# Primjena aluminijskih legura u brodogradnji

**Dubovečak, Luka**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2021**

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

*Permanent link / Trajna poveznica:* https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:712040

*Rights / Prava:* In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-03-29**

*Repository / Repozitorij:*

Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

**Luka Dubovečak**

Zagreb, 2021.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

Mentor:
Izv. prof. dr. sc. Ivica Garašić

Student:
Luka Dubovečak

Zagreb, 2021.

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

Zahvaljujem se mentoru izv. prof. dr. sc. Ivici Garašiću i zahvaljujem se asistentici dr.sc. Maji Jurici na smjernicama i savjetima prilikom izrade ovog rada.

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

Luka Dubovečak

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

**FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE**

Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite

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

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

# ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Luka Dubovečak** Mat. br.: 0035216897

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Primjena aluminijskih legura u brodogradnji**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Application of aluminium alloys in shipbuilding**

Opis zadatka:

U teorijskom dijelu rada potrebno je proučiti primjenu aluminijskih legura u brodogradnji. Navesti i opisati primjenjive tehnologije zavarivanja u brodogradnji za zavarivanje aluminijskih legura s detaljnim osvrtom na MIG tehnologiju zavarivanja. Analizirati pripremu spojeva za zavarivanje aluminijskih legura prema normi HRN EN ISO 9692-3.

U eksperimentalnom dijelu rada je potrebno izraditi tehnologiju zavarivanja odabrane aluminijske legure. Izvesti zavarivanje sučeljenog spoja s odgovarajućom pripremom spoja. Nakon zavarivanja ispitati zavareni spoj penetrantskom metodom te savijanjem prema uputama odgovarajuće norme. Na temelju dobivenih rezultata donijeti zaključak o adekvatnosti korištenih parametara zavarivanja na kvalitetu zavarenog spoja.

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

Zadatak zadan:

30. studenoga 2020.

Zadatak zadao:

Izv.prof.dr.sc. Ivica Garašić

Datum predaje rada:
**1. rok:** 18 veljače 2021.
**2. rok (izvanredni):** 5. srpnja 2021.
**3. rok:** 23. rujna 2021.

Predviđeni datumi obrane:
**1. rok:** 22.2. – 26.2.2021.
**2. rok (izvanredni):** 9.7.2021.
**3. rok:** 27.9. – 1.10.2021.

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Branko Bauer

# SADRŽAJ

SADRŽAJ ..... I
POPIS SLIKA ..... III
POPIS TABLICA ..... VI
POPIS KRATICA ..... VII
POPIS OZNAKA ..... VIII
SAŽETAK ..... IX
SUMMARY ..... X
1. UVOD ..... 1
2. ALUMINIJSKE LEGURE ..... 2
2.1. Proizvodnja ..... 2
2.2. Glavne karakteristike ..... 4
2.3. Vrste aluminijskih legura ..... 6
2.4. Svojstva i primjena aluminijskih legura u brodogradnji ..... 11
2.4.1. Serija 5XXX ..... 12
2.4.2. Serija 6XXX ..... 13
2.5. Problemi zavarljivosti aluminijskih legura ..... 14
2.5.1. Poroznost ..... 14
2.5.2. Oksidni film ..... 15
2.5.3. Tople pukotine ..... 16
2.5.4. Toplinska vodljivost ..... 17
2.5.5. Reducirana čvrstoća u području zavara i zone utjecaja topline ..... 18
3. ZAVARIVANJE ALUMINIJSKIH LEGURA ..... 20
3.1. Općenito ..... 20
3.2. MIG zavarivanje ..... 21
3.2.1. Osnove procesa ..... 21
3.2.2. Oprema za MIG postupak ..... 22
3.2.2.1. Izvor struje ..... 22
3.2.2.2. Pištolj za zavarivanje ..... 23
3.2.2.3. Pogonski sustav žice ..... 24
3.2.3. Prijenos metala pri MIG zavarivanju ..... 24

3.2.3.1. Prijenos kratkim spojevima ... 25
3.2.3.2. Prijenos prijelaznim lukom ... 26
3.2.3.3. Prijenos štrcajućim lukom ... 27
3.2.3.4. Impulsno zavarivanje ... 28
3.2.4. Parametri MIG zavarivanja ... 29
3.2.4.1. Struja zavarivanja ... 29
3.2.4.2. Napon zavarivanja ... 30
3.2.4.3. Brzina zavarivanja ... 31
3.2.4.4. Vrsta i protok zaštitnog plina ... 31
3.2.4.5. Duljina slobodnog kraja žice ... 32
3.2.5. Tehnika rada ... 33
3.2.6. Odabir dodatnog materijala ... 33
3.3. Ostali postupci zavarivanja ... 34
3.3.1. TIG zavarivanje ... 34
3.3.2. Zavarivanje elektrolučnim plazma postupkom ... 36
3.3.3. Zavarivanje laserom ... 37
3.3.3.1. Hibridno lasersko zavarivanje ... 38
3.3.4. Zavarivanje trenjem ... 39
4. PRIPREMA SPOJEVA ZA ZAVARIVANJE PREMA NORMI HRN EN ISO 9692-3 ... 41
5. EKSPERIMENTALNI RAD ... 44
5.1. Oprema za zavarivanje ... 44
5.2. Osnovni i dodatni materijal ... 46
5.3. Zaštitni plin ... 47
5.4. Postupak izrade ... 48
5.5. Nerazorno ispitivanje penetrantima ... 51
5.6. Ispitivanje savijanjem ... 53
5.7. Makroskopska i mikroskopska analiza ... 55
5.7.1. Makro izbrusak ... 55
5.7.2. Mikroskopska analiza ... 57
6. ZAKLJUČAK ... 59
LITERATURA ... 60

# POPIS SLIKA

Slika 1. Ruda boksita [7] ..... 2
Slika 2. Izgled crvenog mulja [8] ..... 2
Slika 3. Kalcinirana glinica [9] ..... 3
Slika 4. Uređaj za elektrolizu glinice [10] ..... 4
Slika 5. Utjecaj hladnog očvrsnuća na mehanička svojstva [1] ..... 9
Slika 6. Prikaz postupka precipitacijskog očvršćivanja legure serije 6XXX [12] ..... 10
Slika 7. Strukturni dijelovi aluminijskih brodova i pripadajuće Al-legure [13] ..... 12
Slika 8. Primjer poroznosti u sučeonom spoju aluminija debljine 6mm [1] ..... 15
Slika 9. Oksidni film u kutnom zavaru [1] ..... 16
Slika 10. Prikaz tople pukotine nastale prilikom zavarivanja [1] ..... 16
Slika 11. Utjecaj koncentracije legirnih elemenata na osjetljivost pojave pukotina [1] ..... 17
Slika 12. Raspored temperatura prilikom zavarivanja čelika i aluminija [15] ..... 17
Slika 13. Utjecaj zavarivanja na legure aluminija očvrsnute hladnom deformacijom [1] ..... 18
Slika 14. Utjecaj temperature žarenja na granicu razvlačenja [1] ..... 18
Slika 15. Utjecaj zavarivanja na precipitacijski očvrsnute legure [1] ..... 19
Slika 16. Primjenjivi postupci zavarivanja u brodogradnji [16] ..... 20
Slika 17. Prikaz opreme za MIG zavarivanje [14] ..... 21
Slika 18. Detalj MIG postupka zavarivanja [17] ..... 22
Slika 19. Shematski dijagram napona i struje zavarivanja ravne izlazne karakteristike [1] ..... 23
Slika 20. Uobičajeni zrakom hlađeni pištolj za zavarivanje [18] ..... 23
Slika 21. Poprečni presjek Push pogonskog sustava sa 4 valjka [1] ..... 24
Slika 22. Odnos promjera žice i struje zavarivanja ovisno o načinu prijenosa metala [1] ..... 25
Slika 23. Prikaz faza prijenosa kapljice metala električnim lukom kratkog spoja [11] ..... 26
Slika 24. Shematski prikaz prijelaznog načina prijenosa metala [11] ..... 27
Slika 25. Shematski prikaz štrcajućeg načina prijenosa metala [11] ..... 28
Slika 26. Grafički prikaz impulsnog načina prijenosa metala [11] ..... 29
Slika 27. Ovisnost brzine žice o jakosti struje kod MIG zavarivanja [19] ..... 30
Slika 28. Utjecaj napona na oblik zavara [11] ..... 30
Slika 29. Utjecaj brzine zavarivanja na profil zavara [15] ..... 31

Slika 30. Oblici penetracije prema udjelu zaštitnog plina [15] ..... 32
Slika 31. Slobodan kraj žice [20] ..... 32
Slika 32. Utjecaj tehnike rada na oblik zavarenog spoja [14] ..... 33
Slika 33. Shematski prikaz TIG postupka zavarivanja [19] ..... 35
Slika 34. Shematski prikaz izmjeničnog TIG zavarivanja [14] ..... 36
Slika 35. Shematski prikaz elektrolučnog plazma zavarivanja [14] ..... 37
Slika 36. Shematski prikaz hibridnog laser zavarivanja [16] ..... 39
Slika 37. Shematski prikaz friction stir postupak zavarivanja [22] ..... 40
Slika 38. Daihen Varstroj WB- P500L ..... 44
Slika 39. Sučelje za podešavanje načina rada i parametara na izvoru struje ..... 45
Slika 40. Dodatni materijal Union AlSi 5 ..... 47
Slika 41. Boca zaštitnog plina Argon 5.0 ..... 48
Slika 42. Priprema spoja ..... 48
Slika 43. Redoslijed zavarivanja ..... 49
Slika 44. Prvi prolaz ..... 49
Slika 45. Drugi prolaz ..... 49
Slika 46. Treći prolaz ..... 50
Slika 47. Pobrušen prvi prolaz ..... 50
Slika 48. Korijen zavara/četvrti prolaz ..... 50
Slika 49. Lice zavara/sedmi prolaz ..... 50
Slika 50. Sredstva korištena za ispitivanje penetrantima ..... 52
Slika 51. Korijen zavara sa nanesenim penetrantom i razvijačem ..... 52
Slika 52. Lice zavara sa nanesenim penetrantom i razvijačem ..... 52
Slika 53. Tračna pila korištena za strojno rezanje ispitnih uzoraka ..... 53
Slika 54. Uzorak za ispitivanje savijanjem ..... 53
Slika 55. Prikaz ispitivanja savijanjem u Laboratoriju za zavarivanje na FSB-u ..... 54
Slika 56. Rezultati bočnog savijanja ..... 54
Slika 57. Makroizbrusak nakon postupka nagrizanja ..... 55
Slika 58. Makroizbrusak lica zavara lijevo ..... 55
Slika 59. Makroizbrusak lica zavara desno ..... 56
Slika 60. Makroizbrusak korijena zavara ..... 56

Slika 61. Mikroskopska snimka metala zavara i ZUT–a – lice zavara, lijevo ..... 57
Slika 62. Mikroskopska snimka metala zavara i ZUT–a – korijen zavara..... 57
Slika 63. Mikroskopska snimka metala zavara – usmjerenost zrna..... 58
Slika 64. Mikroskopska snimka metala zavara – linija staljivanja ..... 58

# POPIS TABLICA

Tablica 1. Označivanje Al-legura [1] ..... 6
Tablica 2. Utjecaj legirnih elemenata na mehanička svojstva [1] ..... 7
Tablica 3. Podjela aluminijskih legura prema mogućnosti očvrsnuća [1] ..... 8
Tablica 4. Mehanička svojstva i kemijski sastav serije 5XXX [13] ..... 13
Tablica 5. Mehanička svojstva i kemijski sastav serije 6XXX [13] ..... 14
Tablica 6. Uobičajene vrijednosti prijelazne struje prilikom zavarivanja ..... 27
Tablica 7. Preporučeni dodatni materijal za zavarivanje aluminijskih legura [10] ..... 34
Tablica 8. Usporedba pripreme spojeva sa i bez podloge [16] ..... 42
Tablica 9. Usporedba pripreme spojeva sa i bez podloge nastavak [16] ..... 43
Tablica 10. Tehničke karakteristike izvora struje WB P500L [24] ..... 45
Tablica 11. Prikaz mehaničkih svojstva ispitne ploče prema atestu osnovnog materijala ..... 46
Tablica 12. Prikaz kemijskog sastava ispitne ploče prema atestu osnovnog materijala ..... 46
Tablica 13. Mehanička svojstva dodatnog materijala [24] ..... 47
Tablica 14. Orijentacijski kemijski sastav dodatnog materijala [24] ..... 47
Tablica 15. Odabrani i očitani parametri kod zavarivanja ispitnog uzorka ..... 51

# POPIS KRATICA

| **Kratica** | **Opis** |
|---|---|
| $AlOH_3$ | Aluminijev hidroksid |
| $Al_2O_3$ | Aluminijev oksid |
| Bi | Bizmut |
| CC | Strmopadajuća statička karakteristika izvora struje zavarivanja |
| CO | Ugljikov monoksid |
| $CO_2$ | Ugljikov dioksid |
| Cr | Krom |
| Cu | Bakar |
| CV | Ravna statička karakteristika izvora struje zavarivanja |
| Fe | Željezo |
| $Fe_2O_3$ | Željezov oksid |
| FSW | Zavarivanje trenjem uz miješanje |
| Li | Litij |
| MIG | Elektrolučno zavarivanje u zaštiti inertnog plina |
| Mn | Mangan |
| Mg | Magnezij |
| $NaAlO_2$ | Natrijev aluminat |
| NaOH | Natrijev hidroksid |
| $Na_3AlF_6$ | Kriolit |
| Ni | Nikal |
| Si | Silicij |
| $SiO_2$ | Silicijev oksid |
| Pb | Olovo |
| Ti | Titan |
| $TiO_2$ | Titanijev oksid |
| TIG | Elektrolučno zavarivanje netaljivom elektrodom u zaštiti inertnog plina |
| UFSW | Podvodno zavarivanje trenjem uz miješanje |
| V | Vandij |
| Zn | Cink |
| ZUT | Zona utjecaja topline |

# POPIS OZNAKA

| Oznaka | Jedinica | Opis |
|---|---|---|
| $\rho_{AL}$ | $kgm^{-3}$ | Gustoća aluminija |
| $\rho_{Č}$ | $kgm^{-3}$ | Gustoća čelika |
| $E_{Al}$ | GPa | Modul elastičnosti aluminija |
| $E_{Č}$ | GPa | Modul elastičnosti čelika |
| $\alpha_{L, Al}$ | $K^{-1}$ | Koeficijent toplinskog širenja aluminija |
| $\alpha_{L, Č}$ | $K^{-1}$ | Koeficijent toplinskog širenja čelika |
| $\sigma_{Al}$ | $Sm^{-1}$ | Električna vodljivost aluminija |
| $\sigma_{Č}$ | $Sm^{-1}$ | Električna vodljivost čelika |
| t | °C | Temperatura |
| $R_e$ | MPa | Granica razvlačenja |
| $R_m$ | MPa | Vlačna čvrstoća |
| A | % | Istezljivost |
| $\lambda_{Al}$ | $Wm^{-1}K^{-1}$ | Toplinska vodljivost aluminija |
| $\lambda č$ | $Wm^{-1}K^{-1}$ | Toplinska vodljivost čelika |
| $Q_z$ | $kJmm^{-1}$ | Unos topline |
| $I_z$ | A | Struja zavarivanja |
| $U_z$ | V | Napon zavarivanja |
| $v_z$ | mm/s | Brzina zavarivanja |

# SAŽETAK

U teorijskom dijelu rada opisana je proizvodnja, karakteristike i problematika zavarljivosti aluminijskih legura s posebnim osvrtom na primjenu aluminijskih legura u brodogradnji. Detaljno je opisan MIG postupak zavarivanja, a ukratko su objašnjeni ostali postupci zavarivanja aluminijskih legura, poput TIG-a, elektrolučnog plazma postupka, laserskog i zavarivanja trenjem. U posljednjem dijelu teorijskog rada dan je pregled pripreme spojeva za zavarivanje aluminijskih legura prema normi HRN EN ISO 9692-3.

U eksperimentalnom dijelu rada odabrana je tehnologija zavarivanja aluminijske legure 6082. Strojnom obradom sukladno normi HRN EN ISO 9692-3 pripremljene su dvije ploče. Provedeno je sučeono zavarivanje radnih komanda impulsnim MIG postupkom. Naposlijetku su provedena nerazorna ispitivanja penetrantima i ispitivanje savijanjem te je izvršena makroskopska i mikroskopska analiza. Na temelju dobivenih rezultata eksperimentalnog rada donesen je zaključak.

Ključne riječi: Aluminij, Al legure u brodogradnji, MIG zavarivanje, norma HRN EN ISO 9692-3

# SUMMARY

The theoretical part of this thesis describes the production, characteristics and weldability problems of aluminum alloys with special emphasis on the application of aluminum alloys in shipbuilding. The thesis also contains a detail description of MIG welding process, and a brief explainion of other welding processes used for aluminum alloys, such as TIG, the arc plasma welding, laser and friction stir welding. The final section gives an overview of recommended types of joint preparation for welding of aluminum alloys according to HRN EN ISO 9692-3.

In the experimental part the suitable welding technology has been chosen for welding aluminum alloy 6082. In accordance with the HRN EN ISO 9692-3 standard two plates were machined. Butt welding was done using MIG pulse technology. Welds were tested using non-destructive dye penetrant method and bend test, furthermore the macroscopic and microscopic analysis was also done. Based on the results of experimental work the conclusion was made.

