

Analiza mehanizma nastanka i redukcije deformacija pri MIG zavarivanju aluminijskih legura

Lovrić, Šime

Master's thesis / Diplomski rad

2024

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:934623>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-19**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Šime Lovrić

Zagreb, 2024.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

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

Student:

Šime Lovrić

Zagreb, 2024.

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

Zahvaljujem se mentoru prof. dr. sc. Ivici Garašiću i asistentu mag. ing. mech. Marku Frajzmanu na smjernicama i savjetima prilikom izrade ovog rada. Također se zahvaljujem djelatnicima Laboratorija za zavarivanje na pomoći u izradi eksperimentalnog dijela rada. Zahvaljujem se svojoj obitelji i prijateljima na podršci tijekom čitavog studija.

Hvala obitelji i prijateljima na ukazanom povjerenju i podršci tijekom čitavog studija jer bez njih ne bi bilo ovog rada i postignutog uspjeha.

Šime Lovrić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:
Proizvodno inženjerstvo, inženjerstvo materijala, industrijsko inženjerstvo i menadžment,
mehatronika i robotika, autonomni sustavi i računalna inteligencija

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

DIPLOMSKI ZADATAK

Student:

Šime Lovrić

JMBAG: 0035220407

Naslov rada na

hrvatskom jeziku:

**Analiza mehanizma nastanka i redukcije deformacija pri MIG
zavarivanju aluminijskih legura**

Naslov rada na

engleskom jeziku:

**Analysis of formation mechanism and reduction of distortions in MIG
welding of aluminium alloys**

Opis zadatka:

U teorijskom dijelu navesti i opisati primjenjive postupke zavarivanja aluminijskih konstrukcija u brodogradnji s posebnim naglaskom na MIG te moderne razvojne inačice uz različite konfiguracije i vrste valnih oblika struje. Klasificirati aluminijske legure i dodatne materijale pogodne za primjenu u morskim uvjetima. Analizirati glavne mehanizme nastanka deformacija pri zavarivanju aluminijskih legura te posljedice za mehanička svojstva i strukturalni integritet konstrukcije. Posebno razmotriti utjecaj topline i redosljed zavarivanja te ulogu ukruta i naprava za smanjenje deformacija kao i metode ravnjanja.

U eksperimentalnom dijelu za zavarenu konfiguraciju I profila razraditi tehnologiju zavarivanja MIG i AC MIG postupkom na razini jednake brzine žice. Definirati razliku u unosu topline za oba koncepta zavarivanja. Osmisliti i izraditi naprave za zavarivanje I profila koja će rezultirati minimalnim deformacijama i odstupanjem dimenzijskih tolerancija. Zaključno, provesti komparativnu analizu zavarivanja s i bez primjene naprave te dodatno ocijeniti utjecaj postupka zavarivanja.

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

Zadatak zadan:

9. svibnja 2024.

Zadatak zadan:

Prof. dr. sc. Ivica Garašić

Datum predaje rada:

11. srpnja 2024.

Predviđeni datumi obrane:

15. – 19. srpnja 2024.

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Ivica Garašić

SADRŽAJ

| | |
|--|------|
| SADRŽAJ | I |
| POPIS SLIKA | III |
| POPIS TABLICA..... | V |
| POPIS TEHNIČKE DOKUMENTACIJE | VI |
| POPIS OZNAKA | VII |
| SAŽETAK..... | VIII |
| SUMMARY | IX |
| 1. UVOD..... | 1 |
| 2. ALUMINIJSKE LEGURE | 2 |
| 2.1. Podjela aluminijskih legura..... | 2 |
| 2.2. Legirni elementi aluminijskih legura | 3 |
| 2.3. Označavanje aluminijskih legura | 4 |
| 2.4. Oznake temperiranja aluminijske | 6 |
| 2.5. Aluminijske legure pogodne za morsku primjenu | 7 |
| 2.5.1. Serija 5xxx (Al-Mg legure)..... | 7 |
| 2.5.2. Serija 6xxx (Al-Mg-Si legure) | 8 |
| 3. ZAVARLJIVOST ALUMINIJA | 9 |
| 3.1. Poroznost aluminijske i njegovih legura | 9 |
| 3.2. Aluminijski oksid..... | 10 |
| 3.3. Tople pukotine | 10 |
| 3.4. Gubitak čvrstoće zavara u zoni utjecaja topline..... | 11 |
| 4. POSTUPCI POGODNI ZA ZAVARIVANJE ALUMINIJA U BRODOGRADNJI..... | 14 |
| 5. MIG POSTUPAK ZAVARIVANJA..... | 16 |
| 5.1. Parametri MIG zavarivanja aluminijske | 18 |
| 5.1.1. Brzina zavarivanja..... | 19 |
| 5.1.2. Zaštitni plin | 19 |
| 5.1.3. Promjer žice i jakost struje..... | 19 |
| 5.1.4. Dodatni materijali | 20 |
| 5.1.5. Napon električnog luka | 21 |
| 5.1.6. Položaj elektrode i radnog komada | 22 |
| 5.2. MIG-P postupak zavarivanja | 22 |
| 5.3. CMT – postupak zavarivanja | 24 |
| 5.4. AC MIG-P postupak zavarivanja | 26 |
| 5.4.1. Uloga polariteta u AC MIG-P postupku zavarivanja..... | 27 |
| 5.4.2. EN omjer i njegov utjecaj na geometriju zavara..... | 27 |
| 5.4.2.1. Utjecaj EN polariteta na brzinu taljenja žice | 29 |
| 5.4.2.2. Utjecaj EN polariteta na dubinu penetracije | 29 |
| 5.4.3. Utjecaj frekvencije na geometriju zavara..... | 32 |
| 6. DEFORMACIJE PRI ZAVARIVANJU ALUMINIJA | 34 |

| | |
|--|----|
| 6.1. Zaostala naprezanja nakon zavarivanja..... | 34 |
| 6.1.1. Klasifikacija zaostalih naprezanja..... | 36 |
| 6.1.2. Klasifikacija zaostalih naprezanja kao posljedica zavarivanja | 38 |
| 6.2. Deformacije uslijed zavarivanja..... | 38 |
| 6.3. Faktori koji utječu na zaostala naprezanja i deformacije..... | 40 |
| 6.3.1. Toplinska i mehanička svojstva materijala | 40 |
| 6.3.2. Utjecaj stezanja | 41 |
| 6.3.3. Utjecaj pripreme spoja | 42 |
| 6.3.4. Utjecaj redoslijeda zavarivanja | 42 |
| 6.4. Mjere za smanjenje zaostalih naprezanja i deformacija..... | 44 |
| 7. EKSPERIMENTALNI DIO | 47 |
| 7.1. Opis eksperimenta..... | 47 |
| 7.2. Oprema za zavarivanje..... | 47 |
| 7.2.1. Izvor struje | 47 |
| 7.2.2. Osnovni i dodatni materijal..... | 48 |
| 7.2.3. Zaštitni plin | 49 |
| 7.3. Postupak izrade | 50 |
| 7.4. Vizualna kontrola deformacija ispitnih uzoraka | 57 |
| 7.5. Analiza rezultata mjerenja deformacija | 58 |
| 8. ZAKLJUČAK..... | 62 |
| LITERATURA..... | 64 |
| PRILOZI..... | 67 |

POPIS SLIKA

| | |
|---|----|
| Slika 1. Topljivost vodika u aluminiju [5] | 10 |
| Slika 2. Prikaz tople pukotine nastale tijekom zavarivanja aluminija [5] | 11 |
| Slika 3. Utjecaj unosa topline na legure aluminija očvrsnute hladnom deformacijom [5] | 12 |
| Slika 4. Utjecaj temperature žarenja na granicu razvlačenja [5] | 12 |
| Slika 5. Utjecaj unosa topline na precipitacijski očvrsnute legure [5] | 13 |
| Slika 6. Zavarivanje broskog poda TIG postupkom [5] | 14 |
| Slika 7. Zavarivanje brodske oplate MIG postupkom [5] | 15 |
| Slika 8. MIG zavarivanje [9] | 16 |
| Slika 9. Oprema za MIG zavarivanje [12] | 17 |
| Slika 10. Osnovni princip MIG zavarivanja [10] | 18 |
| Slika 11. Ovisnost jakosti struje zavarivanja o brzini dovođenja žice[14] | 20 |
| Slika 12. Ovisnost jakosti struje i napona luka pri zavarivanju žicom promjera 1,2 mm [14] | 22 |
| Slika 13. Prikaz faza električnog impulsa u prijenosu kapljice metala impulsnim električnim | 23 |
| Slika 14. Prikaz faza električnog impulsa u prijenosu kapljice metala impulsnim električnim[16] | 25 |
| Slika 15. Valni oblik struje u CMT postupku[16] | 26 |
| Slika 16. Valni oblik struje za AC MIG postupak zavarivanja | 28 |
| Slika 17. Odnos između omjera EN i brzine taljenja žice[23] | 29 |
| Slika 18. Utjecaj balansa na dubinu penetracije [18] | 30 |
| Slika 19. Utjecaj balansa i jakosti struje na dubinu penetracije [20] | 30 |
| Slika 20. Utjecaj balansa na širinu zavara [18] | 31 |
| Slika 21. Utjecaj balansa na nadvišenje zavara [18] | 31 |
| Slika 22. Geometrija zavarenih spojeva zavarenih različitim frekvencijama[24] | 32 |
| Slika 23. Lica zavara dobivena korištenjem različitih postavki frekvencije[24] | 32 |
| Slika 24. Pojednostavljeni model štapa [26] | 35 |
| Slika 25. Shematski prikaz naprezanja u zavaru [27] | 35 |
| Slika 26. Zaostala naprezanja prvog, drugog i trećeg reda[26] | 37 |
| Slika 27. Tipične deformacije uslijed zavarivanja [26] | 40 |
| Slika 28. Odnos deformacija i zaostalih naprezanja uslijed stezanja [25] | 41 |
| Slika 29. Razlika u naprezanjima kod različitih sljedova zavarivanja [25] | 44 |
| Slika 30. Veličina kutne deformacije u zavisnosti o broju prolaza [30] | 45 |
| Slika 31. Primjena steznih naprava[28] | 45 |
| Slika 32. Prednaprezanje pomoću cijevi [28] | 46 |
| Slika 33. Pred namještanje radnog komada[28] | 46 |
| Slika 34. Uređaj za zavarivanje Welbee W400 | 48 |
| Slika 35. Karakteristike Welbee W400 uređaja za zavarivanje [31] | 48 |
| Slika 36. Boca zaštitnog plina Argon 5.0 | 50 |
| Slika 37. Nacrt naprave za stezanje | 51 |
| Slika 38. Model stezne naprave za zavarivanje I-profila | 51 |
| Slika 39. Naprava za stezanje pripremljena za zavarivanje | 52 |
| Slika 40. Stezanje probnog uzorka | 53 |
| Slika 41. Priprema ispitnih uzoraka za zavarivanje | 54 |
| Slika 42. Ispitni uzorci nakon zavarivanja | 57 |
| Slika 43. Vizualna kontrola deformacija ispitnih uzoraka | 58 |

| | |
|---|----|
| Slika 44. Uzorci zavareni bez korištenja naprave za zavarivanje | 59 |
| Slika 45. Uzorci zavareni korištenjem naprave za zavarivanje..... | 60 |

POPIS TABLICA

| | |
|---|----|
| Tablica 1. Podoznake za H – hladno deformirano[1]..... | 6 |
| Tablica 2. Dodatne oznake za T – toplinski obrađeno [1] | 7 |
| Tablica 3. Preporučeni dodatni materijal za zavarivanje aluminijskih legura [11]..... | 21 |
| Tablica 4. Kemijski sastav aluminijeve legure EN AW-5083-H321 | 49 |
| Tablica 5. Mehanička svojstva dodatnog materijala[34] | 49 |
| Tablica 6. Kemijskog sastava dodatnog materijala [32] | 49 |
| Tablica 7. Parametri zavarivanja ispitnih uzoraka | 55 |
| Tablica 8 Stvarni parametri zavarivanja ispitnih uzoraka | 55 |
| Tablica 9. Stvarni unos topline tijekom zavarivanja | 56 |
| Tablica 10. Izmjerene vrijednosti deformacija uzoraka CS1-L300-DC i CS2-L300-AC..... | 59 |
| Tablica 11. Izmjerene vrijednosti deformacija nakon zavarivanja | 61 |

POPIS TEHNIČKE DOKUMENTACIJE

CS-L300-001 Naprava za stezanje I-profila

POPIS OZNAKA

| Oznaka | Jedinica | Opis |
|---------------|-------------------|---|
| A | % | Istezljivost |
| AC MIG | / | MIG zavarivanje izmjeničnom strujom |
| Ar | / | Argon |
| DCEN | / | Direct Current Electrode Positive |
| DCEP | / | Direct Current Electrode Negative |
| EN | / | Engleska norma |
| He | / | Helij |
| HRN | / | Hrvatske norme |
| I | A | Jakost struje zavarivanja |
| ISO | / | International organization for standardization - Međunarodna organizacija za standardizaciju |
| MIG | / | Metal Inert Gas - Elektrolučno zavarivanje taljivom elektrodom u zaštiti neutralnog plina |
| MIG-P | / | Impulsno MIG zavarivanje istosmjernom strujom |
| TIG | / | Tungsten Inert Gas - Elektrolučno zavarivanje netaljivom elektrodom u zaštiti neutralnog plina |
| U | V | Napon zavarivanja |
| v_z | cm/min | Brzina zavarivanja |
| Q | kJ/cm | Unos topline |
| ρ | g/cm ³ | Gustoća |
| ε | mm | Ukupna deformacija |

SAŽETAK

Cilj ovog diplomskog rada je analizirati mehanizme nastanka i redukcije deformacija pri MIG zavarivanju aluminijskih legura. U teorijskom dijelu rada opisani su postupci zavarivanja aluminijskih konstrukcija u brodogradnji s posebnim osvrtom na MIG postupak zavarivanja. Detaljno je objašnjena klasifikacija aluminijskih legura, definirani su i pojašnjeni pojmovi zaostalih napreznja i deformacija. Također, u teorijskom dijelu rada navedene su i metode kojima je moguće smanjiti zaostala napreznja i deformacije.

U eksperimentalnom dijelu rada razrađena je tehnologija zavarivanja I profila DC MIG-P i AC MIG-P postupkom te je provedeno zavarivanje četiri ispitna uzorka. Izrađena je naprava za stezanje I profila prilikom zavarivanja te je provedena analiza deformacija pri zavarivanju s i bez primjene naprave. Na temelju dobivenih rezultata eksperimentalnog rada donesen je zaključak.

Ključne riječi: aluminij, zaostala napreznja, deformacije, zavarivanje MIG postupkom

SUMMARY

The objective of this thesis is to analyze the mechanisms of occurrence and reduction of deformations in MIG welding of aluminum alloys. The theoretical part of the thesis describes the welding processes of aluminum structures in shipbuilding, with a special focus on the MIG welding process. The classification of aluminum alloys is explained in detail, and the concepts of residual stresses and deformations are defined and clarified. Additionally, the theoretical part outlines methods that can be used to reduce residual stresses and deformations.

In the experimental part of the thesis, the welding technology of I profiles using the MIG-P and AC MIG-P processes was elaborated, and welding of four test samples was carried out. A clamping device for I profiles during welding was created, and an analysis of deformations during welding with and without the use of the device was conducted. Based on the results obtained from the experimental work, a conclusion was drawn.

Keywords: aluminum, residual stresses, deformations, MIG welding

1. UVOD

Aluminij je materijal od izuzetne važnosti u brodogradnji zbog svojih povoljnih svojstava kao što su niska gustoća, visoka otpornost na koroziju i dobra zavarljivost. Njegova primjena omogućuje značajno smanjenje težine brodskih konstrukcija, što doprinosi većoj efikasnosti i ekonomičnosti plovila. Međutim, proces zavarivanja aluminijskih legura nosi sa sobom niz izazova, među kojima su deformacije koje mogu narušiti mehanička svojstva i strukturni integritet konačnog proizvoda. Ovaj se rad fokusira na analizu mehanizama nastanka deformacija pri MIG (engl. Metal Inert Gas) zavarivanju aluminijskih legura te istraživanju modernih postupaka i tehnika za njihovu redukciju.

MIG postupak zavarivanja se ističe zbog svoje brzine, efikasnosti i mogućnosti automatizacije. Moderna inačica MIG zavarivanja uključuje različite konfiguracije i vrste valnih oblika struje, kao što su impulsno MIG zavarivanje (MIG-P) i AC-MIG (engl. Alternating Current Metal Inert Gas) s varijabilnom frekvencijom, koji poboljšavaju kontrolu nad procesom i smanjuju rizik od nastanka deformacija radnog komada. Aluminijske legure koje se najčešće koriste u morskim uvjetima uključuju serije 5000 i 6000. Legure iz serije 5000, poznate su po visokoj otpornosti na koroziju i povoljnim mehaničkim svojstvima, a legure iz serije 6000, nude dobru kombinaciju čvrstoće i zavarljivosti.

Deformacije pri zavarivanju aluminijskih legura uglavnom nastaju zbog lokaliziranog zagrijavanja i naknadnog hlađenja, što uzrokuje toplinska naprezanja i kontrakcije. Ovi efekti mogu rezultirati različitim vrstama deformacija, uključujući uzdužno i poprečno savijanje, izobličenja i uvijanje. Takve deformacije mogu ozbiljno ugroziti mehanička svojstva i strukturni integritet zavarenih konstrukcija, smanjujući njihovu otpornost na umor materijala i time dugovječnost same konstrukcije. Toplina unesena tijekom zavarivanja i redosljed izvođenja zavara igraju ključnu ulogu u kontroli nastanka deformacija. Primjena ukruta i naprava za stezanje može pomoći u kontroli i smanjenju deformacija tijekom zavarivanja. Ove metode omogućuju ravnomjerniju raspodjelu naprezanja i održavanje dimenzijske točnosti zavarenih elemenata.

Ovaj rad će detaljno analizirati ove aspekte, pružajući temeljitu preglednost i praktične smjernice za minimalizaciju deformacija pri MIG zavarivanju aluminijskih legura u brodogradnji.

2. ALUMINIJSKE LEGURE

Aluminij je kemijski element prisutan u otprilike 8 % zemljine kore, što ga čini najrasprostranjenijim metalom i trećim najrasprostranjenijim elementom nakon kisika i silicija. Ovaj metal je posebno prepoznatljiv po svojoj niskoj gustoći, a zahvaljujući fenomenu pasivizacije, ima izuzetno dobru korozijsku postojanost. Danas je aluminij neizostavan inženjerski materijal zbog izrazito povoljnog omjera čvrstoće i niske težine, uz istovremeno razumnu cijenu [1].

Osnovna fizikalna svojstva aluminijske legure su sljedeća [2]:

- Mala gustoća (2660 kg/m^3 u usporedbi s čelikom 7850 kg/m^3),
- Visok omjer čvrstoće i težine,
- Niska krutost (modul elastičnosti 70 GPa u usporedbi s čelikom 210 GPa),
- Zadržava dobru duktilnost na niskim temperaturama,
- Visoka korozijska postojanost,
- Treba izbjegavati spajanje s plemenitim metalima (npr. bakrom),
- Veliko toplinsko istezanje ($23 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ u usporedbi s čelikom $12 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$),
- Nema promjena boje površine prilikom zagrijavanja i unošenja veće količine topline ,
- Visoka toplinska vodljivost ($240 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ u usporedbi s čelikom $54 \text{ W/m}^\circ\text{C}$),
- Deblji dijelovi mogu zahtijevati predgrijavanje,
- Aluminij i njegove legure brzo razvijaju žilav, vatrostalan oksidni film kada su izložene kisiku.

2.1. Podjela aluminijskih legura

Aluminijske legure koriste se u lijevanom i gnječenom stanju. Lijevani aluminij dobiva se kada se taljevina iz peći izlije u kalup, dok se gnječeni oblik postiže obradom metala s pomoću alata u čvrstom stanju [3]. Lijewane legure aluminijske danas se najčešće koriste u transportnom sektoru, posebice za proizvodnju blokova motora, glava motora i klipova. Aluminijske legure se mogu lijevati jednako uspješno putem sva tri osnovna načina: u pijesak, kokilu i tlačno [3].

Gnječene legure aluminijske karakteriziraju dobra mehanička svojstva, a proizvode se taljenjem čistih aluminijskih ingota uz dodatak legirnih elemenata potrebnih za stvaranje određene klase aluminijske. Rastaljena legura zatim se lijeva te se oblikuje valjanjem, gnječenjem ili ekstruzijom do postizanja konačnog oblika. U nekim slučajevima, legure se podvrgavaju toplinskoj obradi kako bi se dodatno poboljšala njihova svojstva. Upotrebljavaju se u raznim oblicima, uključujući ploče, limove, otkivke i žice. [3].

2.2. Legirni elementi aluminijskih legura

Čisti aluminij je relativno mekan, ali dodavanjem malih količina legirnih elemenata postiže se niz novih mehaničkih svojstava. Primarni legirni elementi koji se koriste za legiranje aluminijske su bakar, silicij, mangan, magnezij i cink. U aluminijskim legurama, ovi elementi će imati sljedeći učinak [2]:

- bakar je legirni element koji povećava čvrstoću,
- silicij snižava temperaturu taljenja i poboljšava fluidnost taljevine,
- mangan osigurava veću čvrstoću uz vrlo dobru duktilnost,
- magnezij daje veću čvrstoću te zadržava dobru korozivnu postojanost, a u kombinaciji sa silicijem dobiva se legura s većom čvrstoćom i dobrim ekstruzijskim karakteristikama,
- cink u kombinaciji s magnezijem i bakrom daje visoku čvrstoću. Legure cinka i magnezija imaju sposobnost poboljšanja čvrstoće do čijeg pada dolazi tijekom unošenja velike količine topline.

Sekundarni legirni elementi su krom, željezo, cirkonij, vanadij, bizmut, nikal i titan. Ovi legirni elementi se dodaju kako bi se poboljšala toplinska obradivost, čvrstoća, korozivna postojanost te ostala svojstva.[2]

2.3. Označavanje aluminijskih legura

Prema europskim normama koriste se sljedeći prefiksi [5]:

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

2.4.1. Označavanje gnječenih aluminijskih legura

Određene komercijalne legure imaju četveroznamenkastu oznaku prema međunarodnim specifikacijama za gnječene legure ili ISO alfa-numeričkom sustavu (HRN EN 573-1:2008).

