezultata ispitivanja zavarenih spojeva nerazornim i razornim metodama donijeti zaključke o prikladnosti primijenjene tehnologije.

Zadatak zadan:  
25. studenog 2014.

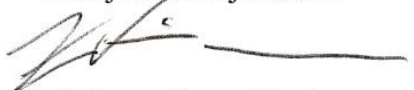
Rok predaje rada:  
**1. rok:** 26. veljače 2015.  
**2. rok:** 17. rujna 2015.

Predviđeni datumi obrane:  
**1. rok:** 2., 3., i 4. ožujka 2015.  
**2. rok:** 21., 22., i 23. rujna 2015.

Zadatak zadao:

  
Doc.dr.sc. Ivica Garašić

Predsjednik Povjerenstva:

  
Prof. dr. sc. Zoran Kunica

# SADRŽAJ

|   |     |
|---|-----|
| SADRŽAJ .....   | I   |
| POPIS SLIKA .....                                     | III |
| POPIS TABLICA.....                                    | V   |
| POPIS OZNAKA .....                                    | VI  |
| SAŽETAK.....  | VII |
| 1. UVOD .....   | 1   |
| 2. O ALUMINIJSKIM LEGURAMA .....                      | 2   |
| 2.1. Vrste.....                                       | 2   |
| 2.1.1. Aluminijske legure .....                       | 2   |
| 2.1.2. Aluminijske legure .....                       | 2   |
| 2.1.3. Aluminijske legure .....                       | 2   |
| 2.1.4. Aluminijske legure .....                       | 3   |
| 2.1.5. Aluminijske legure .....                       | 3   |
| 2.1.6. Aluminijske legure .....                       | 3   |
| 2.2. Mehanička svojstva .....                         | 4   |
| 2.2.1. Vlačna čvrstoća .....                          | 4   |
| 2.2.2. Tvrdća .....                                   | 5   |
| 2.2.3. Duktilnost.....                                | 5   |
| 2.2.4. Puzanje .....                                  | 6   |
| 2.2.5. Ponašanje pri povišenim temperaturama .....    | 7   |
| 2.2.6. Ponašanje pri niskim temperaturama .....       | 8   |
| 2.3. Poteškoće pri zavarivanju .....                  | 10  |
| 2.3.1. Poroznost.....                                 | 10  |
| 2.3.2. Oksidni film .....                             | 12  |
| 2.3.3. Tople pukotine .....                           | 14  |
| 3. ZAVARIVANJE ALUMINIJSKIH LEGURA TIG POSTUPKOM..... | 16  |
| 3.1. Opći podaci o postupku .....                     | 16  |
| 3.2. Struja zavarivanja .....                         | 17  |
| 3.3. Zaštitni plin.....                               | 18  |
| 3.4. Pištolji za zavarivanje i vodiči.....            | 21  |
| 3.5. Volframove elektrode .....                       | 22  |

---

|  |    |
|--|----|
| 4. OPTIMIZACIJA PARAMETARA ZAVARIVANJA.....    | 24 |
| 4.1. Teorijski dio.....                        | 24 |
| 4.1.1. Struja zavarivanja.....                 | 24 |
| 4.1.2. Napon zavarivanja.....                  | 24 |
| 4.1.3. Brzina zavarivanja.....                 | 25 |
| 4.1.4. Frekvencija.....                        | 26 |
| 4.1.5. Veličina elektrode .....                | 27 |
| 4.1.6. Kut nagiba elektrode .....              | 28 |
| 4.2. Eksperimentalni dio .....                 | 28 |
| 4.2.1. Oprema za zavarivanje.....              | 28 |
| 4.2.2. Priprema zavarenog spoja .....          | 29 |
| 4.2.3. Parametri i provođenje zavarivanja..... | 30 |
| 4.2.4. Makroizbrusci .....                     | 32 |
| 4.2.5. Statički vlačni pokus .....             | 34 |
| 5. ZAKLJUČAK .....                             | 38 |
| 6. LITERATURA.....                             | 39 |

## POPIS SLIKA

|   |    |
|---|----|
| Slika 2.1. Hooke-ov dijagram aluminijskih legura i ostalih metalnih materijala.....                           | 4  |
| Slika 2.2. Erichsen metoda ispitivanja .....  | 5  |
| Slika 2.3. Puzanje aluminij-bakar legure.....   | 6  |
| Slika 2.4. Vlačna čvrstoća aluminijske legure 2014-T6 pri ispitnim temperaturama .....                        | 7  |
| Slika 2.5. Moduli elastičnosti aluminijskih legura pri različitim temperaturama .....                         | 8  |
| Slika 2.6. Vlačna svojstva toplinski obrađene i umjetno starene aluminijske legure 6061 .....                 | 9  |
| Slika 2.7. Zavareni spoj unutar kojeg su ostali zarobljeni mali mjehurići plina - porozitet.....              | 10 |
| Slika 2.8. Topivost vodika u aluminiju i aluminijskim legurama .....  | 11 |
| Slika 2.9. Oksidni film u metalu zavara .....   | 12 |
| Slika 2.10. Utjecaj polariteta na katodno čišćenje i izmjenu topline .....                                    | 13 |
| Slika 2.11. Topla pukotina u završnom krateru zavara A5083 aluminijske legure.....                            | 14 |
| Slika 2.12. Opći graf osjetljivosti na tople pukotine .....   | 15 |
| Slika 3.1. Shematski prikaz TIG postupka zavarivanja.....   | 16 |
| Slika 3.2. Osnovna oprema za TIG postupak zavarivanja .....   | 17 |
| Slika 3.3. Utjecaj visokofrekventne (HF) struje na napon i struju zavarivanja.....                            | 18 |
| Slika 3.4. Sučeljni zavar 6 mm debelih limova napravljen TIG postupkom s argonom kao<br>zaštitnim plinom..... | 19 |
| Slika 3.5. Kutni zavar 6 mm debelih limova napravljen TIG postupkom s argonom kao<br>zaštitnim plinom.....    | 19 |
| Slika 3.6. Kutni zavar 6 mm debelih limova napravljen TIG postupkom s helijem kao<br>zaštitnim plinom.....    | 20 |
| Slika 3.7. Moderni pištolj za TIG zavarivanje .....   | 21 |
| Slika 3.8. Preporučeni oblik volframove elektrode .....   | 23 |
| Slika 4.1. Utjecaj struje zavarivanja na penetraciju .....  | 24 |
| Slika 4.2. Utjecaj napona zavarivanja na oblik poprečnog presjeka metala zavara .....                         | 25 |
| Slika 4.3. Ugorina na kutnom zavarenom spoju .....  | 26 |
| Slika 4.4. Zavari napravljeni s različitim frekvencijama izmjenične struje .....                              | 27 |
| Slika 4.5. Utjecaj veličine elektrode na širinu zavara .....  | 27 |
| Slika 4.6. Primjer nagiba elektrode kod TIG postupka zavarivanja.....   | 28 |
| Slika 4.7. TINY 170AC/DC uređaj za TIG zavarivanje .....  | 29 |
| Slika 4.8. Limovi od aluminijske legure AW 5083.....  | 30 |



---

|   |    |
|---|----|
| Slika 4.9. Priprema zavarenog spoja .....                         | 30 |
| Slika 4.10. Tri obostrano (A i B) napravljena zavara.....         | 31 |
| Slika 4.11. Makroizbrusak 1 .....                                 | 32 |
| Slika 4.12. Makroizbrusak 2 .....                                 | 33 |
| Slika 4.13. Makroizbrusak 3 .....                                 | 33 |
| Slika 4.14. Epruveta 1 .....                                      | 34 |
| Slika 4.15. Epruveta 2 .....                                      | 34 |
| Slika 4.16. Epruveta 3 .....                                      | 34 |
| Slika 4.17. Kidalica .....  | 35 |
| Slika 4.18. Epruveta u čeljustima kidalice .....                  | 35 |
| Slika 4.19. Dijagram vlačna sila - produljenje za epruvetu 1..... | 36 |
| Slika 4.20. Dijagram vlačna sila - produljenje za epruvetu 2..... | 37 |
| Slika 4.21. Dijagram vlačna sila - produljenje za epruvetu 3..... | 37 |

**POPIS TABLICA**

|   |    |
|---|----|
| Tablica 3.1. Preporučeni promjeri mlaznica i plinski protoci .....                          | 22 |
| Tablica 3.2. Preporučeni promjeri volframove elektrode za određene struje zavarivanja ..... | 23 |
| Tablica 4.1. Parametri zavarivanja za sva tri zavara .....                                  | 31 |
| Tablica 4.2. Površine poprečnih presjeka zavara .....                                       | 33 |
| Tablica 4.3. Rezultati statičkog vlačnog pokusa .....                                       | 36 |

## POPIS OZNAKA

| OZNAKA        | JEDINICA                 | OPIS   |
|---------------|--------------------------|--|
| $A_{pr}$      | mm <sup>2</sup>          | površina poprečnog presjeka na mjestu puknuća epruvete |
| $C_o$         | cm <sup>3</sup> na 100 g | topljivost vodika                                      |
| $D_E$         | mm                       | promjer elektrode                                      |
| $D_M$         | mm                       | promjer mlaznice                                       |
| $E$           | N/m <sup>2</sup>         | Youngov modul elastičnosti                             |
| $f$           | Hz                       | frekvencija izmjenične struje                          |
| $F_m$         | N                        | maksimalna sila  |
| $HV$          |                          | tvrdoća  |
| $HB$          |                          | tvrdoća  |
| $I$           | A                        | struja zavarivanja                                     |
| $Q_p$         | l/min                    | protok plina   |
| $R_m$         | N/mm <sup>2</sup>        | vlačna čvrstoća  |
| $S_o$         | mm <sup>2</sup>          | površina poprečnog presjeka na mjestu puknuća epruvete |
| $t$           | mm                       | debljina lima  |
| $t$           | h                        | vrijeme  |
| $U$           | V                        | napon zavarivanja                                      |
| $v_z$         | cm/min                   | brzina zavarivanja                                     |
| $\varepsilon$ | %                        | istezanje  |
| $\sigma$      | N/mm <sup>2</sup>        | naprezanje   |
| $\theta$      | °C                       | temperatura  |

## SAŽETAK

Tema ovog završnog rada je Optimizacija parametara TIG zavarivanja aluminijske legure AW 5083. U radu su detaljno opisane aluminijske legure (vrste, mehanička svojstva i poteškoće pri zavarivanju) i njihove specifičnosti kod zavarivanja TIG postupkom. Također je detaljno opisan TIG postupak i njegove karakteristike pri zavarivanju aluminijskih legura. U eksperimentalnom dijelu završnog rada istražen je utjecaj parametara zavarivanja na mehanička svojstva i geometriju zavara. U svrhu istraživanja izrađena su tri zavara, pri različitim frekvencijama izmjenične struje, na 3 mm debelim limovima od aluminijske legure AlMg4.5Mn. Nakon zavarivanja izrađene su epruvete za statički vlačni pokus te makroizbrusci za detaljno analiziranje površine poprečnog presjeka zavara.

## 1. UVOD

TIG postupak zavarivanja jedan je od najčešće korištenih postupaka za spajanje metalnih materijala. Prednosti postupka su mogućnost spajanja različitih metalnih materijala, među kojima su aluminij i aluminijske legure, te mala zona utjecaja topline i nepostojanje troske. Metal zavara i netaljiva volframova elektroda štite se od atmosferskog djelovanja pomoću inertnog plina (najčešće argona). Metalom zavara jednostavno je upravljati zbog toga što je električni luk stabilan pri malim strujama zavarivanja, što omogućava zavarivanje tankih limova. Dimenzije zavara (penetracija i širina zavara) i zona utjecaja topline ovise o faktorima kao što su toplina koju proizvodi električni luk po jedinici površine zavara, brzina zavarivanja, priprema zavarenog spoja itd. Postavljanje odnosa između ulaznih parametara (struje zavarivanja, protoka plina, brzine zavarivanja) i izlaznih parametara (penetracije, širine zavara, zone utjecaja topline) vrši se na temelju vlastitog iskustva, podataka iz priručnika i matematičkih modela. Primjenom matematičkih modela moguće je predvidjeti utjecaj ulaznih parametara na izlazne parametre.

## 2. O ALUMINIJSKIM LEGURAMA

### 2.1. Vrste

#### 2.1.1. *Aluminij-bakar legure*

S bakrom kao glavnim legirnim elementom, ove legure zahtijevaju toplinsku obradu za postizanje optimalnih mehaničkih svojstava, pri čemu mogu nadmašiti mehanička svojstva mekanog čelika. Prema EN oznaka ovih legura je 2XXX, pri čemu druga znamenka označava modifikaciju legure, dok treća i četvrta znamenka služe za identifikaciju različitih legura u grupi. Za postizanje bolje strojne obradivosti ove legure legiraju se s malim dodacima olova (X2030) ili olova i bizmuta (2011). Karakteristične legure u ovoj grupi su 2017, 2024, 2014, X2030 i 2011. Općenito, ove legure imaju ograničenu hladnu deformabilnost, osim u slučaju kada su prethodno bile toplinski obrađene postupkom žarenja, i manju korozivnu otpornost u odnosu na ostale legure aluminija, zbog čega se provodi anodna zaštita od djelovanja agresivne okoline. Legure u ovoj grupi imaju značajnu primjenu u vojnoj i zrakoplovnoj industriji [1].

#### 2.1.2. *Aluminij-mangan legure*

Dodatkom 1 % mangana u aluminijску leguru postiže se približno 10 do 15 % povećanje čvrstoće, u odnosu na čvrstoću legure aluminija 1200, bez značajnog gubitka duktilnosti. Prema EN oznaka ovih legura je 3XXX. Ove legure imaju svoju primjenu na mjestima gdje je potrebna veća čvrstoća od one koju ima aluminijска legura 1200, uz minimalni gubitak korozivne zaštite. Najznačajnija primjena ovih legura nalazi se u proizvodnji krovnih ploča (3103 ÷ 3105) i limova automobila (3103) [1].

#### 2.1.3. *Aluminij-silicij legure*

Dodavanjem silicija u aluminijску leguru, u dovoljnim količinama, postiže se značajno sniženje temperature tališta legure. Zbog navedenog svojstva, ove legure koriste se kao žice za zavarivanje i lemljenje, naročito kod lemljenja, gdje temperatura tališta dodatnog

materijala mora biti niža od temperature tališta osnovnog materijala. Prema EN oznaka ovih legura je 4XXX [1].

#### *2.1.4. Aluminij-magnezij legure*

Ova grupa aluminijskih legura je toplinski neobradiva i posjeduje najbolju kombinaciju visoke čvrstoće i otpornosti na koroziju. Također, ova grupa legura je dobro zavarljiva, ali kada udio magnezija u leguri prijeđe 3 % pojavljuje se mogućnost smanjenja otpornosti na napetosnu koroziju. Prema EN oznaka ovih legura je 5XXX [1].

#### *2.1.5. Aluminij-magnezij-sliciji legure*

Kod ove grupe aluminijskih legura kombinacija magnezija i silicija omogućava toplinsku obradivost. Navedene legure posjeduju najveću čvrstoću, kombiniranu s dobrom korozijskom postojanošću, laganom deformabilnošću i odličnom mogućnošću anodne zaštite. Prema EN oznaka ovih legura je 6XXX. Karakteristične legure u ovoj grupi su 6061, 6063 i 6082. Navedene legure koriste se u građevinskim konstrukcijama, te kopnenim i morskim vozilima [1].