Keywords: Aluminum, Al alloys in shipbuilding, MIG welding, HRN EN ISO 9692- 3 standard

# 1. UVOD

Godine 1886. Paul Heroult i Charles M. Hall razvili su sustav elektrolitičke redukcije glinice, čime je ekstrakcija aluminija iz njegove rude, boksita, napokon postala izvedivim proizvodnim procesom. Aluminij je istog trena privukao pažnju brodograditelja, premda je bio čak 30 puta skuplji od čelika. [1], [2]

Krajem 19. stoljeća započeo je razvoj aluminijskih oplata brodova. Atraktivan omjer čvrstoće i specifične težine privukao je pažnju američkog brodograditelja N. Herreshoff-a prilikom konstruiranja jedrilice „Defender“. Trijumf aluminijske jedrilice na Američkom kupu 1895. godine obilježio je početak upotrebe aluminijskih legura u brodogradnji. [3]

Heterogene metode spajanja i loša mehanička svojstva prvih legura uzrokovali su idealne uvjete za nastanak galvanske korozije koja je drastično smanjivala životni vijek brodova. Primjena aluminijskih legura u brodogradnji postala je popularna tek nakon Drugog svjetskog rata, kada je elektrolučno zavarivanje pružilo održivu alternativu zakovicama. Dostupnost pouzdane i relativno jeftine tehnologije spajanja, zajedno sa sve većom potrebom brodova veće brzine, učinile su aluminijske legure boljom opcijom strukturnog materijala plovila. [3]

Suvremene gnječive legure omogućile su dizajn brzih brodova, olakšavajući trupove do 50% u odnosu na čelik. Lakši trup poboljšao je izdržljivost, smanjio potrošnju goriva i smanjio kapitalni izdatak motora i pogonskog sustava. Aluminij je izvrstan materijal u pomorskom kontekstu kada se posveti odgovarajuća pažnja konstruiranju, posebice u pogledu upotrebe s drugim materijalima. [4]

Zavarivanje aluminijskih legura zahtijeva specifičnu opremu i tehnologiju uz strogo kontrolirane uvjete rada. Zavarivanje se najčešće izvodi MIG i TIG postupkom. Iako su postupci zavarivanja aluminija i čelika identični, zahtjevi i metode su toliko različiti da se zavarivači moraju prekvalificirati, a većina brodogradilišta ne koristi iste zavarivače za rad s oba metala. [5]

# 2. ALUMINIJSKE LEGURE

## 2.1. Proizvodnja

Aluminij se može vaditi iz raznih minerala širom svijeta, ali jedina ruda iz koje je moguća relativno jeftina eksploatacija je boksit. Boksit (slika 1.) je mineralni materijal koji dolazi u širokom rasponu boja i tekstura, te se uglavnom sastoji od aluminijevog oksida. Otprilike 90% svjetskog boksita nalazi se u tropskim i suptropskim regijama, a 73% koncentrirano je u samo pet zemalja: Gvineji, Brazilu, Jamajci, Australiji i Indiji. Specijalna oprema koristi se za slojevito vađenje boksita iz tla, nakon čega slijedi njegovo usitnjavanje i sušenje. [6]



*Slika 1. Ruda boksita [7]*

Pretvorba boksita u glinicu ili aluminij oksid - $Al_2O_3$, sljedeći je korak u proizvodnom procesu. Bayerov postupak najpopularnija je metoda za proizvodnju glinice. Temelji se na dodavanju lužnate otopine natrijevog hidroksida (NaOH) usitnjenom boksitu. Aluminij koji se nalazi u boksitu lako se otapa u lužini i prelazi u otopinu natrijevog aluminata ($NaAlO_2$), dok ostali elementi tvore tzv. crveni mulj (slika 2.). [6], [8]



*Slika 2. Izgled crvenog mulja [8]*

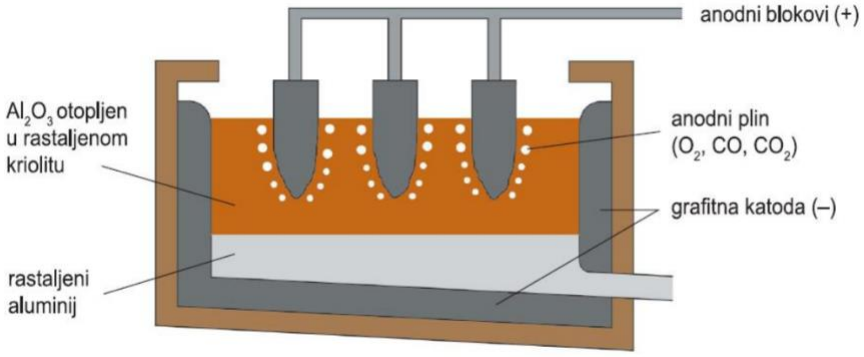
Sljedeći korak je odvajanje zasićenog natrijevog aluminata u crvenom mulju. Nakon što je crveni mulj neutraliziran i ispran vraća se natrag u proces. Crveni mulj se sastoji od željezovog oksida ($Fe_2O_3$) koji mu daje crvenu boju, silicijevog oksida ($SiO_2$), titanijevog oksida ($TiO_2$) i drugih kemijskih spojeva. Crveni mulj je izrazito nepoželjan i opasan otpad koji se mora pažljivo zbrinuti na predviđena odlagališta. [6], [10]

Nakon taloženja aluminijevog hidroksida ($AlOH_3$) iz otopine natrijevog aluminata, slijedi završni korak Bayerovog postupka. Kalcinacijom tj. zagrijavanjem s ciljem uklanjanja vode dobiva se oksid aluminija, odnosno glinica (slika 3.). Ona se mora se čuvati u posebnim uvjetima jer će prvom prilikom upiti vlagu, pa ju proizvođači što prije otpremaju u topionice. [6]



*Slika 3. Kalcinirana glinica [9]*

Drugi dio proizvodnje primarnog aluminija čini elektrolitička redukcija aluminija u kriolitu ($Na_3AlF_6$), pri temperaturi od 950 °C. Elektroliza se provodi u željeznim posudama obloženim grafitom (slika 4.). Taloženjem aluminija na dnu grafitnog korita tvori se katoda, dok kisik koji izbija na ugljenoj anodi daje smjesu ugljikovih oksida (CO, $CO_2$). Stalni napon na elektrodama svake redukcijske ćelije varira u rasponu između 4 i 6 volti, dok jačina struje može doseći 300, 400 KA i više. Upravo je električna struja glavna proizvodna sila ovog procesa. [6], [10]




*Slika 4. Uređaj za elektrolizu glinice [10]*

Za svaku tonu proizvedenog aluminija ispušta se 280 000 kubičnih metara plinova. Kao rezultat toga, bez obzira na svoj dizajn, svaka redukcijska ćelija uključuje uređaj za uklanjanje plinova koji hvata i vodi plinove koji nastaju tijekom faze redukcije do postrojenja za obradu plina. Hidroelektrana je najčešća opcija izvora energije jer može proizvesti potrebnu energiju bez zagađivanja okoliša. Primjerice, u Rusiji hidroelektrane opskrbljuju električnom energijom 95% topionica aluminija. [6]

Aluminij se reciklira otkad je prvi put komercijalno proizveden, a danas sekundarni aluminij čini oko 30% svjetske potrošnje aluminija. Reciklirani aluminij štedi veliku količinu energije, trošeći samo 5% energije koja se koristi za proizvodnju primarnog aluminija. Recikliranjem se ne utječe na kvalitetu, a može se reciklirati nekoliko puta, čime se smanjuju ekološki problemi i gospodarski gubici. Većina recikliranog aluminija koristi se za izradu odlijevaka, a ostatak se pretvara u gnječene legure za ponovnu upotrebu. [6]

## 2.2. Glavne karakteristike

Najlakši od najčešće korištenih metala je aluminij. Poznat je po svojstvima električne i toplinske vodljivosti i otpornosti na koroziju. Nažalost, relativno je slab u čistom stanju i teško zavarljiv, stoga je u njegovu strukturu potrebno dodati odgovarajuće kemijske elemente. Iako je aluminij gotovo 3 puta lakši od čelika ($\rho_{Al} = 2660$ kgm$^{-3}$, $\rho_{č} = 7850$ kgm$^{-3}$) legiranjem može postići čvrstoću ugljičnog čelika. U nastavku su navedena ključna fizikalna i kemijska svojstva aluminija, u usporedbi s čelikom, metalom s kojim je većina brodograditelja upoznatija.

- Točke tališta dvaju metala i njihovih oksida su različita. Željezni oksid tali se oko točke tališta metala, dok se aluminijev oksid tali na 2060 °C, što je oko 1400 °C iznad točke tališta aluminija. To uvelike utječe na postupak zavarivanja, jer je ključno ukloniti i raspršiti oksidni film prije i tijekom zavarivanja kako bi se postigla željena kvaliteta zavarenog spoja.
- Izdržljivost i samoobnovljivost oksidnog sloja osiguravaju aluminijskim legurama izvanrednu otpornost na koroziju, što omogućuje upotrebu u teškim eksploatacijskim uvjetima, bez dodatne površinske zaštite.
- Koeficijent toplinskog širenja aluminija približno je dvostruko veći od čelika ($\alpha_{L,\,Al} = 23\times10^{-6}$ $K^{-1}$, $\alpha_{L,\,č} = 12\times10^{-6}$ $K^{-1}$ ), što rezultira neprihvatljivim savijanjem i deformiranjem metala tijekom zavarivanja.
- Aluminij ima koeficijent toplinske vodljivosti gotovo šest puta veći od čelika ($\lambda_{Al} = 237$ $Wm^{-1}K^{-1}$, $\lambda_{č} = 43$ $Wm^{-1}K^{-1}$). Kao rezultat toga izvor topline koji se koristi za zavarivanje aluminija mora biti znatno jači i lokaliziraniji. To se posebno odnosi na debele dijelove, gdje će prekomjerni gubici topline tijekom zavarivanja rezultirati naljepljivanjem materijala (stijenke većih debljina potrebno je predgrijati).
- Količina topline potrebna da se jednom kilogramu aluminija povisi temperatura za jedan kelvin gotovo je dvostruko veća od čelika ($c_{p,\,Al} = 0.91$ $kJkg^{-1}K^{-1}$, $c_{p,\,č} = 0.49$ $kJkg^{-1}K^{-1}$).
- Približno šest puta veća električna vodljivost aluminija naspram čelika veliki je nedostatak kod elektrootpornog zavarivanja, gdje se toplina za fuziju metala stvara električnim otporom ($\sigma_{Al} = 3.77\times10^{7}$ $Sm^{-1}$, $\sigma_{č} = 6.99\times10^{6}$ $Sm^{-1}$).
- Za razliku od čelika, aluminij ne mijenja boju pri povećanju temperature. Zavarivaču je time otežana procjena trenutka taljenja materijala.
- Budući da je aluminij nemagnetski materijal, magnetsko puhanje luka prilikom zavarivanja ne stvara probleme.
- Aluminij ima modul elastičnosti tri puta manji od čelika, što podrazumijeva da se pod opterećenjem deformira tri puta više od čelika, ali da apsorbira i tri puta više energije tijekom udarnog opterećenja ($E_{Al} = 70$GPa, $E_{č} = 210$GPa).
- Budući da aluminij ima plošno centriranu kubnu rešetku, zadržava svoju tvrdoću kako temperatura pada. Ova kristalna struktura također osigurava izvrsnu sposobnost oblikovanja, omogućavajući proizvodnju materijala korištenjem postupaka kao što su ekstruzija, valjanje i duboko vučenje.

- Za razliku od čelika, fazne promjene prilikom grijanja ili hlađenja aluminija ne postoje. Velike brzine hlađenja imaju malen ili gotovo nikakav utjecaj na aluminijeve legure. [11]

## 2.3. Vrste aluminijskih legura

Najpoznatiji klasifikacijski sustav gnječenih aluminijskih legura razvio je Aluminium Association. Temelji se na kombinaciji četveroznamenkastih brojeva i slova. Prva četiri broja predstavljaju kemijsku strukturu legure, dok slovo i sljedeći broj označavaju uvjete u kojima je provedeno očvršćivanje legure. Ova metoda označavanja danas je široko prihvaćena u cijelom svijetu i učinkovito je nadomjestila prethodne sustave koji su se razlikovali od države do države. Iako prema tehnološkoj preradi još postoje i lijevane aluminijske legure njihova primjena u brodograditeljstvu nije izražena. [1]

*Tablica 1. Označivanje Al-legura [1]*

| Serija | Glavni legirajući elementi |
|---|---|
| 1XXX | Al |
| 2XXX | Al-Cu |
| 3XXX | Al-Mn |
| 4XXX | Al-Si |
| 5XXX | Al-Mg |
| 6XXX | Al-Mg-Si |
| 7XXX | Al-Zn |
| 8XXX | Razni |

Granica razvlačenja kemijski čistog aluminija izuzetno je malena, svega 28MPa. Stoga njegova primjena bez legiranja nije uobičajena. Otapanjem legirnih elemenata u osnovnom metalu stvara se čvrsta otopina. Atomi legirnih elemenata otopljeni u kristalnoj rešetki osnovnog metala tvore intersticijske ili supstitucijske kristale mješance. Supstitucijski (ili zamjenski) atomi pridonose poboljšavanju čvrstoće, kao i žilavosti, dok intersticijski (ili uključinski) atomi pridonose poboljšavanju čvrstoće, ali smanjuju žilavost. Veličina i krutost otopljenih atoma legirnog elementa razlikuju se od atoma osnovnog metala. Tako otopljeni atomi u dodiru s postojećim nesavršenostima kristalne rešetke osnovnog metala uzrokuju očvrsnuće spriječavajući dislokaciju.

Bakar je bio najčešći materijal koji se koristio za povećanje čvrstoće aluminija u 19. stoljeću, no ubrzo se zbog agresivne korozije pokazao neprikladnim za pomorsku uporabu. Danas su osnovni legirni elementi silicij, mangan, magnezij, litij i cink. Elementi poput nikla, kroma, titana, cirkonija i skandija mogu se dodati u malim količinama kako bi se postigla specifična svojstva. U nastavku su navedeni učinci legirnih elemenata. [1], [5], [14]

*Tablica 2. Utjecaj legirnih elemenata na mehanička svojstva [1]*

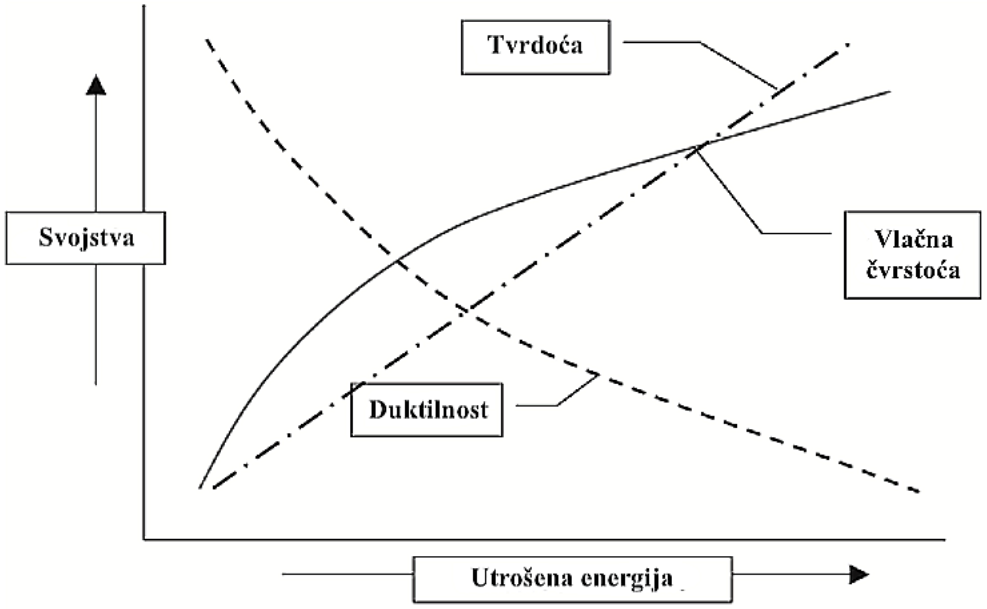
| Element | Učinak |
|---|---|
| Magnezij (Mg) | povećava čvrstoću mehanizmom očvršćivanja pomoću čvrste topivosti i poboljšava očvršćivanje deformacijom |
| Mangan (Mn) | povećava čvrstoću mehanizmom očvršćivanja pomoću čvrste topivosti i poboljšava očvršćivanje deformacijom |
| Bakar (Cu) | značajno povećava čvrstoću, omogućuje precipitacijsko očvršćivanje, smanjuje duktilnost, otpornost na koroziju i zavarljivost |
| Silicij (Si) | povećava čvrstoću i duktilnost, u kombinaciji s magnezijem omogućava precipitacijsko očvrsnuće |
| Cink (Zn) | značajno povećava čvrstoću, dozvoljava precipitacijsko očvrsnuće, može izazvati napetosnu koroziju |
| Željezo (Fe) | povećava čvrstoću čistog aluminija, uglavnom je zaostali element |
| Krom (Cr) | povećava otpornost na napetosnu koroziju |
| Nikal (Ni) | poboljšava čvrstoću na povišenim temperaturama |
| Titan (Ti) | koristi se za smanjenje veličine zrna, posebice u dodatnom materijalu |
| Cirkonij (Zr) | koristi se za smanjenje veličine zrna, posebice u dodatnom materijalu |
| Litij (Li) | značajno povećava čvrstoću i Youngov modul, omogućuje precipitacijsko očvršćivanje i smanjuje gustoću |
| Skandij (Sc) | značajno povećava čvrstoću mehanizmom starenja materijala, koristi se za smanjenje veličine zrna kod zavarivanja |
| Olovo (Pb) | poboljšava svojstva kod OOČ |
| Bizmut (Bi) | poboljšava svojstva kod OOČ |