Legure su grupirane prema glavnim legirnim elementima [1]:

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

Prva znamenka serije označava glavni legirni element dodan aluminijskoj leguri i koristi se za opisivanje serije, tj. serije 1000 ili 5000, itd. Druga znamenka predstavlja modifikaciju specifične legure unutar serije; tj. x1xx predstavlja prvu modifikaciju navedene legure, a x2xx predstavlja drugu modifikaciju. Treća i četvrta znamenka identificiraju leguru unutar određene serije i označavaju čistoću aluminijske legure. Ukratko, legura 5083 je u seriji legura 5000, nema modifikacija i određena je legura tipa 83. [1]

2.4.2. Označavanje lijevanih aluminijskih legura

Ljevačke aluminijske legure označavaju se prema europskoj normi HRN EN 1780-1:2008 i dijele na 11 podskupina [5]:

- AC 2 1 XXX – Al Cu,
- AC 4 1 XXX – Al SiMgTi,
- AC 4 2 XXX – Al Si7Mg,
- AC 4 3 XXX – Al Si10Mg,
- AC 4 4 XXX – Al Si,
- AC 4 5 XXX – Al Si5Cu,
- AC 4 6 XXX – Al Si9Cu,
- AC 4 7 XXX – Al Si(Cu),
- AC 4 8 XXX – Al SiCuNiMg,
- AC 5 1 XXX – Al Mg,
- AC 7 1 XXX – Al ZnMg.

Kao i kod označavanja gnječanih legura, prva znamenka serije označava glavni legirajući element, a druga i treća znamenka su proizvoljne i koriste se za označavanje određene legure u skupini. Četvrta znamenka označava je li legura za lijevanje gotovog oblika (0) ili za lijevanje ingota (1 ili 2 ovisno o čistoći) [2].

2.4. Oznake naknadne obrade aluminija

Aluminijske legure također mogu sadržavati oznaku temperiranja, koja definira dodane korake u obradi (ako se implementiraju). Na mehanička svojstva aluminijskih legura ne utječe samo kemijski sastav, već i stanje u kojem se nalaze, npr. žareno, hladno deformirano, precipitacijski očvršnuto. [1]

Oznake temperiranja su [1]:

- F - primarno isporučeno stanje. Oznaka se odnosi se na gnječene legure gdje nije primijenjena posebna kontrola nad uvjetima toplinskog procesa ili deformacijskog očvršćivanja,
- O - žareno stanje. Oznaka se odnosi na proizvod koji je zagrijan kako bi se postigao najniži uvjet čvrstoće i time povećala duktilnost,
- H – hladno deformirano. Oznaka se odnosi na proizvode koji su očvršnuti hladnom deformacijom. Obrada deformiranjem može biti popraćena dodatnom toplinskom obradom,
- W – homogenizacijski žareno. Nestabilno stanje i odnosi se samo na legure koje očvršćuju na sobnim temperaturama, nakon homogenizacije,
- T – toplinski obrađeno. Vršiti se s ciljem dobivanja stabilnog stanja (različitog od F, O ili H). Ponekad se primjenjuje u kombinaciji s deformacijskim očvršćivanjem.

Podoznake temperiranja. Prvi broj iza slova H označava osnovno stanje [Tablica 1].

Tablica 1. Podoznake za H – hladno deformirano[1]

| H oznaka | Značenje |
|-----------|--|
| H1 | Hladno deformirano |
| H2 | Hladno deformirano i djelomično žareno |
| H3 | Hladno deformirano i stabilizirano |
| H4 | Hladno deformirano i zaštićeno prevlakom |

Prvi broj iza slova T označava osnovno stanje [Tablica 2].

Tablica 2. Dodatne oznake za T – toplinski obrađeno [1]

| T oznaka | Značenje |
|----------|--|
| T1 | hlađeno s povišene temperature preoblikovanja i prirodno dozrijevano |
| T2 | hlađeno s povišene temperature preoblikovanja, hladno deformirano i prirodno dozrijevano |
| T3 | homogenizirano, hladno deformirano i prirodno dozrijevano |
| T4 | homogenizirano i prirodno dozrijevano |
| T5 | hlađeno s povišene temperature oblikovanja i umjetno dozrijevano |
| T6 | homogenizirano i umjetno dozrijevano |
| T7 | homogenizirano i stabilizirano |
| T8 | homogenizirano, hladno deformirano i umjetno dozrijevano |
| T9 | homogenizirano, umjetno dozrijevano i hladno deformirano |

2.5. Aluminijske legure pogodne za morsku primjenu

2.5.1. Serija 5xxx (Al-Mg legure)

Glavni legirni element aluminijskih legura iz serije 5xxx je magnezij (Mg), dok su dodatni legirni elementi mangan, krom i titan. Ove legure su među najvažnijim komercijalnim legurama koje ne očvršćuju precipitacijom ili starenjem. Iako su na propisanim radnim temperaturama stabilne i čvrste, njihova upotreba na visokim temperaturama je ograničena zbog rizika od taljenja. Glavna primjena ove serije legura je u uvjetima gdje je potrebna korozijska postojanost slična onoj kod čistog aluminijskog, ali uz povećane zahtjeve za čvrstoćom. Imaju široku primjenu u zrakoplovstvu, brodogradnji, prometu i industriji kovanih dijelova. Legure 5xxx imaju dobra zavarivačka svojstva, s učinkovitošću zavarivanja od 80-90 % u odnosu na čvrstoću postignutu žarenjem, što ih čini čestim izborom u konstrukcijama, posudama pod tlakom i kemijskim postrojenjima. [4]

2.5.2. Serija 6xxx (Al-Mg-Si legure)

Legure serije 6xxx su često korištene kao konstrukcijski materijali srednje čvrstoće, s najčešćom primjenom u brodogradnji, transportnim sredstvima i arhitektonskim konstrukcijama. Svojstva legura iz ove serije ovise o mikrostrukturi, a cilj je postići optimalnu mikrostrukturu koja zadovoljava zahtjeve za čvrstoćom i žilavošću, uz dodatna svojstva poput otpornosti na koroziju, pucanje i puzanje. Ove legure sadrže silicij i magnezij kao glavne legirne elemente, u omjeru Mg/Si od 1,73, što je potrebno za formiranje magnezij silicida (Mg_2Si). Legure često sadrže višak Si ili Mg, pri čemu višak Si povećava čvrstoću i smanjuje ekstrudabilnost, ali povećava rizik od interkristalne korozije. Međutim, višak Mg povećava otpornost na koroziju, ali smanjuje oblikovljivost i čvrstoću. Značajnu ulogu u primjeni ove serije legura ima njihova dobra oblikovljivost, koja omogućava izradu vrlo složenih oblika iz jednog komada. [4]

Legure skupine 6xxx očvršćuju na nekoliko načina: [4]

- jačanjem granica zrna
- precipitacijskim očvršćivanjem
- očvršćivanjem deformacijom.

3. ZAVARLJIVOST ALUMINIJA

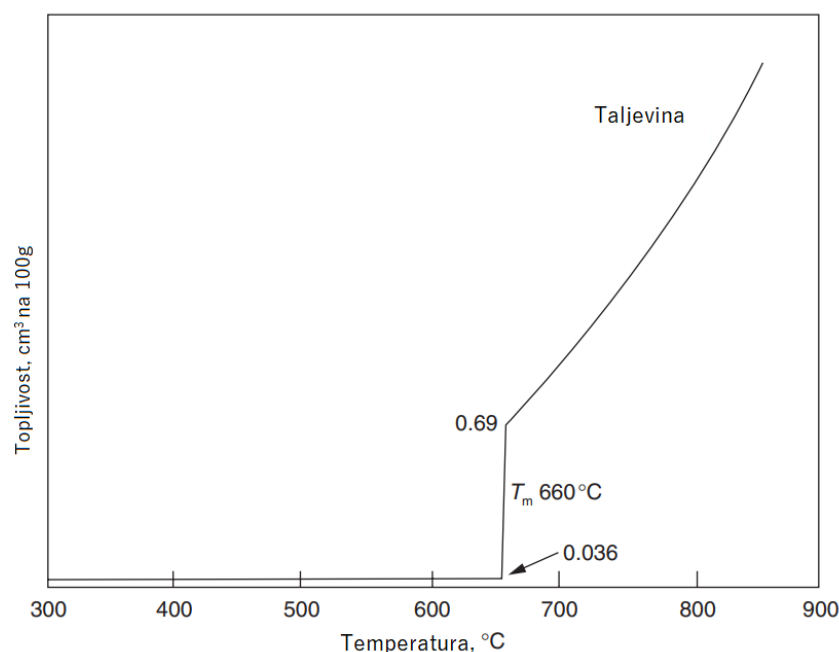
U idealnom zavaru, cijeli zavareni spoj, uključujući metal zavara, zonu utjecaja topline (ZUT) i okolni osnovni metal, trebao bi imati ista svojstva kao i osnovni metal. Međutim, postoji niz problema povezanih sa zavarivanjem aluminija i njegovih legura koji otežavaju postizanje tog stanja. Značajke i nedostaci koji mogu pridonijeti gubitku svojstava uključuju sljedeće [5]:

- poroznost
- oksidni sloj i uključci oksida,
- tople pukotine,
- smanjena čvrstoća u zavaru i ZUT-u,
- nepotpun provar, smanjena otpornost na koroziju,
- povećani električni otpor.

3.1. Poroznost aluminija i njegovih legura

Poroznost je problem koji se ograničava na metal zavara. Uzrok ove greške je plin otopljen u rastaljenom metalu zavara koji ostaje zarobljen zbog smanjenja topljivosti tijekom solidifikacije metala, stvarajući tako mjehuriće u skrutnutom metalu zavara. Smanjenje topljivosti vodika je izrazito izraženo, što otežava zavarivanje aluminija bez pojave poroznosti. Poroznost može varirati od izuzetno sitnih mikroporoziteta do pora promjera 3 do 4 mm. Pore u slučaju aluminija nastaju zbog vodika koji ima visoku topljivost u rastaljenom aluminiju, ali vrlo nisku topljivost u krutom stanju [5].

Slika 1 prikazuje smanjenje topljivosti vodika u aluminiju kako se odvija proces skrućivanja.



Slika 1. Topljivost vodika u aluminiju [5]

3.2. Aluminijev oksid

Aluminijev oksid Al_2O_3 je vrlo tvrd i brzo stvarajući oksid koji daje aluminiju izvrsnu korozijsku postojanost. Aluminijev oksid ima vrlo visoku točku taljenja koja iznosi $2060\text{ }^\circ\text{C}$ u usporedbi s aluminijem čija točka taljenja iznosi $660\text{ }^\circ\text{C}$. Zagrijavanje aluminija bez čišćenja oksidnog filma do točke njegovog taljenja rezultirat će rastaljenim aluminijem okruženim oksidnom membranom koja sprječava rastaljeni metal da se spaja s lokalnim osnovnim metalom. Oksidni film se mora ukloniti kako bi se mogao postići zavareni spoj željene kvalitete. [5]

3.3. Tople pukotine

Tople pukotine nastaju u metalu zavara na visokom temperaturama tijekom procesa skrućivanja. Dodatak legirnih elemenata u čisti aluminij uzrokuje promijene u temperaturi skrućivanja jer se skrućivanje tada odvija u većem rasponu temperatura. Tijekom skrućivanja dio taljevine će biti prisutan u inter-dendritskim područjima dok se metal zavara hladi i skuplja. Naprezanje uzrokovano skupljanjem tada uzrokuje pojavu pukotina u inter-dendritskim područjima. Sve aluminijske legure su osjetljive na tople pukotine i intenzitet nastanka ovisi o stupnju osjetljivosti. Osnovni način za sprječavanje pojave toplih pukotina u

zavarenim spojevima aluminijskih legura je upravljanje kemijskim sastavom metala zavara korištenjem odgovarajućeg dodatnog materijala.[2]

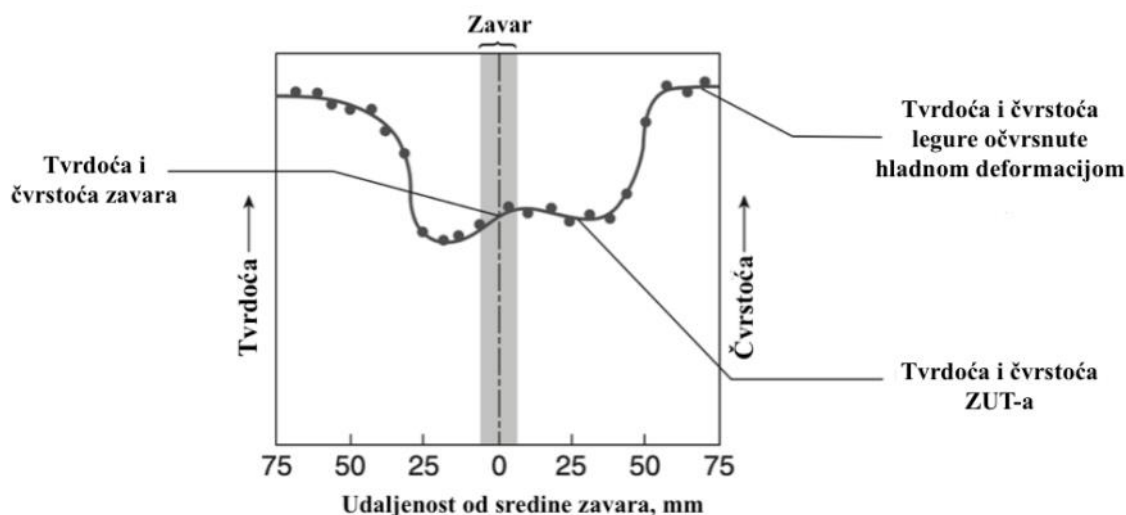
Na Slika 2 prikazana je topla pukotina nastala tijekom zavarivanja aluminijske legure.



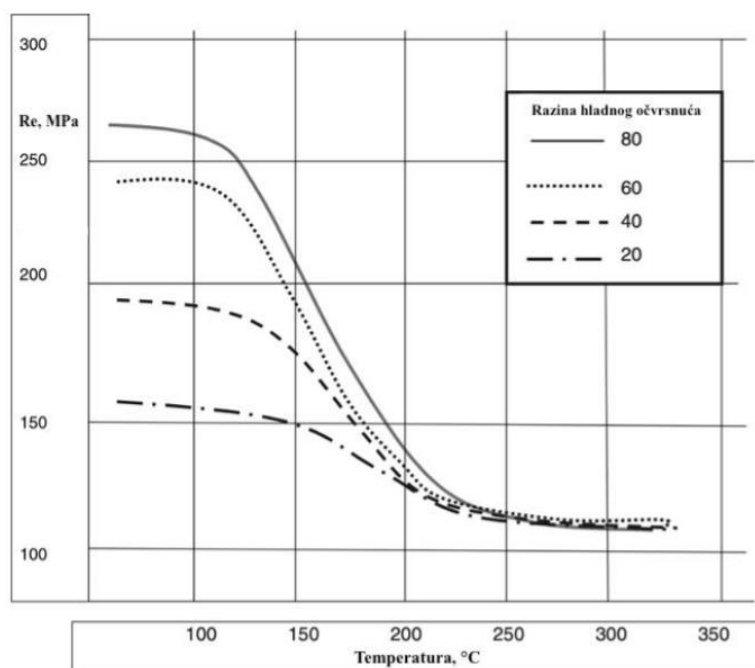
Slika 2. Prikaz tople pukotine nastale tijekom zavarivanja aluminijske legure [5]

3.4. Gubitak čvrstoće zavara u zoni utjecaja topline

Toplina unesena tijekom zavarivanja rezultira stvaranjem različitih zona zavarenog spoja. Razlikujemo osnovni materijal, zonu utjecaja topline i metal zavara. Budući da ZUT može proći više ciklusa zagrijavanja i hlađenja, svojstva ZUT-a mogu biti različita od nepromijenjenog osnovnog materijala. To se posebno odnosi na aluminijske legure koje su bile podvrgnute hladnom ili precipitacijskom očvršću u kojima je došlo do rekristalizacije (Slika 3). Rekristalizacija se počinje odvijati kada temperatura u ZUT-u prijeđe 200 °C te se punim opsegom odvija na temperaturama iznad 300 °C kao što je prikazano na Slika 4.[5]



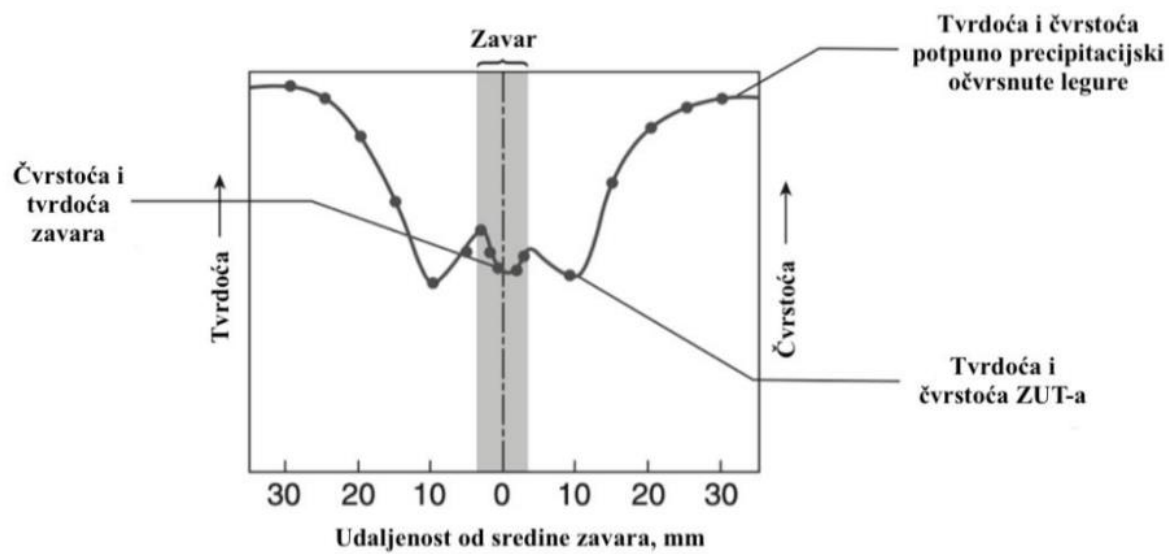
Slika 3. Utjecaj unosa topline na legure aluminija očvrsnute hladnom deformacijom [5]



Slika 4. Utjecaj temperature žarenja na granicu razvlačenja [5]

Smanjenje čvrstoće zbog većeg unosa topline može se primijetiti i u legurama koje se toplinski obrađuju. Rezultat većeg unosa topline je pogrubljenje zrna te samim time smanjenje čvrstoće zavarenog spoja. Međutim, nakon zavarivanja, legure se mogu dodatno ojačati postupcima toplinske obrade te se čvrstoća spoja može dovesti do razine čvrstoće osnovnog materijala. Nadalje, izbor odgovarajućeg dodatnog materijala može značajno doprinijeti većoj čvrstoći metala zavarava.[5]

Na Slika 5. prikazan je utjecaj unosa topline na precipitacijski očvrsnute legure

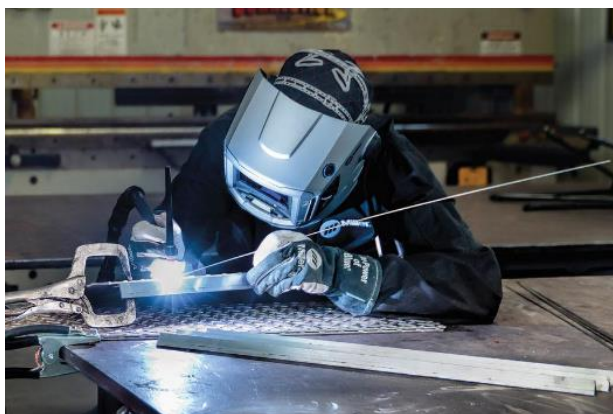


Slika 5. Utjecaj unosa topline na precipitacijski očvrsnute legure [5]

4. POSTUPCI POGODNI ZA ZAVARIVANJE ALUMINIJA U BRODOGRADNJI

Zbog male gustoće, visoke čvrstoće, velike krutosti i dobre korozijske postojanosti, brodovi izrađeni od aluminija su 15 do 20 % lakši od brodova izgrađenih od čelika ili stakloplastike. Visoka čvrstoća, korozijska postojanost i zavarljivost aluminijevih legura omogućuju izgradnju brodova s velikim zahtjevima za težinu. Uobičajeni postupci za zavarivanje aluminijskih legura su TIG (engl. Tungsten Inert Gas) i MIG. [6]

TIG postupak zavarivanja (Slika 6) je postupak elektrolučnog zavarivanja netaljivom volframovom elektrodom u zaštitnoj atmosferi inertnog plina. Elektroda za TIG zavarivanje izrađena je od volframa ili legura volframa. Elektroda se ne tali tijekom procesa zavarivanja, pa je lakše održavati konstantnu dužinu luka i proces zavarivanja je stabilan. Električni luk služi kao izvor topline, a ovisno o potrebi, zavarivač dodaje dodatni materijal u kupku rastaljenog metala. Tijekom zavarivanja, elektroda, zona električnog luka i rastaljeni metal su pod zaštitom inertnog plina koji ih štiti od lokalne atmosfere. Kao zaštitni plin najčešće se koriste argon (Ar) ili helij (He). Taljevina se lako kontrolira te se mogu napraviti provari korijena bez uporabe podloške. Električni luk je izrazito stabilan i pri niskoj struji zavarivanja što omogućuje zavarivanje tankih limova. Kvaliteta zavarenog spoja TIG postupkom je vrlo visoka. Pri TIG zavarivanju aluminijskih legura obično se koristi izmjenična struja. Zbog promjene polariteta struje, pri primjeni izmjenične struje mijenjaju se polovi, tj. naizmjenično se vrši razbijanje oksidnog sloja i zavarivanje te hlađenje elektrode. Brzina zavarivanja TIG postupkom manja je od brzine zavarivanja MIG postupkom te ima manji deposit dodatnog materijala što ga čini manje isplativim u pojedinim slučajevima.[5] [6]



Slika 6. Zavarivanje broskog poda TIG postupkom [5]

MIG postupak zavarivanja (Slika 7) ili drugi riječima elektrolučno zavarivanje taljivom elektrodom u zaštitnoj atmosferi inertnog plina široko je primjenjiv u slučaju zavarivanja tankih limova aluminijskih i aluminijevih legura. MIG postupak zavarivanja koristi žicu kao elektrodu i dodatni materijal, a prilikom zavarivanja, rastaljena metalna kupka, zaštićena je inertnim plinom. Budući da se koristi taljiva žica kao elektroda, može se koristiti visoka jakost struje, pa je brzina taljenja dodatnog materijala veća. Električni luk se uspostavlja kratkim spojem između žice i radnog komada, tj. priključaka na polove istosmjerne ili izmjenične struje. [6] [7]

MIG zavarivanje češće se izvodi istosmjernom strujom nego izmjeničnom no obje vrste struje imaju svoje područje primjene u MIG zavarivanju. Prilikom zavarivanja izmjeničnom strujom, elektroni periodično mijenjaju smjer svojeg toka. Kada elektroni mijenjaju smjer, mijenja se i njihova polaritet. Zavarivanje izmjeničnom strujom pogodno je za zavarivanje aluminijskih zbog oksidnog sloja na površini koji uzrokuje nejednako zagrijavanje metala. Prednosti MIG postupka su relativno velika produktivnost i učinkovitost, postizanje kvalitetnog zavarenog spoja, raznolikost modifikacija postupka te mogućnost automatizacije. [8]



Slika 7. Zavarivanje brodske oplate MIG postupkom [5]

5. MIG POSTUPAK ZAVARIVANJA

MIG postupak zavarivanja razvijen je u SAD-u, gdje je prvi put korišten 1948. godine, nakon čega je ubrz stiglo i u Europu. MIG postupak danas je vrlo primjenjiv u gotovo svim granama obrade metala, od zanatskih radnji do velikih industrijskih postrojenja. Prednost ovog visokoproduktivnog postupka je što može biti automatiziran ili robotiziran te velika proizvodnost i ekonomičnost. [10]

Na Slika 8. prikazan je postupak MIG zavarivanja.