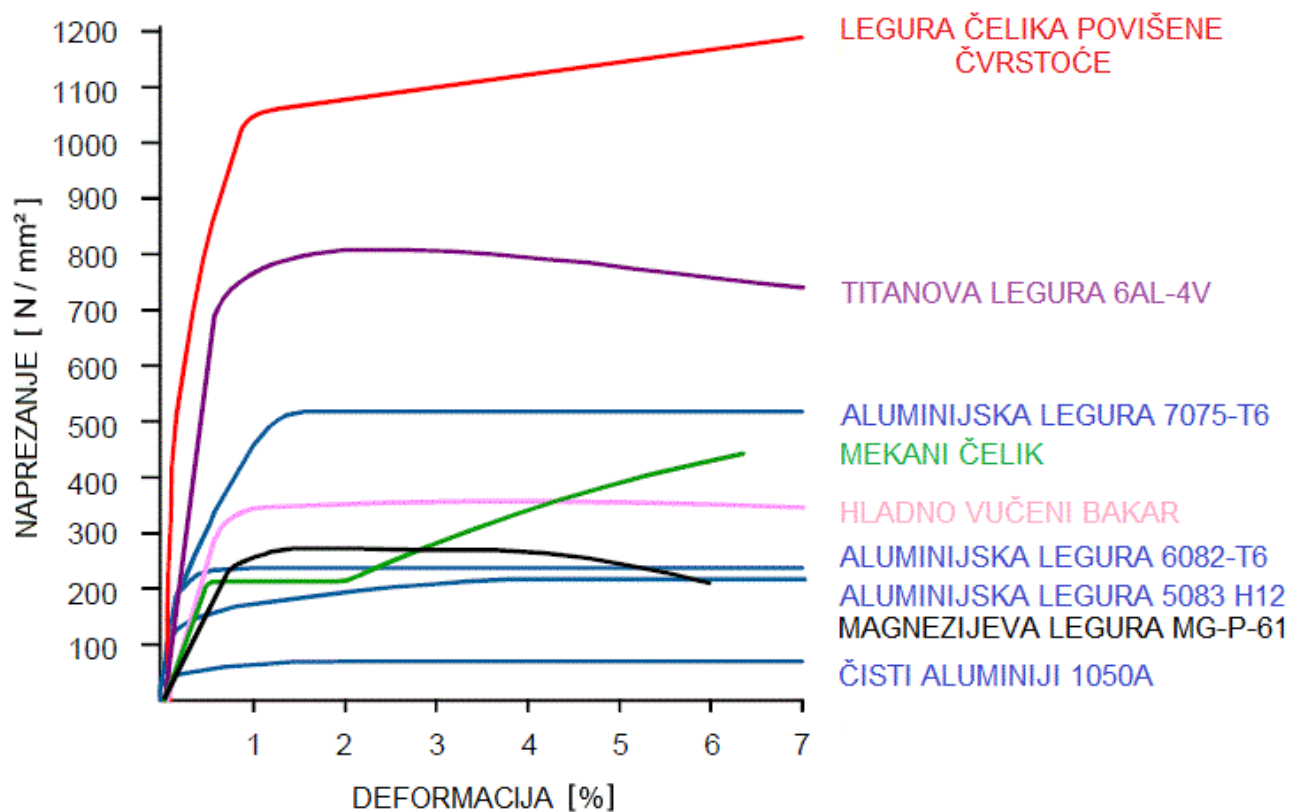
#### *2.1.6. Aluminij-cink-magnezij-bakar legure*

Ova grupa aluminijskih legura posjeduje najveću čvrstoću koja se može postići s aluminijem i u mnogim slučajevima su superiornije u odnosu na čelike s povišenim čvrstoćom. Prema EN oznaka ovih legura je 7XXX. Toplinsku obradu ovih legura omogućava kombinacija cinka i magnezija, čime se postiže visoka čvrstoća. Proizvodnja ove grupe legura je komplicirana i zahtjeva visoki tehnološki stupanj. Najznačajnija primjena ove grupe legura nalazi se u vojnoj industriji [1].

## 2.2. Mehanička svojstva

### 2.2.1. Vlačna čvrstoća

Ponašanje aluminijskih legura pod djelovanjem vlačnog naprezanja obično se podrazumijeva kao osnovno svojstvo metalnih materijala. Slika 1. prikazuje Hooke-ov dijagram u kojem se nalaze karakteristične krivulje aluminijskih legura i ostalih metalnih materijala, čije su krivulje navedene radi usporedbe. Navedene aluminijske legure su: 99,5 % čisti aluminiji (1050A) nakon provedene toplinske obrade žarenja, koji je pogodan za duboko vučenje; 4,5 % aluminij-magnezij legura (5083) nakon provedene obrade hladnog valjanja, koja se koristi u morskim i zavarenim konstrukcijama; aluminij-magnezij-mangan-silicij legura 6082 nakon obrade u kiselinu, koja se koristi u komercijalnim konstrukcijama; i aluminij-cink-magnezij-bakar legura 7075 u toplinski obrađenom stanju, koja se koristi u zrakoplovnim konstrukcijama [1].



Slika 2.1. Hooke-ov dijagram aluminijskih legura i ostalih metalnih materijala [1]

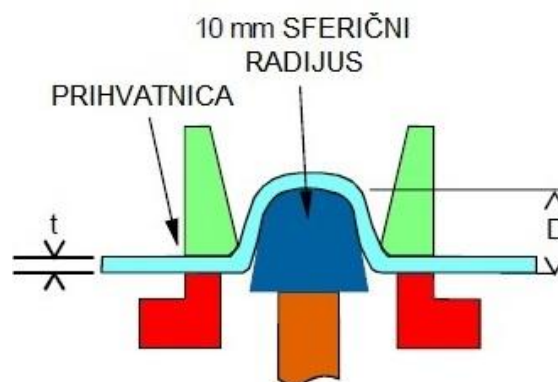


### 2.2.2. Tvrdoća

Otpor površinskom prodiranju identora približni je pokazatelj stanja legure i koristi se kao kontrolna mjera. Ispitivanje tvrdoće aluminijskih legura provodi se prema Brinellu (čelična kuglica), Vickersu (dijamant) i pomoću Scleroscopea (dijamantni čekić). Vrijednosti tvrdoće po Brinellu variraju od 20 za žareni komercijalni čisti aluminij do 175 za najčvršću leguru. Očitavanja tvrdoće nikada se ne bi trebala uzimati kao kvantitativni indeks vlačne čvrstoće, kao što se to ponekad radi kod čelika, jer kada je u pitanju aluminij odnos između ta dva svojstva je daleko od jednakosti. Površinska tvrdoća aluminijskih legura može se značajno povećati pomoću postupka tvrde anodizacije (500VPN), koji se koristi za povećanje otpora trošenja komponenti [1].

### 2.2.3. Duktilnost

Jednostavna ispitivanja savijanja su daljni pokazatelj obradivosti aluminijskih legura. Aluminijski lim sa zaobljenim rubovima savija se za  $90^\circ$  ili  $180^\circ$  (ručno ili pomoću čekića) oko čeličnog valjka određenog radijusa. Upotrebom valjaka sve manjeg i manjeg promjera određuje se minimalni radijus zaobljenja, pri kojem još ne dolazi do pucanja lima, koji se prikazuje pomoću debljine lima "t". Za dobivanje mjere duktilnosti uzorak lima, koji je namjenjen dubokom vučenju ili prešanju, često se podvrgava Erichsen metodi ispitivanja u kojoj hemisferični udarač djelovanjem sile, koja dolazi od ručno okretanog vijka, tiska jednu stranu lima, pri čemu lim poprima oblik čaše.

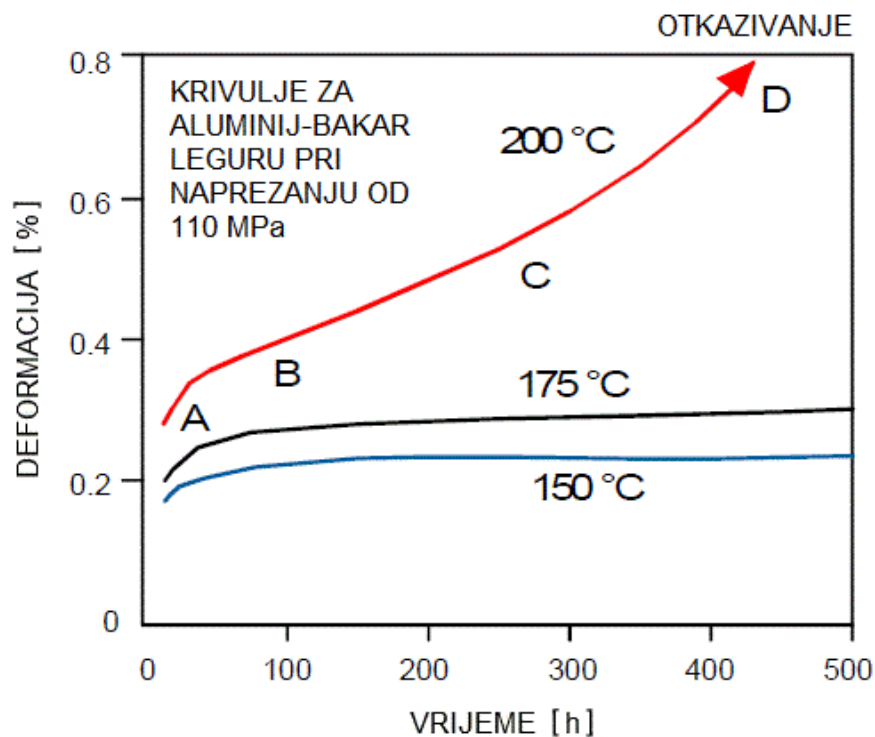


Slika 2.2. Erichsen metoda ispitivanja [1]

Na slici 2.2. prikazana je Erichsen metoda ispitivanja. Dubina prodiranja na određenoj površini pokazatelj je prikladnosti metala za postupak dubokog vučenja. Najveći značaj ovog ispitivanja je mogućnost prikaza dvije pojave koje će onemogućiti uspješno duboko vučenje. Prva pojava je usmjerena zrnata struktura, koja uzrokuje grublju površinu čaše i dovodi do puknuća na mjestu stanjenja lima. Druga pojava je usmjerenost ili promjena svojstava u odnosu na smjer valjanja, koja zahvaća oblik puknuća. Puknuće bi trebalo biti okruglog poprečnog presjeka [1].

#### 2.2.4. Puzanje

Puzajuća čvrstoća aluminijske legure smanjuje se s povećanjem radne temperature, pri čemu je njeno ponašanje pri zagrijavanju jednako ponašanju ostalih metalnih materijala u tim uvjetima. Zbog toga puzajuća čvrstoća ne može biti prikazana jednim brojem, već mora biti povezana s radnom temperaturom, vremenom i veličinom deformacije.



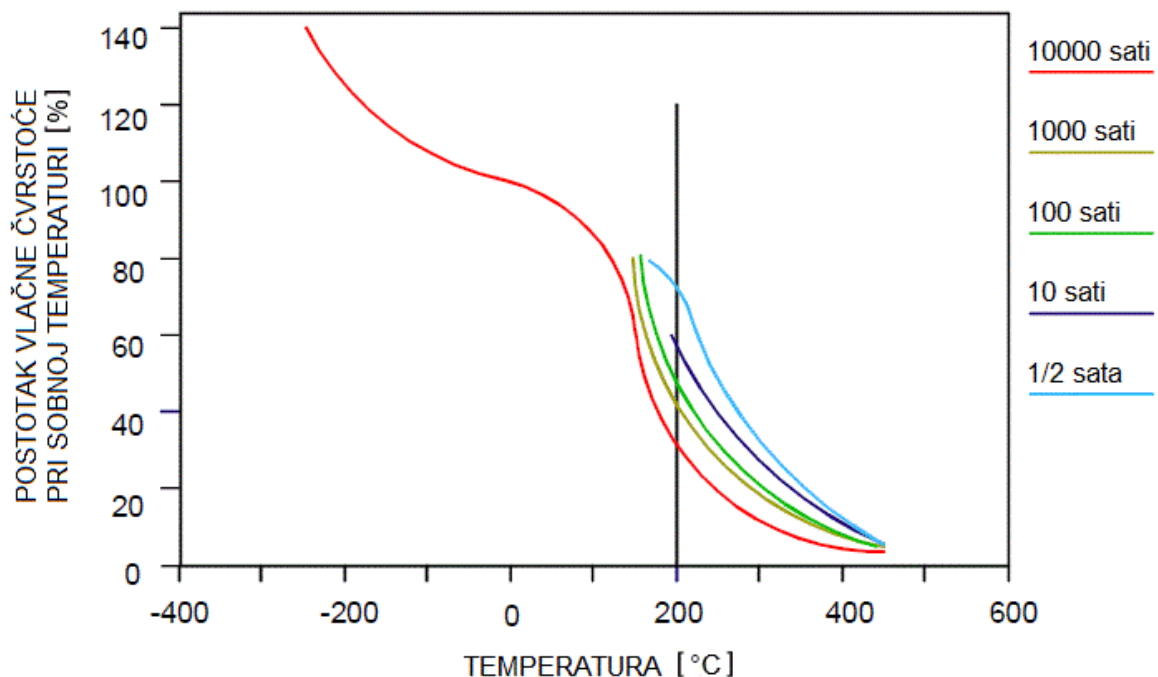
Slika 2.3. Puzanje aluminiij-bakar legure [1]

Na slici 2.3. prikazana je međusobna povezanost radnih temperatura, deformacija i vremena kod puzanja. Navedene karakteristike inženjerima su važne za projektiranje konstrukcija koje

su izložene promjenjivim naprezanjima i temperaturama, kao što su različiti spremnici (čiji je zahtjevani radni vijek 100000 sati). Također su potrebne za predviđanje životnog vijeka konstrukcija u opasnim situacijama, npr. u vatrenom okruženju. Podaci dostupni inženjerima su obično rezultat ispitivanja provedenih na uzorcima koji su deformirani vlačnim naprezanjem do određenog stupnja, izloženi konstantnom naprezanju i promjenjivoj temperaturi. Povezivanjem mjerenja dobiju se krivulje, kao što je to prikazano na slici 2.3. U svakoj od krivulja deformacija raste u četiri faze. Prva faza je elastičnost prilikom opterećenja (od 0 do A), druga faza je elastičnost u opadanju (od A do B), treća faza je konstantna elastičnost (od B do C) i četvrta faza je elastičnost u porastu koja uzrokuje otkazivanje. U navedenom primjeru samo je vrh krivulje ušao u finalnu (četvrtu) fazu. Vrijeme potrebno za dobivanje podataka o puzanju može biti vrlo dugačko i obično se smatra nepraktičnim provoditi ispitivanja dulje od nekoliko tisuća sati [1].