Osim legiranja povećanje čvrstoće aluminijskih legura postiže se hladnom deformacijom i precipitacijskim očvrsnućem. Toplinski neočvrstljive legure ne mogu očvrsnuti precipitacijom već isključivo hladnom deformacijom. U tu skupinu spadaju serije 3XXX, 4XXX i 5XXX. Toplinski očvrstljive legure pripadaju serijama 2XXX, 6XXX i 7XXX. Tablica 3. prikazuje podjelu aluminijskih legura prema mogućnosti očvrsnuća. [1], [15]

*Tablica 3. Podjela aluminijskih legura prema mogućnosti očvrsnuća [1]*

| Serija | Glavni legirajući elementi | Način očvrsnuća |
|---|---|---|
| 2XXX | Al-Cu | Deformiranje u hladnom stanju |
| 3XXX | Al-Mn | Precipitacijom |
| 4XXX | Al-Si | Deformiranje u hladnom stanju |
| 5XXX | Al-Mg | Deformiranje u hladnom stanju |
| 6XXX | Al-Mg-Si | Precipitacijom |
| 7XXX | Al-Zn | Precipitacijom |

Hladno očvrsnuće mehanizam je povećanja čvrstoće i tvrdoće metala i legura koje se ne mogu poboljšati toplinskom obradom. Podrazumijeva promjenu oblika uzrokovanu primjenom mehaničke energije. Napredovanjem deformacije, metal postaje čvršći, tvrđi i manje plastičan, kao što se vidi na slici 5. Naposljetku, postiže se točka u kojoj je daljnja deformacija nemoguća jer je metal postao previše krhak da bi se deformirao bez lomljenja. Očvrsnuće nastaje zbog povećanja dislokacija kristalne strukuture. Izduživanjem metalnih zrna u radnom smjeru pridonosi stvaranju unutarnjeg naprezanja. Unutarnje naprezanje ne samo da povećava čvrstoću i smanjuje duktilnost, već uzrokuje i lagano smanjenje gustoće, smanjenje električne vodljivosti, porast koeficijenta toplinskog širenja i smanjenje otpornosti na koroziju. Stoga se očekuje da deformacije nastale zavarivanjem budu veće od metala koji nije hladno obrađen. [1]

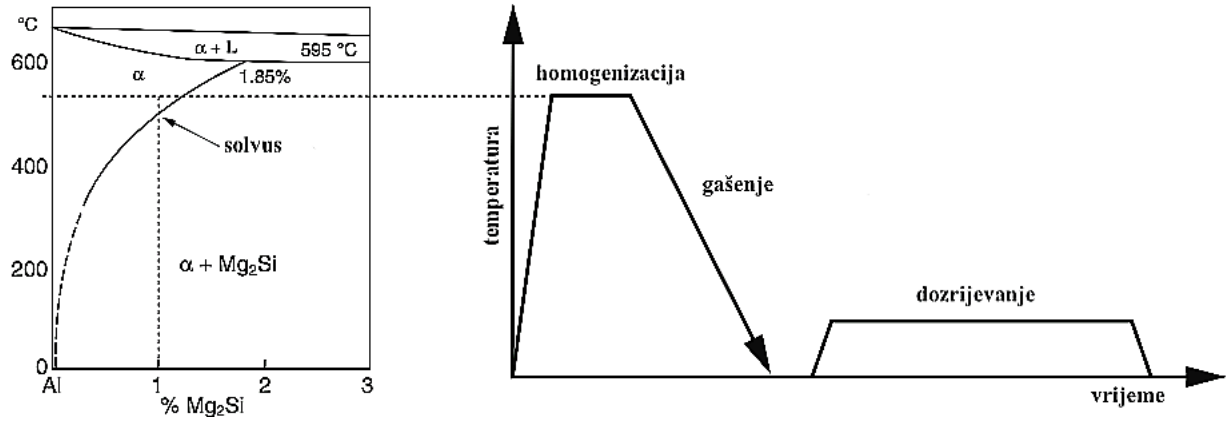



*Slika 5. Utjecaj hladnog očvrsnuća na mehanička svojstva [1]*

Kada se hladno obrađeni metal zagrije na određenu temperaturu, unutarnja naprezanja počinju se smanjivati. Žarenjem hladno deformiranog aluminija dolazi do rekristalizacije zrna, što rezultira smanjenjem čvrstoće i poboljšanjem duktilnosti. Ovim se procesom često dobiva manja veličina zrna. Na temperaturama iznad temperature rekristalizacije, nova zrna počinju apsorbirati jedno drugo i širiti se u veličini. Što se tiče mehaničkih svojstava i zavarljivosti, gruba veličina zrna obično se smatra nepoželjnom. Deformiranje u hladnom stanju provodi se valjanjem, kovanjem, vučenjem, prešanjem i sl. [1]

Precipitacijsko očvrsnuće mehanizam je kontroliran vremenom i temperaturom koji mijenja topljivost legirnih elemenata u osnovnom metalu. Legirni elementi poput Cu, Zn, Si i Mg omogućuju formiranje sitnih precipitata koji deformiraju kristalnu rešetku aluminija, odnosno stvaraju intermetalne spojeve s aluminijem. Da bi legura precipitacijski očvrsnula, prvo se mora zagrijati do temperature rastopnog žarenja i držati na toj temperaturi dovoljno dugo kako bi se legirni elemenati potpuno otopili. Potom se metal brzo hladi (gasi) u vodi. Brzina hlađenja mora biti dovoljno velika kako bi legirni elementi ostali prisilno zarobljeni u čvrstoj otopini čime dolazi do njenog prezasićenja. Zbog prezasićenja, tj. znatno većeg udjela legirnog elementa u čvrstoj otopini nego što je ravnotežna koncentracija, legura se nalazi u neravnotežnom stanju. Prirodno

dozrijevanje na temperaturi okoline ili umjetno pri povišenim temperaturama zadnji je korak precipitacijskog očvrsnuća. Nastala kristalna rešetka je izvitoperena i to leguri daje izuzetno visoku čvrstoću i tvrdoću. Slika 6. prikazuje postupak precipitacijskog očvršćivanja legure serije 6XXX. [6], [15]




*Slika 6. Prikaz postupka precipitacijskog očvršćivanja legure serije 6XXX [12]*

Važan čimbenik mehaničkih svojstva, osim kemijskog sastava legure, su stanja toplinske obrade. I za proizvođača i za inženjera zavarivanja svakako je presudno da se ovo stanje jednostavno i nepobitno utvrdi. Stanja toplinske obrade gnječenih legura su:

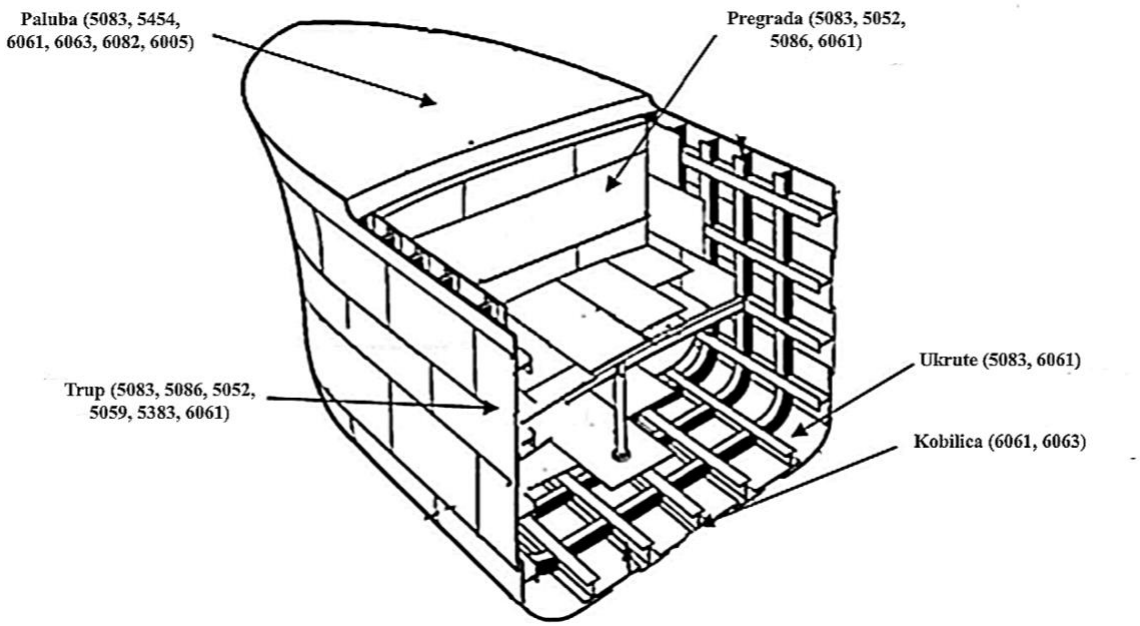
- F - primarno (isporučeno) stanje - mehanička svojstva nisu specificirana
- O - žareno stanje - koristi se u svrhu smanjenja čvrstoće, poboljšanja oblikovljivosti i dimenzijske stabilnosti
- H - očvrsnuto stanje - za legure očvrsnute hladnom deformacijom, s naknadnim ili bez naknadnog zadržavanja, na temperaturi koja izaziva djelomično omekšavanje metala. Iza ove oznake slijede uvijek najmanje dva broja. Prvi označava vrstu toplinske obrade, a drugi stupanj hladnog očvrsnuća. Vrste toplinske obrade su:
  - H1 - hladno deformirano
  - H2 - hladno deformirano i djelomično žareno
  - H3 - hladno deformirano i stabilizirano
  - H4 - hladno deformirano i zaštićeno prevlakom

- T - toplinski obrađeno - za legure koje su toplinski obrađene, sa ili bez hladnog očvrsnuća. Iza T uvijek slijedi jedna ili više znamenki koje označavaju određeni slijed postupaka:
  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

  Dodatne znamenke koriste se za označavanje varijacija toplinske obrade ili hladne deformacije koje značajno mijenjaju svojstva proizvoda. Npr. TX označava popuštanje napetosti nekim postupkom, primjerice, istezanjem, sabijanjem i slično. [1], [11], [13]

## 2.4. Svojstva i primjena aluminijskih legura u brodogradnji

Gnječene legure primjenjuju se kao strukturni elementi koji se ugrađuju u trup ili nadgrađe broda u obliku limova, ploča i profila. Od dostupnih aluminijskih legura, jedine legure koje se preporučuju za upotrebu u brodograđevnoj industriji su serije 5XXX i 6XXX. Razlozi tome, kao što je i ranije napomenuto, su visoki omjer čvrstoće i težine, odlična korozijska otpornost, dobra oblikovljivost, dobra zavarljivost i dr. Iznad i ispod palube u upotrebi su aluminijske legure serije 6XXX najčešće u ekstrudiranom ili obliku lima, te legure serije 5XXX u obliku limova ili ploča. Neke od gnječenih aluminijskih legura koje se upotrebljavaju pri proizvodnji trupa broda su legure 5083, 5086, 5454 i 5456 te odnedavno 5059 i 5383. Najčešće korištene legure serije 6XXX su 6061, 6063 i 6082. Ekstrudirane legure serije 6XXX kompleksnih poprečnih presjeka imaju široku primjenu kod raznih brodskih konstrukcija, poput pregrada, rebara, poprečnih greda, namještaja, stepeništa itd. Slika 7. prikazuje strukturne dijelove aluminijskih brodova i pripadajuće Al-legure. [5], [13]




*Slika 7. Strukturni dijelovi aluminijskih brodova i pripadajuće Al-legure [13]*

### 2.4.1. Serija 5XXX

Legure serije 5XXX imaju izvrsnu otpornost na koroziju u slanoj vodi i na niskim temperaturama postižu odličnu čvrstoću i tvrdoću. Mogu se lagano zavariti do debljine 20 mm pomoću različitih tehnika zavarivanja. Magnezij kao glavni legirni element odgovoran je za visoku čvrstoću ove serije. Mehanička svojstva dostupna za brodsku primjenu posebno se reguliraju različitim toplinskim stanjima (H116, H321, H111, H112, H116 i H32). Legura 5083 najčešće je korištena legura serije 5XXX u brodogradnji. Ima visoku čvrstoću i otpornost na koroziju i lako je oblikovljiva. Kako je uporaba aluminija i njegovih legura u pomorskim primjenama rasla, razvile su se nove aluminijske legure s boljim svojstvima. Izmjenom kemijskog sastava nastala je legura 5383 koja ima niži sadržaj silicija i željeza i veći udio bakra, magnezija, mangana, cinka i cirkonija. Ona je nadmašila leguru 5083 u pogledu čvrstoće, otpornosti na koroziju i mogućnosti oblikovanja. Uz 5083, daljnje modifikacije u kemijskom sastavu legura rezultirale su razvojem legura 5059, 5052, 5086, 5454 i 5456. Tablica 4. navodi kemijski sastav i mehanička svojstva različitih legura koje se mogu koristiti u pomorskim primjenama. Za trupove i ukrućenja, brodski pod i nadgradnju, najčešće se koristi legura 5083-H113/H321. Ostale aluminijske legure koje se koriste u konstrukciji trupova različitih plovila uključuju 5086, 5454, 5456, 5059 i 5383. Te se legure obično

koriste u žarenom stanju, ali kada je potrebna veća čvrstoća one su dodatno očvrsnute. Legura 5086-H321, debljine 4,5 do 12,7 mm, uobičajen je materijal trupa aluminijskog broda. Kabine, spremnici za gorivo i pregrade izrađeni su od istog materijala kao i trup, iako se nekad koristi i legura 5052. Legure 5083 i 5454 često se koriste u brzim putničkim brodovima. [13]

*Tablica 4. Mehanička svojstva i kemijski sastav serije 5XXX [13]*

| Legura | Kemijski sastav | Stanje toplinske obrade | $R_e$ (Mpa) | $R_m$ (Mpa) |
|---|---|---|---|---|
| 5083 | Mg = 4,0–4,90; Mn = 0,40–1,0; Cr = 0,05–0,2; Cu+Fe+Si+Zn≤1,15; Ti≤0,15 | H116<br>H321 | 215<br>215-295 | 305<br>305-385 |
| 5052 | Si ≤ 0,40; Fe ≤ 0,40; Cu ≤ 0,10; Mn = 0,40–1,00; Mg = 4–4,90; Cr=0–0,25; Zn≤0,25 Ti≤0,15 | H321 | 195 | 228 |
| 5059 | Mg = 5,0–6,0; Mn = 0,6–1,20; Cr = 0–0,30; Zr = 0,05–0,25; Cu + Fe +Si+Zn≤2,90;Ti≤0,15 | H116/H31 | 270 | 370 |
| 5086 | Si ≤ 0,40; Fe ≤ 0,50; Cu = 0,10; Mn = 0,2–0,70; Mg = 3,50–4,50; Cr=0,05≤0,25; Zn=≤0.25; Ti=≤0,15 | H116 | 207 | 290 |
| 5383 | Si ≤ 0,25; Fe ≤ 0,25; Cu ≤ 0,20; Mn ≤ 0,7–1,0; Mg = 4,0–5,20; Cr≤0,25; Zn≤0,40; Ti≤0,15; Zr≤0,20 | H116 | 220 | 305 |
| 5454 | Si ≤ 0,25; Fe ≤ 0,40; Cu ≤ 0,10; Mn ≤ 0,5–1,0; Mg = 2,4–3,0; Cr=0,05–0,20; Zn=≤0,25 Ti=≤0,20 | H321 | 180 | 260 |
| 5456 | Si ≤ 0,25; Fe ≤ 0,40; Cu ≤ 0,10; Mn ≤ 0,5–1,0; Mg = 4,7–5,50; Cr = 0,05–0.20; Zn ≤ 0,25; Ti ≤ 0,20 | H116<br>H321 | 200<br>255 | 315<br>350 |
| 5754 | Si ≤ 0,40; Fe ≤ 0,40; Cu ≤ 0,10; Mn ≤ 0,50; Mg = 2,46–3,60; Cr=0,30; Zn=≤0,20; Ti=≤0,15 | H111 | 80 | 190-240 |

## 2.4.2. Serija 6XXX

Legure serije 6XXX imaju dobru čvrstoću i otpornost na koroziju te se mogu toplinski obrađivati. Sadržaj magnezija u ovim legurama iznosi 0,4–1,2%, a sadržaj silicija 0,2–1,3%. Ekstrudiranost je jedna od najznačajnijih karakteristika ove serije. Lako se zavaruju i često se koriste u brodogradnji u ekstrudiranom obliku. U usporedbi sa serijom 5XXX, glavni legirni elementi ove legure su Mg i Si, koji blago smanjuju otpornost na koroziju i daju približno jednaku čvrstoću. Ekstrudirane legure složenih poprečnih presjeka serije 6XXX obično se koriste kao rebra broda i poprečne grede trupa. Legure 6061, 6063 i 6082 najčešće su korištene legure serije 6XXX u brodograđevnoj industriji. Legura 6061-T6 uobičajeni je materijal trupa malih brodova gdje nisu potrebne jače, hladno deformirane legure. Pregrade, palubni paneli i obloge palube najčešće se izrađuju od legure 6061. Legura 6063 također se često koriste u konstrukciji nadgrađa brodova s

ciljem povećanja stabilnosti. Najčešće korišteni profili za strukturne dijelove izrađeni su od legura 6061 i 6063. 6082 je legura visoke čvrstoće koja se koristi u brodskim okvirima i ukrutnim pločama palube. Glavnina ukruta izrađena je od serije 6XXX, a upravo ta serija polako pronalazi svoju primjenu i u konstrukciji trupa broda. Tablica 5. navodi kemijski sastav i mehanička svojstva različitih legura serije 6XXX. [13]