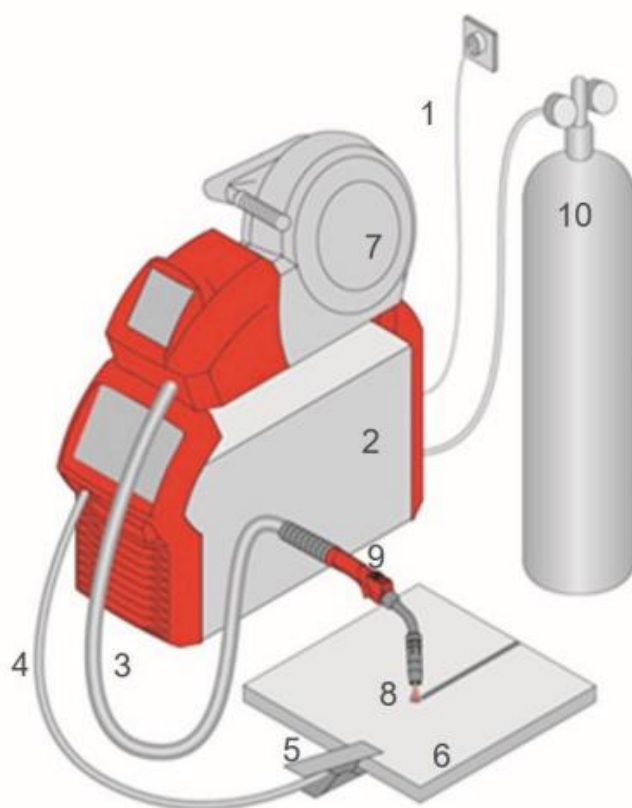
Slika 8. MIG zavarivanje [9]

MIG predstavlja postupak zavarivanja metala pomoću električnog luka, gdje se koristi žičana elektroda i zaštitni plin koji se pomoću zavarivačkog pištolja dovodi do mjesta zvara. Električni luk između žice i osnovnog metala stvara toplinu potrebnu za taljenje. Zaštitni plin štiti rastaljeni metal od štetnih atmosferskih plinova. Prilikom MIG zavarivanja najčešće se koriste izvori struje s konstantnim naponom, istosmjernom strujom, ali se mogu koristiti izvori struje s konstantnom strujom i izmjeničnom strujom. [9]

Na Slika 9. prikazana je oprema za MIG postupak zavarivanja. Brojevi redom označavaju sljedeće: [12]

1. Priključak na električnu mrežu
2. Izvor struje

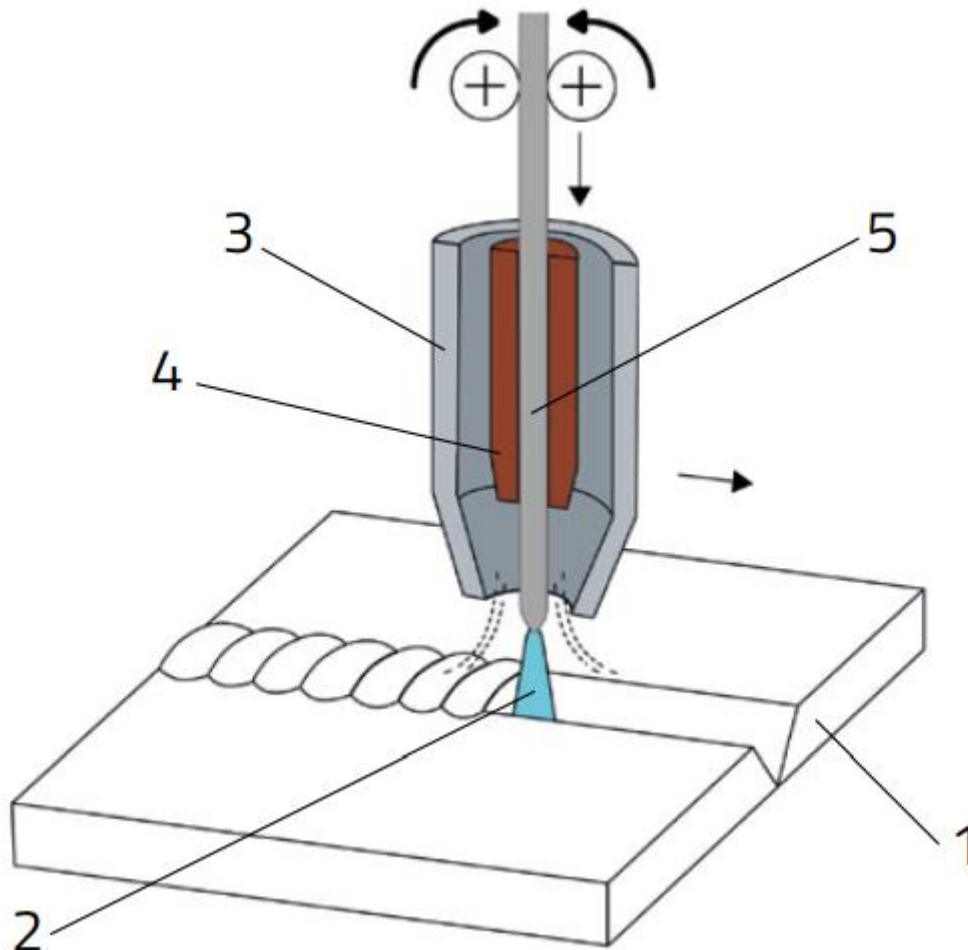
3. Polikabel
4. Strujni kabel
5. Priključak mase
6. Radni komad
7. Dodatni materijal za zavarivanje
8. Električni luk
9. Pištolj za zavarivanje
10. Boca s zaštitnim plinom



Slika 9. Oprema za MIG zavarivanje [12]

Tijekom zavarivanja (Slika 10), dodatni materijal (žica) koja je ujedno i elektroda (5) se dovodi s koluta s pomoću sustava za dovod žice na mjesto zavarivanja, električki kontakt se ostvaruje preko kontaktnih vodilica (4). Električki luk (2) se uspostavlja između vrha elektrode i osnovnog metala (1). Zaštitni plin prolazi kroz plinsku sapnicu (3), koja koncentrično obuhvaća elektrodu (žicu). Električni luk i metal zavara tako su zaštićeni od atmosferskih plinova. Osim svoje zaštitne funkcije, zaštitni plin ima i druge uloge, on određuje sastav zaštitne atmosfere električnog luka, utječe na njegovu električnu vodljivost, a

samim time i na zavarivačke karakteristike. Osim toga, zaštitni plin utječe na kemijski sastav zavara. [10]



Slika 10. Osnovni princip MIG zavarivanja [10]

5.1. Parametri MIG zavarivanja aluminija

Postupak MIG zavarivanja je produktivna i visokokvalitetna metoda zavarivanja legura aluminija. Iako sam postupak izgleda jednostavno, tijekom procesa zavarivanja postoje mnogi problemi koje treba prevladati kako bi se dobio zavareni spoj visoke kvalitete, samim time potrebno je razumijevanje materijala i procesa zavarivanja. Određivanje parametara poput struje (A), napona (V), vrste i protoka zaštitnog plina (l/min), brzine zavarivanja (mm/s) i promjera žice (mm) značajno utječe na sam proces zavarivanja, a time i na kvalitetu zavarenog spoja. [13]

5.1.1. Brzina zavarivanja

Brzina zavarivanja, bilo visoka ili niska, može značajno utjecati na mehanička i fizikalna svojstva zavarenog spoja. Niska brzina zavarivanja značajno utječe na vlačnu čvrstoću zbog prekomjernog unosa topline. Viša brzina zavarivanja utječe na formiranje poroznosti koja se javlja u zavaru te također može doći do naljepljivanja. [13]

5.1.2. Zaštitni plin

Zaštitni plinovi koji se koriste u MIG zavarivanju aluminijskih legura su argon i helij te njihove mješavine. Aktivni plinovi poput kisika ili dušika čak i u malim količinama mogu uzrokovati poroznost i pojavu čađe. Najčešće korišteni plin je argon koji se koristi za ručno i automatizirano zavarivanje. Bitno je jeftiniji od helija i doprinosi uravnoteženom i stabilnom električnom luku, dajući širok i glatki zavareni spoj. Međutim, argon ima nižu toplinsku vodljivost od helija te stoga postoji rizik od naljepljivanja i poroznosti na većim debljinama radnog komada. Argon također može ostaviti čađu na površini zavara, međutim ona se lako uklanja mehaničkim čišćenjem površine. Helij povećava napon luka za čak 20 % u usporedbi s argonom, rezultirajući stvaranjem električnog luka s višom temperaturom, većom penetracijom i širim metalom zavara. Širi zavareni spoj zahtjeva manje kritično pozicioniranje luka i pomaže u izbjegavanju zajeda na rubovima i nedovoljne penetracije. Toplija, sporije hlađena zavarena kupka također omogućuje difuziju vodika iz rastopljenog metala zavara, što ovaj plin čini pogodnijim za smanjenje poroznosti u zavarenom spoju. Veći unos topline također omogućuje postizanje većih brzina zavarivanja, čak tri puta većih nego kada se koristi argon kao zaštitni plin. Međutim, helij je skuplji i daje manje stabilan električni luk od argona. Stoga se čisti helij najviše koristi u automatiziranom ili robotiziranom zavarivanju. Zaštitni plinovi moraju imati minimalnu čistoću od 99,998 % i nisku razine vlage, idealno s točkom rosišta manjom od -50 °C. [5]

Količina zaštitnog plina se određuje prema promjeru žice, položaju zavarivanja i vrsti spoja. Orijehtacijski, da bi se postigla optimalna potrošnja ona treba iznositi iskustveno 10-15 x promjer žice. [14]

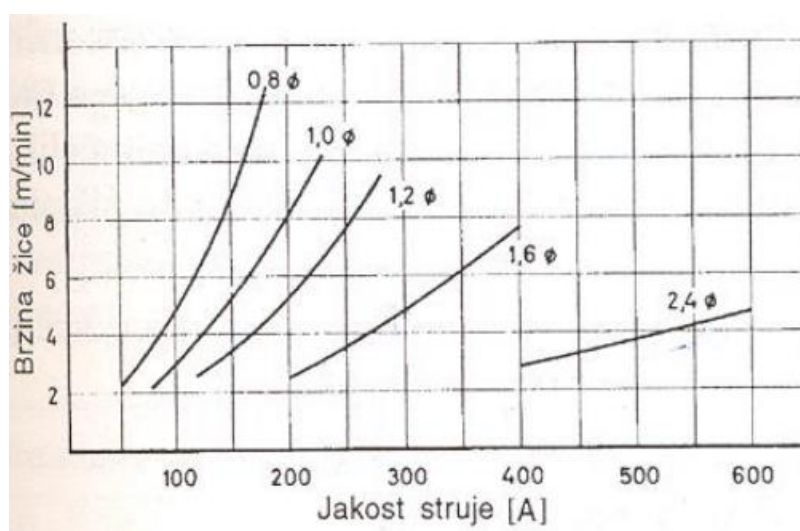
5.1.3. Promjer žice i jakost struje

Žica ima ulogu kao dodatni materijal i kao elektroda u električnom luku. Promjeri žice za zavarivanje variraju od 0,8 mm do 3,2 mm. Žice trebaju biti skladištene u čistim, suhim uvjetima i zatvorenom pakiranju ako je moguće. Žice koje su bile skladištene u dužem

razdoblju, npr. 6 mjeseci ili više, čak i kada su skladištene u originalnom pakiranju, mogu uzrokovati poroznost. Moguće je ugraditi uređaje za čišćenje žice koji se pričvršćuju na žicu na mjestu ulaska u kabel za dovod žice. [5]

Povećavanjem jakosti struje povećava se penetracija i količina taljenja žice. Jakost struje zavarivanja ovisi o debljini materijala koji se zavaruje i položaju zavarivanja. Podešavanje jakosti struje vrši se odabiranjem brzine dovođenja žice. Što je veća brzina žice, bit će veća i jakost struje zavarivanja. [14]

Na Sliku 11 prikazana je ovisnost jakosti struje zavarivanja o brzini dovođenja žice



Slika 11 Ovisnost jakosti struje zavarivanja o brzini dovođenja žice[14]

5.1.4. Dodatni materijali

Izbor dodatnog materijala ovisi o nekoliko faktora, uključujući sljedeće [11]:

- kompatibilnost s kemijskim sastavom osnovnog materijala, primjerice sklonost pucanju zavara,
- mehanička svojstva koja se zahtijevaju od spoja (uzimajući u obzir i ZUT i svojstva metala zavara),
- naknadna obrada mjesta zavarivanja ili konstrukcije, poput površinske obrade, eloksiranja i dekorativne završne obrade,
- otpornost na koroziju koja se zahtijeva od spoja,
- optimalna zavarljivost.

Legure s visokim sadržajem magnezija poput legure EN AW 5083 koriste kao dodatni materijal legure 5356, 5183 i 5556 jer pružaju najveću čvrstoću zavara i financijski su

isplative. Međutim, za zavarivanje legure 6061 treba koristiti legure s visokim sadržajem silicija (4043 ili 4047). [11]

U Tablica 3 dan je prikaz preporučenih dodatnih materijala za zavarivanje aluminijskih legura

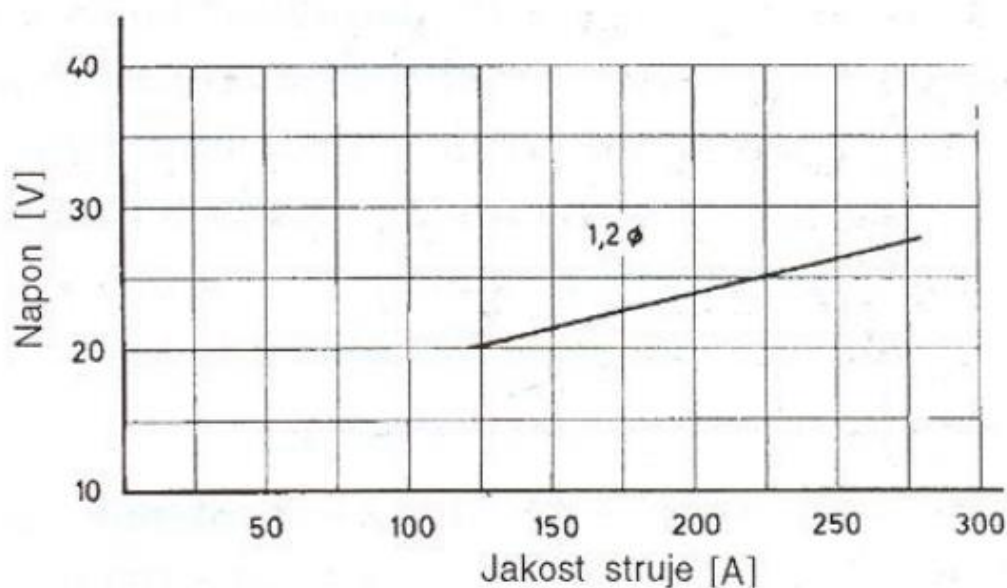
Tablica 3. Preporučeni dodatni materijal za zavarivanje aluminijskih legura [11]

| | | | | | | | |
|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|--------------|----------------------|-------------|----------------------|
| | 356.0 | 6061 | 5154 | 5083 | 5052 | 2219 | 1100 1350 |
| 1100 1350 | 4043 | 4043 | 5356 | 5356 | 4043 | 4145 | 1100 |
| 2219 | 4145 4043 | 4043 | 4043 | 4043 | 4043 | 2319 | |
| 5052 | 4043 | 5653 | 5654 5183 5356 | 5356 5183 | 5654 5183 5356 | | |
| 5083 | 5356 5183 4043 | 5356 5183 | 5356 5183 | 5183 5356 | | | |
| 5154 | 4043 4047 5356 | 5356 5183 4043 | 5654 5356 5183 | | | | |
| 6061 | 4043 4047 | 4043 5356 | | | | | |
| 356.0 | 4043 4047 | | | | | | |

5.1.5. Napon električnog luka

Napon električnog luka utječe na penetraciju i širinu zavara. Povećanjem napona smanjuje se penetracija, a povećava širina zavara. Pri manjem naponu manje je prskanje za vrijeme zavarivanja, a izgled zavara je bolji. Za određenu jakost struje i promjer žice mogu se koristiti različiti naponi električnog luka. Napon luka direktno ovisi o duljini luka, čim je duljina luka veća, veći je i napon. Prekomjernim povećanjem napona (povećanjem duljine luka) smanjuje se zaštita rastaljenog metala od utjecaja plinova iz zraka i pogoršavaju se mehaničke karakteristike zavarenog spoja. Sa stajališta mehaničkih karakteristika, za određenu jakost struje treba odabrati najniži napon luka. Treba voditi računa o tome da nizak napon električnog luka daje uži zavar, veće nadvišenje i lošiji izgled zavara. Ako je jakost struje zavarivanja jednaka, za manje promjere žice koriste se veći napon električnog luka.[14]

Na Slika 12. prikazana je ovisnost jakosti struje i napona električnog luka pri zavarivanju žicom promjera 1,2 mm.



Slika 12. Ovisnost jakosti struje i napona luka pri zavarivanju žicom promjera 1,2 mm [14]

5.1.6. Položaj elektrode i radnog komada

Kut pod kojim je pištolj za zavarivanje postavljen prema radnom komadu je važan jer nepravilan kut može rezultirati unošenjem zraka u zaštitni plin i također utjecati na penetraciju. Idealno, pištolj bi trebao biti usmjeren prema smjeru kretanja pod kutom između 10° i 15° u odnosu na vertikalnu liniju. Kako se taj kut povećava, penetracija se smanjuje, a raste ulazak nečistoća u metal zavara. [14]

Visina električnog luka ne može se postaviti prilagođavanjem napona jer je to funkcija otpora cijelog kruga. Visina luka postavlja se od strane zavarivača oslanjajući se na vid i zvuk, pri čemu se ispravna dužina luka karakterizira mekim pucketavim zvukom. Prekratki luk zvuči grubo i rezultira prekomjernim prskanjem, a dugi luk ima zujajući zvuk. [5]

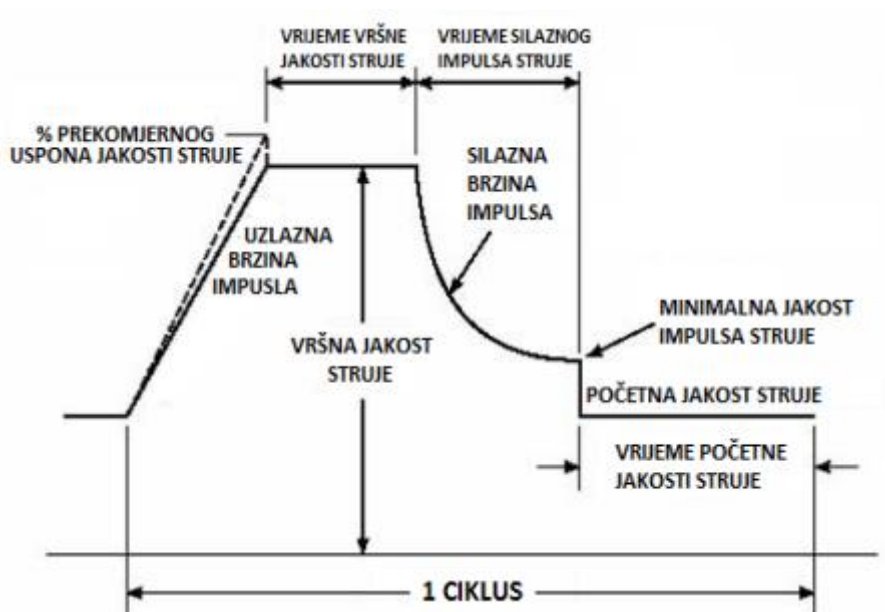
Duljina slobodnog kraja žice iznosi iskustveno 12-15 x promjer žice. Značajnija odstupanja od te veličine dovodi do promjene odnosa napona i struje zavarivanja. Što je slobodni kraj žice veći, povećava se električni otpor i žica se više zagrijava. [14]

5.2. MIG-P postupak zavarivanja

Impulsno MIG zavarivanje (engl. Pulsed Metal Inert Gas), kontrolirani je prijenos metala štrcajućim lukom. Prilikom ovog procesa, izmjenjuju se dvije vrijednosti istosmjerne struje: maksimalna (vršna) i minimalna (bazna/osnovna). Za razliku od tradicionalnog MIG postupka s kratkim spojem, dodatni materijal se prenosi sa žice u talinu zavara bez kontakta žice s

rastaljenom kupkom. Struja se mijenja između visoke vršne struje i niske osnovne struje frekvencijom do nekoliko stotina puta u sekundi. Sa svakim pulsom, vršna struja odvoji rastaljenu kapljicu sa žice i usmjerava je prema zavarenom spoju, dok osnovna struja održava luk na dovoljno niskoj razini energije kako bi se spriječio kratki spoj. [17]

Na Sliku 13. je dan prikaz faza električnog impulsa u prijenosu kapljice metala impulsnim prijenosom metala.