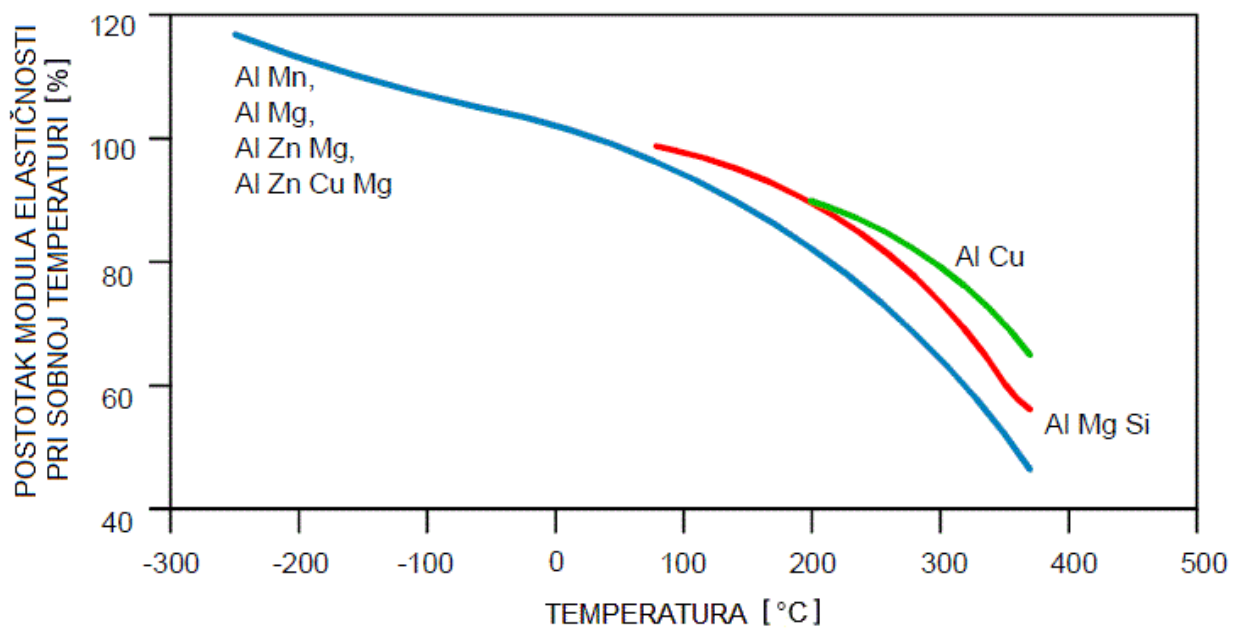
### 2.2.5. Ponašanje pri povišenim temperaturama

Porastom temperature smanjuje se čvrstoća aluminijskih legura. Vrijeme trajanja izloženosti važno je u slučaju hladno obrađenih ili toplinski obrađenih aluminijskih legura, osim kod žarenih aluminijskih legura gdje je taj utjecaj zanemariv.



Slika 2.4. Vlačna čvrstoća aluminijske legure 2014-T6 pri ispitnim temperaturama [1]

Na slici 2.4. prikazana je ovisnost vlačne čvrstoće aluminijske legure 2014-T6 o ispitnoj temperaturi. Vrijeme trajanja grijanja pri ispitnoj temperaturi obično je 10000 sati. Smanjenje čvrstoće, uzrokovano izloženosti povišenoj temperaturi, može se vratiti toplinskom ili hladnom obradom ili kombinacijom ova dva postupka što je obično nepraktično u slučaju gotovih proizvoda. S porastom radne temperature smanjuju se moduli elastičnosti aluminijskih legura, dok kod čvrstoće dolazi do stabilizacije pri nižim temperaturama žarenja. Nakon završetka izlaganja moduli elastičnosti vraćaju se na iznose koje imaju pri sobnoj temperaturi. Slika 2.5. prikazuje module elastičnosti aluminijskih legura pri različitim temperaturama [1].

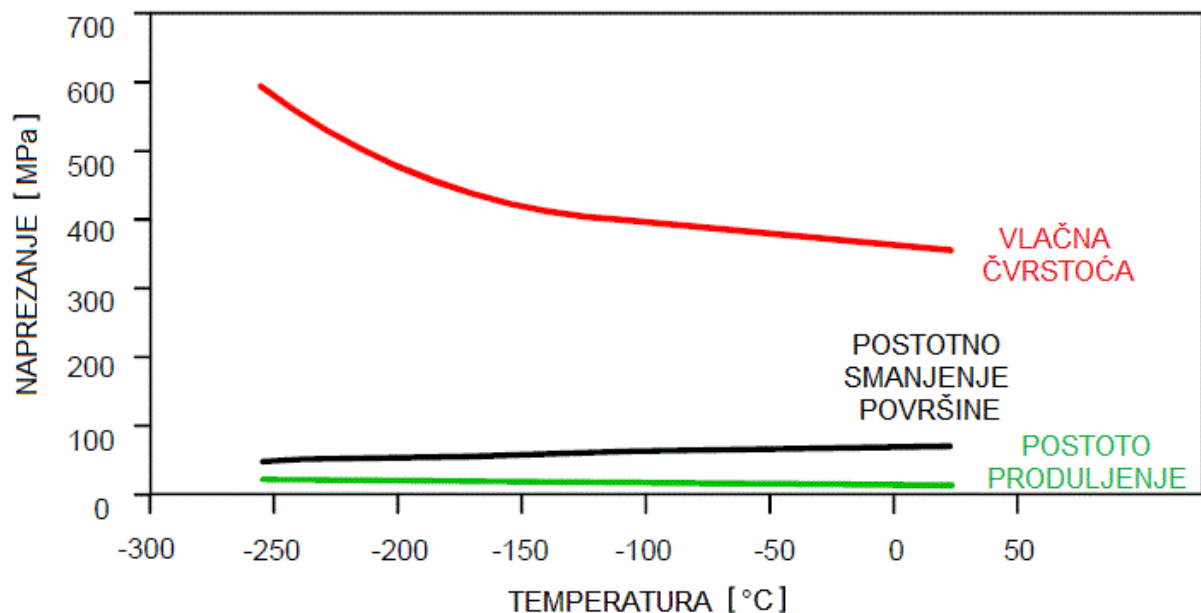


Slika 2.5. Moduli elastičnosti aluminijskih legura pri različitim temperaturama [1]

### 2.2.6. Ponašanje pri niskim temperaturama

Aluminij i njegove legure pri niskim temperaturama nemaju prijelaz iz duktilnog u krhko stanje, već njihova čvrstoća raste s padom temperature. Na čvrstoću stabilnih, toplinski obrađenih aluminijskih legura ne utječe vrijeme trajanja izloženosti na niskoj temperaturi. Kod toplinski obradivih aluminijskih legura izloženost niskim temperaturama rezultira usporavanjem njihova procesa starenja. Ovo svojstvo koristi se kod postavljanja zrakoplovnih zakovica, od AlCuMgSi aluminijske legure, koje se zagrijavaju na temperaturu od 495 °C u trajanju od 5 do 60 minuta nakon čega slijedi kaljenje u hladnoj vodi. Nakon kaljenja

zakovice ostaju mekane 2 sata na sobnoj temperaturi, 45 sati pri temperaturi od  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$  i 150 sati pri temperaturi od  $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Porast čvrstoće aluminijskih legura pri niskim temperaturama je zanemariv do  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ , nakon čega čvrstoća počinje polako rasti, dok značajan porast počinje tek ispod  $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Produljenje većine aluminijskih legura također raste sa padom temperature do  $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ , nakon čega kod nekih legura sa značajno većim udjelom magnezija (većim od 4,5 %) počinje lagano smanjenje produljenja, ali je dobiveni iznos i dalje veći od onog na sobnoj temperaturi. Na slici 2.6. prikazane su vlačne karakteristike toplinski obrađene i umjetno starene aluminijske legure 6061 [1].

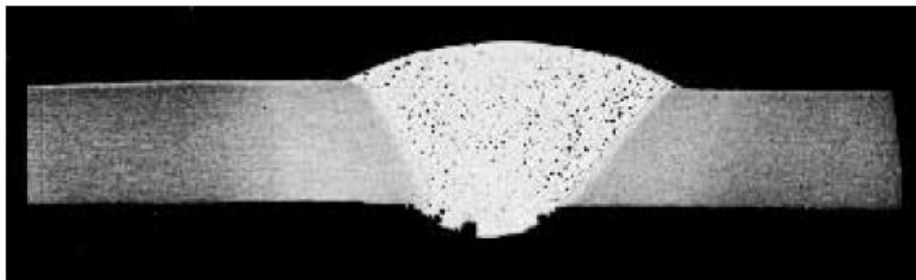


Slika 2.6. Vlačna svojstva toplinski obrađene i umjetno starene aluminijske legure 6061 [1]

## 2.3. Poteškoće pri zavarivanju

### 2.3.1. Poroznost

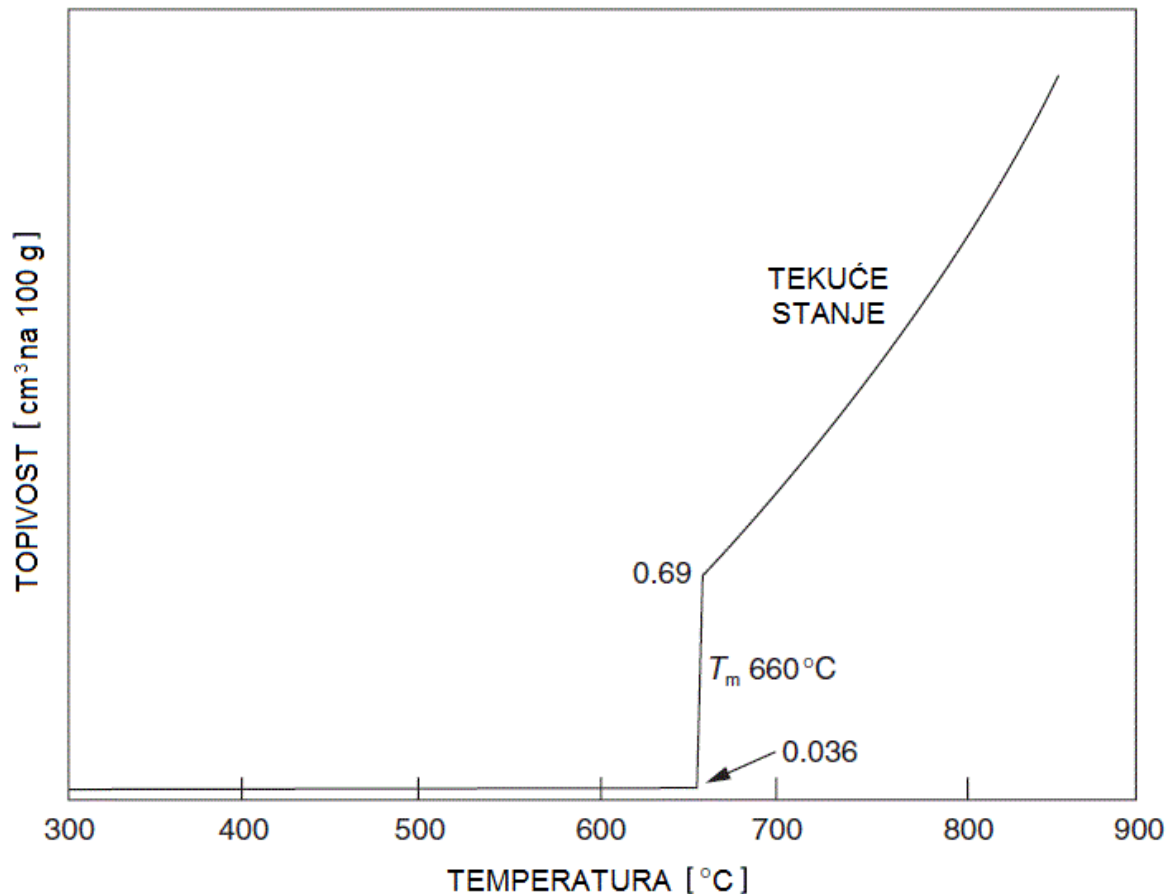
Poroznost je problem koji je vezan za metal zavara i nastaje kada oslobođeni mjehurići plina ostanu zarobljeni unutar metala zavara nakon njegova skrućivanja. Na slici 2.7. prikazan je zavareni spoj, napravljen TIG postupkom, unutar kojeg su ostali zarobljeni mali mjehurići plina.



Slika 2.7. Zavareni spoj unutar kojeg su ostali zarobljeni mali mjehurići plina - porozitet [2]

Poroznost može varirati od mikro poroznosti (jako mali mjehurići zarobljenog plina) do velike poroznosti (zarobljeni mjehurići mogu biti 3 do 4 mm u promjeru). Krivac za poroznost aluminija i aluminijskih legura je vodik, koji ima veliku topljivost u rastaljenom, a jako malu u krutom stanju aluminija i aluminijskih legura. Na slici 2.8. prikazana je topljivost vodika u aluminiju i aluminijskim legurama. Iz slike se može vidjeti kako je topljivost vodika u slučaju krutog stanja aluminija i aluminijskih legura izuzetno mala, dok prilikom prelaska iz krutog u tekuće stanje počinje intenzivno rasti, što govori da je jako teško postići aluminijski zavar bez poroznosti. Kada se u zavarivanje uključi dodatni materijal povećava se razina poroznosti zbog kontaminacije koju unosi žica za zavarivanje. Od konvencionalnih fuzijskih postupaka zavarivanja, TIG postupak ima manju razinu poroznosti u odnosu na MIG, zato što je kod MIG-a žica kontaminirana vodikom. Povećanjem struje zavarivanja, povećava se temperatura metala zavara, što uzrokuje porast razine topljivosti vodika u rastaljenom metalu. Povećanjem unosa topline prilikom zavarivanja u horizontalnom položaju moguće je smanjiti poroznost zavara, jer brzina stvaranja vodika iz zavara nadmašuje brzinu adsorpcije, što

omogućuje mjehurićima vodika da izađu iz zavara. Sličan učinak može se postići smanjenjem brzine zavarivanja.



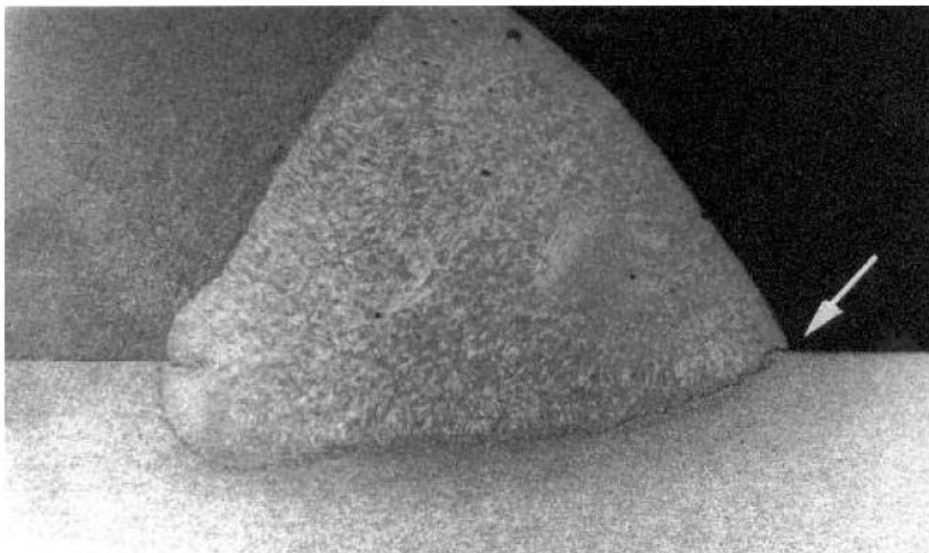
Slika 2.8. Topivost vodika u aluminiju i aluminijskim legurama [2]

Povećanjem napona ili duljine električnog luka povećava se izloženost rastaljenog metala kontaminaciji, pri čemu dolazi do rasta poroznosti. Sastav aluminijskih legura također može utjecati na količinu poroznosti na način da se mijenja topljivost vodika. Prisutnost magnezija u aluminijskoj leguri uzrokuje povećanje topljivosti i smanjenje adsorpcije vodika za dva puta pri udjelu magnezija od 6 %. Bakar i silicij imaju suprotan učinak. Postoji dosta izvora vodika i oni mogu varirati, ali primarni su dodatni materijali. Vлага je sastavni dio električnog luka u bilo kojem elektrolučnom postupku zavarivanja kao što su REL, MIG/MAG ili EPP. Tijekom zavarivanja u električnom luku vlaga se razlaže na vodik, što rezultira velikim porozitetom. To je jedan od razloga zašto navedeni postupci nisu u širokoj upotrebi za zavarivanje aluminija i aluminijskih legura. Još jedan od izvora vlage kod elektrolučnih postupaka je zaštitni plin. Idealni zaštitni plin koji bi se trebao koristiti kod ovih postupaka mora imati

temperaturu rosišta manju od  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$  (39 ppm vode). U svrhu postizanja tako visoke čistoće potrebno je nabaviti zaštitni plin sa zajamčenom niskom temperaturom rosišta. Također je važno osigurati da visoka čistoća zaštitnog plina ostane sve do njegovog dolaska do rastaljenog metala [2].