*Tablica 5. Mehanička svojstva i kemijski sastav serije 6XXX [13]*

| Legura | Kemijski sastav | Stanje toplinske obrade | $R_e$ (Mpa) | $R_m$ (Mpa) |
|---|---|---|---|---|
| 6005 | Si = 0,50–0,90; Mg = 0,40–0,70; Cu + Fe + Zn ≤ 0,85; Mn + Cr = 0,12–0,50; Ti ≤ 0,10 | T6 | 225 | 270 |
| 6082 | Si = 0,70–1,30; Mn = 0,40–1,0; Mg = 0,60–1,2; Cu+Fe+Cr+Zn≤1,05; Ti≤0,10 | T6 | 260 | 310 |
| 6061 | Si = 0,40–0,80; Mn = 0,15; Mg = 0,80–1,20; Cu = 0,15–0,40; Fe+Zn≤0,95; Cr=0,04–0,35; Ti≤0,15 | T6 | 240 | 260 |
| 6063 | Si = 0,20–0,6; Mn = 0–0,10; Mg = 0,45–0,9; Cu = 0–0,10; Fe+Zn≤0,45; Cr=0–0,10; Ti≤0,10 | T6 | 170 | 215 |

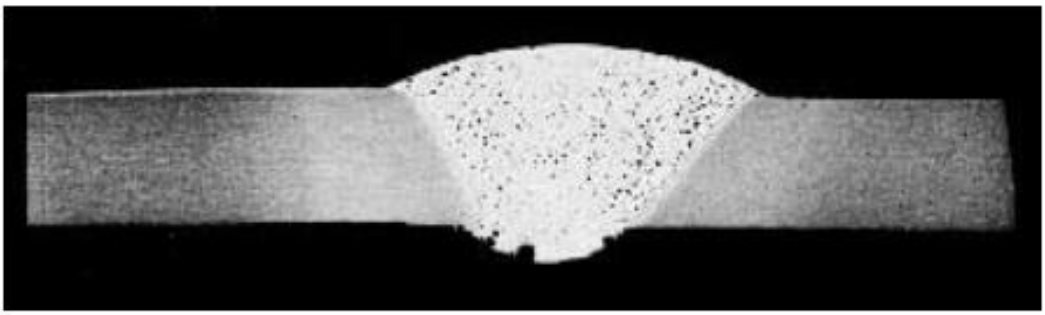
## 2.5. Problemi zavarljivosti aluminijskih legura

Aluminijske legure relativno je lagano zavariti pod uvjetom da se koriste odgovarajuće zaštitne mjere. Međutim, presudno je biti svjestan nedostataka i kako ih spriječiti. U nastavku su navedeni najčešći nedostaci zavarivanja aluminija.

### 2.5.1. Poroznost

Poroznost nastaje kao rezultat otopljenog plina u talini metala zavara. Prilikom stvrdnjavanja otopljeni plin ostaje zarobljen u obliku pora u ohlađenom i skrutnutom metalu zavaru (slika 8). Poroznost može varirati od izuzetno sitne mikroporoznosti pa sve do grubih pora promjera 3 ili 4 mm. U slučaju aluminija, krivac je vodik koji ima visoku topivost u rastaljenom stanju, ali vrlo nisku u čvrstom stanju. Zbog onečišćenja dodatnog materijala vodikom, zavarivanje TIG postupkom rezultira manjom stopom poroznosti u odnosu na MIG postupak zavarivanja. Jedan od načina kontroliranja poroznosti je smanjenjem brzine skrućivanja metala zavara, čime se osigura izlaz mjehurića vodika iz metala zavara. Sličan efekt može se postići smanjenjem brzine

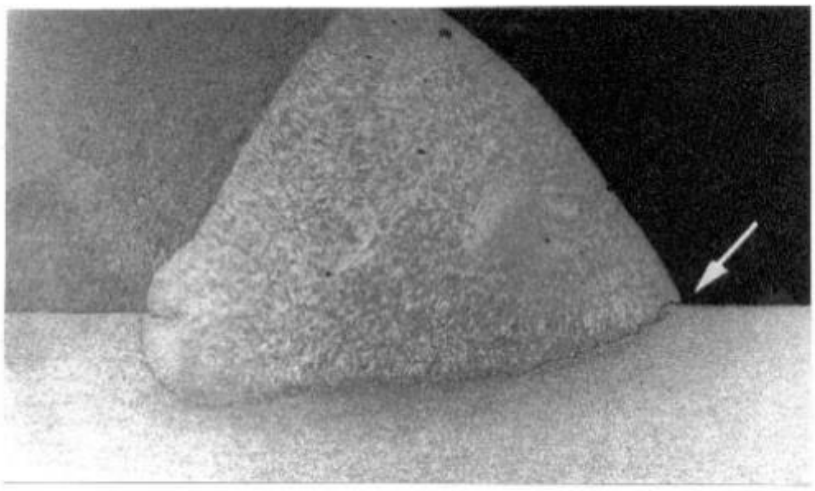
zavarivanja. Kako se napon i/ili duljina električnog luka povećavaju, rastaljeni metal izložen je većem onečišćenju, a poroznost kao rezultat toga raste. Izmjenom kemijskog sastava legure također se utječe na količinu poroznosti koja se može pojaviti. Drugi izvor vlage koji je lako propustiti je količina vodika koja se nalazi u zaštitnim plinovima. Sustav za opskrbu plinom treba redovito pregledavati radi istjecanja, a oštećena crijeva treba zamijeniti što je prije moguće. Čistoća osnovnog metala također je presudna za održavanje niske razine poroznosti. Nakon temeljitog odmašćivanja potrebno je mehaničko pranje, poput struganja žicom od nehrđajućeg čelika, kako bi se uklonila oksidna prevlaka koja može biti hidratizirana. [1]



*Slika 8. Primjer poroznosti u sučeonom spoju aluminija debljine 6mm [1]*

## 2.5.2. Oksidni film

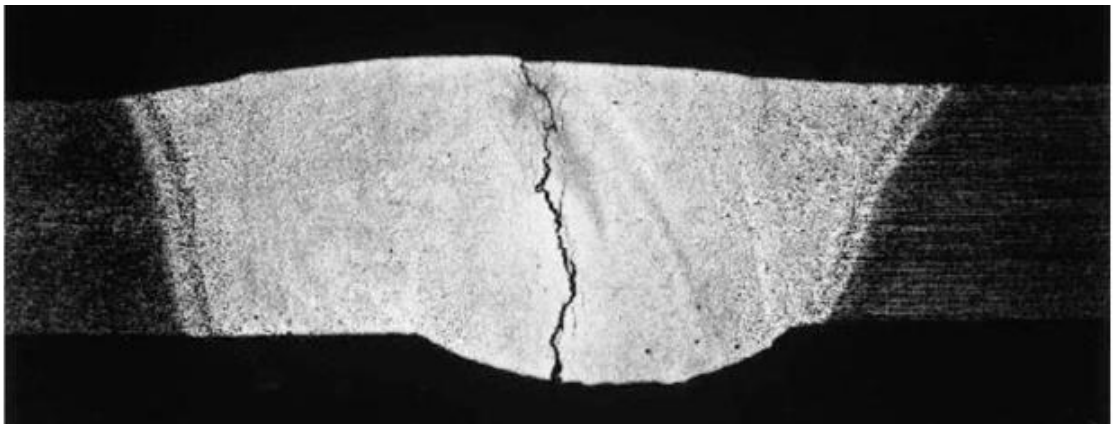
Jedna od karakteristika aluminija i njegovih legura je veliki afinitet prema kisiku. Atomi aluminija spajaju se s kisikom u zraku i tvore oksid s visokim talištem, koji prekriva površinu metala. Budući da se aluminijev oksid tali na temperaturi većoj od samog aluminija, oksid se mora očistiti prije nego što započne zavarivanje. Oksidni sloj odlično se skida četkanjem, ručnom ili rotirajućom električnom četkom s nitima od nehrđajućeg čelika. Kada se koristi postupak zavarivanja MIG, struja inertnog plina prekriva zonu taljenja, isključujući sav zrak iz područja zavarivanja. Time se sprječava ponovna oksidacija rastaljenog aluminija. Kod TIG postupka za zavarivanje aluminijskih materijala primjenjuje se izmjenična struja zavarivanja gdje se na pozitivnoj poluperiodi čisti oksid, a negativnoj hladi vrh volframove elektrode. [14], [16]



*Slika 9. Oksidni film u kutnom zavaru [1]*

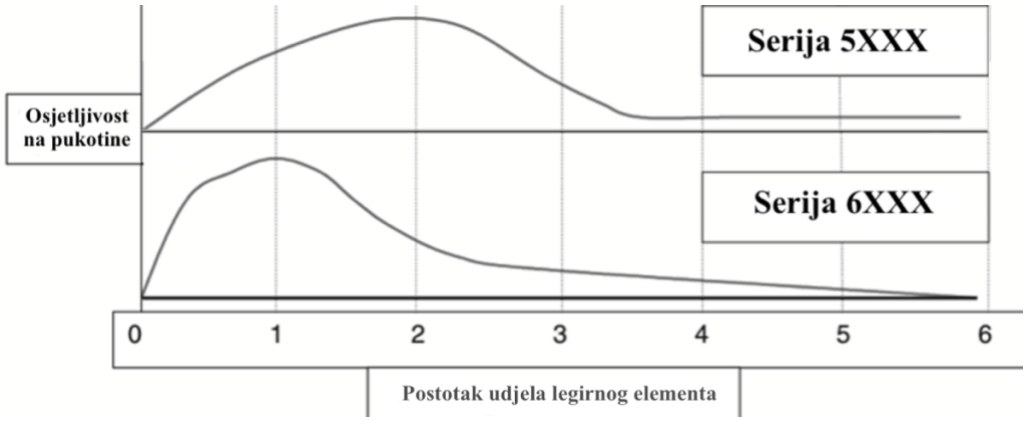
### 2.5.3. Tople pukotine

Solidifikacijom aluminija pojavljuju se naprezanja i deformacije koje su glavni uzrok nastajanja toplih pukotina. Ove pukotine primarno nastaju između granica zrna, ali mogu biti i interkristalne. Tople pukotine stvaraju se u metalu zavara i obično se pojavljuju duž sredine zavara (slika 10.). Na pojavu toplih pukotina utječe metal zavara i parametri zavarivanja. Visoki unosi topline dobiveni korištenjem visokih struja i malih brzina zavarivanja doprinose stvaranju pukotina. Postupci zavarivanja kod kojih je unos topline niži rezultiraju smanjenjem pojave stvaranja pukotina. Osnovni način za spriječavanje pojave pukotina u zavarima aluminijskih legura je upravljanje sastavom metala zavara korištenjem odgovarajućeg dodatnog materijala. [1], [17]



*Slika 10. Prikaz tople pukotine nastale prilikom zavarivanja [1]*

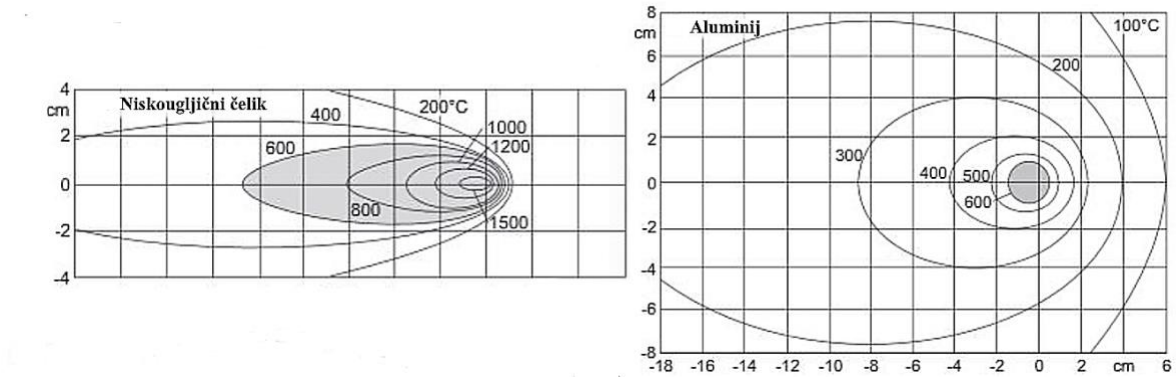
Rezultati ispitivanja utjecaja legirnih elemenata na pojavu pukotina u zavaru odredili su ono što se naziva „hot short range“, raspon unutar kojeg legura ima visoki rizik od toplih pukotina. Na slici 11. prikazan je utjecaj koncentracije legirnih elemenata na osjetljivost pojave pukotina. [1]




*Slika 11. Utjecaj koncentracije legirnih elemenata na osjetljivost pojave pukotina [1]*

## 2.5.4. Toplinska vodljivost

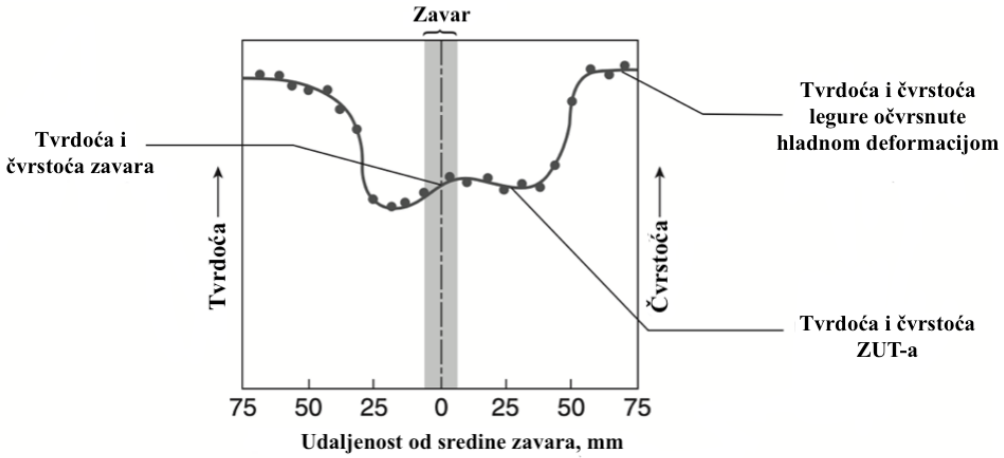
Toplinska vodljivost je svojstvo koje utječe na brzinu odvođenje topline s mjesta zavarivanja. Kako je toplinska vodljivost aluminija gotovo šest puta veća od čelika kod zavarivanja aluminijskih legura potrebno je predgrijavanje ili povećanje unosa energije. Naglo odvođenje topline stvara opasnost od naljepljivanja, pa se pregrijavanje materijala preporučuje kod zavarivanja stjenki većih od 12 mm. Predgrijavanje aluminijskih legura smanjuje brzinu ohlađivanja, suši površinu, smanjuje pojavu nastanka pukotina i smanjuje zaostala naprezanja. Slika 12. prikazuje raspored temperatura prilikom zavarivanja čelika i aluminija. [16]



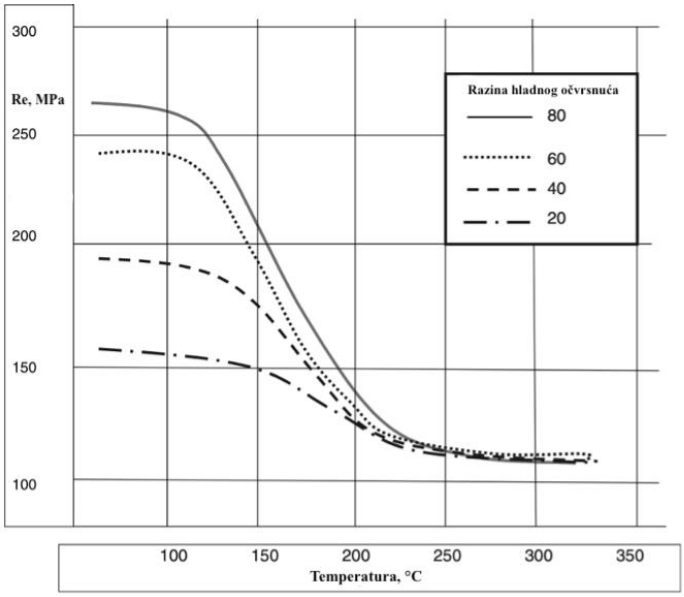

*Slika 12. Raspored temperatura prilikom zavarivanja čelika i aluminija [16]*

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

Toplina generirana postupkom zavarivanja rezultira stvaranjem različitih zona zavarenog spoja. Razlikujemo osnovni materijal, zonu utjecaja topline i metal zavara. Budući da je ZUT prošao jedan ili više ciklusa zagrijavanja i hlađenja, njegova se svojstva mogu drastično razlikovati od svojstava osnovnog metala. To se posebno odnosi na aluminijske legure koje su bile podvrgnute hladnom ili precipitacijskom očvrsnuću. Zbog rekristalizacije zone utjecaja topline, čvrstoća i tvrdoća hladno očvrsnutih legura je smanjena (slika 13.). Rekristalizacija započinje kada temperatura ZUT-a prijeđe 200 °C, a potpuno žarenje nastupa na 300 °C kao što je prikazano na slici 14. [1]