Slika 13. Prikaz faza električnog impulsa u prijenosu kapljice metala impulsnim električnim lukom

Glavne karakteristike [15]

- Jakost struje: 80 - 500 A ; napon: 13 - 30 V
- Promjeri žica: 0,8 mm do 2,4 mm
- Preporučeno korištenje inertnog zaštitnog plina (Argon)
- Konstantna visina električnog luka uz minimalno štrcanje
- Prikladan za robotizaciju i automatizaciju
- Prikladan za sve položaje zavarivanja – ovisno o parametrima
- Spajanje radnih komada debljina: 1,0 mm i više
- Niži unos topline - minimalna deformacija
- Smanjeno prskanje: prskanje je značajno smanjeno ili čak eliminirano
- Estetski bolji izgled zavari
- Veći depozit dodatnog materijala

- Bolja kontrola taline zavara
- Smanjena količina dima pri zavarivanju

Aluminij izuzetno dobro provodi toplinu (što znači da se toplina brzo odvodi u zonu utjecaja topline) s relativno niskom točkom taljenja. MIG-P postupak omogućava znatno veću kontrolu unosa topline, pružajući dovoljan unos topline za uspješno taljenje materijala, a istovremeno izbjegavajući deformacije ili prekomjerno taljenje metala. [17]

5.3. CMT – postupak zavarivanje

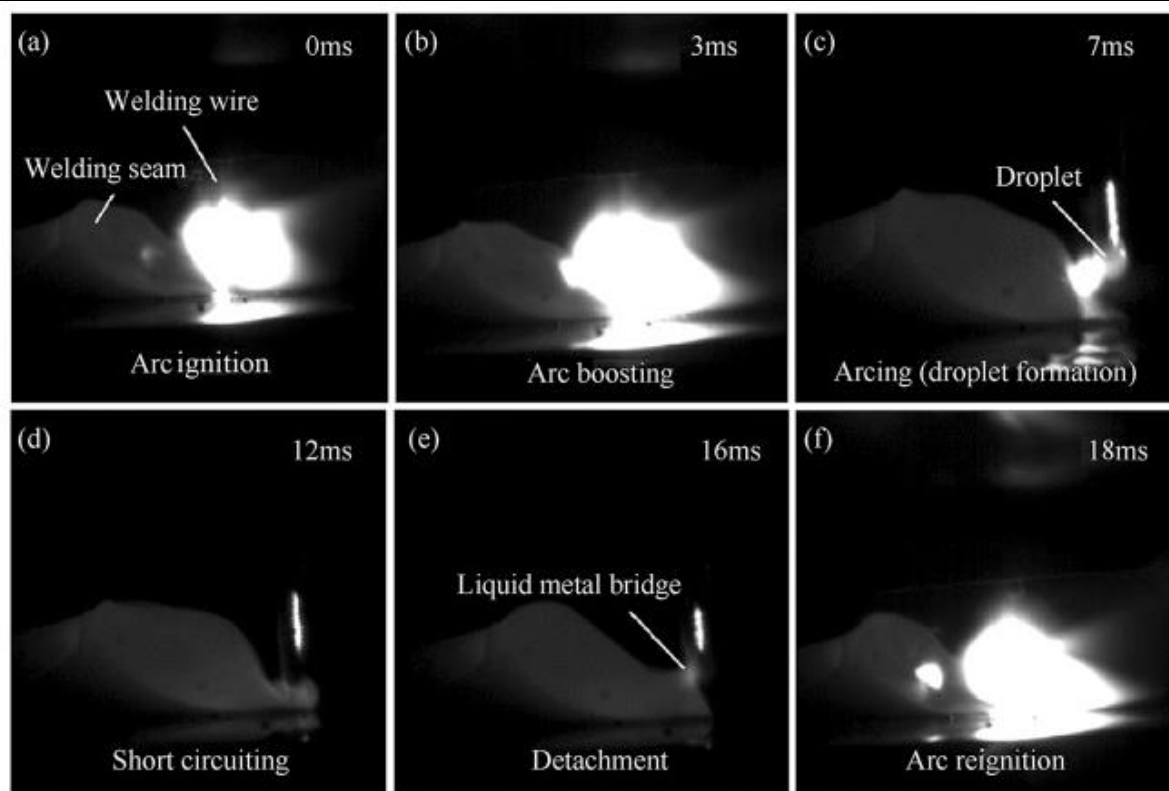
CMT (engl. Cold Metal Transfer) postupak zavarivanja je modificirani MIG postupak zavarivanja temeljen na procesu prijenosa kratkim spojem, koji je razvila tvrtka Fronius iz Austrije 2004. godine. Ovaj se postupak razlikuje od MIG/MAG postupka zavarivanja po mehanizmu odvajanja kapljica dodatnog materijala. CMT postupak omogućuje kontrolirani prijenos dodatnog materijala i nizak unos topline korištenjem sustava za dodavanje žice u kombinaciji s sustavom kontrole koji je digitaliziran. Brzina dodavanja žice i faza električnog luka kontroliraju se kako bi se osigurala dovoljna energija za taljenje osnovnog i dodatnog materijala. [16]

Dvije su glavne značajke CMT postupka:

- Trenutak kratkog spoja s niskom strujom koja odgovara niskom unosu topline,
- Stabilno i kontrolirano odvijanje kratkog spoja.

Proces se naziva "mehanički potpomognuto deponiranje kapljica" jer se u procesu kontrolira trenutak kratkog spoja povlačenjem žice iz kratkog spoja. Način odvajanja kapljica u CMT postupku ne koristi elektromagnetsku silu kao u konvencionalnom MIG/MAG postupku, pa se smanjuje prskanje. CMT postupak je posebno prikladan za zavarivanje manjih debljina radnog komada od aluminijskih legura zbog niskog unosa topline te minimalne deformacije.

U CMT postupku, kada vrh žice dođe u kontakt s talinom metala zavara, servomotor žice dobiva signal za povlačenje. Povlačenje žice, potpomaže prijenos kapljice, što je prikazano na Slika 14. Tijekom prijenosa metala, struja pada gotovo na nulu čime se izbjegava prskanje. Čim je prijenos metala završen, električni luk se ponovno pali i žica se ponovno izvlači naprijed uz ponovno uspostavljanje postavljene struje zavarivanja. [16]

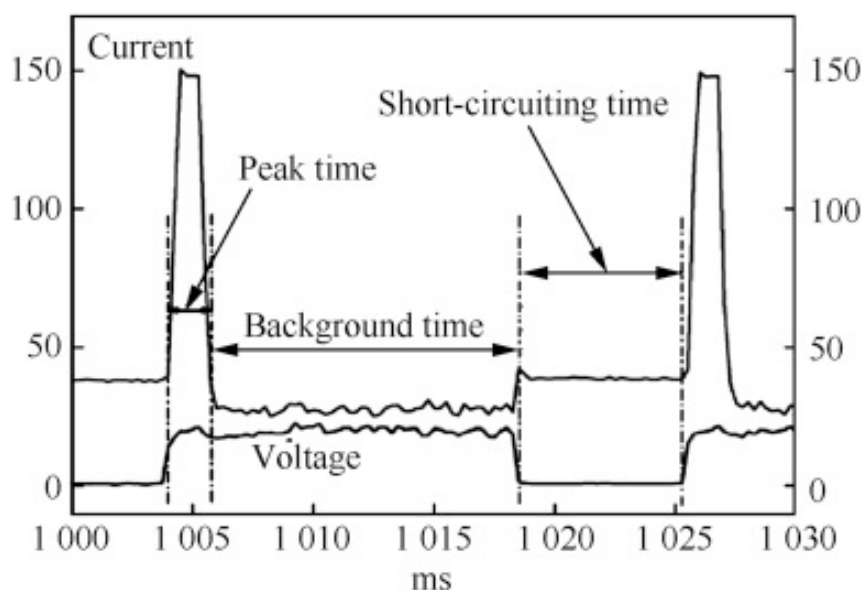


Slika 14. Prikaz faza električnog impulsa u prijenosu kapljice metala impulsnim električnim[16]

Tipičan električni signalni ciklus CMT zavarivanja može se definirati kao razdoblje potrebno za deponiranje kapljice rastaljene elektrode u kupci za zavarivanje. Analiza valnog oblika struje i napona ključna je za proučavanje raspodjele energije u različitim fazama procesa prijenosa kapljica. Ciklus je podijeljen u tri faze kako slijedi: [16]

1. Faza vršne struje: Ovo je faza konstantnog napona luka koja odgovara visokom impulsu struje što omogućuje lako paljenje luka za zavarivanje i zatim zagrijava vrh žice kako bi se formirala kapljica.
2. Faza osnovne struje: Ova faza odgovara nižoj struji. Struja se smanjuje kako bi se spriječio globularni prijenos kapljice formirane na vrhu žice. Ova faza traje sve dok ne dođe do kratkog spoja.
3. Faza kratkog spoja: U ovoj fazi napon luka pada na nulu. Istovremeno, povratni signal se šalje sustavu za dovod žice što dovodi do povratnog gibanja žice. Ova faza pomaže u prijelomu tekućine i prijenosu metala u rastaljeni metal zavara.

Valni oblik struje prikazan je na Slika 15.



Slika 15. Valni oblik struje u CMT postupku[16]

5.4. AC MIG-P postupak zavarivanja

MIG postupak zavarivanja jedan je od najčešće korištenih postupaka za spajanje legura aluminija. Razvoj MIG postupaka usmjeren je na povećanje količine deponiranog materijala uz smanjen unos topline u osnovni materijal, smanjenje zone utjecaja topline (ZUT) i smanjenje prskanja. Veći unos topline i ponavljanje toplinskih ciklusa kroz unos topline znatno pogoršavaju čvrstoću i negativno utječu na potrebna svojstva zavarenog spoja. U posljednjih nekoliko godina, AC MIG (eng. Alternating Current Metal Inert Gas) postupak zavarivanja, kao napredna varijanta konvencionalnog MIG zavarivanja, postao je popularan kao relativno novi postupak zavarivanja zahvaljujući svojim posebnim karakteristikama. [18]

AC MIG zavarivanje kombinira dvije ključne značajke:

- Velika količina depozita: omogućava brže zavarivanje uz manji unos topline, što smanjuje toplinske deformacije na tankim materijalima,
- Veća kontrola penetracije: povećava kvalitetu zavara, omogućavajući bolje prodiranje u materijal bez pregrijavanja.

Kod AC MIG zavarivanja smanjuje se unos topline, što je posebno važno kod zavarivanja materijala osjetljivih na veći unos toplinu, kao što je aluminij. Osim toga, smanjuje stvaranje oksidnih slojeva i dima, što rezultira čistim i estetski boljim zavarom.[21]

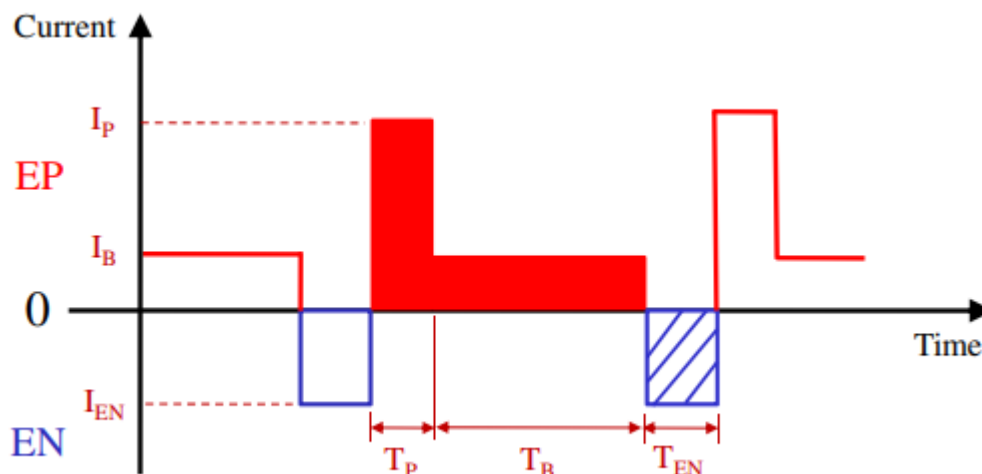
5.4.1. Uloga polariteta u AC MIG-P postupku zavarivanja

AC-MIG-P postupak obuhvaća dva različita dijela pulsa. Polaritet se klasificira na DCEP (engl. Direct Current Electrode Positive) pozitivnu elektrodu s istosmjernom strujom, i DCEN (engl. Direct Current Electrode Negative) negativnu elektrodu s istosmjernom strujom i izmjeničnu struju AC (engl. Alternating current) pri kojoj se DCEP i DCEN izmjenjuju. AC-MIG-P karakterizira manji nastanak deformacija, smanjeni unos topline te veća količina deponiranog materijala za isti unos topline u usporedbi s DC-MIG (Direct Current Metal Inert Gas) postupkom. Budući da je to postupak s niskim unosom topline, materijali osjetljivi na veći unos topline, poput aluminija, imat će bolje mehaničke karakteristike u zoni utjecaja topline. [18]

Veliki izazov tijekom početne faze razvoja postupka bilo je prevladavanje problema prelaska s elektrode pozitivne DCEP na elektrodu negativnu DCEN fazu. To je zato što tijekom prijelaza kroz nulu, plazma luka se gasi i treba je ponovno uspostaviti. Ako se DCEP polaritet koristi u MIG zavarivanju, penetracija u osnovni metal je veća i luk je stabilniji. Stoga se DCEP polaritet koristi u MIG postupku za postizanje stabilnog luka. Nadalje, DCEP ima efekt čišćenja, koji uklanja oksidni film s površine prilikom zavarivanja aluminijske legure. Ako se DCEN polaritet koristi u MIG-u, penetracija u osnovni metal se smanjuje uz visoku brzinu taljenja žice, a luk postaje manje stabilan. DCEN se odabire kako bi se osigurao stabilan luk i postigla potpuna penetracija. Kod izmjenične struje, može se postići dobra penetracija i efekt čišćenja oksida.. U ovom procesu, stabilnost luka u DCEP fazi je kombinirana s visokim stupnjem taljenja u DCEN fazi kako bi se izbjeglo prekomjerna penetracija. [19] [20]

5.4.2. EN omjer i njegov utjecaj na geometriju zavara

AC MIG-P je postupak kojim se mogu istovremeno dobiti pozitivni učinci DCEP-a i DCEN-a. Slika 16 prikazuje valni oblik struje za AC MIG postupak zavarivanja, koji je izražen EN omjerom. EN omjer definira se kao omjer između površine struje EN polariteta i ukupne površine struje jednog ciklusa.



Slika 16. Valni oblik struje za AC MIG postupak zavarivanja

Jednadžba omjera EN prikazana je u jednadžbi (1).

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

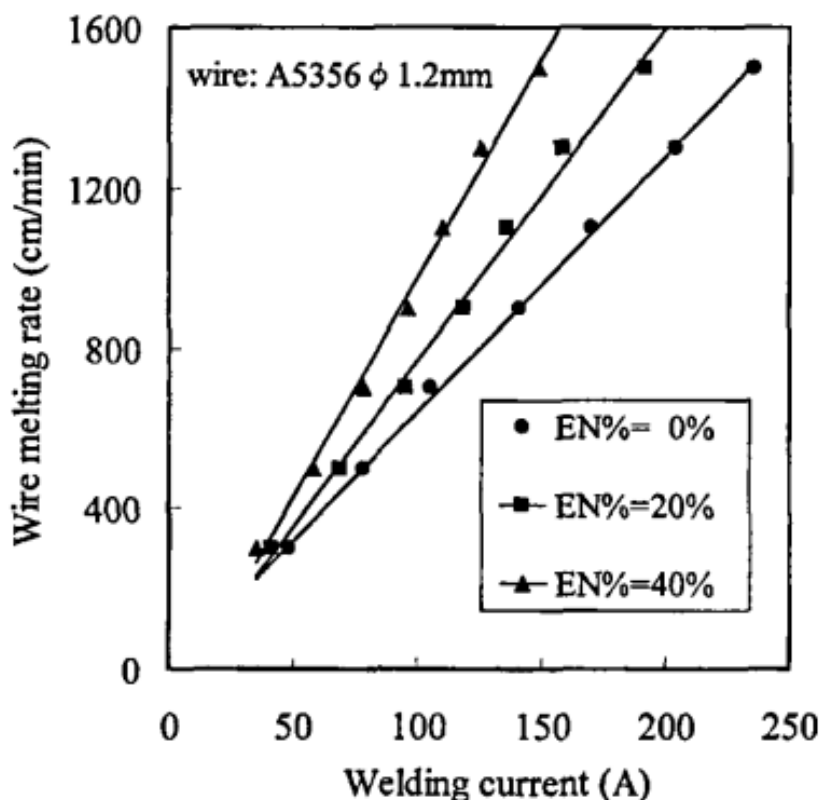
EN omjer definira se kao udio ukupnog vremena ciklusa u kojem je struja negativna, značajno utječe na prijenos metala i intenzitet taljenja. Veći EN omjer ima tendenciju smanjenja prskanja i poboljšanja izgleda zavara, ali uz manji unos topline, što utječe na penetraciju. Optimizacija EN omjera stoga je ključna za prilagođavanje AC MIG-P postupka specifičnim tehnološkim zahtjevima, osiguravajući ravnotežu između penetracije, smanjenja prskanja i ukupne kvalitete zavara.

Tijekom procesa zavarivanja, odabir parametara valnog oblika izravno utječe na izvedbu zavara. EN omjer obično se mijenja kako bi se kontrolirao unos topline u radni komad. Veći EN omjer rezultira duljim vremenskim ciklusom u kojem je struja negativna, što smanjuje ukupni unos topline. Ovo smanjenje unosa topline može dovesti do manje deformacije i manjih zaostalih naprezanja te bolje kontrole taline zavara, ali može zahtijevati prilagodbe brzine zavarivanja i brzine dovođenja žice.

Vrsta materijala koji se zavaruje može određivati EN omjer. Na primjer, aluminij, koji ima visoku toplinsku vodljivost, može imati koristi od većeg EN omjera kako bi se spriječio prekomjeren unos topline. [22]

5.4.2.1. Utjecaj EN polariteta na brzinu taljenja žice

Slika 17 prikazuje odnos između brzine taljenja žice i EN omjera u AC MIG-P zavarivanju. Kada je srednja struja zavarivanja ista, povećavanjem EN omjera, brzina taljenja žice se povećava. Pri srednjoj struji zavarivanja od 150 A, brzina taljenja žice s EN omjerom od 40 % je 60 % veća od one s EN omjerom od 0 % . [23]

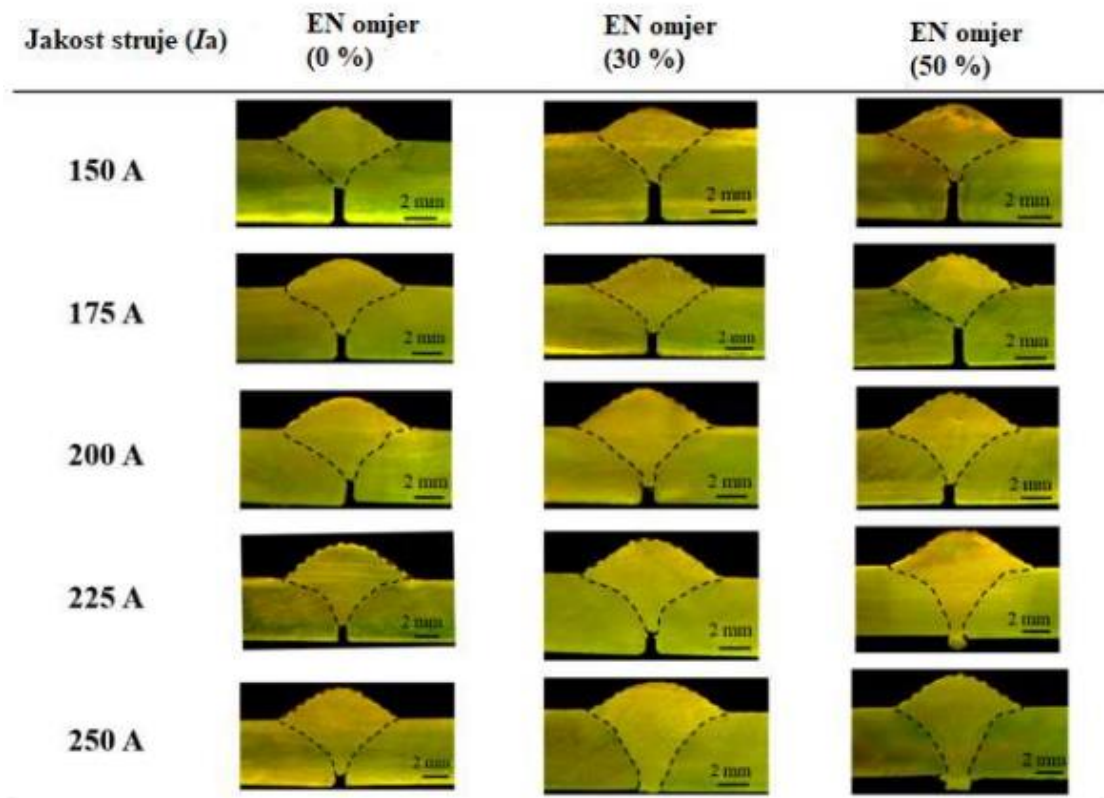


Slika 17. Odnos između omjera EN i brzine taljenja žice[23]

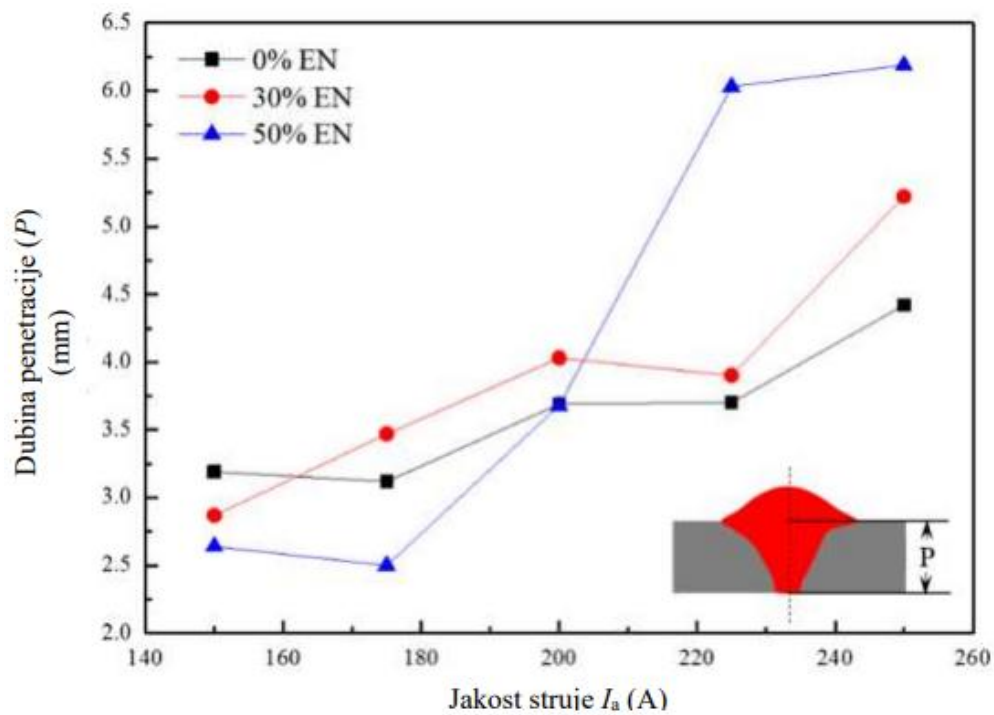
5.4.2.2. Utjecaj EN polariteta na dubinu penetracije

Balans polariteta ima značajan utjecaj na dubinu penetracije tijekom AC MIG zavarivanja. Pri zavarivanju nižim jakostima struje i istovremenim povećavanjem EN omjera, dolazi do smanjenje dubine penetracije. Usporedba dubine penetracije pri EN omjeru od 50 % s dubinom penetracije pri EN omjerima od 0 % i 30 % pokazuje da se dubina penetracije smanjuje za različite vrijednosti struje zavarivanja Slika 18.