### 2.3.2. Oksidni film

Aluminijev oksid ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) vrlo je otporan i brzo stvarajući oksid koji osigurava aluminiju i aluminijskim legurama izvrsnu korozijsku otpornost. Ima visoku temperaturu tališta ( $2060\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) u usporedbi s aluminijem ( $660\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Oksidi većine metalnih materijala imaju temperaturu taljenja koja je manja ili jednaka onoj koju ima metal i tijekom zavarivanja plivaju na površini rastaljenog metala kao rastaljena troska. Zagrijavanjem aluminija i aluminijskih legura do njihovih temperatura taljenja, bez raspršivanja oksidnog filma, rezultira rastaljenim metalom koji je okružen oksidnim filmom. Oksidni film mora biti uklonjen odgovarajućim postupcima.

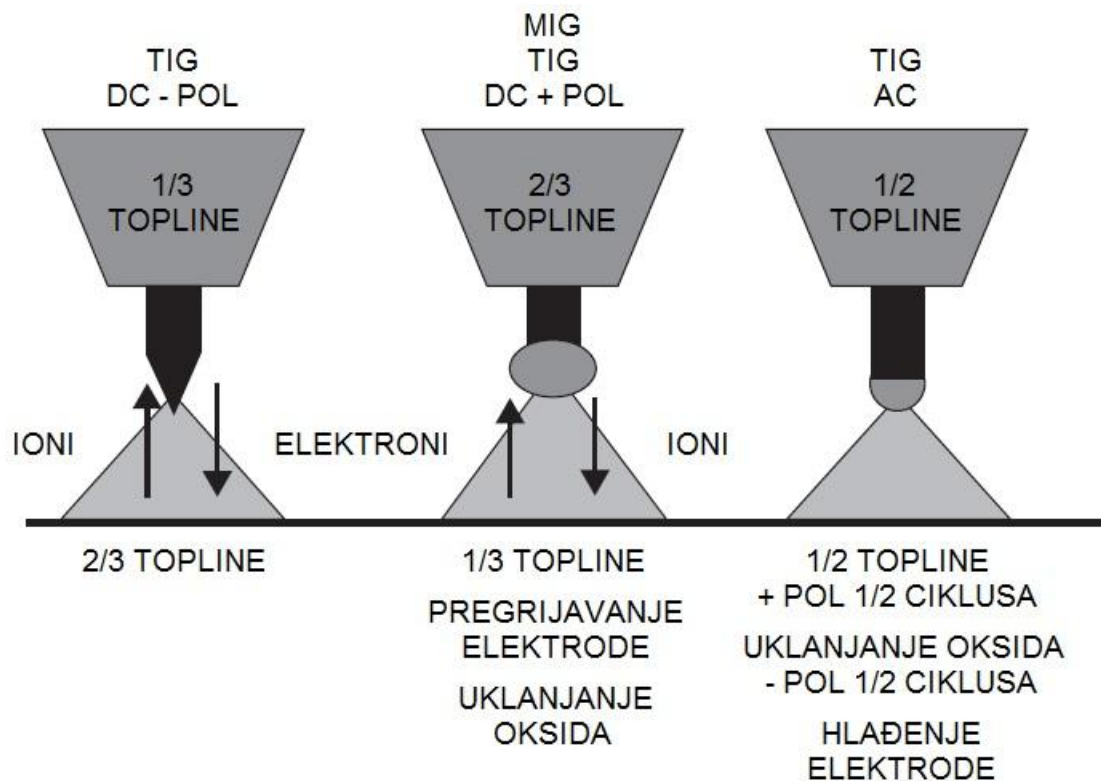


Slika 2.9. Oksidni film u metalu zavara [2]

Za uklanjanje oksidnih filmova, pri zavarivanju elektro-lučnim postupcima, koristi se pojava koja se naziva katodno čišćenje. Kada je elektroda priključena na + pol izvora struje, koji je namješten na istosmjernu struju, pojavljuje se tok elektrona koji ide od radnog komada prema elektrodi, pri čemu ioni putuju u suprotnom smjeru i bombardiraju površinu radnog komada.



Ionsko bombardiranje rastavlja i raspršuje oksidni film i omogućava metalu zavara da teče i da se spoji s osnovnim metalom. Kod MIG postupka zavarivanja se provodi s elektrodom na + polu (DCEP). U slučaju da se provodi s elektrodom na - polu (DCEN) pojavila bi se nestabilnost električnog luka, što bi rezultiralo lošom kvalitetom zavara. Na slici 2.10. prikazan je utjecaj polariteta na katodno čišćenje i izmjenu topline.

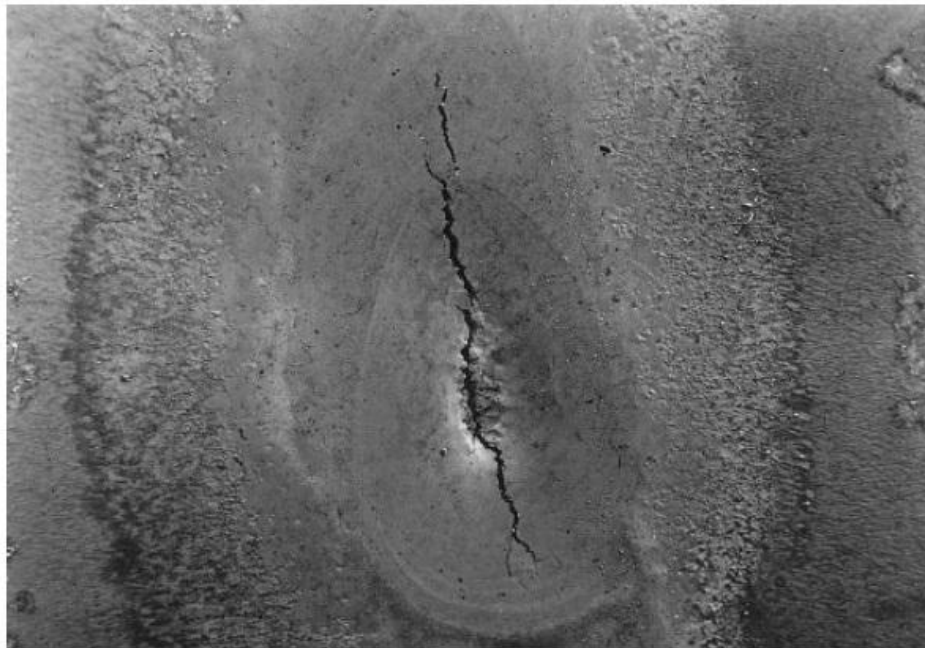


Slika 2.10. Utjecaj polariteta na katodno čišćenje i izmjenu topline [2]

TIG zavarivanje obično se provodi s elektrodom na - polu (DCEN), što kod aluminija rezultira zavaram loše kvalitete. Premještanjem elektrode na + pol (DCEP) dolazi do pregrijavanja volframove elektrode već na 60 - 70 % topline koja bi se mogla prenijeti električnim lukom kada je elektroda spojena na - pol (DCEN). To može uzrokovati taljenje elektrode, što dovodi do prekida zavarivanja. Rješenje je postignuto korištenjem izmjenične struje (AC) za zavarivanje, gdje se u pozitivnom polu ciklusa uklanja oksidni film, a u negativnom polu ciklusa hladi volframova elektroda. TIG zavarivanje se stoga provodi s izmjeničnom strujom (AC), ali postoji nekoliko tehnika koje koriste istosmjernu struju na + polu (DCEP) i - polu (DCEN) [2].

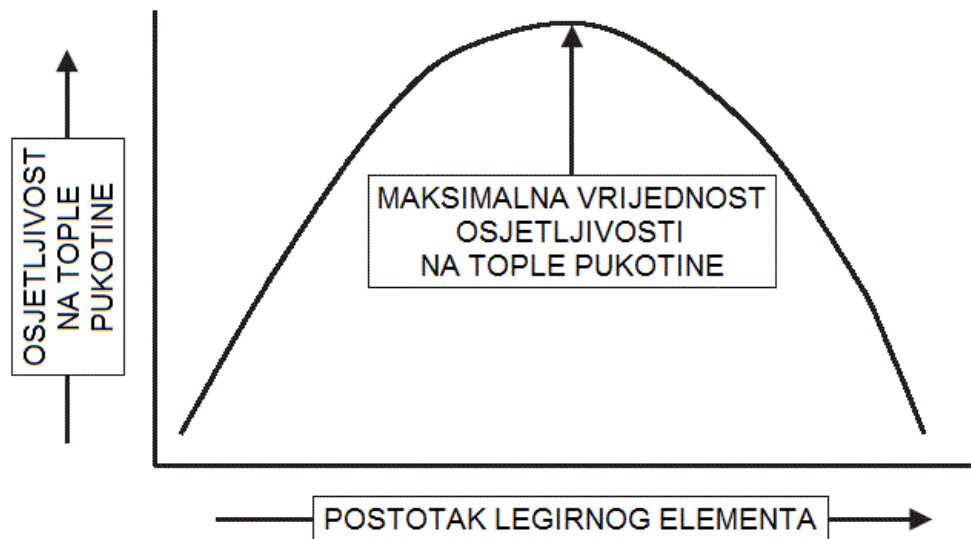
### 2.3.3. Tople pukotine

Tople pukotine su zavarivački problem koji nije prisutan kod čistih metala, ali se može naći u određenim legirnim sustavima. Nije čvrsto vezan za aluminijske legure, već se javlja i kod čelika, niklovih i bakrenih legura. Osnovni mehanizam isti je kod svih legura metala i funkcija je načina na koji se legura metala skrućuje. Dodavanjem legirnih elemenata čistom metalu mijenja se temperatura solidifikacije nastale metalne legure, što rezultira različitim fazama. Kod aluminijskih legura dodani legirni elementi tvore veliki raspon eutektika čija je temperatura skrućivanja (solidus) značajno niža od one koju ima osnovni metal. To znači da su sve aluminijske legure, do određenog stupnja, podložne ovom obliku pukotina, pri čemu se razlikuju samo u stupnju podložnosti.



Slika 2.11. Topla pukotina u završnom krateru zavara A5083 aluminijske legure [2]

Sve aluminijske legure imaju najveći otpor prema toplim pukotinama pri malim i velikim udjelima legirnih elemenata. Pri malim udjelima legirnih elemenata prisutna je mala količina eutektika, što rezultira diskontinuiranim ili tankim tekućim filmom na granici zrna. Na slici 2.12. prikazan je opći graf osjetljivosti na tople pukotine.



Slika 2.12. Opći graf osjetljivosti na tople pukotine [2]

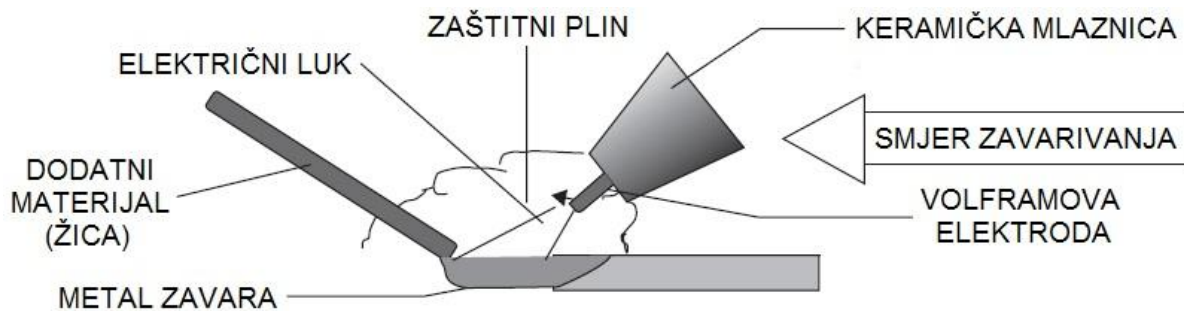
Tople pukotine mogu se eliminirati na slijedeće načine:

1. Malom veličinom zrna,
2. Kontrolom sastava metala zavara dodavanjem dodatnog metala,
3. Primjenom najveće brzine zavarivanja,
4. Primjenom brzih, malo volumenskih i više prolaznih procedura,
5. Odabirom dodatnog materijala koji ima temperaturu taljenja koja je blizu one od osnovnog materijala [2].

### 3. ZAVARIVANJE ALUMINIJSKIH LEGURA TIG POSTUPKOM

#### 3.1. Opći podaci o postupku

Zavarivanje volframovom elektrodom pod plinskom zaštitom (TIG), je elektrolučni postupak zavarivanja u kojem se koristi netaljiva volframova elektroda i inertni plin koji služi za zaštitu elektrode, električnog luka i metala zavara. Na slici 3.1. shematski je prikaz TIG postupka zavarivanja.



Slika 3.1. Shematski prikaz TIG postupka zavarivanja [2]

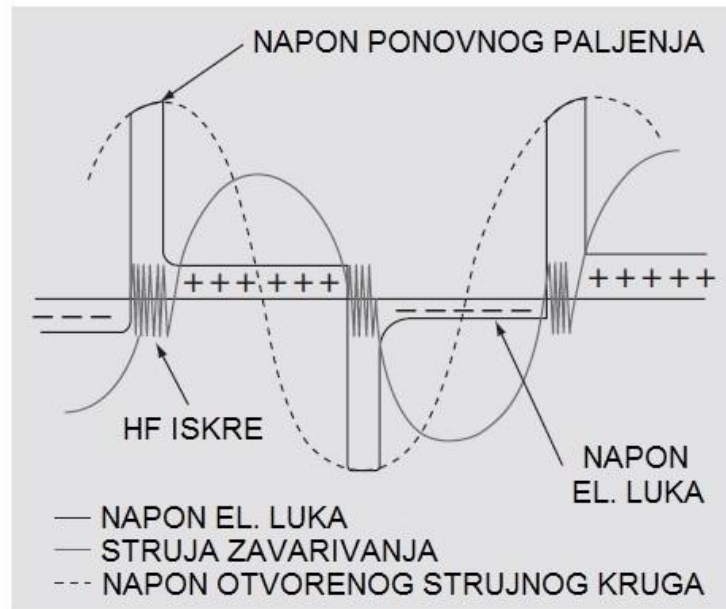
Električni luk je izvor topline za postupak. Inženjer zavarivanja odlučuje hoće li se koristiti dodatni materijal tokom zavarivanja. Metalom zavara jednostavno je upravljati, te se zbog toga mogu izrađivati korijenski zavari bez podložnih pločica. Električni luk je stabilan pri malim strujama zavarivanja, što omogućava zavarivanje tankih limova. Ovim postupkom zavarivanja može se postići visoka kvaliteta metala zavara, ali za to su potrebniiskusni zavarivači. U usporedbi s MIG postupkom zavarivanja, brzina zavarivanja je manja, kao i deposit dodatnog materijala, što ovaj postupak u nekim slučajevima čini ekonomski manje isplativim. Kod TIG zavarivanja aluminija debljina aluminijskog lima je u većini slučajeva do 6 mm, zbog toga što je dubina zavarivanja manja u odnosu na MIG postupak. Osnovna oprema za TIG postupak zavarivanja sastoji se od: izvora struje, pištolja za zavarivanje, boce s inertnim zaštitnim plinom, dodatnog materijala (žice) i sustava za vodeno hlađenje. Na slici 3.2. prikazana je osnovna oprema za TIG postupak zavarivanja [2].