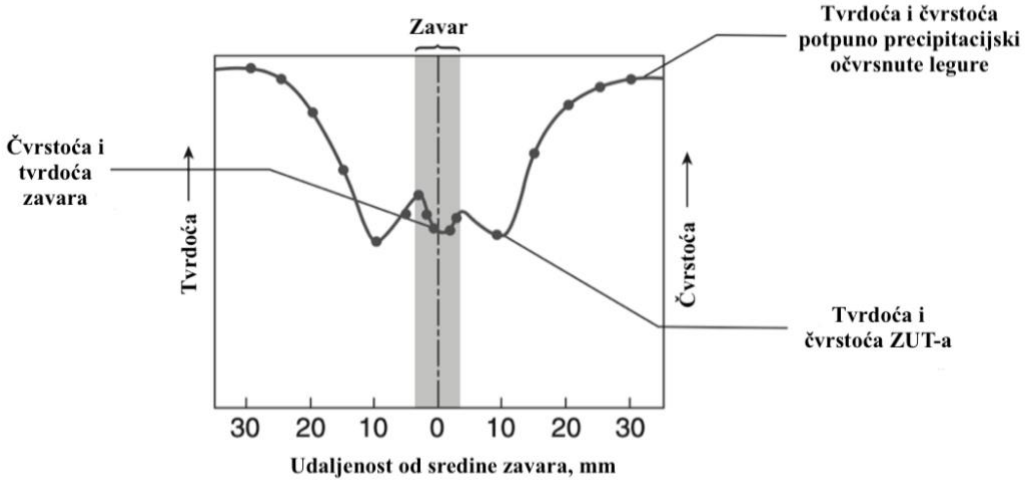



*Slika 13. Utjecaj zavarivanja na legure aluminija očvrsnute hladnom deformacijom [1]*




*Slika 14. Utjecaj temperature žarenja na granicu razvlačenja [1]*

U legurama koje se toplinski obrađuju, može se primijetiti slična situacija (slika 15.). Rezultat smanjenja čvrstoće je pogrubljenje zrna. Kod legura koje su ojačane toplinskom obradom „odžarena“ zona tijekom vremena ponovno otvrdnjava i čvrstoća se polako povećava gotovo do razine čvrstoće osnovnog materijala. Izbor odgovarajućeg dodatnog materijala može značajno doprinijeti većoj čvrstoći metala zavara. [1]

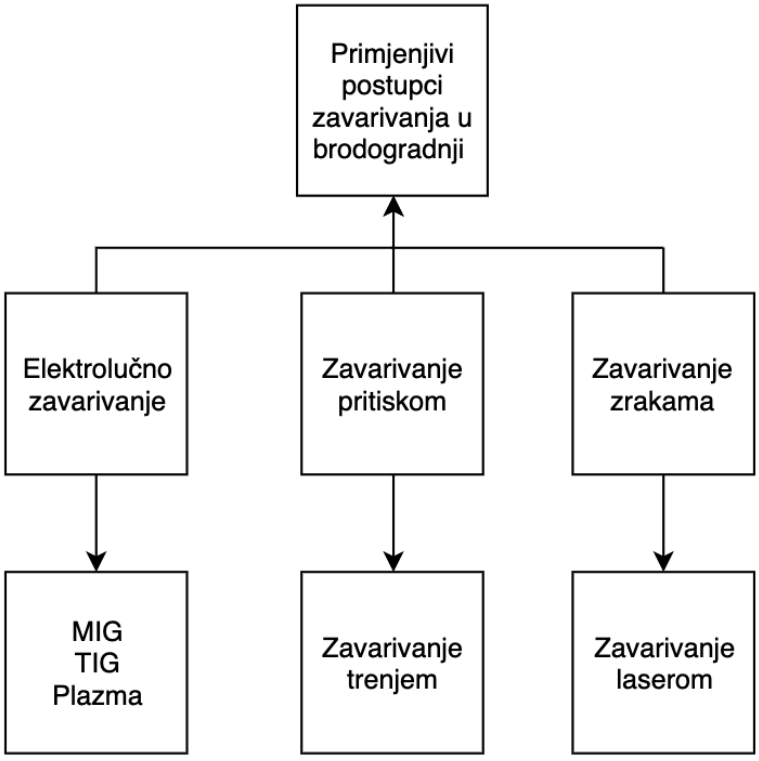



*Slika 15. Utjecaj zavarivanja na precipitacijski očvrsnute legure [1]*

# 3. ZAVARIVANJE ALUMINIJSKIH LEGURA

## 3.1. Općenito

Kvaliteta i pouzdanost brodova često je proporcionalna kvaliteti zavarenih spojeva. Kao rezultat toga, izbor optimalnog postupka zavarivanja je ključan. Razlikujemo tri velike grupe primjenjivih postupaka zavarivanja u brodogradnji: elektrolučno zavarivanje, zavarivanje pritiskom i zavarivanje zrakama (slika 16). U praksi najčešći postupak zavarivanja aluminijskih legura u brodograđevnoj industriji je MIG. Razlog tome je što je postupak plazma zavarivanja skuplji i specifičniji, a TIG postupak spor i neproduktivan. Razvojem tehnologije postupci poput zavarivanja laserom i zavarivanja trenjem polako pronalaze svoju primjenu u izgradnji brodova specijalne namjene. Cilj ovog poglavlja je dati pregled različitih postupaka spajanja aluminijskih legura. [1], [17]

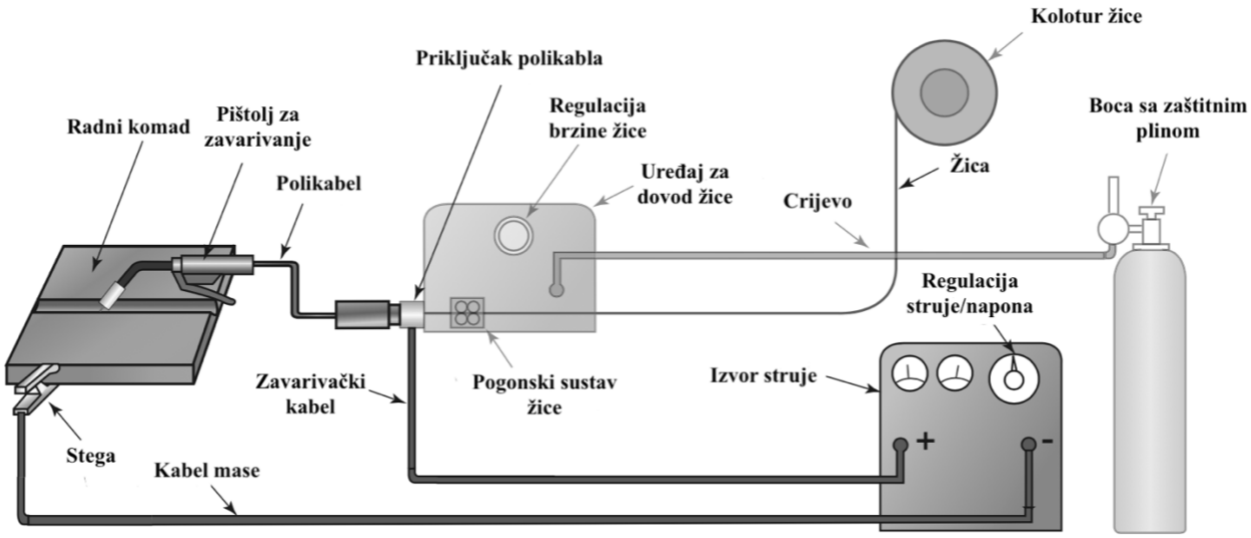



*Slika 16. Primjenjivi postupci zavarivanja u brodogradnji [17]*

## 3.2. MIG zavarivanje

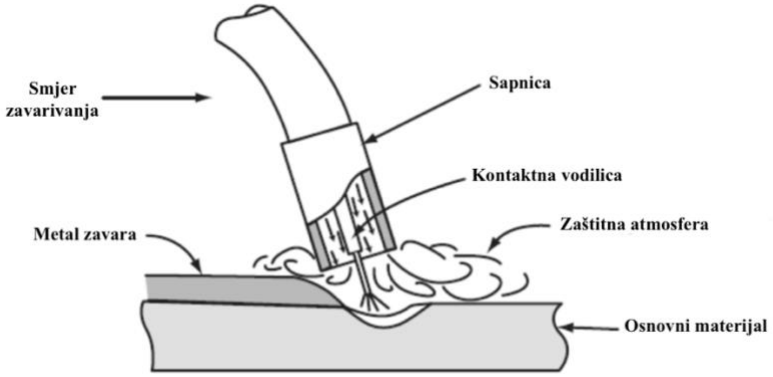
### 3.2.1. Osnove procesa

Postupak elektrolučnog zavarivanja u zaštiti inertnog plina, često poznat kao MIG (eng. metal inert gas), razvijen je u SAD-u sredinom 1940-ih. Od svog početka, postupak je našao široku primjenu u raznim sektorima, od proizvodnje brodova pa sve do automobila. To je postupak zavarivanja koji koristi kontinuiranu elektrodu u obliku žice, spojenu na pozitivni pol istosmjernog izvora struje. Na slici 17. prikazana je oprema MIG zavarivanja koja se sastoji od pištolja za zavarivanje, polikabla, uređaja za dovod žice, izvora struje, regulatora protoka zaštitnog plina, boce sa zaštitnim plinom itd. [1], [14]




*Slika 17. Prikaz opreme za MIG zavarivanje [14]*

Uređaj za dovod žice kroz polikabel i pištolj dodaje žicu u električni luk. Žica je istovremeno i elektroda i dodatni materijal. Zaštitni plinovi koji se koriste u postupku (inertni plinovi i mješavine) dovode se na mjesto zavarivanja kroz sapnicu na pištolju koja se nalazi oko kontaktne cjevčice. Kratkim spojem između žice i radnog komada uspostavlja se vodljivi prostor za održavanje električnog luka. Električni luk potom topi žicu elektrode koja se taloži da bi se stvorio zavar. Kada se postupak prekine, zavar se ohladi, stvrdne i formira. Na slici 18. prikazan je detalj MIG postupka zavarivanja. [1], [14], [20]

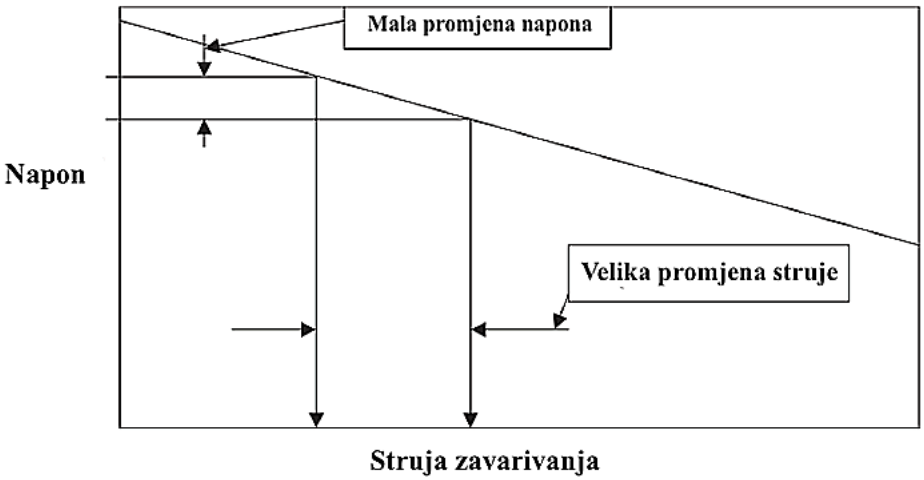



*Slika 18. Detalj MIG postupka zavarivanja [18]*

## 3.2.2. Oprema za MIG postupak

### 3.2.2.1. Izvor struje

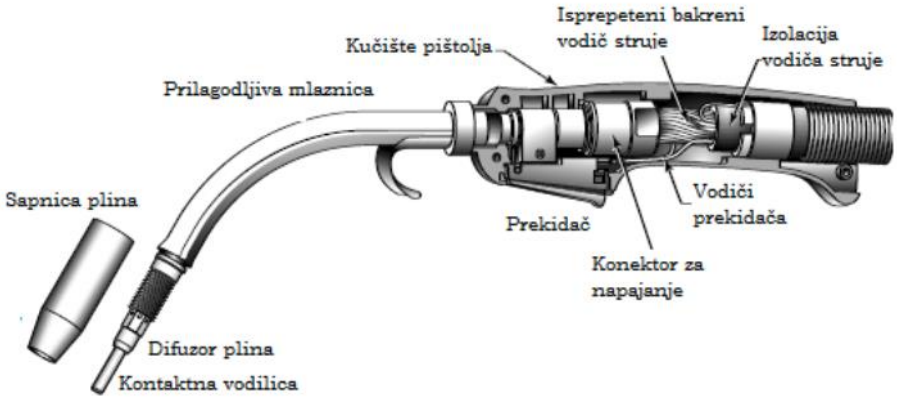
Električnom luku potreban je izvor struje koji ima dobru korelaciju između struje zavarivanja i napona. Upravo tu vezu zovemo dinamičkom karakteristikom izvora napajanja. Praćenjem i korekcijom parametara utječe se na stabilnost električnog luka, a samim time i na kvalitetu zavarenih spojeva. Pošto MIG postupak koristi značajku kontinuiranog dovoda žice, presudno je da brzina dodavanja žice odgovara brzini taljenja žice u luku. Razvoj izvora struje za MIG zavarivanje aluminijskih legura povezan je s razvojem izvora sa statičkim karakteristikama. Razlikujemo dvije statičke karakteristike: strmopadajuću (eng. CC-constant current) i ravnu (eng. CV-constant voltage). Kod MIG postupka izvori struje imaju CV karakteristiku koja zbog utjecaja unutarnjih otpora izvora struje ipak bilježi blagi pad napona. Drhtava ruka ili pomicanje tijekom zavarivanja uzrokuje promjenu duljine luka, što rezultira promjenama napona luka. Kako bi se kompenzirao taj problem pri vođenju električnog luka konstruirani su posebni pogonski sustavi žice koji sa smanjenjem visine električnog luka povećavaju brzinu dobave žice i obrnuto. Sa statičkom CV karakteristikom izvora napajanja, lagano povećanje duljine luka uzrokuje blagi porast napona luka, što rezultira značajnim smanjenjem struje luka, kao što se vidi na slici 19. Danas su najčešći izvori napajanja inverteri s razinom izlaznog napona između 15 do 80V i razinom izlazne struje između 40 pa sve do 500A. [1], [16], [19]




*Slika 19. Shematski dijagram napona i struje zavarivanja ravne izlazne karakteristike [1]*

### 3.2.2.2. Pištolj za zavarivanje

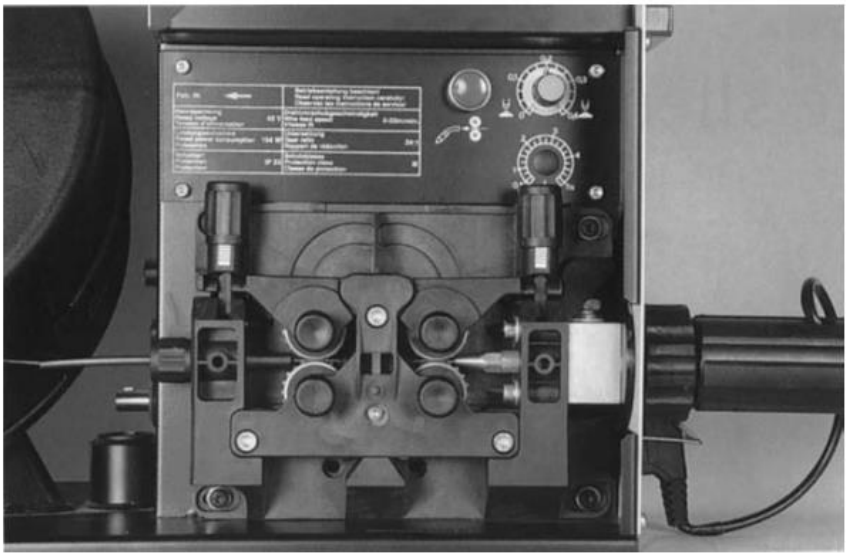
Pištolj za zavarivanje omogućuje dovod elektrode (žice), struje i plina do električnog luka. Pištolj je konstruiran da bude pogodan za rad u teškim uvjetima, lagan i jednostavan za upotrebu. Slika 20. prikazuje poprečni presjek klasičnog pištolja. Sastoji se od sapnice koja ravnomjerno usmjerava zaštitni plin prema zoni zavarivanja, kontaktne vodilice koja usmjerava žicu prema mjestu zavara i prenosi struju na istu, difuzora, kućišta, prekidača, priključka i kablova. Važno je napomenti da postoje izvedbe pištolja koje koriste vodeno hlađenje kod viših struja zavarivanja (300A). Također postoji i izvedba push-pull pištolja koji se koristi za savladavanje trenja ako je udaljenost od aparata veća od 5 metara. Pritiskom prekidača struja dovedena polikabelom prenosi se u kontaktnoj vodilici na žicu dodatnog materijala uz istovremen izlazak zaštitnog plina iz sapnice. [1], [16]