Međutim, pri višim vrijednostima jakosti struje i povećanjem EN omjera, dolazi do povećanja dubine penetracije. Ovo povećanje penetracije je rezultat intenzivnih mlazova plazme koji se generiraju duž osi zavara. Veća dubina penetracije pri višim jakostima struje i EN omjerima omogućuje zavarivanje debljih materijala. Dijagram na Slika 19. prikazuje odnos između balansa, jakosti struje i dubine penetracije. [18]



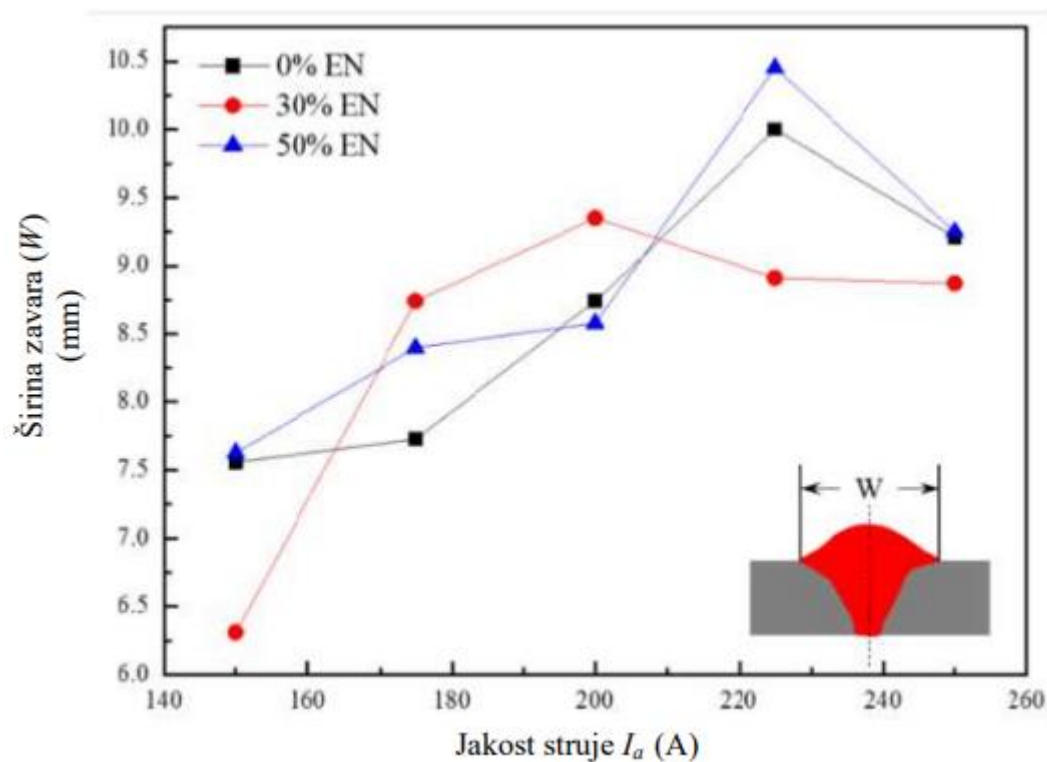
Slika 18. Utjecaj balansa na dubinu penetracije [18]



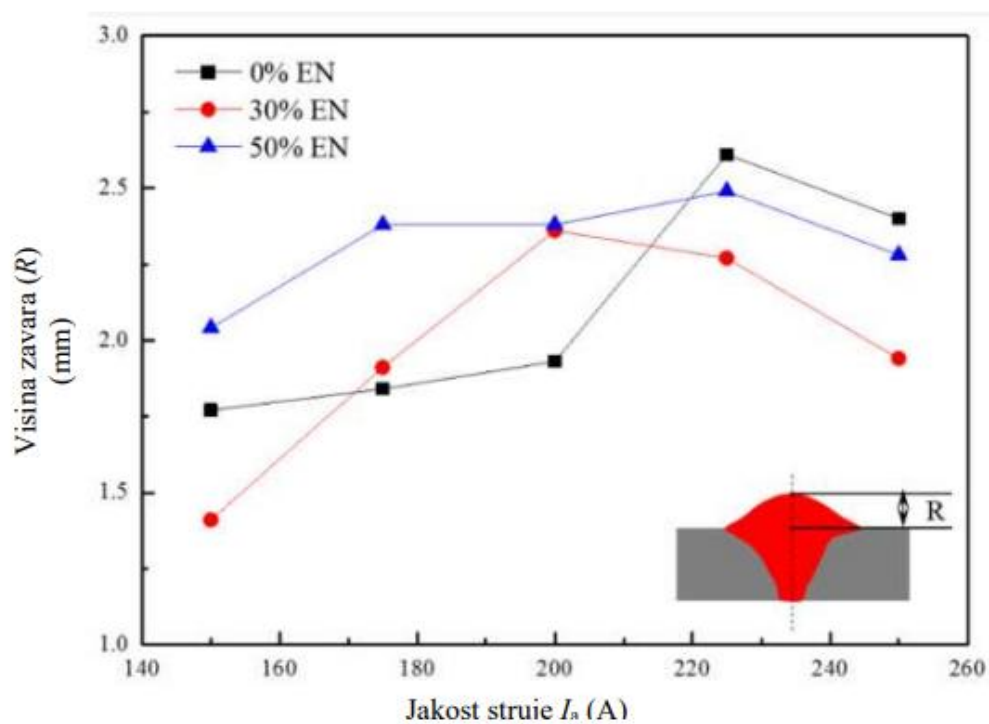
Slika 19. Utjecaj balansa i jakosti struje na dubinu penetracije [20]

Balans ne utječe samo na dubinu penetracije, već i na širinu i nadvišenje zavora. Na Slika 20.i

Slika 21. prikazan je utjecaj balansa na ove geometriju zavora.



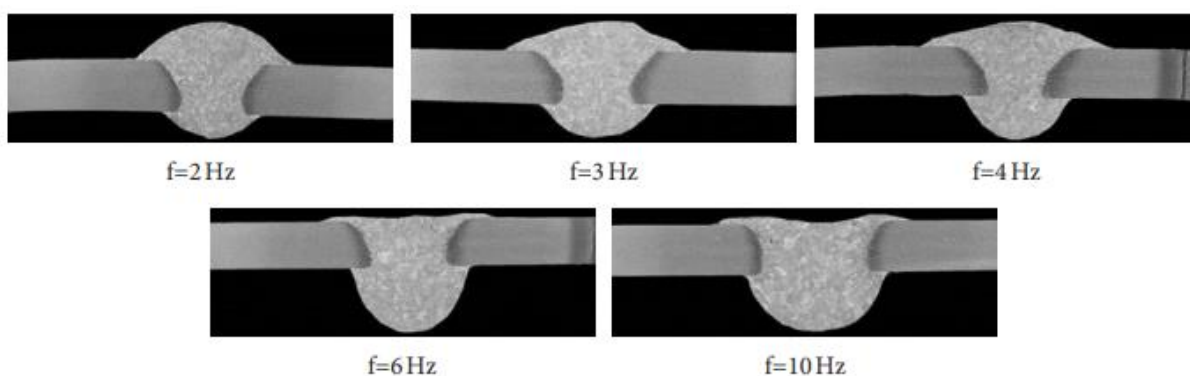
Slika 20. Utjecaj balansa na širinu zavora [18]



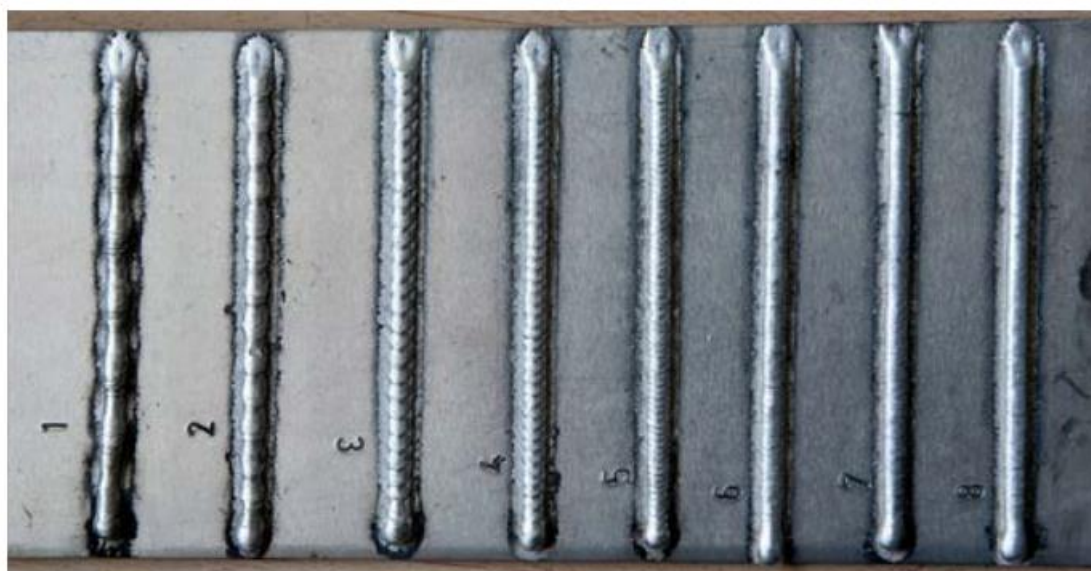
Slika 21. Utjecaj balansa na nadvišenje zavora [18]

5.4.3. Utjecaj frekvencije na geometriju zavora

Jedan od ključnih parametara koji utječu na kvalitetu i oblik zavora kod AC MIG zavarivanja je frekvencija. Frekvencija određuje broj impulsa koji se događaju u jednoj sekundi (na primjer, 1 Hz znači jedan impuls u sekundi). Tako je za frekvenciju iznosa dva Hz impulsu potrebno pola sekunde da se završi. Frekvencija kontrolira koliko brzo želimo da se impulsi odvijaju. Povećanjem frekvencije dolazi do povećanja penetracije u korijenu zavora te smanjenja visine zavora. Slika 22 prikazuje kako frekvencija utječe na geometriju zavora. [24]



Slika 22. Geometrija zavarenih spojeva zavarenih različitim frekvencijama[24]



Slika 23. Lica zavora dobivena korištenjem različitih postavki frekvencije[24]

Ispod 3 Hz jasno se vide nakupine dodatnog materijala na zavaru koje liče na „ljuskice“ koje se preklapaju i daju zavaru karakterističan i lijep izgled. Povećavanjem frekvencije „ljuskice“ postaju zbijenije jedna uz drugu, dok pri iznosima većim od 5 Hz gubi se izgled „ljuskica“. Važno je napomenuti kako je efekt „ljuskica“ ovisi o vrsti materijala koji se zavaruje te brzini

zavarivanja i unesenoj toplini. Na Slika 23. se vidi izgled lica zavara dobivenih korištenjem različitim postavki frekvencije. [24]

6. DEFORMACIJE PRI ZAVARIVANJU ALUMINIJA

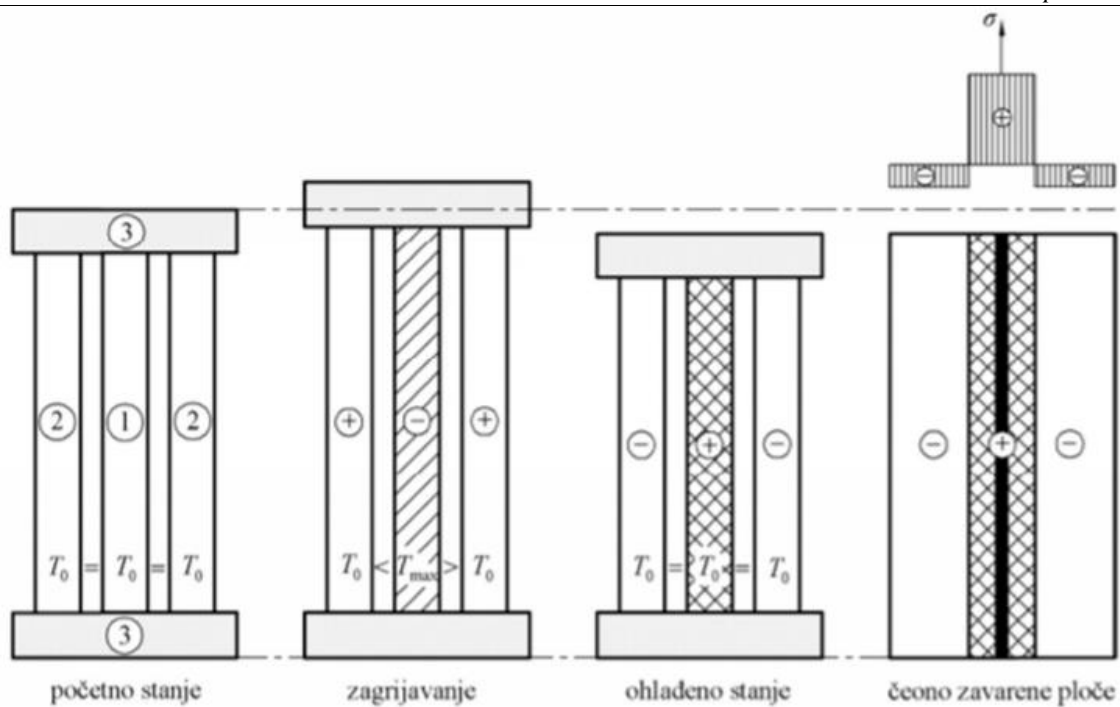
Deformacije koje nastaju tijekom zavarivanja aluminijskih legura predstavljaju značajan izazov u industrijskoj primjeni, posebno u brodogradnji gdje je dimenzijska točnost od ključne važnosti.

6.1. Zaostala naprezanja nakon zavarivanja

Zaostala naprezanja su ona koja su prisutna u radnom komadu, ako u tom trenutku na taj komad ne djeluje niti jedna vanjska sila ili moment [25]. Tijekom zavarivanja u materijalu dolazi do nastanka naprezanja, a ponekad dolazi i do deformacija. Ovi se efekti javljaju zbog unosa topline u materijal, taljenja metala i njegovog očvršćivanja. [26]

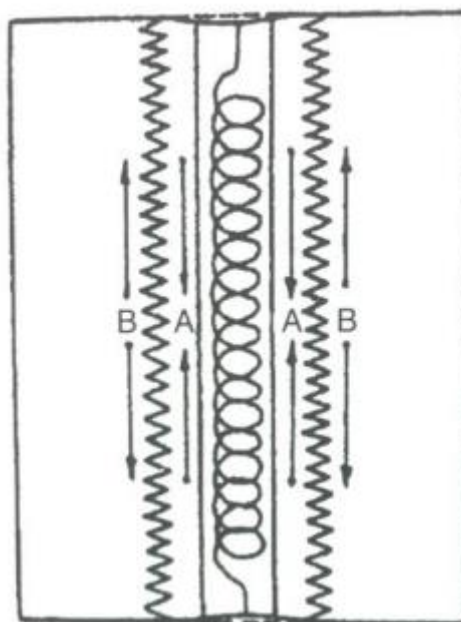
Zaostala naprezanja mogu se jednostavno prikazati modelom koji se sastoji od tri identična štapa, čiji su krajevi čvrsto povezani s krutim pločama. Gornja kruta ploča može se pomicati duž osi štapova. U ovom modelu, središnji štap predstavlja zavareni spoj u koji se unosi topline, a granični štapovi predstavljaju ostatak konstrukcije bez unosa topline. U početnom stanju, temperatura svih štapova je jednaka i iznosi T_0 . Prilikom zagrijavanja, središnji štap nastoji se produljiti, no zbog krute veze s preostala dva štapa, i oni se produljuju. Produljivanjem, granični štapovi su izloženi vlačnim naprezanjima, a u središnjem štapu dolazi do tlačnih naprezanja. Ako je maksimalna temperatura T_{\max} dovoljno visoka, tlačna naprezanja premašuju granicu tečenja materijala, uzrokujući trajne plastične deformacije nakon hlađenja na početnu temperaturu T_0 . Ako maksimalna temperatura T_{\max} nije dovoljno visoka, odnosno, ako naprezanja u središnjem štapu ostanu ispod granice tečenja materijala, neće doći do deformacija nakon hlađenja. Tijekom hlađenja, naprezanja su suprotna onima koja nastaju tijekom zagrijavanja, što znači da će u središnjem štapu doći do vlačnog naprezanja, dok će u graničnim štapovima doći do tlačnog naprezanja. [26]

Na Slika 24. prikazan je pojednostavljeni model štapa.



Slika 24. Pojednostavljeni model štapa [26]

Na primjeru sučono zavarenih ploča može se uočiti analogija modela s tri štapa. Zavar se ponaša kao središnji štap gdje se metal zavora pokušava skupiti, a područja udaljena od zavora preuzimaju ulogu graničnih štapova opirući se stezanju.[26]



Slika 25. Shematski prikaz napreznja u zavaru [27]

Faktori koji utječu na zaostala naprezanja su [26]:

- Količina unesene topline tijekom zavarivanja,
- broj prolaza pri zavarivanju,
- redoslijed zavarivanja,
- svojstva osnovnog i dodatnog materijala,
- toplinski rubni uvjeti,
- mehanički rubni uvjeti,
- volumen rastaljenog metala,
- dimenzije i oblik konstrukcije i sl.

Poznato je da se metali šire u svim smjerovima kad se zagrijavaju, a ponovo skupljaju kada se hlade. Kada je metalni komad slobodan i ravnomjerno zagrijavan, on bi se širio bez prepreka i nakon ravnomjernog hlađenja vratio bi se na svoje prvobitne dimenzije, što bi značilo da ne bi došlo do zaostalih naprezanja i deformacija. Međutim, proces zavarivanja se razlikuje od ovog idealnog scenarija u nekoliko ključnih aspekata: [26]

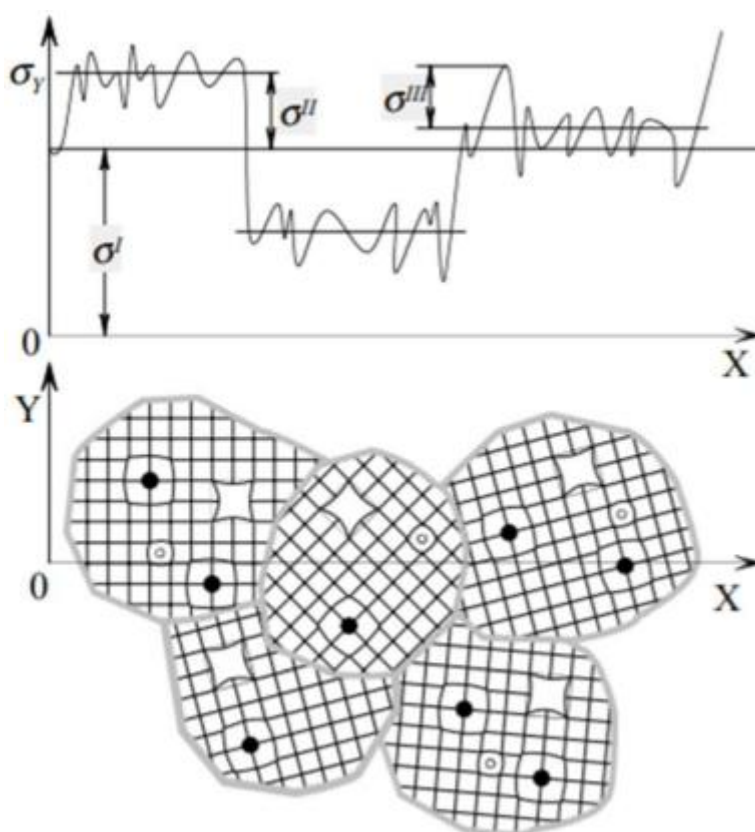
- Zagrijavanje i hlađenje se odvijaju neravnomjerno,
- širenje zagrijanog materijala je ograničeno hladnijim okolnim materijalom,
- skupljanje zagrijanog dijela je također ograničeno hladnijim okolnim materijalom,
- različita kemijska, fizikalna i mehanička svojstva materijala te različite debljine radnih komada zahtijevaju različite unose topline,
- različiti postupci zavarivanja rezultiraju različitim unosima topline i shodno tome, različitim tijekovima izoterma.

6.1.1. Klasifikacija zaostalih naprezanja

Kao što je ranije navedeno, zaostala naprezanja nastaju zbog neravnomjernog zagrijavanja i hlađenja konstrukcije. Dijele se na makro i mikro naprezanja prvog, drugog i trećeg reda. Zaostala naprezanja prvog reda (σ_1) prostiru se preko makroskopskih područja (područja veća od 1 mm), odnosno preko velikog broja kristalnih zrna. Sile i momenti koji djeluju na radni komad nalaze se u međusobnoj ravnoteži. [26]

Zaostala naprezanja drugog reda (σ_2) mikro dimenzija 1-0,01 mm, protežu se preko manjeg područja u usporedbi s naprezanjima prvog reda, odnosno preko nekoliko susjednih zrna. Iznos zaostalih naprezanja drugog reda je konstantan. Ako dođe do narušavanja ravnoteže, može doći do promjena dimenzija. Za razliku od naprezanja prvog reda, naprezanja drugog reda ubrajaju se u mikro zaostala naprezanja. [26]

Zaostala naprezanja trećeg reda (σ_3) prostiru se na izuzetno malenom prostoru reda veličine atomskih razmaka. Pripadajući momenti i sile kod naprezanja trećeg reda su u ravnoteži samo unutar malog dijela zrna. Na naprezanja trećeg reda može se gledati kao na odstupanja od prosjeka naprezanja drugog reda izazvana različitim nepravilnostima na atomskoj razini. Kao i naprezanja drugog reda, naprezanja trećeg reda također se nazivaju mikro zaostala naprezanja. [26]



Slika 26. Zaostala naprezanja prvog, drugog i trećeg reda[26]

Zaostala naprezanja prvog, drugog i trećeg reda prikazana su na Slika 26. Zaostala naprezanja koja se javljaju u nekoj konstrukciji ili komadu rezultat su sumiranja zaostalih naprezanja sva tri reda što se može prikazati izrazom (2)[26]:

$$\sigma = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 \quad (2)$$

Prilikom istraživanja utjecaja zaostalih naprezanja na nastale deformacije, fokus bi trebao biti na makro zaostalim naprezanjima. Vanjske sile koje izazivaju zaostala naprezanja su makro naprezanja, uključujući one koje nastaju zavarivanjem. [26]

6.1.2. Klasifikacija zaostalih naprezanja kao posljedica zavarivanja

Naprezanja koja nastaju prilikom zavarivanja mogu se, prema trajnosti, podijeliti na [26]:

- privremena,
- zaostala.