Slika 3.2. Osnovna oprema za TIG postupak zavarivanja [2]

### 3.2. Struja zavarivanja

Za zavarivanje većine materijala TIG postupkom zavarivanja koristi se istosmjerna struja (DC) s elektrodom spojenom na - pol (DCEN). Kao što je navedeno u odlomku vezanom za oksidne filmove, zavarivanje aluminija s elektrodom na + polu (DCEP) ili - polu (DCEN) ne osigurava učinkovito uklanjanje oksidnog filma koji se nalazi na površini aluminija. Stoga se ručno TIG zavarivanje provodi pomoću izmjenične struje (AC), gdje se u pozitivnoj polovici ciklusa provodi uklanjanje oksidnog filma, a u negativnoj polovici ciklusa hladi elektroda i vrši zavarivanje. Električni luk se prekida i ponovno uspostavlja svakih pola ciklusa kada struja prolazi kroz nulu. Na izvoru struje koji ima frekvenciju 50 Hz to se događa 100 puta u sekundi. U svrhu postizanja brzog ponovnog uspostavljanja električnog luka koristi se visokofrekventna (HF) i visokonaponska (9 - 15000 V) struja koja premošćuje rupu, u kojoj električni luk nije uspostavljen, kontinuiranim izbojem. To dovodi do ionizacije plina u rupi, što omogućava električnom luku ponovno uspostavljanje s minimalnim zakašnjenjem. Na slici 3.3. prikazan je utjecaj visokofrekventne (HF) struje na napon i struju zavarivanja.



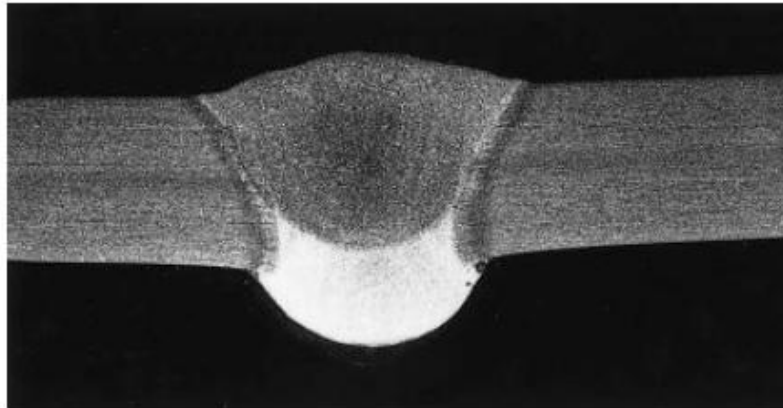
Slika 3.3. Utjecaj visokofrekventne (HF) struje na napon i struju zavarivanja [2]

Aluminij je slab emiter elektrona, što znači da je znatno teže ponovno uspostaviti električni luk na elektrodi u pozitivnoj polovici ciklusa. U slučaju da se pojavi zakašnjenje u uspostavljanju električnog luka, manje struje bi teklo u pozitivnoj polovici ciklusa, a više u negativnoj polovici ciklusa. Takvo stanje naziva se djelomično ispravljanje, koje može rezultirati potpunim ispravljanjem, što bi značilo da u pozitivnoj polovici ciklusa uopće ne bi tekla struja. Rezultat takvog stanja je nestabilnost električnog luka, gubitak mogućnosti uklanjanja oksidnog filma i mogućnost stvaranja istosmjerne komponente struje u sekundarnim strujnim krugovima strujnog izvora, što dovodi do pregrijavanja transformatora. Kod starijih uređaja takva situacija spriječena je pomoću baterija koje su izvor struje u suprotnom smjeru, dok je kod novijih uređaja to riješeno umetanjem blok kondenzatora u sklopovlje izvora struje [2].

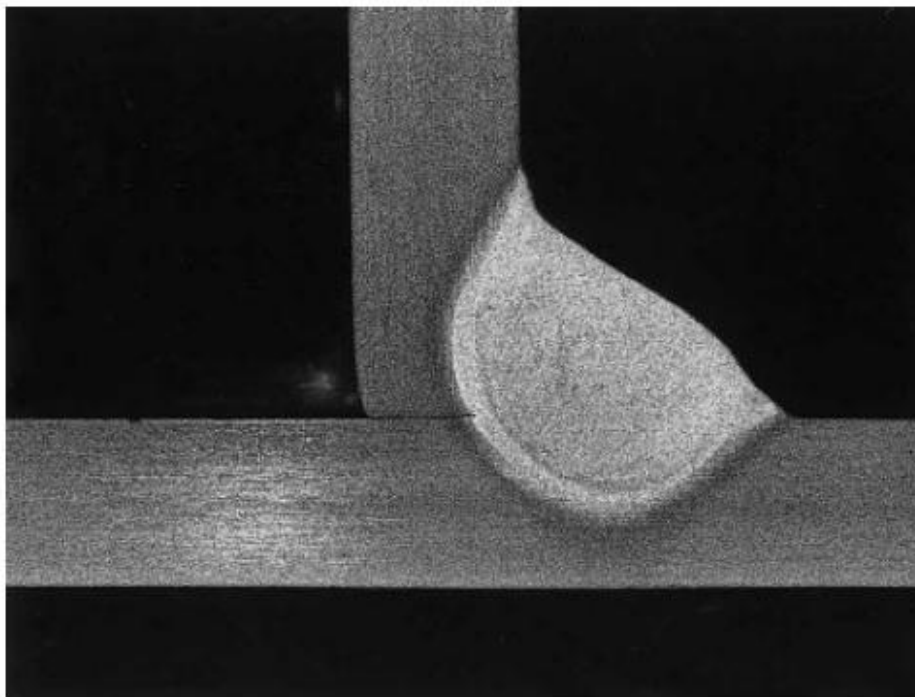
### 3.3. Zaštitni plin

Preferirani zaštitni plin za zavarivanje aluminijskih legura TIG postupkom s izmjeničnom strujom je argon, ali koristi se i helij i mješavine argona i helija. Korištenjem argona dobiva se plitak i širok srebrnasti zavar. Najlakša uspostava i najveća stabilnost električnog luka postiže se upotrebom argona kao zaštitnog plina. Na slici 3.4. prikazan je sučeljni zavar 6 mm debelih limova napravljen TIG postupkom s argonom kao zaštitnim

plinom. Na slici 3.5. prikazan je kutni zavar 6 mm debelih limova napravljen također TIG postupkom s argonom kao zaštitnim plinom.

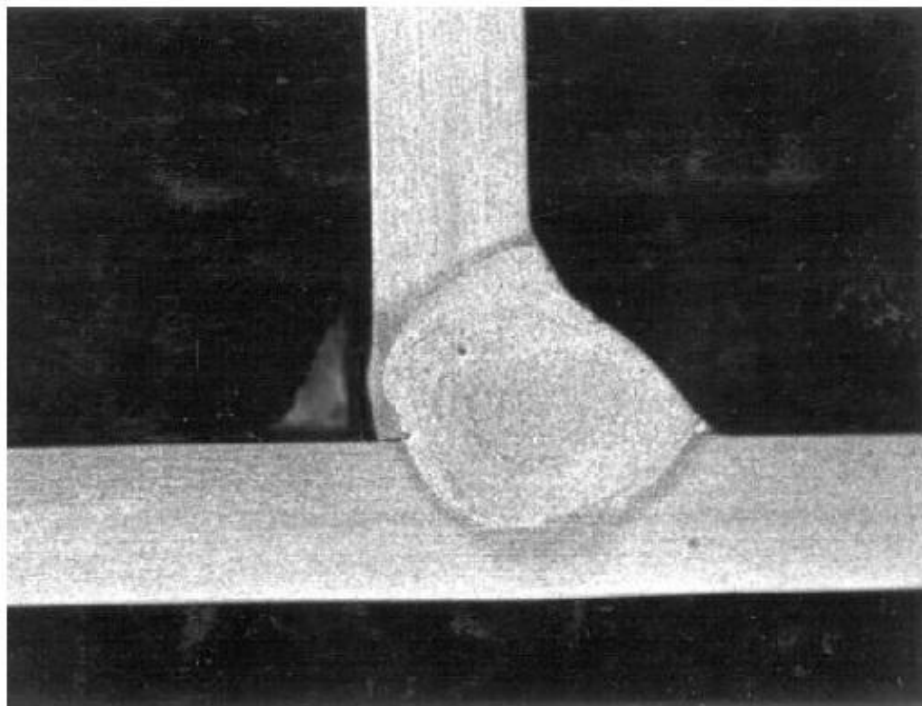


Slika 3.4. Sučeljni zavar 6 mm debelih limova napravljen TIG postupkom s argonom kao zaštitnim plinom [2]



Slika 3.5. Kutni zavar 6 mm debelih limova napravljen TIG postupkom s argonom kao zaštitnim plinom [2]

Helij povećava napon električnog luka, što rezultira njegovim suženjem i povećanjem penetracije, ali i također otežava njegovo uspostavljanje, pa utječe i na njegovu stabilnost. Neki od modernih izvora struje opremljeni su sklopovljem pomoću kojeg se zavar započinje s argonom i kada se uspostavi stabilan električni luk, napravi se automatska zamjena na helij. Na slici 3.6. prikazan je isti zavar kao što je na slici 3.5., samo što je sada kao zaštitni plin upotrebljen helij. Uspoređivanjem navedenih slika može se uočiti da je korištenjem helija kao zaštitnog plina postignuta znatno veća penetracija.



Slika 3.6. Kutni zavar 6 mm debelih limova napravljen TIG postupkom s helijem kao zaštitnim plinom [2]

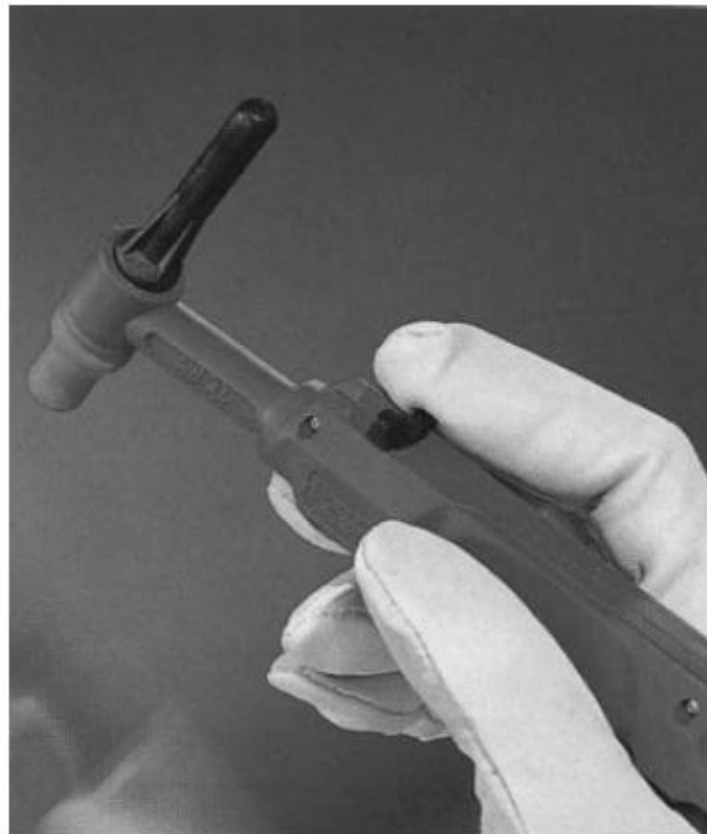
Cijena helija je otprilike 5 do 6 puta veća od cijene argona, i heliji osigurava malu ili nikakvu funkciju čišćenja oksidnog filma na aluminiju. Zbog navedenih razloga čisti helij rijetko se koristi kod ručnog TIG zavarivanja aluminija i aluminijskih legura. Dodavanjem argona heliju olakšava se uspostava električnog luka i povećava se njegova stabilnost. Brzina zavarivanja i penetracija su manje nego kod čistog helija, ali veće nego kod samog argona. Moguće je upravljati širinom zavara mijenjajući samo udjel argona u mješavini. Najčešće korištena mješavina argona i helija je ona u kojoj ima 25 % helija. Sklopovi izvora struje trebali bi omogućiti protok plina kroz pištolj prije uspostave i nakon prekida električnog luka. Protok



plina prije uspostave električnog luka potreban je za čišćenje polikabela i pištolja, te za zaštitu elektrode u trenutku kada se uspostavi električni luk. Protok plina nakon prekida električnog luka potreban je za zaštitu elektrode i metala zavara od oksidacije dok se hlade s temperature zavarivanja [2].

### 3.4. Pištolji za zavarivanje i vodiči

Postoji široki raspon pištolja za TIG zavarivanje, koji seže od onih za struje zavarivanja od nekoliko desetaka ampera, do onih koji su namjenjeni za struje od preko 400 ampera. Većina modernih pištolja za zavarivanje u sebi ima ugrađenu mogućnost upravljanja strujom zavarivanja. Svi pištolji koji su namjenjeni za struje zavarivanja veće od 200 A imaju u sebi ugrađeno vodeno hlađenje koje se može koristiti za hlađenje energetskih kabela. Pregrijavanje pištolja može dovesti do taljenja lemljenih spojeva koji se nalaze u pištolju ili do taljenja plastične izolacije polikabela.



Slika 3.7. Moderni pištolj za TIG zavarivanje [2]

Proizvođač rangira pištolje za zavarivanje na osnovu pozitivne istosmjerne struje (DCEP), tako da prije korištenja pištolja za TIG zavarivanje izmjeničnom strujom (AC) treba provjeriti koliku maksimalnu izmjeničnu struju pištolj može podnijeti. Na većini pištolja mogu se koristiti metalne i keramičke mlaznice. Keramičke mlaznice lakše se oštećuju u odnosu na metalne. Tablica 3.1. prikazuje preporučene promjere mlaznica i protoke plina za određene debljine limova koji se zavaruju [2].