*Slika 20. Uobičajeni zrakom hlađeni pištolj za zavarivanje [19, 18]*

#### 3.2.2.3. Pogonski sustav žice

Cilj pogonskog sustava je stabilna i pouzdana opskrba procesa zavarivanja žicom. Pogonski sustav obično se nalazi van kućišta kao zasebna jedinica zbog prednosti poput rotacije modula s obzirom na izvor struje za zavarivanje, što je vrlo korisno kod zavarivanja većih radnih komada kojima je pristup otežan. Pogonski sustavi koji se koriste za dobavu žica kod aluminijskih legura su Push sustav (slika 21.) i Push-Pull sustav. Push sustav potiskuje žicu valjcima uzduž fleksibilnog polikabla. Zbog elastičnosti aluminijske žice, ona se može zaglaviti i zapetljati. Zato dodavanje žice mora biti glatko i kontinuirano, kako se ne bi narušila kvaliteta zavarenog spoja. Niz pogonskih valjaka izvlači žicu iz kalema, te ju gura kroz polikabel i pištolj sve do električnog luka. Sila guranja se ostvaruje trenjem, te njen iznos ne smije biti prevelik kako ne bi došlo do deformacije žice. Pogon se ostvaruje sa 2 ili 4 valjka koji imaju adekvatan U utor. Push-Pull sustav, kako mu i naziv govori, je kombinacija push sustava i pull sustava. Takav sustav omogućava provođenje žice na veće udaljenosti, dulji vijek trajanja motora zbog manjeg opterećenja, korištenje žica malih promjera i brže ponovno pokretanje. [1], [14], [21]

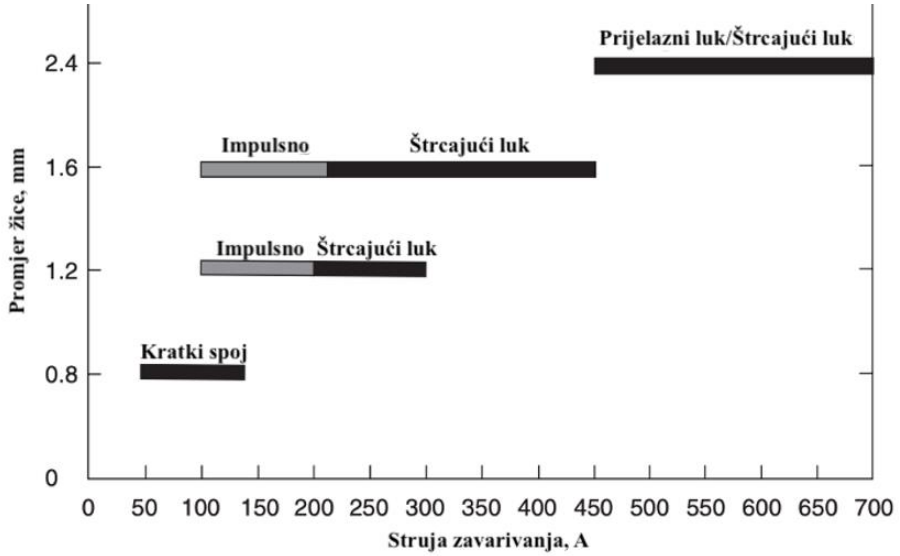


*Slika 21. Poprečni presjek Push pogonskog sustava sa 4 valjka [1]*

## 3.2.3. Prijenos metala pri MIG zavarivanju

Postupak elektrolučnog zavarivanja taljivom žicom u zaštiti inertnog plina koristi četiri osnovna načina za prijenos metala s elektrode na obradak. Razlikujemo prijenos metala kratkim spojevima, prijelaznim lukom, štrcajućim lukom i impulsno zavarivanje. Navedeni mehanizmi imaju svoje

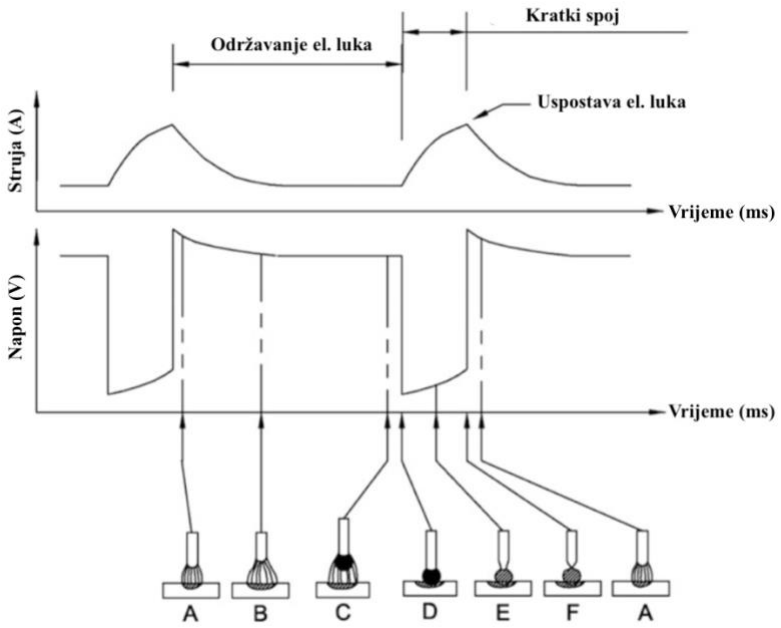
posebne karakteristike i primjenu. Neke od najznačajnijih karakteristika su količina unosa topline, debljina materijala koji se može zavarivati, brzina zavarivanja, depozit materijala i mogućnost različitih položaja zavarivanja. Slika 22. prikazuje načine prijenosa metala u ovisnosti sa strujom zavarivanja i promjerom žice.




*Slika 22. Odnos promjera žice i struje zavarivanja ovisno o načinu prijenosa metala [1]*

### 3.2.3.1. Prijenos kratkim spojevima

Za rad s manjim promjerom žice (0,8 mm) koristi se način prijenosa kratkim spojevima. Prijenos kratkim spojevima, događa se samo kada rastaljeni metal formiran na vrhu žice dođe u kontakt s talinom. Ovaj način prijenosa metala idealan je za spajanje tankih dijelova i premošćivanja širokih otvora korijena. Karakteristične vrijednosti jakosti struje zavarivanja ovog načina prijenosa metala su od 50-150 A, a napona od 13-21 V. Kratki spoj se tijekom zavarivanja javlja između 20 i 200 puta u sekundi. Kada žica dođe u kontakt s talinom, dolazi do kratkog spoja, što rezultira naglim smanjenjem napona luka i porastom struje zavarivanja. Slika 23. prikazuje redoslijed događaja tijekom prijenosa metala u kratkom spoju, kao i vezu struje i napona. [11]

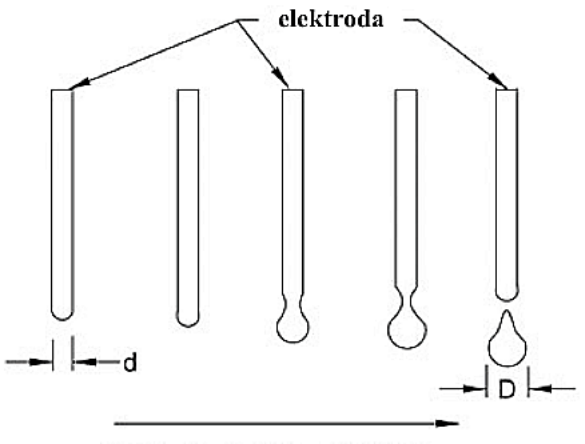



*Slika 23. Prikaz faza prijenosa kapljice metala električnim lukom kratkog spoja [11]*

Električni luk započinje neposredno prije trenutka A. S uspostavljenim lukom vrh elektrode se zagrijava i počinje taliti tijekom trenutka B, a kroz trenutak C rastaljena kapljica u cijelosti nastaje i ostaje na vrhu žice zbog sila površinske napetosti. Kao što se vidi na slici 23., kada se rastaljena kapljica susretne s talinom metala, dolazi do kratkog spoja, što rezultira drastičnim smanjenjem napona luka i skokom struje. Iznos struje je stalno kontroliran tako da doseže vrhunac u trenutku F, kada se kapljica odvaja. Kako bi se spriječilo naglo odvajanje rastaljenih kapljica i smanjilo raspršivanje, struja se postupno povećava. Napon otvorenog kruga održava se dovoljno niskim da se kap rastaljenog metala na vrhu žice ne odvoji dok ne dođe do taline osnovnog metala. [11]

### 3.2.3.2. Prijenos prijelaznim lukom

Prijenos prijelaznim lukom definiran je veličinom kapljica, koje su obično veće od promjera žice. Uspostavom električnog luka, vrh elektrode se zagrijava i tali. Kako se događa taljenje, stvara se kapljica koja se neprestano povećava dok ne prijeđe promjer žice. Sile površinske napetosti drže rastaljeni metal na elektrodi. Kada težina kapljice premaši silu površinske napetosti, ona se odvaja od elektrode i pada u talinu, kao što je shematski prikazano na slici 24. Kao rezultat toga, moguće je prekomjerno prskanje rastaljenog dodatnog materijala. Zbog činjenice da se prijenos metala događa pod gravitacijom, onemogućeno je zavarivanje u svim položajima. Metal se u ovom načinu prenosi u obliku kuglica brzinom manjom od 10 kapi u sekundi. [11]




*Slika 24. Shematski prikaz prijelaznog načina prijenosa metala [11]*

### 3.2.3.3. Prijenos štrcajućim lukom

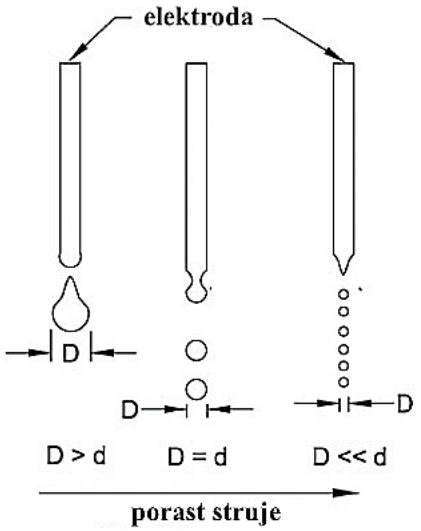
Štrcajućim lukom prijenos metala se provodi u obliku sitnih kapljica brzinom od nekoliko stotina kapljica u sekundi. Stezanjem kapljica pod utjecajem jakog magnetnog polja (tzv. „Pinch effect“) omogućen je visoko učinkovit depozit materijala. Ključan prag jakosti struje karakterističan za ovaj prijenos zove se prijelazna točka. Kako bi se ostvario prijenos štrcajućim lukom vrijednosti struje moraju biti iznad kritične vrijednosti prijelazne struje. Tablica 6. prikazuju uobičajene vrijednosti prijelazne struje prilikom zavarivanja aluminija štrcajućim lukom. [11], [18]

*Tablica 6. Uobičajene vrijednosti prijelazne struje prilikom zavarivanja aluminija štrcajućim lukom [11]*

| Promjer žice (mm) | Zaštitni plin | Prijelazna struja (A) |
|---|---|---|
| 0,8 | Argon | 95 |
| 1,1 | Argon | 135 |
| 1,6 | Argon | 180 |

Kako struja raste, veličina rastaljene kapljice drastično se smanjuje, kao što je prikazano na slici 25. Ovaj način prijenosa metala vrši se slobodnim letom malih kapljica kroz atmosferu luka. Zaštitni plin je najčešće minimalno 80% argona u kombinaciji s helijem, jer omogućuju viši unos

energije. Način prijenosa štrcajućim lukom pogodan je samo za zavarivanje u položenom položaju. Budući da su metalne kapljice tako sitne, ne dolazi do kratkog spoja i prskanje je gotovo eliminirano. Budući da zavarivanje štrcajućim lukom koristi jaku struje ono stvara duboku penetraciju, što otežava zavarivanje tankih ploča. Karakteristične vrijednosti jakosti struje iznose od 220-600 A, napona od 25-40 V za promjere žice od 1,2 do 2,4 mm. [11], [18]

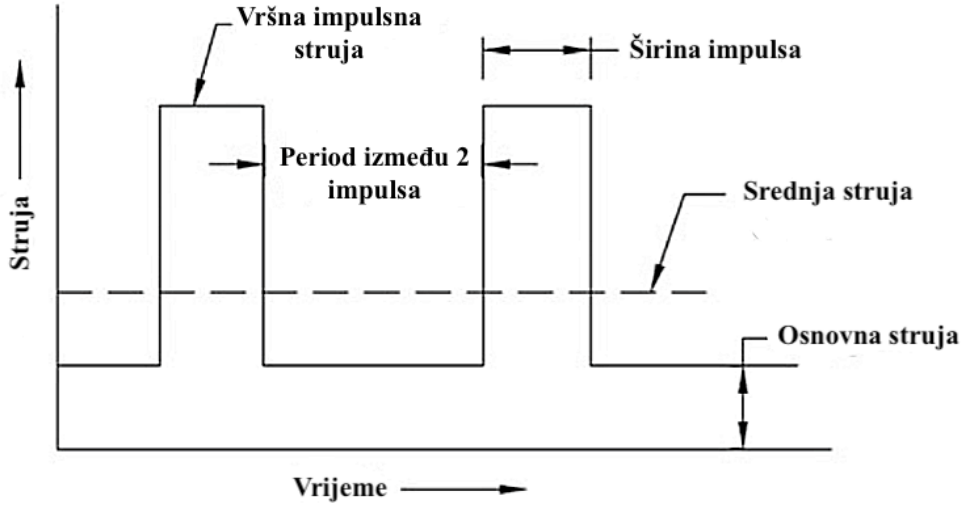



*Slika 25. Shematski prikaz štrcajućeg načina prijenosa metala [11]*

### 3.2.3.4. Impulsno zavarivanje

Impulsni prijenos stvoren je kako bi se spriječio kratki spoj i prskanje luka na nižim vrijednostima struje. Glavne prednosti prijenosa metala impulsnim lukom su: omogućeno zavarivanja tankih limova (debljine veće od 1 mm), zavarivanje u svim položajima (ovisno o parametrima), kontrolirani unos topline i mogućnost mehanizacije i robotizacije. MIG zavarivanje impulsnim načinom prijenosa metala koristi nisku početnu ili tzv. osnovnu struju i višu, vršnu struju. Osnovna struja je dovoljno niska kako bi se električni luk mogao održavati, ali kod nje ne dolazi do taljenje i odvajanja žice dodatnog metala. Viša, vršna vrijednost struje značajno je viša od potrebne da se ostvari štrcajući električni luk. Jakost struje kod ovog oblika prijenosa metala iznosi od 80 do 500 A, napon od 13 do 30 V, promjer žice od 0,8 do 2,4 mm. Slika 26. konceptualno prikazuje valni oblik. Stalna pozadinska struja koristi se za održavanje luka bez davanja dovoljno energije za taljenje vrha žice, kao i superponirana pulsirajuća struja veća od prijelazne struje potrebne za prijenos prskanja. Samo tijekom intervala impulsne struje može doći do prijenosa

metala. Frekvencija i amplituda tj. oblik impulsa do vršne vrijednosti diktira način prijenosa metala i brzine kojom se formira kapljica. Ovaj prijenos metala zahtijeva sinergijski izvor struje. Sinergijski impulsni izvori napajanja automatski reguliraju optimalnu kombinaciju svih impulsnih parametara. [11], [18], [20]




*Slika 26. Grafički prikaz impulsnog načina prijenosa metala [11]*

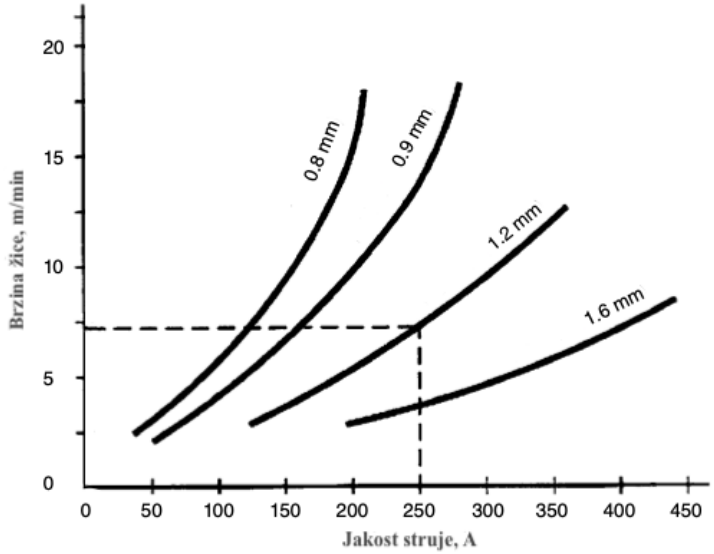
## 3.2.4. Parametri MIG zavarivanja

Struja zavarivanja, napon, brzina, duljina slobodnog kraja žice i sastav zaštitnog plina različiti su parametri zavarivanja koji utječu na kvalitetu zavara. Svaki od ovih parametara ima različit utjecaj na depozit materijala, oblik zavarenog spoja, penetraciju i brzinu hlađenja. Za stvaranje zavarenog spoja potreban je precizan odabir postavki zavarivanja. Kao rezultat toga, neophodno je temeljito poznavanje utjecaja ovih parametara ili varijabli procesa. [11]

### 3.2.4.1. Struja zavarivanja

Glavni parametar zavarivanja je jakost struje. Na temelju debljine materijala, promjera žice i položaja zavarivanja određujemo njezin iznos. Jakost struje također utječe na profil penetracije, količinu deponiranog materijala, oblik zavara i unos topline. Povećavanje struje zavarivanja dovodi do toga da zavar dublje prodire u osnovni materijal. Brzina dodavanja žice i jakost struje