Privremena naprezanja koja se javljaju tijekom zavarivanja prisutna su samo u određenim trenucima zbog neravnomjernog postupka zagrijavanja i hlađenja. Zaostala naprezanja, međutim, ostaju prisutna u konstrukciji i nakon završetka procesa zavarivanja i hlađenja na sobnu temperaturu. [26]

S obzirom na smjer djelovanja, naprezanja se mogu podijeliti na [26]:

- longitudinalna (naprezanja paralelna smjeru zavarivanja),
- transverzalna (naprezanja okomita na smjer zavarivanja).

Prema podrijetlu, naprezanja nastala zavarivanjem dijele se na [26]:

- toplinska naprezanja (uzrokovana neravnomjernom raspodjelom temperature),
- naprezanja nastala plastičnom deformacijom metala,
- naprezanja nastala faznom promjenom.

6.2. Deformacije uslijed zavarivanja

Deformacije koje se javljaju tijekom zavarivanja predstavljaju odstupanja konstrukcijskog elementa od njegovog definiranog oblika nakon unosa topline i naknadnog hlađenja na sobnu temperaturu [28]. Tipične deformacije koje se javljaju prilikom zavarivanja prikazane su na Slika 27.

Zaostala naprežanja nastala zavarivanjem izazivaju deformacije u konstrukciji, koje mogu biti trajne ili privremene, slično kao i kod drugih vrsta zaostalih naprežanja. Ukupna deformacija u materijalu zavarene konstrukcije može se izraziti preko jednadžbe (3):

$$\varepsilon = \varepsilon_{el} + \varepsilon_{pl} + \varepsilon_{th} + \varepsilon_{\Delta V} + \varepsilon_{Trp} \quad (3)$$

Gdje su [26]:

ε_{el} – elastična deformacija,

ε_{pl} – plastična deformacija,

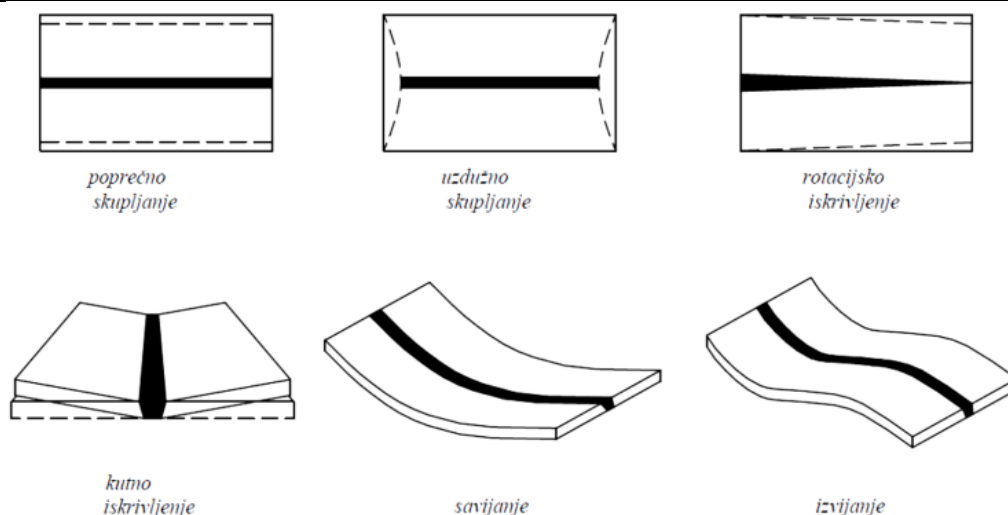
ε_{th} – toplinska deformacija,

$\varepsilon_{\Delta V}$ – volumenska deformacija uslijed faznih promjena materijala,

ε_{Trp} – plastična deformacija uslijed faznih promjena materijala.

Kod zavarenih spojeva najčešće se javljaju šest uobičajenih vrsta deformacija [26].:

- uzdužna deformacija – skraćenje elemenata u uzdužnom smjeru,
- poprečna deformacija – skraćenje elemenata poprečno na uzdužnu os,
- rotacijska deformacija – kutno iskrivljenje u ravnini ploče zbog toplinske ekspanzije ili kontrakcije,
- kutna deformacija – iskrivljenje uzrokovano nejednolikom raspodjelom temperature u poprečnom smjeru,
- savijanje – iskrivljenje u ravnini dužine zavara,
- izvijanje – iskrivljenje uzrokovano tlačnim naprežanjima zbog nestabilnosti jer su ploče tanke.



Slika 27. Tipične deformacije uslijed zavarivanja [26]

6.3. Faktori koji utječu na zaostala naprezanja i deformacije

Problemi vezani uz zaostala naprezanja i deformacije koje ona uzrokuju vrlo su složeni i unatoč značajnom napretku u tehnologiji zavarivanja, još uvijek nisu u potpunosti riješeni. Premda ove pojave nisu u potpunosti objašnjene, brojna istraživanja su pokazala da na zaostala naprezanja i deformacije prvenstveno utječu mehanička i toplinska svojstva materijala, unos i raspodjela topline tijekom zavarivanja, te mehanički čimbenici poput stezanja i debljine materijala.

6.3.1. Toplinska i mehanička svojstva materijala

Mehanička i toplinska svojstva materijala koja utječu na pojavu zaostalih naprezanja i deformacija su [29]:

- modul elastičnosti,
- granica tečenja materijala,
- koeficijent toplinske rastezljivosti,
- gustoća materijala,
- specifični toplinski kapacitet,
- koeficijent toplinske vodljivosti,
- temperatura tališta.

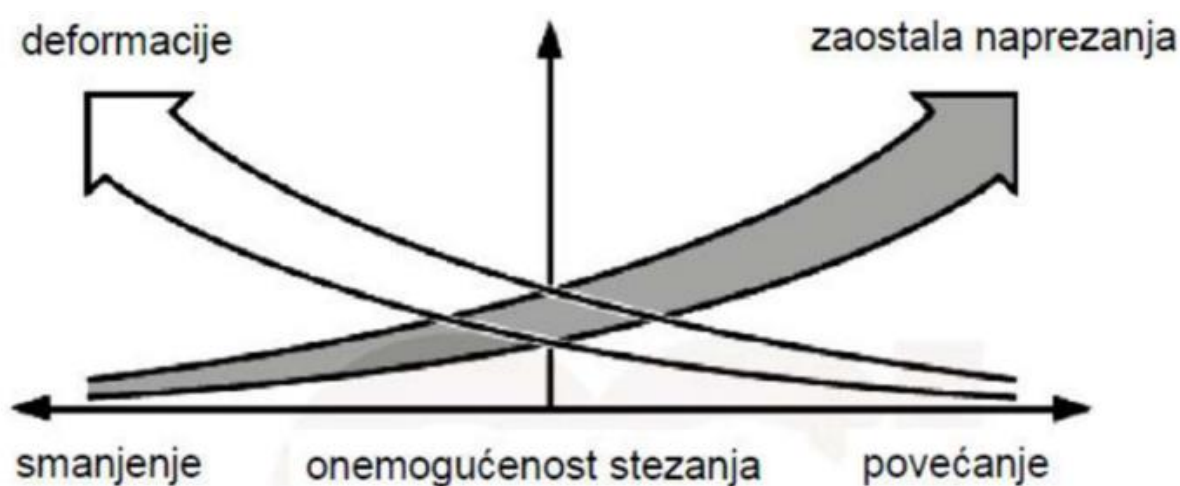
Na nastanak zaostalih naprezanja značajno utječe koeficijent toplinske rastezljivosti. Manji koeficijent toplinske rastezljivosti i niža temperatura tališta materijala dovode do manjih

zaostalih napreznja. Suprotno od toga, veća toplinska vodljivost rezultira bržim prijenosom topline kroz materijal, što smanjuje napreznja. Toplinska vodljivost, dakle, određuje brzinu prijenosa topline. Slično, viši specifični toplinski kapacitet i gustoća materijala smanjuju sklonost nastanku zaostalih napreznja. [29]

Kada su u pitanju mehanička svojstva, modul elastičnosti i granica tečenja su dva važna faktora. Niži modul elastičnosti čini materijal sklonijim deformacijama, ali manje podložnim zaostalim napreznjima, kao što je slučaj s aluminijem. S druge strane, viši modul elastičnosti rezultira većim napreznjima i manjim deformacijama. Isto vrijedi i za granicu tečenja, viša granica tečenja znači veća zaostala napreznja i manje deformacije. [29]

6.3.2. Utjecaj stezanja

Ako je skupljanje materijala ravnomjerno raspoređeno, materijal je velike debljine ili je konstrukcija čvrsta, deformacije će biti minimalne, a zaostala napreznja biti visoka. Suprotno tome, kod nesimetričnog skupljanja materijala, male debljine materijala ili fleksibilne konstrukcije, deformacije će biti značajne, a zaostala napreznja mala. Iz ovoga možemo zaključiti da postoji obrnuto proporcionalan odnos između deformacija i zaostalih napreznja. Na Sliku 28. prikazan je odnos deformacija i zaostalih napreznja uslijed stezanja. [25]



Slika 28. Odnos deformacija i zaostalih napreznja uslijed stezanja [25]

O utjecaju stezanja na zaostala naprezanja i deformacije, mogu se donijeti određeni zaključci [25]:

- kada se stezanje primjenjuje tijekom zavarivanja, a zatim otpusti nakon potpunog hlađenja na sobnu temperaturu, dolazi do značajnog smanjenja kutne distorzije,
- primjena stezanja tijekom zavarivanja, uz naknadno otpuštanje nakon hlađenja na sobnu temperaturu, rezultira povećanjem transverzalnih zaostalih naprezanja,
- isto tako, stezanje tijekom zavarivanja i njegovo otpuštanje nakon potpunog hlađenja na sobnu temperaturu povećava longitudinalna zaostala naprezanja na donjoj površini radnog komada,
- ako se stezanje primjenjuje tijekom zavarivanja, a zatim otpusti dok je radni komad još zagrijan na visoku temperaturu, neće značajno utjecati na zaostala naprezanja, ali će deformacije ostati prisutne zbog stezanja materijala uslijed hlađenja.

6.3.3. Utjecaj pripreme spoja

Pravilna priprema spoja može znatno smanjiti moguće deformacije i zaostala naprezanja. Budući da unos topline igra ključnu ulogu u stvaranju zaostalih naprezanja i deformacija, važno je odabrati tip spoja koji će minimalizirati unos topline. [25]

Zavarivanje u više prolaza smanjuje generalno zaostala naprezanja i smanjuje rizik od krhkog loma. Međutim, ovaj postupak također ima negativne efekte kao što su povećanje transverzalnih zaostalih naprezanja, skupljanje i kutne deformacije. Svaki novi prolaz unosi dodatnu toplinu, što rezultira smanjenjem longitudinalnih zaostalih naprezanja. [29]

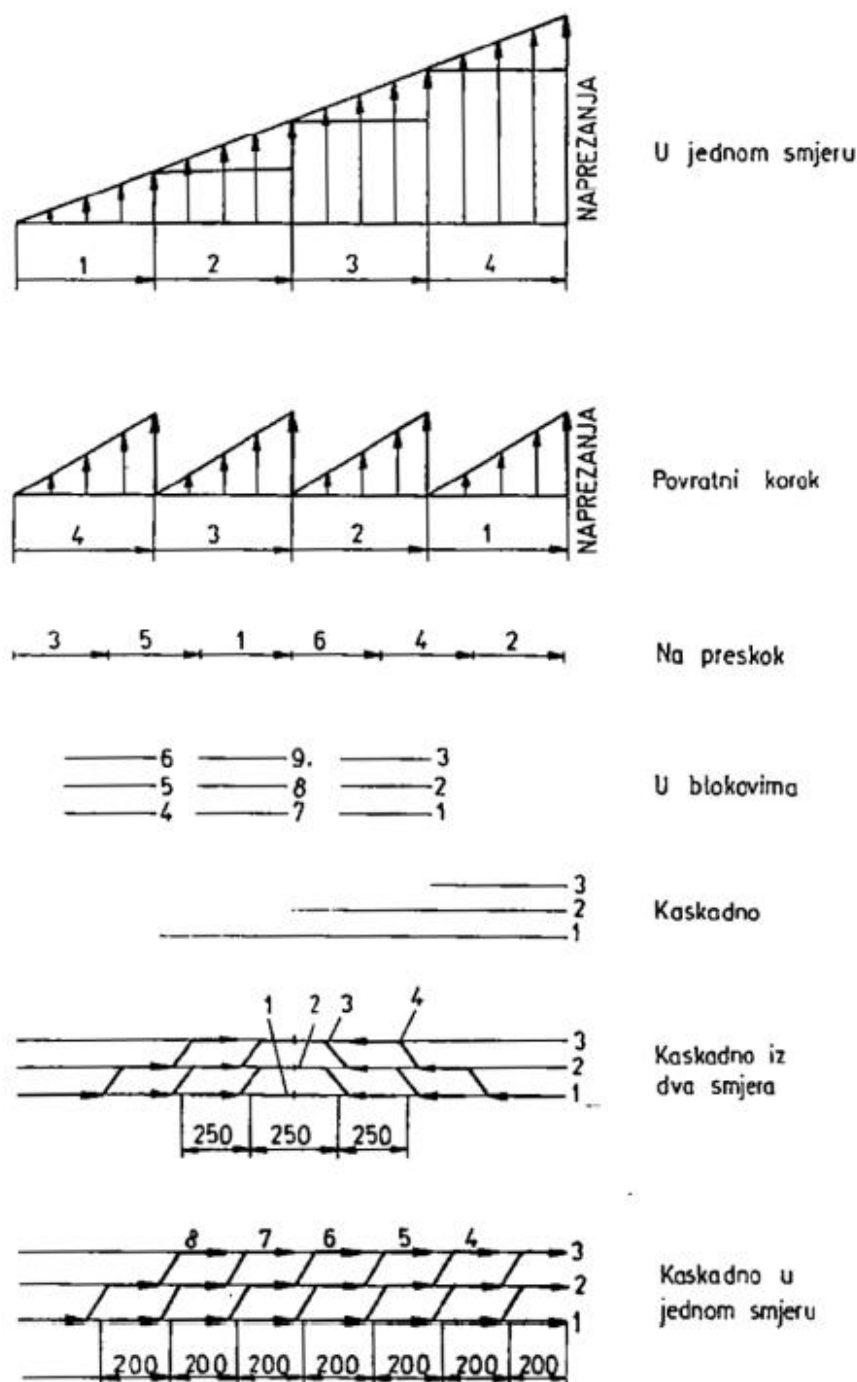
6.3.4. Utjecaj redoslijeda zavarivanja

Iako je redoslijed zavarivanja jedan od ključnih faktora koji utječu na deformacije i zaostala naprezanja, ne postoji univerzalno pravilo za redoslijed zavarivanja jer ono ovisi o specifičnoj konstrukciji. Pravilo je da longitudinalne zavare treba postavljati kontinuirano i paralelno, dok transverzalne zavare treba rasporediti kako bi se spriječilo nakupljanje vlačnih zaostalih naprezanja. [25]

Različite tehnike koje se primjenjuju tijekom zavarivanja mogu značajno smanjiti naprezanja i deformacije. Prva tehnika, zavarivanje u jednom smjeru, smatra se nepovoljnom jer može dovesti do značajnih koncentracija topline i deformacija. Povratni korak uključuje zavarivanje unazad u odnosu na prethodni zavareni segment, čime se ravnomjernije raspodjeljuje toplina i

smanjuju naprezanja. Tehnika na preskok podrazumijeva zavarivanje diskontinuirano, preskačući dijelove između zavara, što omogućuje ravnomjernije hlađenje materijala. Zavarivanje u blokovima uključuje zavarivanje manjih segmenata zavara u različitim dijelovima spoja, što smanjuje lokalnu koncentraciju topline. Kaskadno zavarivanje podrazumijeva zavarivanje u uzorku nalik kaskadi, što također pomaže u ravnomjernoj raspodjeli topline i smanjenju naprezanja. [25]

Na Slika 29 prikazana je razlika u napreznjima kod različitih sljedova zavarivanja.



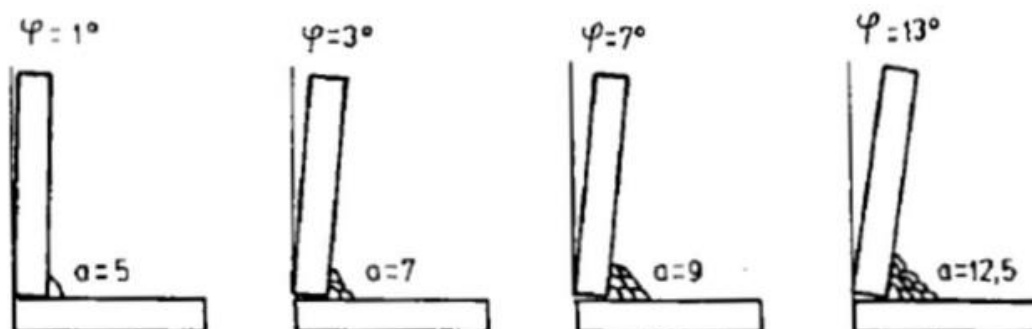
Slika 29. Razlika u naprežanjima kod različitih sljedova zavarivanja [25]

6.4. Mjere za smanjenje zaostalih naprežanja i deformacija

Zaostala naprežanja i deformacije nije moguće potpuno eliminirati no postoje mjere za njihovo smanjenje. Važno je integritirati ove metode u sve faze procesa zavarivanja, od pripreme do završne obrade, kako bi se postigla maksimalna učinkovitost i kvaliteta zavara

Smanjenje količine depozita

Smanjenjem presjeka i debljine zavara, kao i duljine i broja prolaza, smanjuje se količina lokalno unesene topline. Na Slika 30 prikazana je ovisnost kutne deformacije o broju prolaza. [30]



Slika 30. Veličina kutne deformacije u zavisnosti o broju prolaza [30]

Primjena steznih naprava

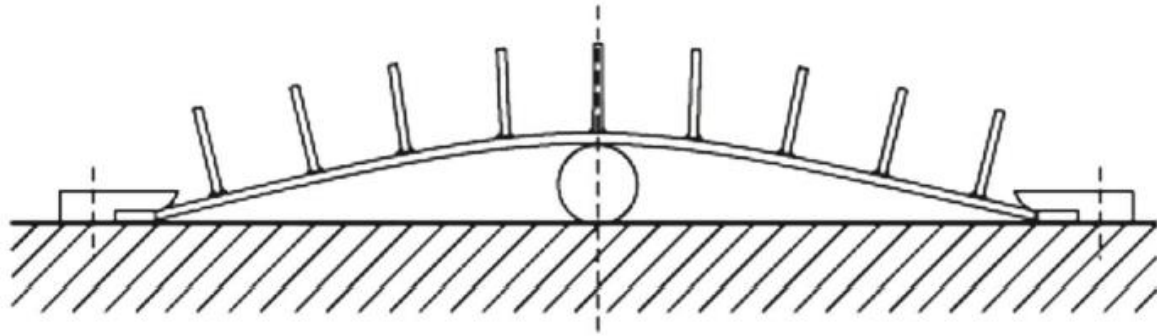
Primjenom steznih naprava onemogućene su kutne deformacije (Slika 31) [28]



Slika 31. Primjena steznih naprava [28]

Prednaprezanje

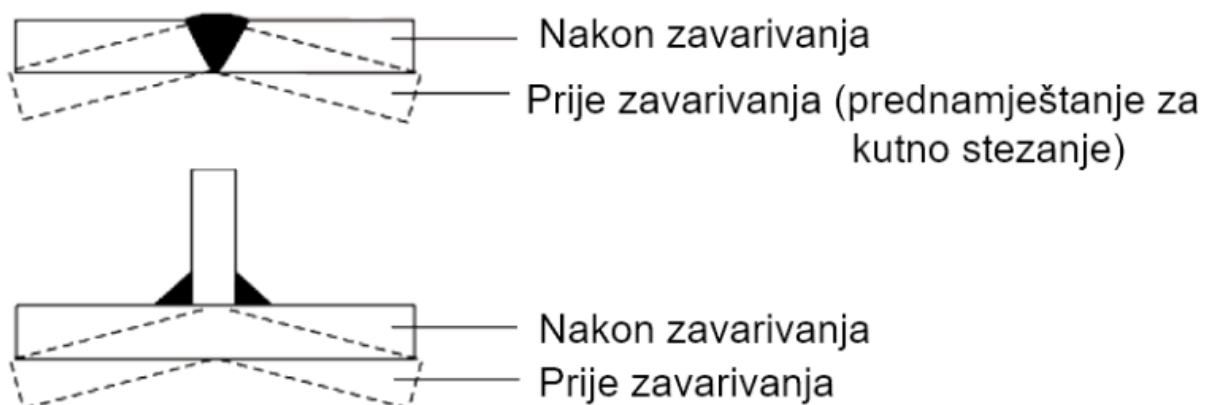
Prije zavarivanja moguće je deformirati nosač u smjeru suprotnom od očekivanih kutnih deformacija Slika 32. Cijev je prednapregnuta za iznos kutne deformacije u suprotnom smjeru, kako bi nakon zavarivanja ostala ravna. [28]



Slika 32. Prednaprežanje pomoću cijevi [28]

Stavljanje izvan pravog položaja

Kada su poznate vrijednosti stezanja i kutnih deformacija nakon zavarivanja, radne komade možemo postaviti izvan pravog položaja za tu vrijednost, kako bi deformacije dovele predmet u željeni položaj nakon zavarivanja (Slika 33). [28]



Slika 33. Pred namještanje radnog komada[28]

7. EKSPERIMENTALNI DIO

7.1. Opis eksperimenta.

Cilj eksperimentalnog dijela rada je odrediti tehnologiju zavarivanja DCMIG-P i AC MIG-P postupkom na razini jednake brzine dovoda žice za zavarivanje segmenata I profila od aluminijske legure EN AW-5083-H321 (HRN EN 573-1:2008). Samim time, radi se komparativna analiza između zavarivanja I profila u napravi za stezanje i I profila koji su zavareni bez primjene stezne naprave. Cijeli eksperiment je izveden u Laboratoriju za zavarivanje Fakulteta strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu.

Za provedbu ovog eksperimenta zavarena su četiri ispitna uzorka I profila od aluminijske legure EN AW-5083-H321, dva uzorka su zavarena DC-MIG-P postupkom, s i bez naprave te dva ispitna uzorka s AC MIG-P postupkom, s i bez naprave. Korišten je aparat za zavarivanje naziva Welbee W400 i automat za zavarivanje Fronius Automation FlexTrack 45 PRO kojim osiguravamo kontinuiranost procesa uz zadani položaj pištolja i brzinu zavarivanja.