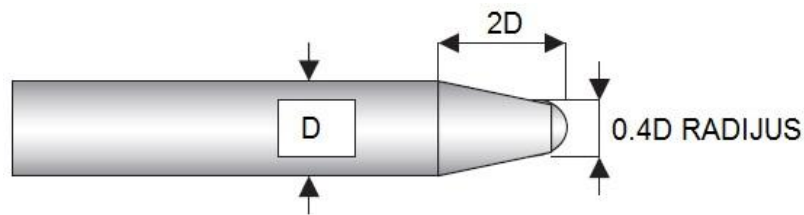
Tablica 3.1. Preporučeni promjeri mlaznica i plinski protoci [2]

| DEBLJINA<br>LIMOVA<br>(mm) | PROMJER<br>MLAZNICE<br>(mm) | PROTOK PLINA     |                   |
|----------------------------|-----------------------------|------------------|-------------------|
|                            |                             | ARGON<br>(l/min) | HELIJI<br>(l/min) |
| up to 1                    | 9.5                         | 3.4              | 7.5               |
| 1 to 3                     | 9.5                         | 4.5              | 9.5               |
| 3 to 5                     | 12.5                        | 5.6              | 11.8              |
| 5 to 9                     | 12.5                        | 7.0              | 14.2              |
| 9 to 12                    | 16.0                        | 8.0              | 16.5              |
| 12 and above               | 25.0                        | 12.0             | 21.0              |

### 3.5. Volframove elektrode

Postoji nekoliko varijanti elektroda za TIG postupak zavarivanja. Te varijante uključuju elektrode od čistog volframa, volframa legiranog s torijem ( $\text{ThO}_2$ ) ili cirkonijem ( $\text{ZrO}_2$ ). Navedeni legirni elementi dodaju se radi olakšavanja uspostave električnog luka, njegove stabilizaciju i produljenja životnog vijeka elektrode. Kod TIG zavarivanja izmjeničnom strujom (AC) preferiraju se volframove elektrode legirane s cirkonijem zbog toga što one imaju višu temperaturu taljenja u odnosu na elektrode od čistog volframa ili volframa legiranog s torijem, pa zbog toga mogu podnijeti više struje zavarivanja i imaju veći otpor na kontaminaciju. Tijekom zavarivanja vrh elektrode poprima hemisferični oblik. Važno je održati takav oblik tokom zavarivanja ako želimo stabilan električni luk. Kraj elektrode mora biti koničnog oblika kako bi omogućio formiranje zaobljenog vrha. Na slici 3.8. prikazan je preporučeni oblik volframove elektrode. Odabirom elektrode koja ima manji promjer od potrebnog za struju zavarivanja doći će do njenog pregrijavanja i moguće je da se

rastali, te time kontaminira metal zavara. Odabirom elektrode koja ima promjer veći od potrebnog za struju zavarivanja rezultirat će nestabilnim električnim lukom i širokim zavarom.



Slika 3.8. Preporučeni oblik volframove elektrode [2]

Elektrode se proizvode u promjerima od 0,3 mm pa do 6,4 mm. Elektroda ne bi trebala iz mlaznice viriti više od 6 mm, iako se to može produžiti do 10 mm ako se ugrade plinske leće u pištolj za zavarivanje. Produljenje može biti korisno ukoliko je ograničen pristup zavarenom mjestu. Prije početka zavarivanja preporučeno je predgrijavanje elektrode na način da se uspostavi električni luk na aluminijskom škartu. To omogućava formiranje zaobljenog vrha i provjeru ispravnosti elektrode. U tablici 3.2. navedeni su preporučeni promjeri volframove elektrode za određene struje zavarivanja [2].

Tablica 3.2. Preporučeni promjeri volframove elektrode za određene struje zavarivanja [2]

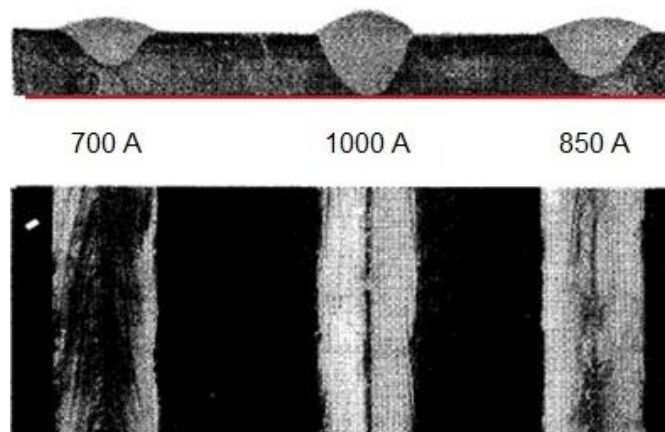
| PROMJER VOLFRAMOVE<br>ELEKTRODE (mm) | STRUJA<br>ZAVARIVANJA (A) |
|--------------------------------------|---------------------------|
| 1.0                                  | 20–50                     |
| 1.6                                  | 50–80                     |
| 2.4                                  | 80–160                    |
| 3.2                                  | 160–225                   |
| 4.0                                  | 225–330                   |
| 5.0                                  | 330–400                   |
| 6.4                                  | 400–550                   |

## 4. OPTIMIZACIJA PARAMETARA ZAVARIVANJA

### 4.1. Teorijski dio

#### 4.1.1. Struja zavarivanja

Struja zavarivanja je najvažniji parametar zbog toga što utječe na oblik metala zavara, brzinu taljenja metala (unos topline), zonu utjecaja topline, penetraciju i količinu rastaljenog metala. Povećanje struje zavarivanja uzrokuje veću penetraciju. U slučaju da je struja zavarivanja prevelika (za odabranu brzinu zavarivanja), i penetracija će biti velika, što može rezultirati potpunim rastaljivanjem poprečnog presjeka metala koji se spajaju. Širina zavara raste s povećanjem struje zavarivanja sve dok se ne dosegne kritični iznos struje zavarivanja, nakon kojeg počinje padati. Zona utjecaja topline (ZUT) također se povećava s povećanjem struje zavarivanja. Niska struja zavarivanja može uzrokovati nepotpunu penetraciju ili nedovoljnu fuziju metala. Slika 4.1. prikazuje utjecaj struje zavarivanja na penetraciju [3].

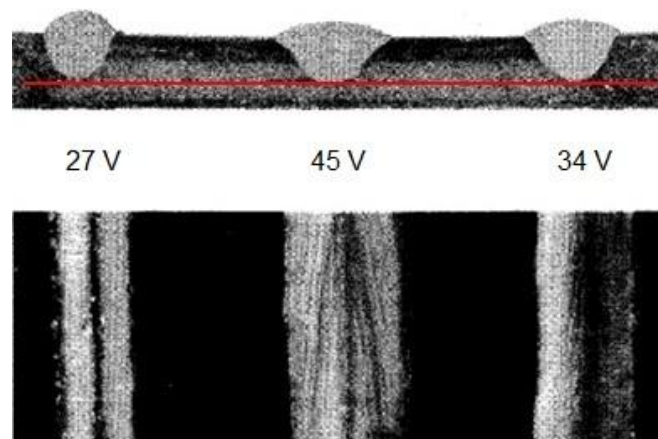


Slika 4.1. Utjecaj struje zavarivanja na penetraciju [4]

#### 4.1.2. Napon zavarivanja

Napon zavarivanja se mijenja s promjenom duljine električnog luka između elektrode i rastaljenog metala. Povećanjem duljine električnog luka dolazi do porasta njegovog napona, zbog toga što produljenje uzrokuje hlađenje rubnog dijela električnog luka. Također,

električni luk kontinuirano gubi nositelje naboja, zbog njihovog radijalnog gibanja prema hladnijem rubnom dijelu električnog luka. Napon zavarivanja općenito određuje oblik poprečnog presjeka metala zavara i njegov vanjski izgled. Povećanjem napona električnog luka, pri konstantnoj struji zavarivanja i brzini zavarivanja, postiže se spljošteniji i širi zavar s manjom penetracijom. U slučaju velikog razmaka kod korijena zavara, viši napon električnog luka pomaže u njegovom premošćivanju. Također, viši napon električnog luka uzrokuje povećanje kapljica rastaljenog metala u električnom luku, pri čemu se njihovo vrijeme prijenosa produljuje. Na slici 4.2. prikazan je utjecaj napona zavarivanja na oblik poprečnog presjeka metala zavara.



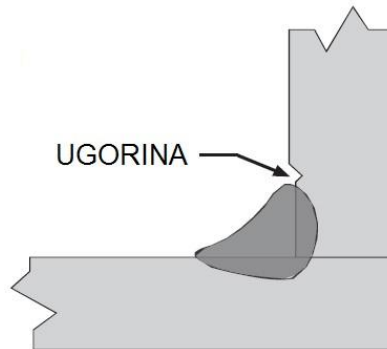
Slika 4.2. Utjecaj napona zavarivanja na oblik poprečnog presjeka metala zavara [4]

Daljnijim povećanjem napona zavarivanja raste mogućnost prekida električnog luka, a time i prekida zavarivanja. Preveliki napon zavarivanja uzrokuje široki poprečni presjek metala zavara koji je podložan pucanju. Smanjenjem napona postiže se uža električni luk koji uzrokuje veću penetraciju [3].

#### 4.1.3. Brzina zavarivanja

Brzina zavarivanja je linearna brzina kojom se električni luk pomiče po duljini zavarenog spoja. Pri bilo kojoj kombinaciji napona i struje zavarivanja promjena brzine zavarivanja podliježe općem obrazcu zavarivanja. Ukoliko se brzina zavarivanja poveća, smanjuje se snaga (toplinski tok), unos topline i depozit dodatnog materijala po jedinici duljine zavara, što rezultira manjim dimenzijama zavara. U odnosu na ostale parametre

zavarivanja, osim struje, brzina zavarivanja ima najveći utjecaj na penetraciju. Navedeno ne vrijedi za slučajeve kada je brzina zavarivanja jako mala, jer je tada rastaljeni metal zavara točno ispod elektrode. U tom slučaju penetracijske sile električnog luka prigušene su rastaljenim metalom. Prevelika brzina zavarivanja može uzrokovati ugorine, poroznost, magnetsko puhanje električnog luka, puknuća i uključke troske u metalu zavara. Na slici 4.3. prikazana je ugorina na kutnom zavarenom spoju.



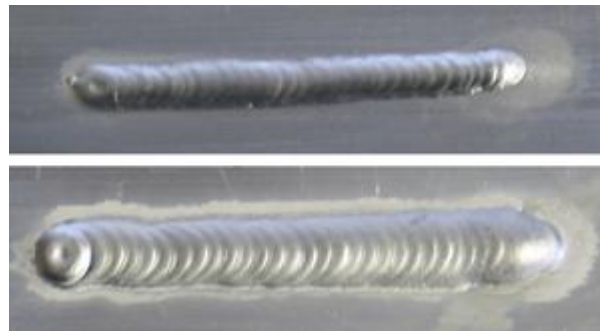
Slika 4.3. Ugorina na kutnom zavarenom spoju [5]

Brzina zavarivanja, unutar granica, može upravljati veličinom i penetracijom zavarenog spoja. Relativno mala brzina zavarivanja osigurava vrijeme potrebno plinovima da se otpuste iz rastaljenog metala, čime se smanjuje porozitet zavara. Jako mala brzina zavarivanja uzrokuje zavar konveksnog oblika koji je podložan pucanju. Također, mala brzina zavarivanja uzrokuje veliku količinu rastaljenog metala, što za posljedicu ima grublji zavar [3].

#### 4.1.4. Frekvencija

Namještanje frekvencije izmjenične struje (AC) omogućava zavarivaču bolju kontrolu nad izgledom i penetracijom zavara. Dok starija tehnologija ograničava frekvenciju izmjenične struje na raspon od 50 do 60 Hz, kod novijih uređaja za TIG zavarivanje moguće je namještanje frekvenciju u rasponu od 20 do 400 Hz. S frekvencijama između 80 i 120 Hz je povoljno raditi jer omogućuju povećanu kontrolu električnog luka i povećanje brzine zavarivanja. Frekvencije između 120 i 200 Hz su idealne za TIG zavarivanje aluminija i aluminijevskih legura. Električni luk pri 400 Hz je uži i usmjereniji, poboljšava stabilnost i

idealna je za kutne zavare. Gornji dio slike 4.4. prikazuje zavar napravljen s frekvencijom od 150 Hz, dok donji dio prikazuje zavar izrađen s frekvencijom od 40 Hz.

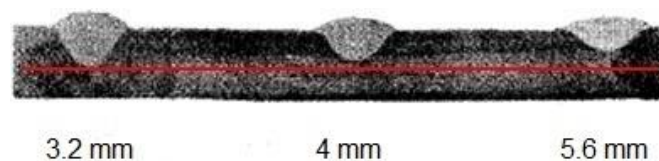


Slika 4.4. Zavari napravljeni s različitim frekvencijama izmjenične struje [6]

Povećanje frekvencije izmjenične struje uzrokuje usmjereniji električni luk, uži zavar i užu zonu čišćenja. Smanjivanjem frekvencije dobiva se mekaniji električni luk, što rezultira širim zavarom i manjom penetracijom [6].

#### 4.1.5. Veličina elektrode

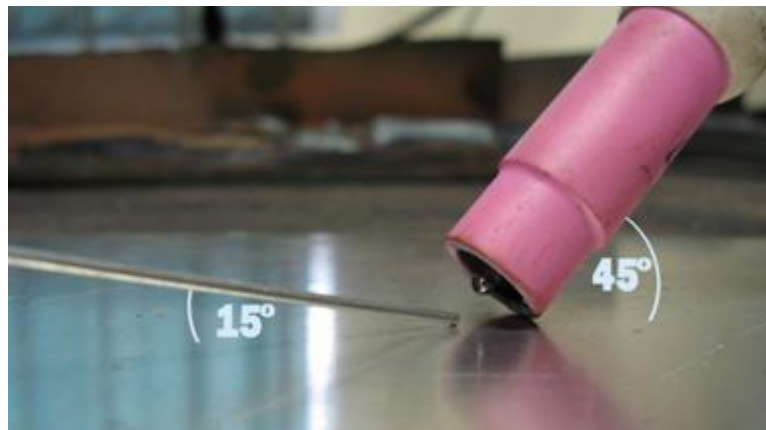
Pri konstantnoj struji zavarivanja, veličina elektrode utječe na oblik metala zavora i dubinu penetracije. Pri bilo kojoj struji zavarivanja, elektroda manjeg promjera će imati veću gustoću struje zavarivanja i veći depozit dodatnog materijala u odnosu na elektrodu većeg promjera. Međutim, elektroda većeg promjera može provoditi veću struju zavarivanja. Pri istim vrijednostima struje zavarivanja, napona zavarivanja i brzine zavarivanja, povećanje promjera elektrode uzrokovat će malo povećanje širine zavora. Slika 4.5. prikazuje utjecaj veličine elektrode na širinu zavora [3].



Slika 4.5. Utjecaj veličine elektrode na širinu zavora [4]

#### 4.1.6. Kut nagiba elektrode

Elektroda se može držati okomito, nagnuto prema naprijed ili natrag u odnosu na metal zavara. Budući da mlaz električnog luka ima tendenciju da se poravna s osi elektrode, oblik metala zavara je drugačiji pri različitim kutevima nagiba elektrode. U slučaju lijeve tehnike rada rastaljeni metal putuje ispod električnog luka pri čemu je penetracija manja i širina zavara veća, dok kod desne tehnike rada tlak koji stvara električni luk potiskuje rastaljeni metal koji se nalazi ispod njega pri čemu je penetracija veća, a širina zavara manja. Držanje elektrode u okomitom položaju u odnosu na metal zavara daje rezultate koji su između lijeve i desne tehnike rada. Na slici 4.6. prikazan je primjer nagiba elektrode kod TIG postupka zavarivanja [3].



Slika 4.6. Primjer nagiba elektrode kod TIG postupka zavarivanja [7]

## 4.2. Eksperimentalni dio

Cilj eksperimentalnog dijela bio je ispitati utjecaj frekvencije na dimenzije i mehanička svojstva zavara. Brzina zavarivanja, struja zavarivanja, napon zavarivanja i udaljenost pištolja od radnog komada tokom zavarivanja bili su konstantni.