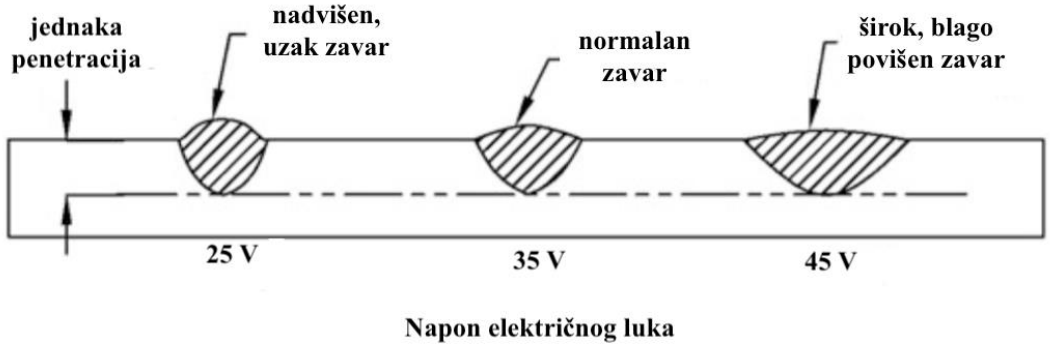
usko su povezani. Na slici 27. prikazana je ovisnost brzine žice i zavarivanja. Jakost struje kod MIG postupka se obično kreće izmedu 50-600A. [16], [19]




*Slika 27. Ovisnost brzine žice o jakosti struje kod MIG zavarivanja [19]*

### 3.2.4.2. Napon zavarivanja

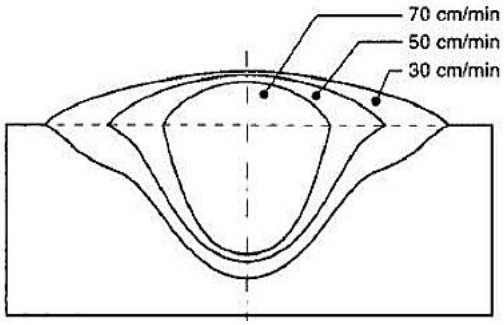
Udaljenost rastaljenog metala zavara i žice najčešće se tijekom zavarivanja kontrolira naponom. Napon zavarivanja utječe na širinu zavara, dubinu protaljivanja i nadvišenje (slika 28). Povećanjem napona omjer širine i dubine će rasti, čime dolazi do povećanja duljine luka što rezultira prekomjernim prskanjem kapljica. Kod preslabog napona greška koja se često susreće je naljepljivanje. Okvirne vrijednosti kod MIG zavarivanja kreću se između 15-35V. [16], [19]




*Slika 28. Utjecaj napona na oblik zavara [11]*

### 3.2.4.3. Brzina zavarivanja

Velike brzine zavarivanja uzrokuju smanjenje penetracije. Posljedica toga je manji ukupni unos topline. Kod prevelikih brzina zavarivanja uobičajena je pojava greški poput pora, zajeda i puhanja luka. Smanjenjem brzine, penetracija i širina samog zavara se povećava. Karakteristične greške malih brzina zavarivanja su tople pukotine. Slika 29. prikazuje ovisnost brzine zavarivanja o profilu zavara. [16], [11]




*Slika 29. Utjecaj brzine zavarivanja na profil zavara [16]*

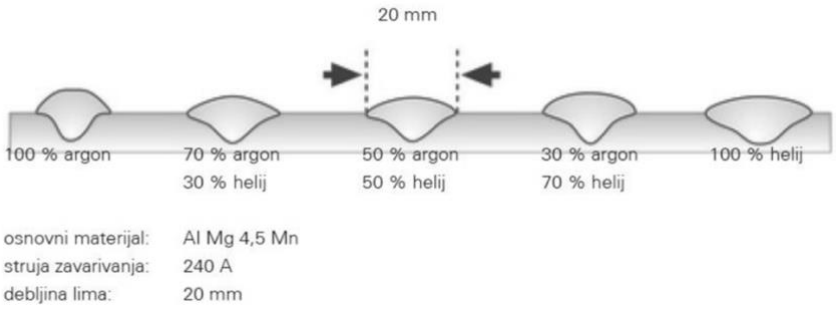
### 3.2.4.4. Vrsta i protok zaštitnog plina

Zaštitni plin koji se koristi u procesu zavarivanju ima značajan utjecaj na konačni proizvod. Njegova primarna uloga je zaštita rastaljenog metala od štetnog utjecaja okoline. Zaštitni plin utječe na metalurške procese u talini zavara, električno-fizikalna svojstva električnog luka i tehnološke parametre. Plinovi koji se koriste kod zavarivanja aluminijskih legura su argon i helij. [1], [18]

Argon ima kemijski simbol Ar i inertan je plin. Inertni plinovi netopivi su u talini metala zavara i ne reagiraju s drugim tvarima. Metali poput aluminija, bakra, magnezija, nikla i njihovih legura zavarljivi su 100% argonom. Budući da je argon gušći od zraka, učinkovito štiti zavar istiskujući lakši zrak. Argon je daleko jeftiniji plin od helija, zato ako se koristi u mješavini najčešće je on u većinskom udjelu. Argon se sa svojim ionizacijskim potencijalom od 15,7 eV relativno lagano ionizira, što rezultira laganim uspostavljanjem električnog luka. Oblik penetracije upotrebom argona je „prstolik“ (slika 30.). [1], [18]

Helij ima kemijski simbol He, pogodan je za zavarivanje svih vrsta materijala i također je inertan plin. Helij se sa svojim ionizacijskim potencijalom od 24,5 eV teško ionizira, stoga je uspostava luka teža, puno je veća toplinska vodljivost, veći je napon električnog luka i unos topline za isti iznos jakosti struje je višestruko veći. Upotreba helija osigurava širok profil zavara (slika 30.) [1], [18], [20]

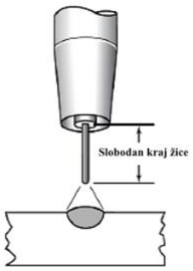
U praksi uobičajena je preporuka koristiti 100% argona za debljine aluminija do 12,7 mm. Za zavarivanje debljih komada koristi se kombinacija inertnih plinova, gdje se iskorištavaju pozitivna svojstva obaju plinova. Smjese helija i argona mogu sadržavati do 80% helija. [1], [18]




*Slika 30. Oblici penetracije prema udjelu zaštitnog plina [16]*

### 3.2.4.5. Duljina slobodnog kraja žice

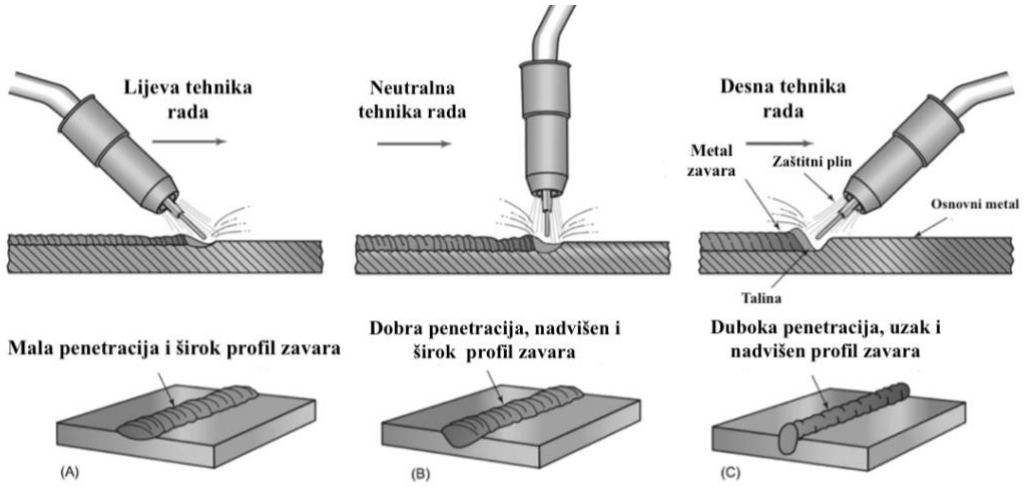
Duljina slobodnog kraja žice definirana je kao udaljenost kontaktne cjevčice do električnog luka. Promjena ove udaljenosti mijenja otpor žice čime jakost struje pada. Napon raste kako se povećava duljina žice koja teče od kontaktne cijevi do taline. Budući da konstantni napon izvora energije ne može podnijeti velik razmak, sustav se prilagođava smanjenjem struje. To rezultira smanjenjem protaljivanja i većom širinom zavara. Za konstantnu dubinu penetracije vrlo je bitno održavati jednaku duljinu slobodnog kraja žice. [14], [25]




*Slika 31. Slobodan kraj žice [21]*

### 3.2.5. Tehnika rada

Desna, neutralna i lijeva tehnika rada najčešće se koriste za karakterizaciju kuta pištolja u smislu rada i smjera zavarivanja. Slika 32. (A) prikazuje lijevu tehniku zavarivanja, rezultat ove tehnike zavarivanja je širi zavar sa manjom penetracijom. Ova tehnika je pogodna za zavarivanje tanjih materijala. Neutralno zavarivanje koristi se u automatiziranom zavarivanju jer ima izvrsnu ravnotežu penetracije i širine (slika 32. (B)). Na slici 32. (C) prikazana je desna tehnika zavarivanja, koje ima visoku razinu protaljivanja i dobru zaštitu procesa. Ova tehnika je pogodna za zavarivanje debljih materijala.



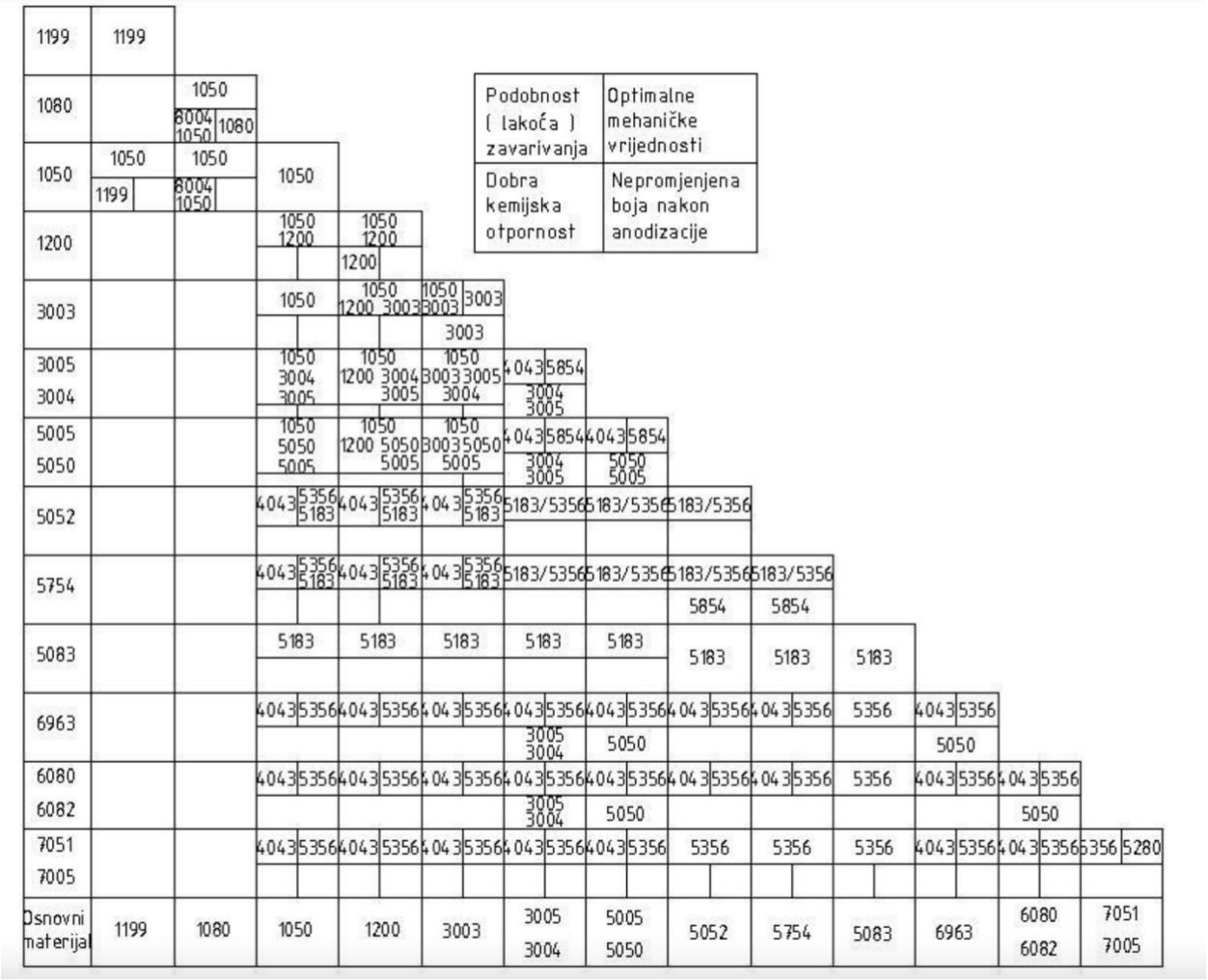

*Slika 32. Utjecaj tehnike rada na oblik zavarenog spoja [14]*

### 3.2.6. Odabir dodatnog materijala

Vrsta dodatnog materijala odabire se na temelju kemijskog sastava osnovnog materijala, a promjer žice odabire se na temelju debljine osnovnog materijala i položaja zavarivanja. Žica raspona 1,0 do 1,6 mm najčešće je korištena prilikom MIG zavarivanja. Manji promjer žice daje veću gustoću struje koja uzrokuje veće protaljivanje, uži zavar i veću brzinu dovođenja žice. Površina žice mora biti čista kako kasnije izvedeni zavari ne bi imali razne nepravilnosti u strukturi kao što su tople pukotine i poroznost. Odabir preporučenih dodatnih materijala pri zavarivanju aluminija vrši se prema tablici 7. Iz tablice je vidljivo koji dodatni materijal treba odabrati ovisno o osnovnom materijalu, ali i o tome što se pri zavarivanju želi postići. Rubovi tablice označavaju aluminijske legure osnovnih materijala, dok su unutar tablice navedeni preporučeni dodatni

materijali. Prazni kvadrati u tablici označavaju nemogućnost postizanja ispravnog zavarenog spoja pri odabiru takve kombinacije osnovnog i dodatnog materijala. [10], [21]

*Tablica 7. Preporučeni dodatni materijal za zavarivanje aluminijskih legura [10]*

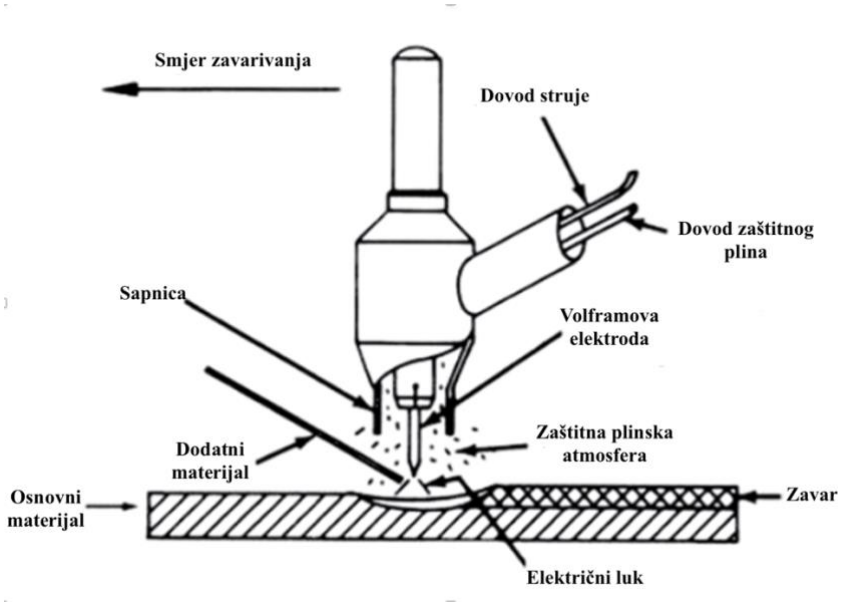



## 3.3. Ostali postupci zavarivanja

### 3.3.1. TIG zavarivanje

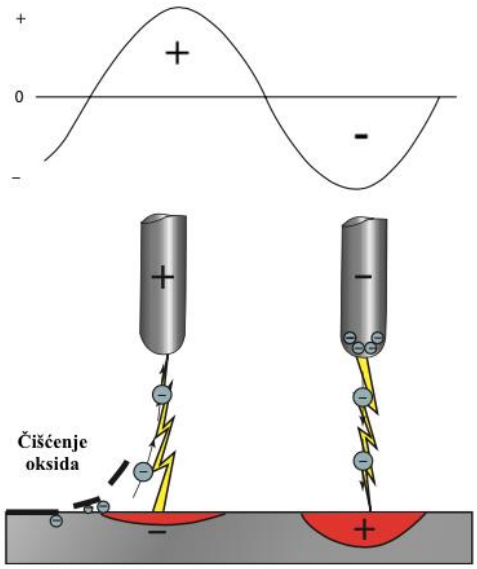
TIG zavarivanje postupak je elektrolučnog zavarivanja koji koristi volframovu elektrodu i zaštitu inertnog plina. Glavna oprema ovog postupka zavarivanja sastoji se od izvora struje, pištolja za zavarivanje, zaštitnog inertnog plina i dodatnog materijala. Budući da su električni luk

i žica neovisni jedno o drugome, TIG postupak zavarivanja omogućuje znatno precizniju kontrolu unosa topline i taline zavara. Ovaj postupak u usporedbi s ostalim elektrolučnim metodama zavarivanja omogućuje izradu najkvalitetnijih zavara. TIG postupak često se koristi za male dijelove gdje je akumulacija topline problem, jer se može koristiti s vrlo malom strujom i bez dodatnog materijala. Na slici 33. shematski je prikazan TIG postupak zavarivanja. [1], [19]