7.2. Oprema za zavarivanje

7.2.1. Izvor struje

Kod izrade zavarenih uzoraka korišten je uređaj za zavarivanje naziva Welbee W400. Uređaj za zavarivanje prikazan je na Slika 34., a specifikacije uređaja za zavarivanje prikazane su na uređaja prikazane su na Slika 35.



Slika 34. Uređaj za zavarivanje Welbee W400

| | |
|---------------------------------|-----------------|
| Broj faza | 3 |
| Frekvencija | 50/60 Hz |
| Nazivni ulazni napon | 460 V ± 10% |
| Nazivna ulazna snaga | 14,8 kW |
| Nazivna ulazna struja | 24,4 A |
| Nazivna izlazna struja | 400 A |
| Raspon nazivne izlazne struje | 30 – 400 A |
| Raspon nazivnog izlaznog napona | 12 – 36 V |
| Maksimalni napon praznog hoda | 92 V / 110 V |
| Intermitencija | 60 % |
| Dimenzije (Š x D x V) | 396 x 711 x 836 |
| Masa | 75 kg |

Slika 35. Karakteristike Welbee W400 uređaja za zavarivanje [31]

7.2.2. Osnovni i dodatni materijal

Kao osnovni materijal za zavarivanje I profila korištene su ploče aluminijske legure EN AW-5083-H321, debljine 10 mm, širine 150 mm i duljine 300 mm. U Tablica 4 prikazan je kemijski sastav osnovnog materijala EN AW-5083-H321 prema atestu osnovnog materijala.

Tablica 4. Kemijski sastav aluminijske legure EN AW-5083-H321

| Kemijski sastav aluminijske legure | | | | | | | | |
|------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|---------|
| Si | Fe | Mn | Mg | Cu | Ti | Cr | Zn | Al |
| 0,109 | 0,301 | 0,423 | 4,256 | 0,044 | 0,010 | 0,069 | 0,161 | ostatak |

Kao dodatni materijal za zavarivanje ispitnih uzorka korištena je žica proizvođača Elektroda Zagreb oznake AlMg5 promjera 1,2 mm. U Tablica 5 prikazana su mehanička svojstva dodatnog materijala, a u Tablica 6 prikazan je njegov kemijski sastav.

Tablica 5. Mehanička svojstva dodatnog materijala [34]

| Mehanička svojstva | Vrijednost |
|----------------------------------|------------|
| Vlačna čvrstoća, R_m , MPa | 260 |
| Granica razvlačenja, R_e , MPa | 120 |
| Produljenje, A % | >25 |

Tablica 6. Kemijskog sastava dodatnog materijala [32]

| Kemijski sastav dodatnog materijala, % | | | | | |
|--|------|------|------|------|---------|
| Mg | Mn | Cr | Si | Fe | Al |
| 5,0 | 0,15 | 0,10 | 0,05 | 0,15 | ostatak |

Aluminijska žica za MIG zavarivanje oznake AlMg5 legirana je s 5 % magnezija namijenjena je za zavarivanje Al-Mg i Al-Mg-Si legura. Metal zavara je relativno visoke čvrstoće i korozijski postojan u morskoj atmosferi. [32]

7.2.3. Zaštitni plin

U eksperimentalnom dijelu rada korišten je zaštitni plin Argon 5.0 proizvođača Messer oznake II prema normi HRN EN ISO 14175:2008. Volumni udio argona u njemu iznosi 99,999%.



Slika 36. Boca zaštitnog plina Argon 5.0

7.3. Postupak izrade

Kako bi se provela usporedba ispitnih uzoraka s i bez primjene naprave za stezanje potrebno je prvo provesti zavarivanje ispitnih uzoraka:

- Uzorak CS1-L300-DC zavaren je DC MIG-P postupkom bez stezne naprave
- Uzorak CS2-L300-AC zavaren je AC MIG postupkom bez stezne naprave
- Uzorak CS3-L300-DC zavaren je DC MIG-P postupkom u steznoj napravi
- Uzorak CS4-L300-AC zavaren je AC MIG postupkom u steznoj napravi

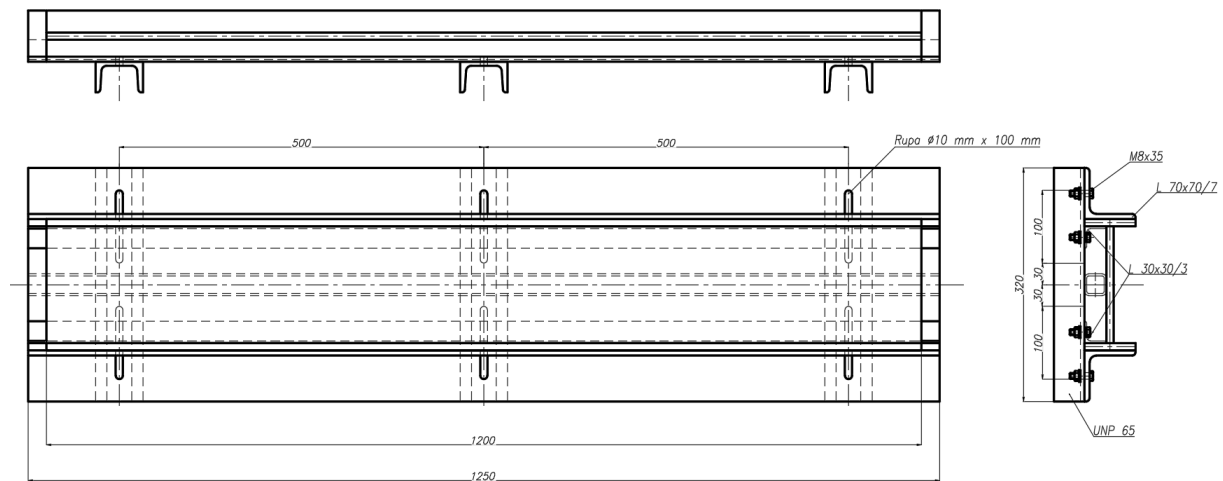
Usporedba deformacija pri različitim postupcima zavarivanja opisana je u poglavlju 7.5. ovog rada.

7.3.1 Naprava za stezanje ispitnih uzoraka

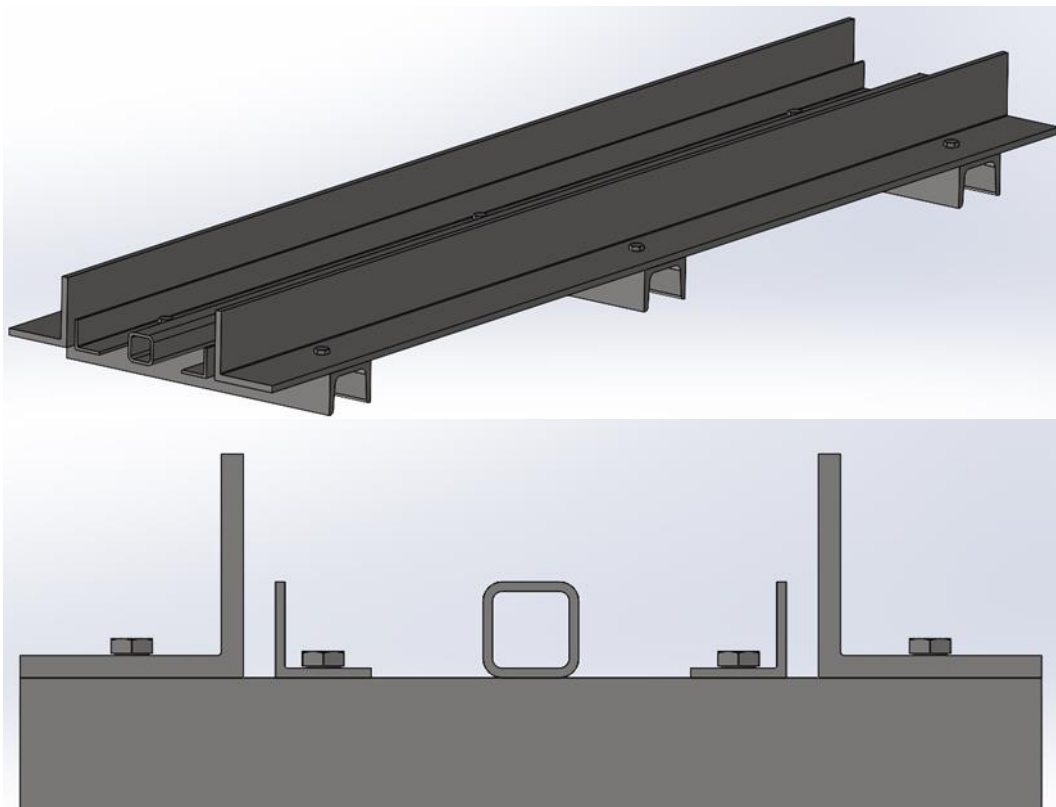
Glavna svrha naprave je stegnuti elemente I profila tijekom procesa zavarivanja kako bi se minimizirale deformacije koje nastaju uslijed zavarivanja te osigurala njihova dimenzijska točnost. Na Slika 37. i Slika 39. je prikazana naprava za stezanje. Postolja naprave se sastoji od tri profila UNP-65 dužine 320 mm koji služe kao osnova za postavljanje L profila (L 70x70/7 i L 30x30/3) dužine 1250 mm, koji služe za stezanje pojasnica I profila.

Naprava je podesiva te se pozicije L profila mogu stezati na različitim razmacima kako bi se omogućilo zavarivanje I profila različitih dimenzija. Ideja u projektiranju naprave je bila da se u kratkom roku u napravu mogu postaviti ploče, stegnute i krenuti s procesom zavarivanja.

Pomični L profili se prilagođuju dimenzijama I profila, drže ga u željenom položaju te ravnomjerno raspoređuju silu stezanja kako bi spriječili deformacije ispitnih uzoraka.. Nakon provedenog zavarivanja, I profil je ostavljen stegnut u napravi da se ohladi do sobne temperature.



Slika 37. Nacrt naprave za stezanje



Slika 38. Model stezne naprave za zavarivanje I-profila

Na Sliku 39. prikazana je izrađena naprava za stezanje I profila tijekom zavarivanja



Slika 39. Naprava za stezanje pripremljena za zavarivanje

Na Slika 40. prikazano je stezanje probnog uzorka kojim smo testirali napravu prije zavarivanja ispitnih uzoraka.



Slika 40. Stezanje probnog uzorka

7.3.2. Priprema spoja

Kako bi proces zavarivanja bio zadovoljavajuće kvalitete, potrebno je provesti pripremu spoja. Za izradu ispitnih uzoraka korištene su aluminijske ploče dimenzija 300x150x10 mm kao hrbat i ploče 300x70x10 mm kao pojasnice. Prije samog početka zavarivanja, obje ploče su očišćene i odmašćene alkoholom kako bi se spriječila onečišćenja mjesta zavarivanja te samim time ostvario što kvalitetniji zavareni spoj. Nakon toga, izvršeno je pripajanje ploča na nekoliko mjesta kako bi se postigao željeni oblik I profila Slika 41. Nakon pripajanja ploča u oblik I profila, ispitni uzorci su ponovno očišćeni i odmašćeni.



Slika 41. Priprema ispitnih uzoraka za zavarivanje

7.3.3. Parametri zavarivanja

Zavarivanje ispitnih uzoraka provedeno je prema parametrima zavarivanja prikazanim u Tablica 7. Zavarivanje sva četiri ispitna uzorka provedeno je u PB položaju zavarivanja.

Tablica 7. Parametri zavarivanja ispitnih uzoraka

| Parametri zavarivanja | Oznake ispitnih uzoraka | | | |
|------------------------------|-------------------------|-------------|-------------|-------------|
| | CS1-L300-DC | CS2-L300-AC | CS3-L300-DC | CS4-L300-AC |
| Postupak zavarivanja | DC MIG-P | AC MIG-P | DC MIG-P | AC MIG-P |
| Struja, A | 250 | 200 | 250 | 200 |
| Napon, V | 31 +50 | 28 | 31 +50 | 28 |
| Balans polariteta, % | / | +50 | / | +50 |
| Brzina dodavanja žice, m/min | 16,6 | 16,6 | 16,6 | 16,6 |
| Brzina zavarivanja, cm/min | 70 | 70 | 70 | 70 |
| Slobodni kraj žice, mm | 17 | 17 | 17 | 17 |
| Protok plina, l/min | 21 | 21 | 21 | 21 |

Tablica 8 Stvarni parametri zavarivanja ispitnih uzoraka

| Stvarni parametri zavarivanja | | | | |
|-------------------------------|--------------|----------|-----------|----------|
| Oznaka uzorka | Broj prolaza | | | |
| | I | II | III | IV |
| CS1-L300-DC | I=303 A | I=280 A | I=278 A | I=276 A |
| | U=24,2 V | U=27,2 V | U=27,8 V | U=27,8 V |
| CS2-L300-AC | I=226 A | I=226 A | I=226 A | I=240 A |
| | U=25 V | U=23,3 V | U= 22,7 V | U=21,3 V |
| CS3-L300-DC | I=288 A | I=287 A | I=302 A | I=302 A |
| | U=27,4 V | U=27,2 V | U=24,3 V | U=24,4 V |
| CS4-L300-AC | I=226 A | I=220 A | I=226 A | I=226 A |
| | U=24,2 V | U=25,3 V | U=23,4 V | U=23,3 V |

Unos topline

Formulom prema normi HRN EN 1011-1:2009 moguće je izračunati unos topline (4):

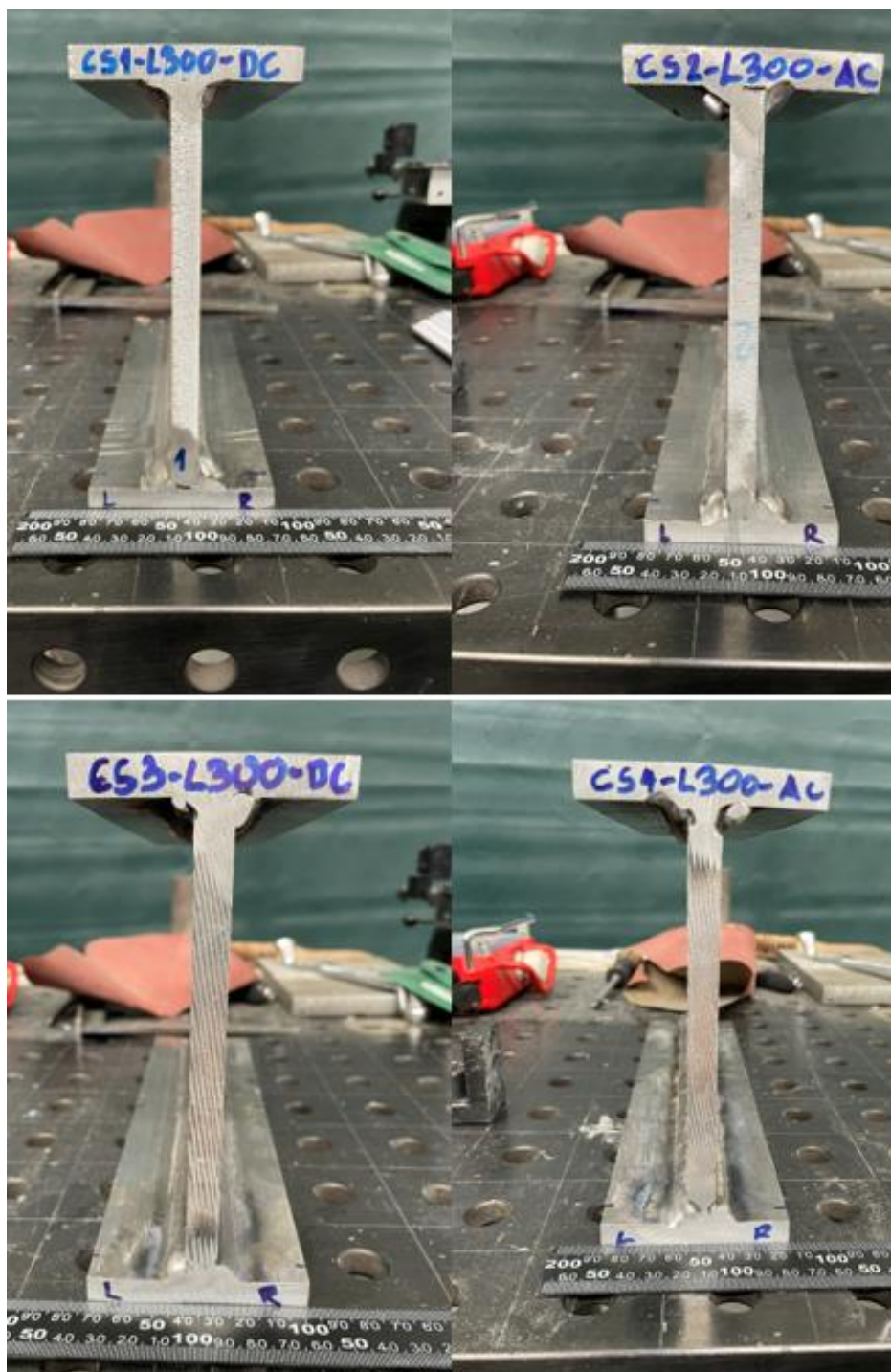
$$Q = k \times \frac{U \times I}{V} \times \frac{60}{1000} \text{ [kJ/cm]} \quad (4)$$

U Tablica 9 su prikazane vrijednosti unosa topline (izražene u kJ/cm) za dva različita postupka zavarivanja: DC MIG-P i AC-MIG-P.

Tablica 9. Stvarni unos topline tijekom zavarivanja

| Unos topline Q, kJ/cm | | | | |
|-----------------------|--------------|------|------|------|
| | Broj prolaza | | | |
| Oznaka uzorka | I | II | III | IV |
| CS1-L300-DC | 5,03 | 5,22 | 5,3 | 5,26 |
| CS2-L300-AC | 3,87 | 3,61 | 3,52 | 3,51 |
| CS3-L300-DC | 5,41 | 5,35 | 5,13 | 5,05 |
| CS4-L300-AC | 3,75 | 3,82 | 3,63 | 3,6 |

Iz ovih podataka možemo zaključiti da DC MIG - P postupak zavarivanja unosi više topline u materijal u usporedbi s AC - MIG postupkom za jednaku brzinu dovoda žice i jednaku brzinu zavarivanja ispitnih uzoraka (Tablica 9). Nakon zavarivanja Slika 42., uzorci su pušteni da se ohlade na sobnu temperaturu te su očišćeni mehanički uz pomoć četke te odmašćeni pomoću alkohola..



Slika 42. Ispitni uzorci nakon zavarivanja

7.4. Vizualna kontrola deformacija ispitnih uzoraka

Nakon provedenog zavarivanja ispitnih uzoraka, provedena je vizualna kontrola deformacija hrbata ispitnih uzoraka. Kontrola je provedena uz pomoć kutnika (Slika 43) kojim se

kontroliralo odstupanje ravnosti osi hrbata od njegovih idealnih dimenzija. Kontrola je provedena okomito na duljinu hrbata na više različitih mjesta.



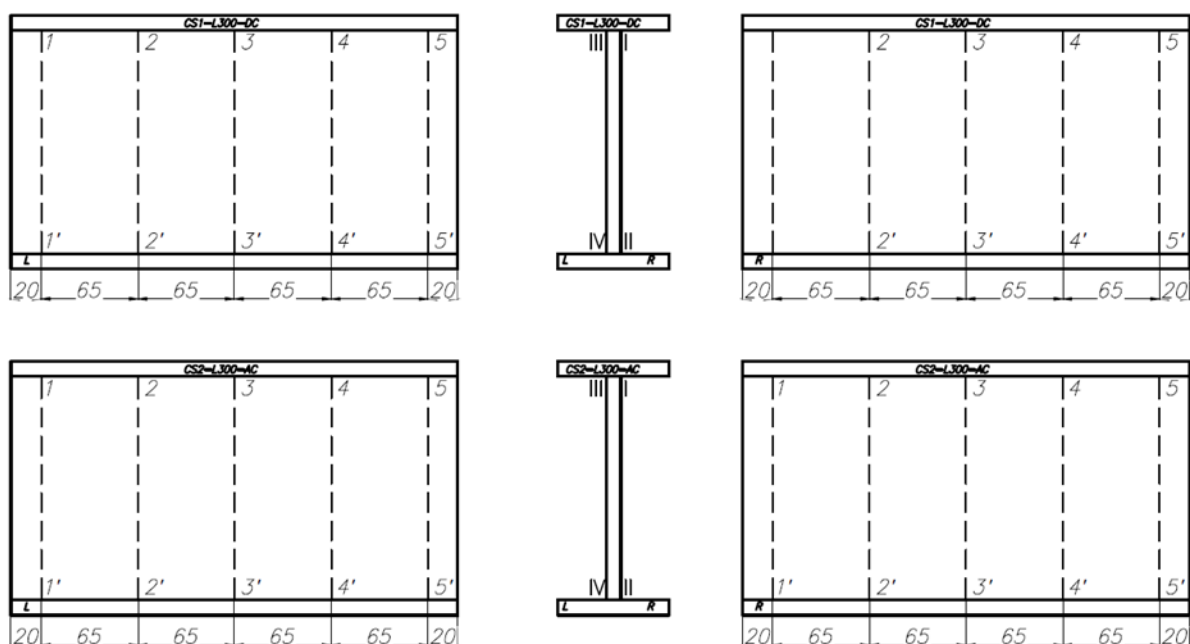
Slika 43. Vizualna kontrola deformacija ispitnih uzoraka

Vizualnom kontrolom deformacije hrbata sva četiri ispitna uzorka utvrđeno je da nema odstupanja od početne geometrije, a samim time nema ni značajnijih deformacija koje bi se mogle uočiti ovom metodom kontrole deformacija što je unutar prihvatljivih granica prema normi EN 1090-3.

7.5. Analiza rezultata mjerenja deformacija

U radu su analizirane deformacije ispitnih uzoraka nakon zavarivanja korištenjem dvaju različitih postupaka: DC MIG-P i AC MIG-P. Uzorci su zavareni s i bez korištenja naprave za stezanje. Na temelju dobivenih rezultata mjerenja deformacija, doneseni su zaključci o utjecaju svakog postupka na nastanak deformacije, te je opisana uloga naprave u osiguravanju dimenzijske točnosti ispitnih uzoraka.

Na Slika 44. vide se mjesta gdje su izmjerene deformacije na uzorcima koji su zavareni bez korištenja naprave za stezanje, mjerene su svakih 65 mm na radnom komadu, i s lijeve i s desne strane. U Tablica 10. dane su izmjerene vrijednosti deformacija od idealne vrijednosti koja iznosi 150 mm.