### 4.2.1. Oprema za zavarivanje

Za potrebe eksperimentalnog dijela završnog rada korišten je TINY 170AC/DC uređaj za TIG zavarivanje tvrtke Kjellberg. Maksimalna struja zavarivanja ovog uređaja iznosi 250



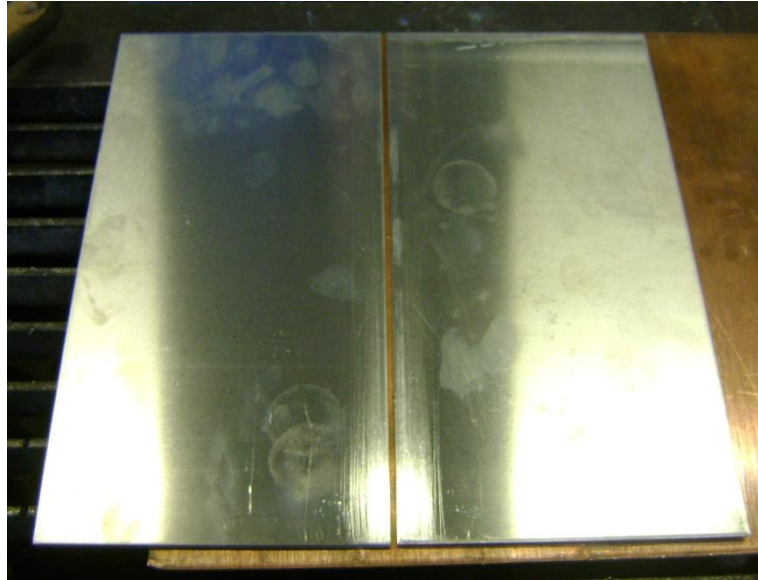
A, maksimalna frekvencija izmjenične struje iznosi 200 Hz, a napon se kreće u rasponu od 10 do 20 V. Na slici 4.7. prikazan je navedeni uređaj.



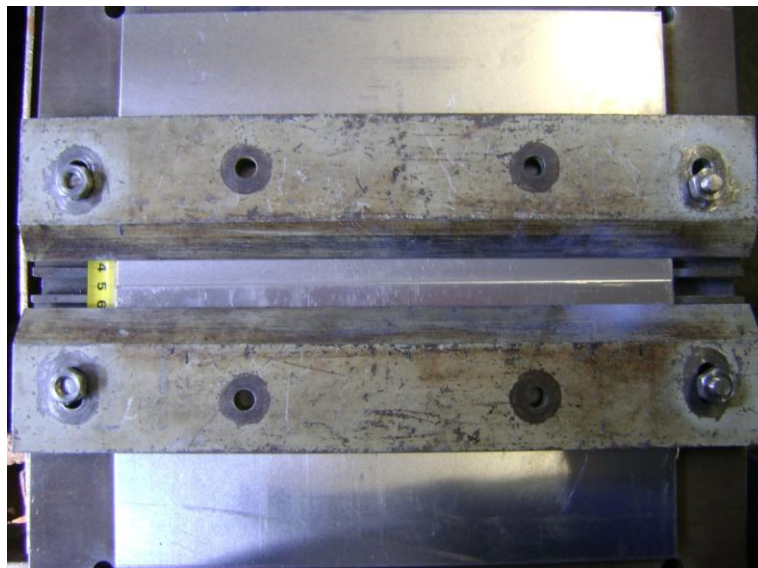
Slika 4.7. TINY 170AC/DC uređaj za TIG zavarivanje

#### 4.2.2. Priprema zavarenog spoja

Kao osnovni materijal za postupak korišteni su limovi od aluminijske legure AW 5083 debljine 3 mm. Prije zavarivanja spojno mjesto je bilo očišćeno pomoću finog brusnog papira. Kao dodatni materijal korištena je žica AlMg5. Limovi su bili postavljeni paralelno jedan do drugog formirajući pripremu za sučeoni zavar. Između limova nije bilo razmaka. Ispod limova nalazila se bakrena ploča za odvođenje topline nastale tijekom zavarivanja. U svrhu sprječavanja savijanja uslijed djelovanja topline, limovi su bili stegnuti za radni stol pomoću dvije metalne ploče s maticama. Slika 4.8. prikazuje limove od aluminijske legure AW 5083 koji su korišteni za postupak, dok slika 4.9. prikazuje pripremu zavarenog spoja.



Slika 4.8. Limovi od aluminijske legure AW 5083



Slika 4.9. Priprema zavarenog spoja

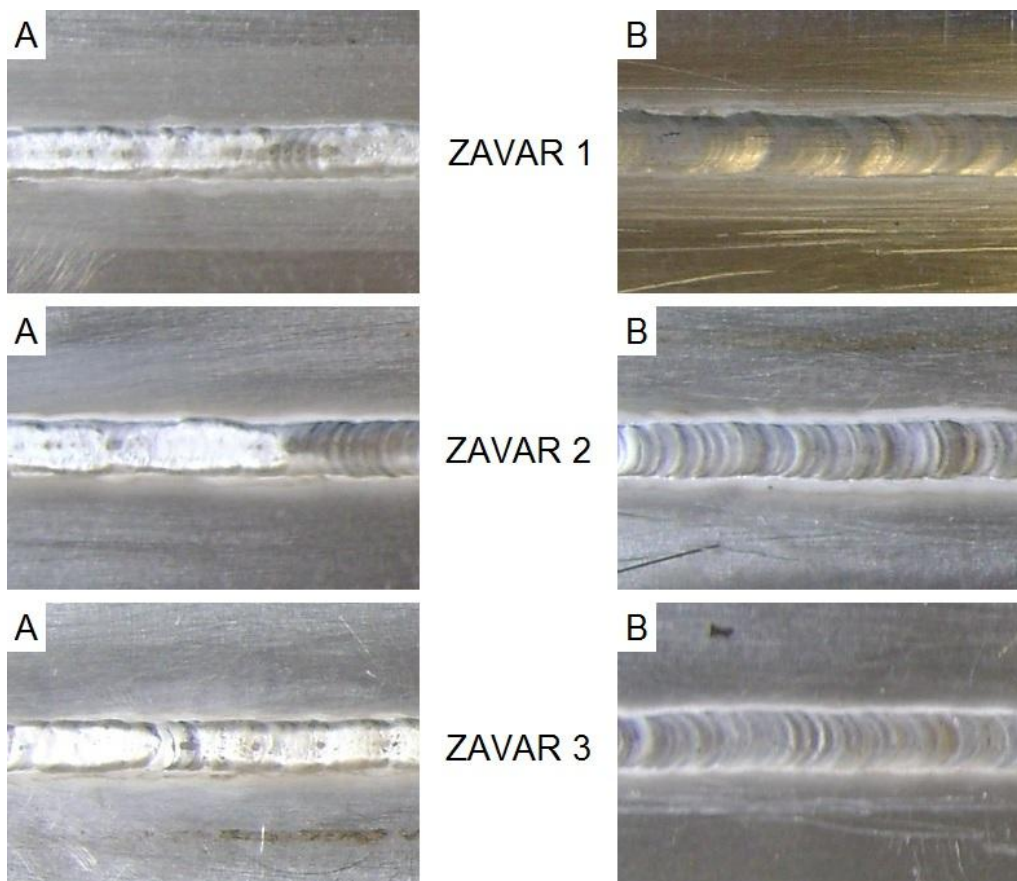
#### *4.2.3. Parametri i provođenje zavarivanja*

Nakon završene pripreme zavarenog spoja uslijedilo je namještanje parametara zavarivanja. Zavarivanje se provelo obostrano na tri para limova pomoću izmjenične struje (AC). Parametri zavarivanja za sva tri zavora i njihove brojčane vrijednosti prikazani su u tablici 4.1.

Tablica 4.1. Parametri zavarivanja za sva tri zavara

| ZAVAR                       | 1   | 2   | 3   |
|-----------------------------|-----|-----|-----|
| STRUJA ZAVARIVANJA (A)      | 150 | 150 | 150 |
| PROTOK PLINA (l/min)        | 7   | 7   | 7   |
| FREKVENCIJA STRUJE (Hz)     | 125 | 50  | 200 |
| BRZINA ZAVARIVANJA (cm/min) | 18  | 18  | 18  |

U gornjoj tablici može se primjetiti da su struja zavarivanja, protok plina i brzina zavarivanja kod sva tri zavara bili konstantni, dok je jedini parametar koji se mijenjao bila je frekvencija struje zavarivanja. Slika 4.10. prikazuje tri obostrano (A i B) napravljena zavara.

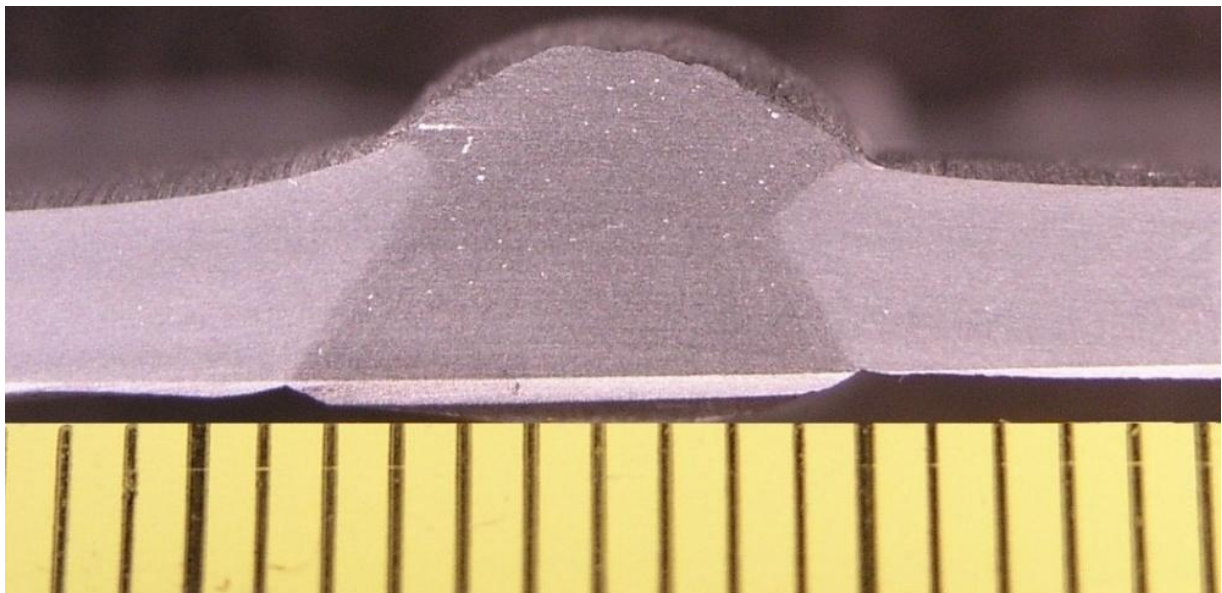


Slika 4.10. Tri obostrano (A i B) napravljena zavara

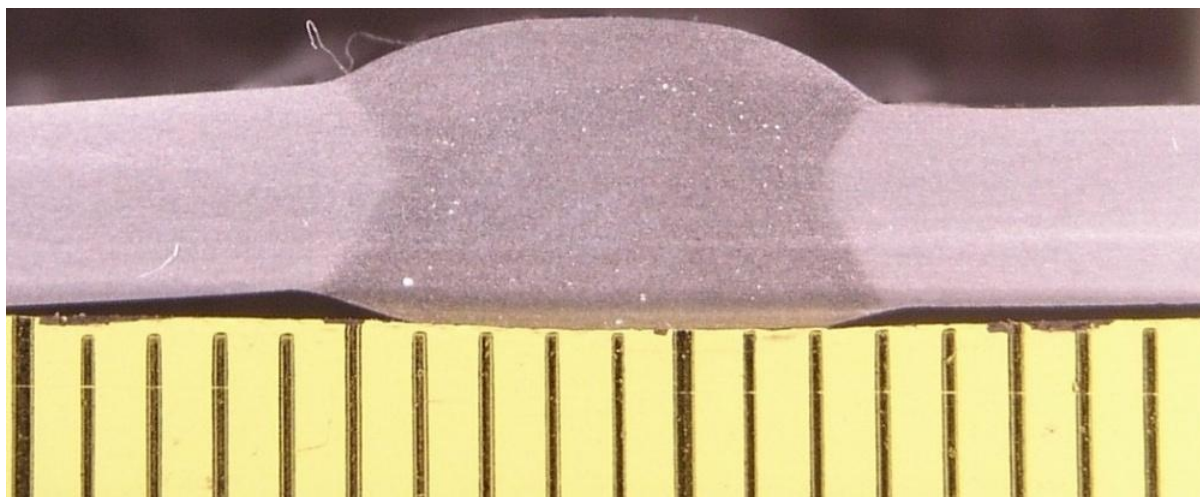
Nakon hlađenja, na limovima je uslijedilo zacrtavanje uzoraka za makroizbrusak i epruveta za statički vlačni pokus. Dimenzije uzoraka za makroizbrusak određene su prema normi HRN EN ISO 17639 [8], dok su dimenzije epruveta za statički vlačni pokus određene prema normi HRN EN ISO 4136 [9]. Uzroci za makroizbrusak su izrezani pomoću škara za lim, a epruvete za statički vlačni pokus su izrezane pomoću tračne pile i zatim obrađene na glodalici.

#### 4.2.4. Makroizbrusci

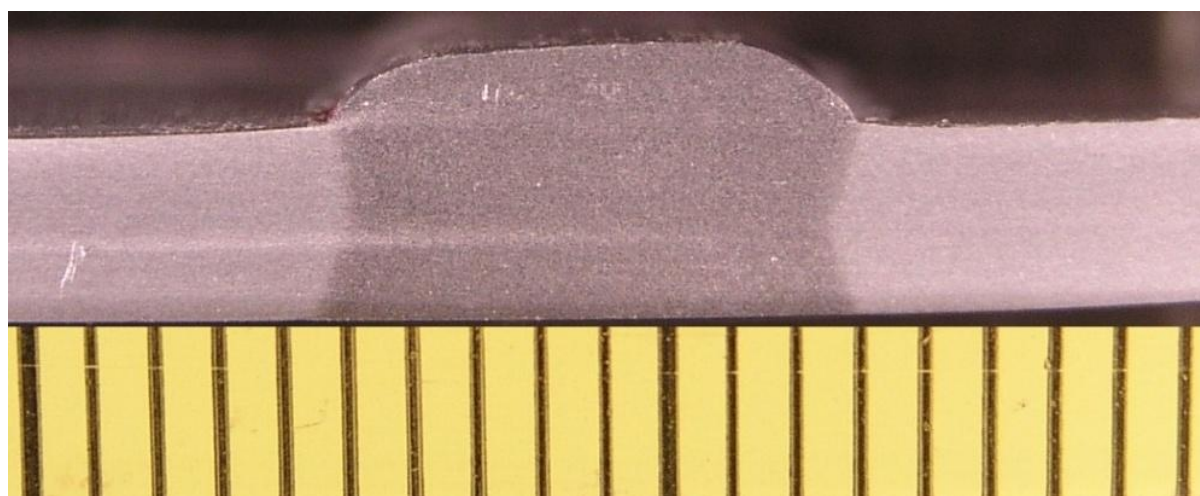
Nakon što su škarama za lim izrezani uzorci za makroizbrusak prema gore navedenoj normi, uslijedilo je njihovo brušenje po poprečnom presjeku. Brušenje je započeto s brusnim papirom kvalitete 500, a završeno s brusnim papirom kvalitete 4000. Nakon završenog brušenja uzorci su uronjeni u Kellerov reagens koji je svojim nagrivanjem osigurao kontrast između metala zavara i osnovnog metala. Kellerov reagens je otopina koja se sastoji od 95 ml destilirane vode, 2,5 ml  $\text{HNO}_3$ , 1,5 ml  $\text{HCl}$  i 1 ml  $\text{HF}$ . Slike 4.11., 4.12. i 4.13. prikazuju makroizbruske zavara nakon nagrivanja Kellerovim reagensom.