Slika 44. Uzorci zavareni bez korištenja naprave za zavarivanje

Uzorak 1 (CS1-L300-DC) - DC MIG bez naprave za zavarivanje (Tablica 10):

- Deformacije se kreću između 149,2 mm i 149,6 mm na lijevoj strani (L).
- Deformacije na desnoj strani (R) su između 148,5 mm i 149,2 mm.
- Deformacije su veće na strani prvog i drugog prolaza.

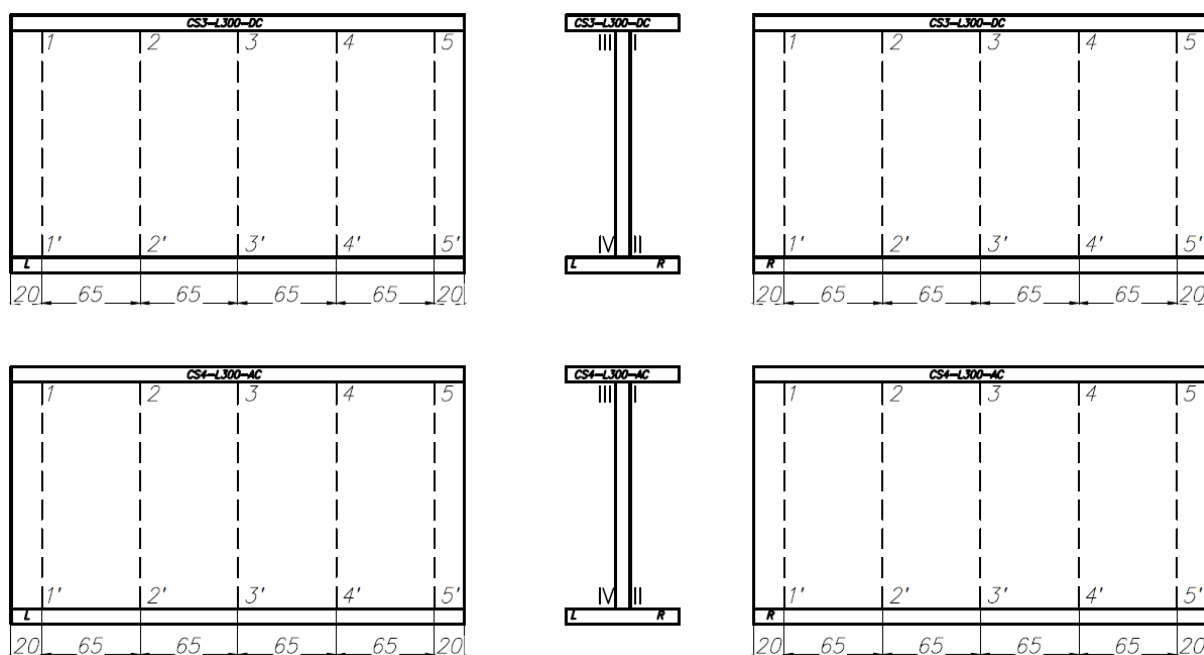
Uzorak 2 (CS2-L300-AC) - AC MIG bez naprave za zavarivanje (Tablica 10):

- Deformacije se kreću između 148,7 mm i 148,9 mm na lijevoj strani (L).
- Deformacije na desnoj strani (R) su između 147,6 mm i 148,8 mm.
- Deformacije su veće na strani prvog i drugog prolaza.

Tablica 10. Izmjerene vrijednosti deformacija uzoraka CS1-L300-DC i CS2-L300-AC

| Deformacije uzorak 1 (CS1-L300-DC) [mm] | | | | | |
|---|-------|-------|-------|-------|-------|
| Točka mjerenja | 1-1' | 2-2' | 3-3' | 4-4' | 5-5' |
| Lijeva strana | 149,6 | 149,4 | 149,5 | 149,5 | 149,6 |
| Desna strana | 149,2 | 148,5 | 148,5 | 148,6 | 148,9 |
| Deformacije uzorak 2 (CS2-L300-AC) [mm] | | | | | |
| Točka mjerenja | 1-1' | 2-2' | 3-3' | 4-4' | 5-5' |
| Lijeva strana | 148,9 | 148,9 | 148,8 | 148,7 | 148,9 |
| Desna strana | 148 | 147,6 | 147,7 | 148 | 148,8 |

Slika 45. vide se mjesta gdje su izmjerene deformacije na uzorcima koji su zavareni s korištenjem naprave za stezanje, mjerene su svakih 65mm na radnom komadu, i s lijeve i s desne strane. U Tablica 11 dane su izmjerene vrijednosti deformacija.



Slika 45. Uzorci zavareni korištenjem naprave za zavarivanje

Uzorak 3 (CS3-L300-DC) - DC MIG s napravom za zavarivanje (Tablica 11):

- Deformacije se kreću između 147,3 mm i 148,8 mm na lijevoj strani (L).
- Deformacije na desnoj strani (R) su između 146,6 mm i 147,4 mm.
- Deformacije su veće na strani prvog i drugog prolaza.

Uzorak 4 (CS4-L300-AC) - AC MIG s napravom za zavarivanje (Tablica 11):

- Deformacije se kreću između 147,6 mm i 148,4 mm na lijevoj strani (L).
- Deformacije na desnoj strani (R) između 146,7 mm i 148,2 mm.
- Deformacije su veće na strani prvog i drugog prolaza.

Tablica 11. Izmjerene vrijednosti deformacija nakon zavarivanja

| Deformacije uzorak 3 (CS3-L300-DC) [mm] | | | | | |
|---|-------|-------|-------|-------|-------|
| Točka mjerjenja | 1-1' | 2-2' | 3-3' | 4-4' | 5-5' |
| Lijeva strana | 147,7 | 147,3 | 147,7 | 148,2 | 148,8 |
| Desna strana | 147,2 | 146,8 | 146,6 | 146,9 | 147,4 |
| Deformacije uzorak 4 (CS4-L300-AC) [mm] | | | | | |
| Točka mjerjenja | 1-1' | 2-2' | 3-3' | 4-4' | 5-5' |
| Lijeva strana | 147,7 | 147,6 | 148 | 148,3 | 148,4 |
| Desna strana | 147,6 | 146,7 | 146,7 | 147,5 | 148,2 |

Analizom rezultata mjerenja prikazanih u Tablica 9 i Tablica 10 mogu se donijeti sljedeći zaključci:

- Deformacija ispitnih uzoraka je veća sa strane 1 i 2 prolaza (desna strana, oznaka R) u odnosu na 3 i 4 prolaz kod svih ispitnih uzoraka
- Deformacije svih ispitnih uzoraka su manje od 2 mm kada se deformacija podijeli na obje strane pojasnice ispitnog uzorka. Ovo pokazuje da je stupanj deformacija unutar prihvatljivih granica.
- Kod uzoraka 3 i 4, deformacije su veće kod DC MIG-P postupka u odnosu na AC MIG-P postupak. Iako je razlika mala, to ukazuje na to da naprava učinkovito radi svoj posao smanjujući razlike u deformacijama koje su manje od 2 mm u odnosu na simetralu pojasnice, što je unutar prihvatljivih granica prema normi EN 1090-3.

8. ZAKLJUČAK

Aluminij je materijal od izuzetne važnosti u brodogradnji i izradi konstrukcija zbog svojih povoljnih svojstava kao što su niska gustoća, visoka otpornost na koroziju i dobra zavarljivost. Njegova primjena omogućuje značajno smanjenje težine, što doprinosi većoj efikasnosti i ekonomičnosti plovila. Međutim, proces zavarivanja aluminijskih legura nosi sa sobom niz izazova, među kojima su deformacije koje mogu narušiti mehanička svojstva i strukturni integritet konačnog proizvoda. Ovaj rad fokusira se na analizu mehanizama nastanka deformacija pri MIG zavarivanju aluminijskih legura te analizu modernih postupaka i tehnika za njihovo smanjenje.

Zavarivanje aluminijskih legura MIG postupkom, naročito uz korištenje impulsnog prijenosa metala, omogućava postizanje kvalitetnog zavarenog spoja, no suočava se s problemima prilikom zavarivanja tankih i debelih aluminijskih ploča. Kod tankih materijala postoji značajan rizik od progaranja i deformacija. Kao odgovor na te izazove, razvijen je MIG postupak zavarivanja s izmjeničnom strujom (AC MIG). Ovaj postupak omogućava minimalizaciju deformacija i eliminira problem progaranja pri zavarivanju tankih aluminijskih ploča uz pravilnu tehnologiju zavarivanja. AC MIG nije samo rješenje za tanke ploče, već je također vrlo efikasan za zavarivanje debljih aluminijskih ploča. Razlog tome je što je upotrebom AC MIG postupka i pravilnim odabirom parametara zavarivanja moguće je ostvariti bolju penetraciju, za razliku od DC MIG-P postupka, te je moguće osigurati veću produktivnost. Dodatna prednost AC MIG postupka je smanjen unos topline u osnovni materijal, što dodatno doprinosi smanjenju deformacija. Jedan od ključnih faktora koji omogućava ove prednosti je EN omjer, koji definira odnos struje negativnog polariteta u odnosu na ukupnu struju tijekom jednog ciklusa izmjenične struje. Pravilnim odabirom parametara zavarivanja i optimizacijom EN omjera, AC MIG postupak postaje izvanredno efikasan postupak za zavarivanje aluminijskih legura različitih debljina, pružajući bolju kontrolu nad procesom i a time i boljom kvalitetom zavara.

Deformacije pri zavarivanju aluminijskih legura uglavnom nastaju zbog lokaliziranog zagrijavanja i naknadnog hlađenja, što uzrokuje naprezanja. Ovi efekti mogu rezultirati različitim vrstama deformacija, uključujući uzdužno i poprečno savijanje, izvijanje i uvijanje. Toplina unesena tijekom zavarivanja i redosljed izvođenja zavara igraju ključnu ulogu u kontroli deformacija. Primjena ukruta i naprava za stezanje može pomoći u kontroli i

smanjenju deformacija tijekom zavarivanja. Ove metode omogućuju ravnomjerniju raspodjelu naprezanja i održavanje dimenzijske točnosti zavarenih elemenata.

Eksperimentalni dio ovog rada imao je za cilj odrediti optimalnu tehnologiju zavarivanja I profila aluminijske ligure serije EN AW-5083-H321 koristeći DC-MIG-P i AC MIG-P postupke, te provesti komparativnu analizu učinkovitosti zavarivanja s i bez primjene stezne naprave. Za provedbu eksperimenta, zavarena su četiri ispitna uzorka I profila: dva uzorka postupkom DC-MIG-P (jedan s napravom, drugi bez) i dva uzorka postupkom AC MIG-P (jedan s napravom, drugi bez). Korišteni su uređaj za zavarivanje, Welbee W400 i automat za zavarivanje Fronius Automation FlexTrack 45 PRO, koji su omogućili preciznu kontrolu nad procesom zavarivanja, uključujući položaj pištolja i brzinu zavarivanja. Naprava za zavarivanje, koja je bila podesiva i omogućavala prilagodbu različitim dimenzijama I profila, imala je ključnu ulogu u eksperimentu. Ova naprava omogućavala je brzo postavljanje i stezanje ploča, te ravnomjernu raspodjelu sila stezanja, čime se nastojalo spriječiti deformacije ispitnih uzoraka. Nakon zavarivanja, uzorci su ostavljeni stegnuti u napravi dok se nisu ohladili do sobne temperature.

Deformacije svih ispitnih uzoraka bile su manje od 2 mm kada se deformacija podijeli na obje pojasnice, što ukazuje na to da su deformacije unutar prihvatljivih granica prema normi EN 1090-3. Kod uzoraka zavarivanih postupkom DC MIG-P, deformacije su bile nešto veće u usporedbi s onima zavarivanim AC MIG-P postupkom. Iako je razlika mala, rezultati sugeriraju da AC MIG-P postupak smanjuje deformacije učinkovitije nego DC MIG-P postupak. Analiza je također potvrdila učinkovitost naprave za stezanje u smanjenju deformacija. Međutim, najveće deformacije zabilježene su kod uzoraka koji su bili zavareni u napravi, što ukazuje na to da trenutni dizajn naprave nije optimalan. Ovaj zaključak pokazuje da naprava mora biti redizajnirana s više steznih elemenata kako bi se osigurala bolja kontrola i ravnomjernija raspodjela steznih sila.

Sveukupno, eksperimentalni rezultati naglašavaju prednosti AC MIG-P postupka u pogledu smanjenja deformacija i poboljšanja produktivnosti, kao i ključnu ulogu steznih naprava u održavanju kvalitete zavarenih spojeva. Međutim, neophodno je unaprijediti dizajn naprave za zavarivanje kako bi se smanjile deformacije i osigurala veća dimenzijska točnost. Ovi rezultati pružaju vrijedne smjernice za optimizaciju tehnologije zavarivanja u industrijskoj praksi, posebno u kontekstu brodogradnje gdje su dimenzionalna točnost i strukturni integritet od suštinske važnosti.

LITERATURA

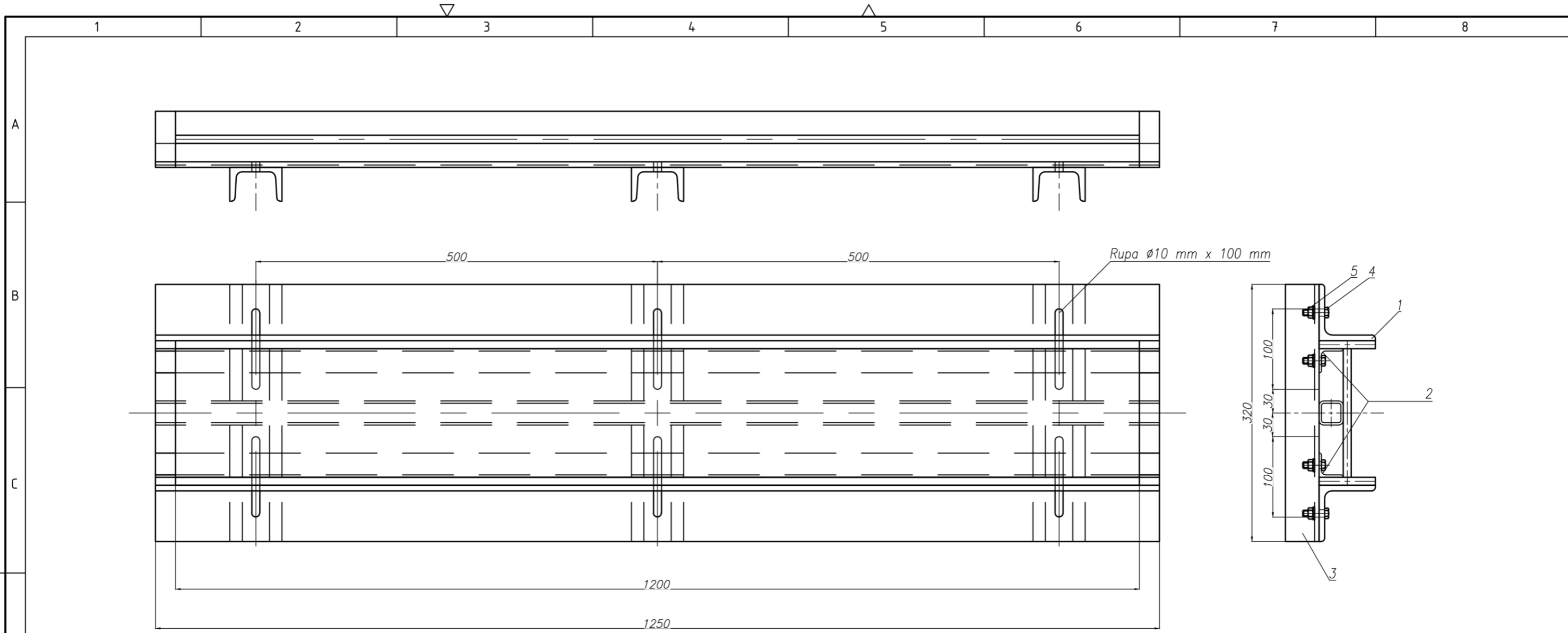
- [1] A definitive guide to the welding. Dostupno iz <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/aluminium-welding#HowcanAluminiumbeWelded> [13.01.2024]
- [2] F.Neessen, V.van der Mee. Smjernice za zavarivanje aluminija. Zbornik radova, Spajanje aluminija i magnezija. Šibenik, Hrvatska, 2002.
- [3] Roger Lumley. Fundamentals of aluminium metallurgy: Woodhead Publishing Limited, 2011.
- [4] T. Sheppard. Extrusion of Aluminium Alloys. Boston: Springer US, 1999.
- [5] Mathers, G. The welding of aluminium and its alloys. Cambridge, England: Woodhead Publishing Ltd, 2002.
- [6] What Are The Marine Aluminum Welding Processes. Dostupno iz : <https://www.marinealu.com/a/what-are-the-marine-aluminum-welding-processes.html> dostupno [13.3.2024]
- [7] MIG/MAG postupak zavarivanja. Dostupno iz: <https://tsi.webador.com/tois-mig-mag-postupak-zavarivanja> [13.3.2024.]
- [8] Understanding AC and DC for welding. Dostupno iz: <https://weldingmastermind.com/understanding-ac-and-dc-for-mig-welding/> [9.4.2024.]
- [9] What is GMAW (MIG Welding) & How Does it Work? Dostupno iz: <https://weldguru.com/mig-welding/> [9.4.2024.]
- [10] MIG / MAG WELDING DICTIONARY. Dostupno iz: <file:///D:/Izrada%20diplomskog%20rada/SCHWEISSLEXIKON MIG-MAG 11-2020-A4 WEB EN.PDF> [10.04.2024.]
- [11] Fronius_Broschuere_MIG_MAG_EN-USA.indd. Dostupno [10.04.2024.]
- [12] R.A. Himarosa. Effect of MIG Welding Speed Butt-Joint on Physical and Mechanical Properties of Materials AA 5083. Dostupno iz: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2214785322051550> [10.04.2024.]
- [13] Zavarivanje u zaštiti plinova TIG, MIG, MAG. Lončar, Starčević: Zagreb, 1983.
- [14] PRIRUČNIK IZ KOLEGIJA STROJEVI I OPREMA ZA ZAVARIVANJE; Ivica Garašić, Zoran Kožuh; FSB, Zagreb, 2015.

- [15] S. Selvi, A. Vishvaksean. Cold metal transfer (CMT) technology - An overview. Dostupno iz: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214914717301022> [31.5.2024]
- [16] What is a Pulse MIG? A how & why guide to Pulse MIG welding. Dostupno iz: <https://www.weldclass.com.au/blog/94-what-is-a-pulse-mig-a-how-why-guide-to-pulse-mig-welding> [31.5.2024]
- [17] Ikram A., Chung.H., The Effect of EN Ratio and Current on Microstructural and Mechanical Properties of Weld Joined by AC-GMAW on Square Groove Butt Joints; Daejeon 34141, Korea; 2017.
- [18] Arc welding. Dostupno iz: <https://www.sciencedirect.com/topics/materials-science/gas-metal-arc-welding> [01.06.2024.]
- [19] Jin Park H., Kim DC., Kang MJ., The arc phenomenon by the characteristic of EN ratio in AC pulse GMAW. Dostupno iz: <file:///C:/Users/simel/Downloads/s00170-012-4371-1.pdf> [15.5.2024.]
- [20] AC MIG. Dostupno iz: <https://otc-daihen.com/welding/welding-process/migmag/processes/ac/mig.html> [25.06.2024.]
- [21] Characterization of the effects of high-intensity negative current pulses on metal transfer and melting rate in the AC-GMAW process. Dostupno iz: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s00170-022-09987-3.pdf> [15.05.2024.]
- [22] Tong H., Ueyama T. Improvement of aluminium alloy sheet metal welding quality and productivity with AC pulsed MIG welding system, 2009.
- [23] Tomasz Pfeifer. Application of variable polarity MIG welding of aluminium alloys. 2014.
- [24] Nemeč K., Analiza metoda rendgenske i neutronske difrakcije za mjerenje zaostalih naprezanja, Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje. 2021.
- [25] Pilipenko A, Computere simulation of residual stress and distortion of thick plates in multi-electrode submerged arc welding. Their mitigation techniques, Trondheim: Norwegian University of Science and Technology, 2001.
- [26] Šisl V; Kovačević B, Toplinska obrada u zavarivanju (prvi dio), Zagreb: Zavarivanje 44 (1/2), 2001.
- [27] Bauer B, Zaostala naprezanja i deformacije - postupci spajanja (predavanja), Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje.
- [28] Radaj D, Heat Effects of Welding Temperature Field, Residual Stress, Distortion, Springer-Verlag, Berlin, 1992.

-
- [29] Matija D. Analiza zaostalih napreznja pri zavarivanju nelegiranih čelika primjenom programa Visual Weld, Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje 2016
- [30] WELBEE-W400 katalog. Dostupno iz: <https://autoline.nz/products/robotic-automation/robot-brands/otc-daihen-robotic-welding/welbee-w400-dual-inverter-ac-mig-dc-dc-pulse-ac-pulse-ac-wavepulse-welding-power-source/> [31.05.2024.]
- [31] EZ - MIG AlMg5- Specifikacija. Dostupno iz: <https://ezg.hr/proizvodi/zice/ez-mig-almg5/> [31.05.2024.]

PRILOZI

I. TEHNIČKA DOKUMENTACIJA



| 5. | Matica M8 | 12. | DIN 934 | 8.8 | M8 | |
|--------------------|------------------|-------------------------|----------------------|-------------|--------------------------------------|------------|
| 4. | Vijak M8x35 | 12. | HRN EN ISO 4014:2022 | 8.8 | M8x35 | |
| 3. | UNP 65 | 3. | HRN EN 10025-1:2006 | S275JR | 320 mm | |
| 2. | L-profil 30x30/3 | 2. | HRN EN 10025-1:2006 | S275JR | 1250 mm | |
| 1. | L-profil 70x70/7 | 2 | HRN EN 10025-1:2006 | S275JR | 1250 mm | |
| Poz. | Naziv dijela | Kom. | Crtež broj Norma | Materijal | Sirove dimenzije Proizvođač | Masa |
| Broj naziva - code | | Datum | Ime i prezime | | Potpis | |
| Projektirao | | 12.06.24 | Šime Lovrić | | | |
| Razradio | | 12.06.24 | Šime Lovrić | | | |
| Crtao | | 12.06.24 | Šime Lovrić | | | |
| Pregledao | | 21.06.24 | Marko Frajzman | | | |
| ISO - tolerancije | | Objekt: | | | Objekt broj: | |
| | | | | | R. N. broj: | |
| | | Napomena: | | | | |
| | | Materijal: S275JR | | Masa: 40 kg | | |
| | | | | | Naziv: Naprava za stezanje l-profila | |
| | | Mjerilo originala | | | Pozicija: | |
| | | 1:5 | | | Format: A3 | |
| | | Crtež broj: CS-L300-001 | | | | Listova: 1 |
| | | | | | | List: 1/1 |

Design by CADLab