Slika 4.11. Makroizbrusak 1



Slika 4.12. Makroizbrusak 2



Slika 4.13. Makroizbrusak 3

Nakon slikanja makroizbrusaka uslijedilo je računanje površine poprečnog presjeka svakog zavara pomoću programske aplikacije ImageJ. U tablici 4.2. prikazane su izračunate površine poprečnih presjeka svakog od zavara.

Tablica 4.2. Površine poprečnih presjeka zavara

| ZAVAR                       | 1      | 2      | 3      |
|-----------------------------|--------|--------|--------|
| $A_{pr}$ (mm <sup>2</sup> ) | 28,759 | 31,249 | 27,843 |

Iz podataka navedenih u tablici može se uočiti kako najveću površinu ima zavar koji je izrađen s najmanjom frekvencijom izmjenične struje (50 Hz).

#### 4.2.5. Statički vlačni pokus

Nakon rezanja prema navedenoj normi i obrade na glodalici, epruvete su podvrgnute statičkom vlačnom pokusu na kidalici. Na slikama 4.14., 4.15. i 4.16. prikazane su epruvete prije provedenog statičkog vlačnog pokusa.



Slika 4.14. Epruveta 1



Slika 4.15. Epruveta 2



Slika 4.16. Epruveta 3

Postupak provedbe pokusa se sastojao od vlačnog opterećenja epruveta, koje su bile učvršćene u čeljusti kidalice, vlačnom silom koja je uzrokovala njihovu elongaciju, i na kraju puknuće. Na slici 4.17. prikazana je kidalica koja je korištena za pokus, dok slika 4.18. prikazuje epruvetu u čeljustima kidalice prije provedenog pokusa.



Slika 4.17. Kidalica



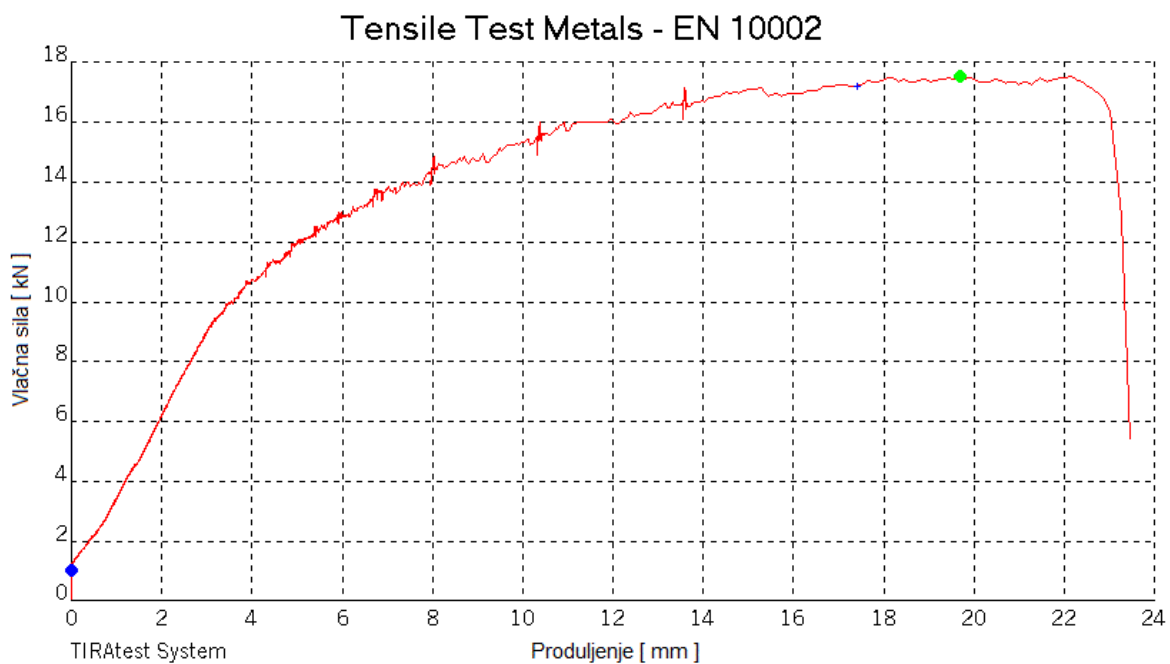
Slika 4.18. Epruveta u čeljustima kidalice

Rezultati pokusa za svaku epruvetu prikazani su u tablici 4.3.

Tablica 4.3. Rezultati statičkog vlačnog pokusa

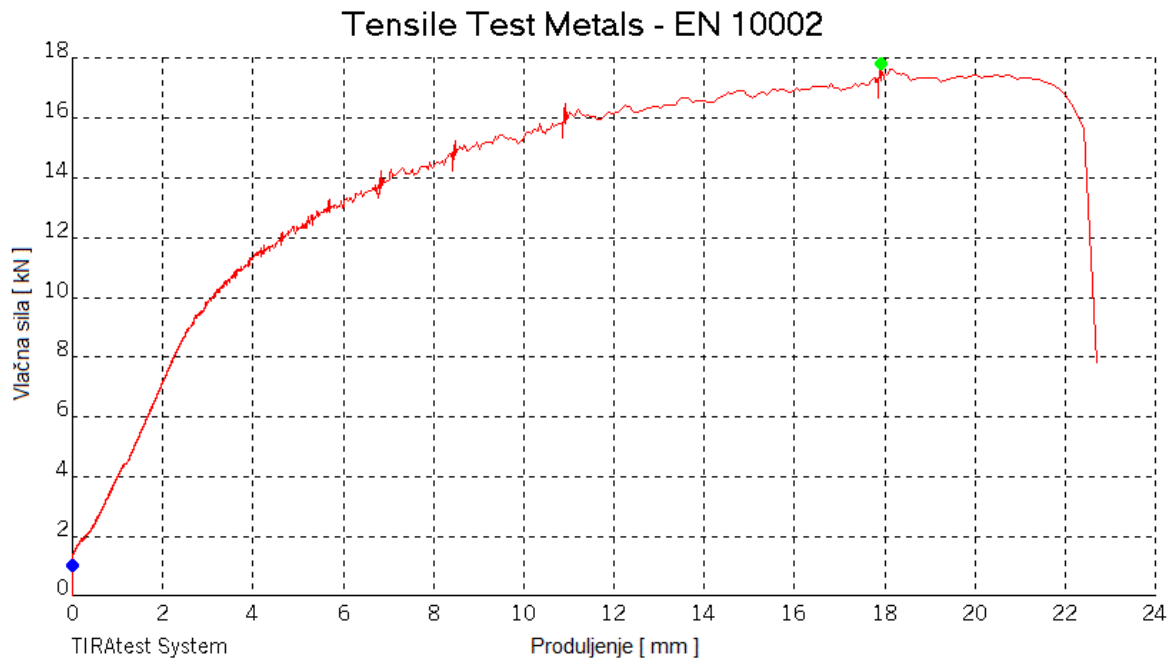
| EPRUVETA                   | 1      | 2      | 3     |
|----------------------------|--------|--------|-------|
| $R_m$ (N/mm <sup>2</sup> ) | 222,72 | 226,58 | 215,6 |
| $F_m$ (kN)                 | 17,53  | 17,79  | 17,41 |
| $S_o$ (mm <sup>2</sup> )   | 78,69  | 78,50  | 80,75 |

Iz navedenih rezultata može se uočiti da najveću vlačnu čvrstoću ima epruveta 2, dok najmanju vlačnu čvrstoću ima epruveta 3. Mogući razlog najmanje vlačne čvrstoće kod epruvete 3 je tangencijalno naprezanje koje se pojavilo zbog toga što čeljusti kidalice nisu potpuno okomito zahvatile gornji kraj epruvete te time na epruvetu nije djelovalo čisto vlačno opterećenje, već se pojavila i smična komponenta opterećenja. Do puknuća na svakoj od tri epruveta došlo je u zoni utjecaja topline. Vlačna čvrstoća aluminijske legure AW 5083 iznosi oko 270 N/mm<sup>2</sup> [10], dok se iznosi dobiveni statičkim vlačnim pokusom kreću od 215 do 227 N/mm<sup>2</sup>. Iz navedenog se može zaključiti kako je unos topline tijekom zavarivanja uzrokovao pad vlačne čvrstoće u osnovnom materijalu. Slike 4.19., 4.20. i 4.21. prikazuju dijagrame vlačna sila - produljenje za svaku od epruveta.

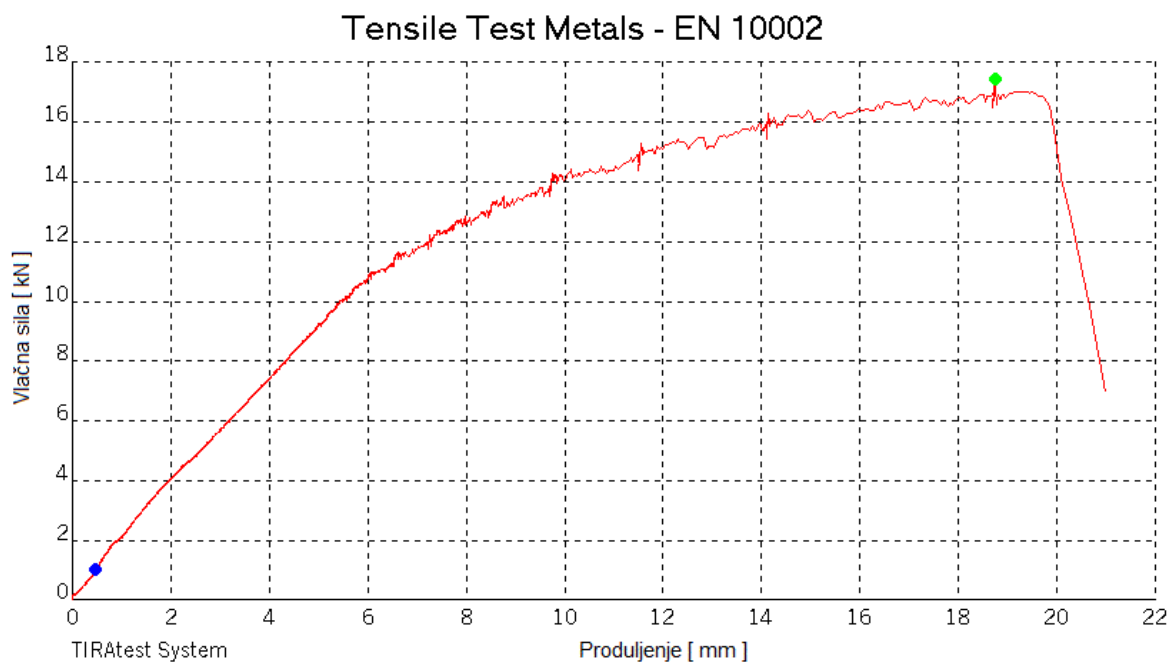


Slika 4.19. Dijagram vlačna sila - produljenje za epruvetu 1





Slika 4.20. Dijagram vlačna sila - produljenje za epruvetu 2



Slika 4.21. Dijagram vlačna sila - produljenje za epruvetu 3

## 5. ZAKLJUČAK

Aluminij i aluminijske legure su metalni materijali koji imaju dobra antikorozivna svojstva, dobru toplinsku vodljivost i manju gustoću u odnosu na čelike. Korozijska postojanost je prisutna zbog površinskog sloja aluminijevog oksida koji omogućuje primjenu aluminija i aluminijskih legura u konstrukcijama bez dodatne antikorozivne zaštite. Zbog dobre toplinske vodljivosti potreban je unos topline koji je nekoliko puta veći od onog za zavarivanje čelika. Manja gustoća aluminija i aluminijskih legura znači i manju masu konstrukcija, što je neki puta presudni faktor primjene. TIG zavarivanje aluminija i aluminijskih legura je specifično po tome što se provodi gotovo isključivo s izmjeničnom strujom (AC) zbog potrebe čišćenja površinskog sloja oksida pri zavarivanju. Također, jedan od važnijih faktora je balans struje zavarivanja kojim se određuje odnos između duljine trajanja pozitivnog i negativnog poluvala na volframovoj elektrodi, jer njegovim namještanjem odlučujemo da li želimo duže čišćenje površinskog sloja oksida ili taljenje metala. U eksperimentalnom dijelu završnog rada ispitan je utjecaj frekvencije struje zavarivanja na mehanička svojstva zavara aluminijske legure AW 5083 u cilju pronalaska optimalne frekvencije struje zavarivanja. Rezultati dobiveni nakon provedenih mehaničkih ispitivanja (makroizbruska i statičkog vlačnog pokusa) pokazali su da najbolja mehanička svojstva ima zavar 2, koji je izrađen s frekvencijom struje zavarivanja od 50 Hz. Navedeni zavar imao je najveću vlačnu čvrstoću ( $226,58 \text{ N/mm}^2$ ) i površinu poprečnog presjeka ( $31,249 \text{ mm}^2$ ) u odnosu na preostala dva zavara. Promatrajući rezultate dobivene za preostala dva zavara, koji su izrađeni s frekvencijama struje zavarivanja od 125 i 200 Hz, može se primjetiti da s povećanjem frekvencije struje zavarivanja dolazi do smanjenja površine poprečnog presjeka zavara, iz čega proizlazi da je povećanje frekvencije struje zavarivanja uzrokovalo manju količinu rastaljenog osnovnog i dodatnog metala. Uzimajući u obzir sve rezultate dobivene mehaničkim ispitivanjima, može se zaključiti da za aluminijsku leguru AW 5083 optimalna frekvencija izmjenične struje zavarivanja iznosi 50 Hz.

## 6. LITERATURA

- [1] Ron Cobden, Alcan, Banbury, Aluminum: Physical Properties, Characteristic and Alloys, European Aluminium Association, 1994. g.
- [2] Gene Mathers, The welding of aluminium and its alloys, Woodhead Publishing Ltd., 2002. g.
- [3] Vinod Kumar, Effect of Welding Parameters on Bead Geometry and Flux Consumption
- [4] <http://www.fabricatingandmetalworking.com/2014/01/variables-that-affect-weld-penetration/>
- [5] Leigh Baughurst, Welding Defects, Causes & Corrections, ASPEC Engineering Technical Article, October, 2011. g.
- [6] <http://www.thefabricator.com/article/aluminumwelding/riding-the-right-wave-in-aluminum-welding>
- [7] [http://www.r-techwelding.co.uk/tig\\_welding\\_how\\_to\\_use\\_a\\_tig\\_welder\\_guide.php](http://www.r-techwelding.co.uk/tig_welding_how_to_use_a_tig_welder_guide.php)
- [8] HRN EN ISO 17639: Razorno ispitivanje zavara metalnih materijala - Makroskopsko i mikroskopsko ispitivanje zavara
- [9] HRN EN ISO 4136: Razorna ispitivanja zavarenih spojeva na metalnim materijalima - Poprečno vlačno ispitivanje
- [10] Gleich Aluminium, EN AW 5083 Technical Data Sheet