*Slika 33. Shematski prikaz TIG postupka zavarivanja [19]*

Općenito, TIG postupak je odabrana metoda zavarivanja kada su potrebni visokokvalitetni zavari i precizna regulacija topline. Međutim, kada je potrebna velika produktivnost, to nije slučaj. Tipični rasponi napona luka su od 10 do 15 V, a struje električnog luka od 30 do 150 ampera, što je mnogo niže od ostalih postupaka elektrolučnog zavarivanja. Brzine zavarivanja obično su između 8 do 15 centimentara u minuti. Argon je najčešći zaštitni plin, jeftiniji je od helija, a budući da je teži od zraka, manje je podložan propuhu. Helij omogućuje stvaranje luka s boljom toplinskom vodljivošću, što znači da učinkovitije prenosi toplinu iz električnog luka na obradak. Mješavine argona i helija često se koriste skupa, kombinirajući svoje prednosti. TIG zavarivanje aluminija najčešće se vrši izmjeničnom strujom (AC), pri čemu se uklanja oksidni sloj na pozitivnom poluvalu, a hlađenje elektrode i penetracija događaju se na negativnom poluvalu sinusne krivulje (slika 34.). Luk se gasi i ponovno pokreće svakih pola ciklusa. [1], [19]

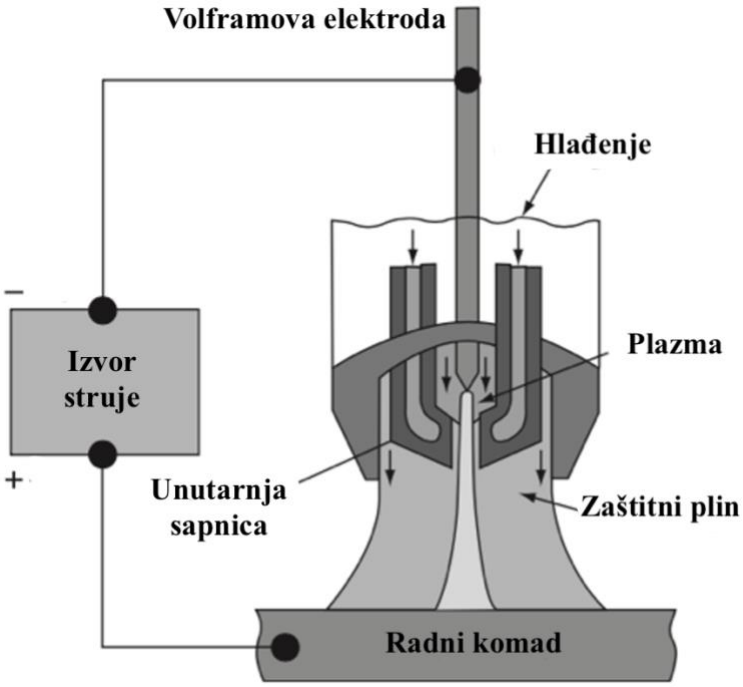



*Slika 34. Shematski prikaz izmjeničnog TIG zavarivanja [14]*

Iako se volframova elektroda smatra netaljivom, njezin vrh se uslijed zavarivanja troši. Vrh volframove elektrode mora biti brušen u oblik polukugle kako bi se stvorio pravilan električni luk. Oštre elektrone s manjim kutom osiguravaju veći, manje gusti luk, što rezultira širim profilom zavara s plitkom penetracijom. Jednom kada je kut odabran za određenu primjenu ili tehniku, presudno ga je održavati tijekom cijelog procesa. [1], [19]

### 3.3.2. Zavarivanje elektrolučnim plazma postupkom

Elektrolučno plazma zavarivanje postupak je koji se razvio iz TIG zavarivanja. Mlaz plazme stvara se potiskivanjem plina koji teče duž mlaznice, kao što je prikazano na slici 35. Plin se zagrijava do temperature ionizacije, kada nastaje mlaz koji izgleda poput jarkog plamena. Plin se ionizira kako bi se dobio luk koji je stupičastog oblika velike gustoće energije. Slika 35. prikazuje shematski postupak zavarivanja plazmom. Zona zavarivanja generirana plazma postupkom ima znatno veći omjer dubine i širine. Oprema ovog postupka skuplja je od konvencionalne opreme za elektrolučno zavarivanje, a dodatni materijal može se ili se ne mora koristiti. U odnosu na TIG zavarivanje zavar je manje osjetljiv na onečišćenje od elektrode jer se ona nalazi unutar unutarnje mlaznice i udaljenija je od radnog komada. Dodatni materijali koji se koriste u ovom postupku identični su onima koji se koriste u TIG-u. Najpopularniji plinovi za zaštitnu su argon i kombinacija argon-helij. [1], [14]




*Slika 35. Shematski prikaz elektrolučnog plazma zavarivanja [14]*

Veća gustoća energije i stupičasti oblik električnog luka omogućuju način zavarivanja ključanicom, koji može u jednom prolazu zavariti deblje materijale, sa velikim brzinama zavarivanja i manjim ukupnim unosom topline od TIG-a. Iako se elektroda najčešće spaja na negativni pol izvora struje, kvadratni izmjenični val izvora struje može se koristiti kako bi se iskoristilo djelovanje čišćenja oksida. Raspon struje zavarivanja identičan je kao i kod TIG-a dok je napon nešto veći zbog znatno veće duljine luka. Zbog visoke cijene i slabe raznovrsnosti ovaj postupak zavarivanja nije stekao veliku popularnost u brodogradnji. [1], [14]

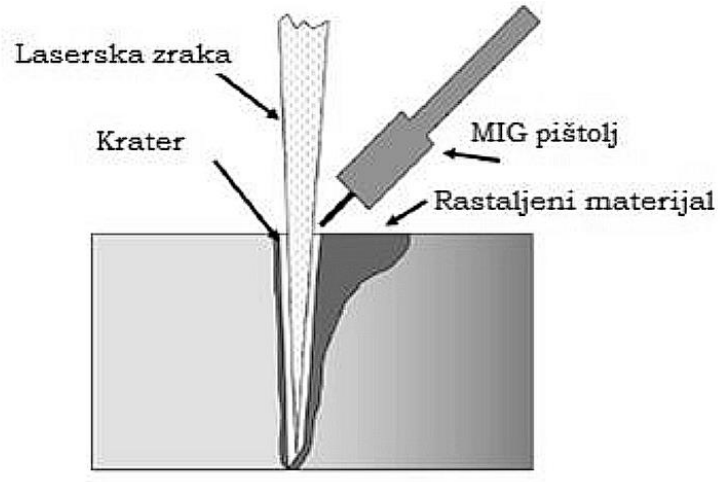
### 3.3.3. Zavarivanje laserom

Lasersko zavarivanje postupak je zavarivanja koji koristi koncentrirani izvor topline visoke gustoće energije. Visoka gustoća energije omogućuje način zavarivanja ključanicom, koja poboljšava apsorpciju laserske zrake zahvaljujući refleksijama unutar šupljine. Duboko prodirući zavar u ključanici stvara ekstremno uske zone utjecaja topline, smanjujući deformacije, gubitak čvrstoće i gubitak legirnih elemenata s niskim vrelištem kao što je magnezij. Laserski zavareni spojevi imaju nedostatke koji su usporedivi s onima uočenim u drugim metodama zavarivanja taljenjem. Kako bi se zajamčilo stvaranje stabilne ključanice, potrebna je temeljita priprema

površine, zaštita plinom i primjena dovoljne snage zavarivanja. U laserskom mediju nastaje laserska zraka, a razlikuju se dva tipa lasera za zavarivanje metala: Nd:YAG laser koji pripada laserima s krutim medijem i CO2 laser koji pripada plinskim laserima. Valna duljina laserskog svjetla utječe na apsorpciju energije metala koji se zavaruje. Kako se valna duljina povećava, apsorpcija postaje lošija, a to je velik problem kod aluminija i njegovih legura. Valna duljina svjetlosti $CO_2$-lasera je 10,6 mm, a Nd-YAG lasera 1,06 mm, pa je Nd-YAG laser pogodniji za zavarivanje aluminija. Nd-YAG laser zbog svoje male valne duljine može isporučiti lasersko svjetlo kroz optička vlakna, a ne kroz bakrena zrcala koja su potrebna za kontrolu svjetlosti $CO_2$ lasera. To poboljšava fleksibilnost omogućavajući robotu pomicanje i postavljanje snopa. Kako bi se izbjeglo prodiranje ili poroznost, prosječna snaga lasera manja od 1kW smatra se najnižom prihvatljivom granicom. Od ranih devedesetih snaga lasera porasla je do te mjere da impulsni laser od 3 kW može zavariti legure serije 5XXX debljine 1,5 mm brzinom do 2,3 metra u minuti. Plinska zaštita postiže se korištenjem argona, helija ili dušika koji se isporučuju koaksijalno sa zrakom ili putem jednostavnog bočnog otvora. [1]

#### 3.3.3.1. Hibridno lasersko zavarivanje

Zavarivanje laserskim snopom relativno je nova tehnologija koja se danas intenzivno koristi u brodogradnji. Osim gore navedenih primarnih prednosti, lasersko zavarivanje ima i određene nedostatke, poput potrebnog održavanja malog razmaka između pozicija i ravnosti njihovih rubova. Hibridno lasersko zavarivanje trenutno se koristi u brodogradnji kako bi se zaobišla ta ograničenja. Ova se metoda često koristi za izradu ojačanih ploča i pregrada. Hibridno lasersko zavarivanje kombinira elektrolučno zavarivanje u zaštiti inertnog plina i laser. Ova metoda poboljšava ukupnu produktivnost i kvalitetu zavara, a istovremeno osigurava veliku brzinu zavarivanja, dublje prodiranje i fleksibilnost. Deformacije u procesu zavarivanja također su svedene na minimum. [1]

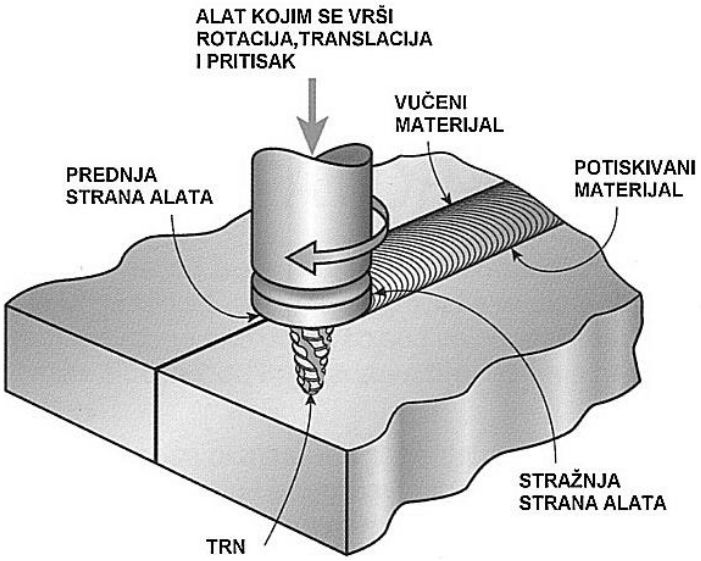



*Slika 36. Shematski prikaz hibridnog laser zavarivanja [17]*

### 3.3.4. Zavarivanje trenjem

Britanski Institut za zavarivanje izumio je postupak zavarivanja trenjem uz miješanje (eng. FSW- friction stir welding) 1991. godine. Radi se o postupku gdje rotirajući alat u obliku trna razvija toplinu trenjem koja omekšava materijal i plastično deformira cilindrično područje oko trna (slika 37.). Ovaj postupak zavarivanja primjenjiv je pri zavarivanju različitih i istih materijala. Zavarivanjem trenjem uz miješanje radni komad se ne tali. Kao posljedica toga, uklanja se nekoliko nedostataka elektrolučnog zavarivanja, što dovodi do izvanredne čvrstoće i duktilnosti zavarenog spoja. Osim toga, u usporedbi s klasičnim postupcima, ovaj postupak je energetski učinkovitiji i bolji za okoliš. Primjena ovog postupka zavarivanja izražena je u zrakoplovnoj, automobilskoj i brodograđevnoj industriji. U usporedbi s elektrolučnim zavarivanjem, pomorske legure koje nisu toplinski obradive (serija 5XXX) zavarene trenjem uz miješanje imaju ekvivalentnu ili malo veću vlačnu čvrstoću. Toplinski obradive legure serije 6XXX zavarene trenjem uz miješanje postižu visoku mehaničku čvrstoću, ali mogu rezultirati smanjenjem duktilnosti. U usporedbi s elektrolučnim zavarivanjem, zavarivanje trenjem uz miješanje postiže odličnu kvalitetu površine, što ga čini popularnim oblikom zavarivanja u brodogradnji. Zbog malih deformacija i smanjenih toplinskih naprezanja, pomorska industrija bila je prva koja je prihvatila ovaj postupak zavarivanja u komercijalnoj upotrebi. Paneli na palubi, pregrade, trupovi, nadgradnje, jarboli i nosači plovila za jedrenje dijelovi su brodova koje je poželjno zavarivati trenjem uz miješanje. Nedavno se razvila nova podvrsta zavarivanja trenjem uz miješanje koja se naziva podvodno zavarivanje trenjem uz miješanje (eng. UFSW- underwater friction stir welding).

Voda se u tom postupku koristi kao rashladna tekućina za izjednačavanje temperaturnih profila koji se javljaju u zavarenom spoju. UFSW je korišten na raznim aluminijskim legurama kako bi se pružio učinak hlađenja tijekom zavarivanja. Zbog svojeg potencijala za poboljšanje mehaničkih svojstava u odnosu na zavarivanje trenjem uz miješanje i elektrolučno zavarivanje, UFSW postaje vrlo poželjan postupak zavarivanja. [13]

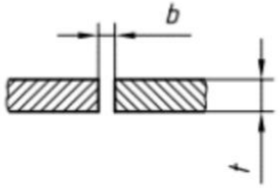
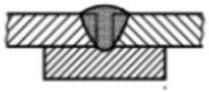
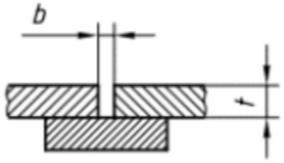
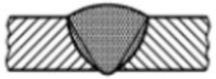
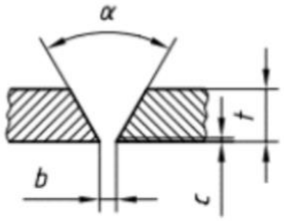



*Slika 37. Shematski prikaz friction stir postupak zavarivanja [22]*

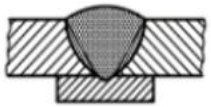
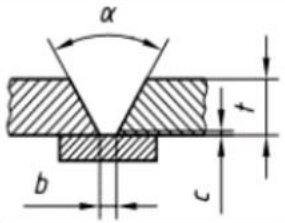
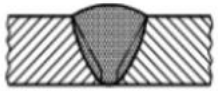
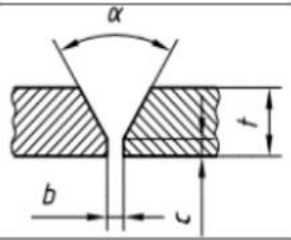
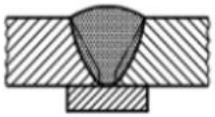
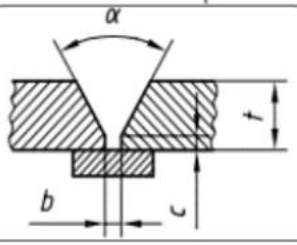
# 4. PRIPREMA SPOJEVA ZA ZAVARIVANJE PREMA NORMI HRN EN ISO 9692-3

Norma ISO 9692-3 definira pripreme spojeva koje treba koristiti za zavarivanje aluminijskih legura. Priprema spojeva obuhvaćena ovom normom odnosi se na elektrolučne postupke zavarivanja inertnim plinom, MIG (131) i TIG (141). Sve vrste zavarljivih aluminijskih legura prihvatljive su za pripremu spojeva prema ovom odjeljku norme ISO 9692. Za pripremu rubova treba koristiti mehaničke metode (poput rezanja, piljenja ili glodanja). Tekućine za čišćenje na bazi mineralnog ulja nisu dopuštene. Pri razmacima većim od 1,5 mm preporučuje se upotreba podloga. U tablici 7. i 8. prikazana je nekolicina primjera pripremljenih spojeva. [23, 20]

*Tablica 8. Usporedba pripreme spojeva sa i bez podloge [17]*

| **Debljina osnovnog materijala** t | **Oznaka** | **Ilustracija** | **Presjek** | **Kut** α, β | **Razmak** b | **Visina grla** c |
|---|---|---|---|---|---|---|
| $t \leq 4$ | ‖ |  |   | - | $b \leq 2$ | - |
| $2 \leq t \leq 4$ | ‖ MR ‖ M |  |   | - | $b \leq 1,5$ | - |
| $3 \leq t \leq 5$ | V |  |   | $\alpha \geq 50°$ | $b \leq 3$ | $c \leq 2$ |
| | | | | $60° \leq \alpha \leq 90°$ | $b \leq 2$ | |

*Tablica 9. Usporedba pripreme spojeva sa i bez podloge nastavak [17]*

| **Debljina osnovnog materijala** t | **Oznaka** | **Ilustracija** | **Presjek** | **Kut** α, β | **Razmak** b | **Visina grla** c |
|---|---|---|---|---|---|---|
| $3 \le t \le 5$ | MR / M |  |  | $60° \le \alpha \le 90°$ | $b \le 4$ | $c \le 2$ |
| $3 \le t \le 15$ | Y |  |  | $\alpha \ge 50°$ | $b \le 2$ | $c \le 2$ |
| $6 \le t \le 25$ | Y MR Y M |  |  | $\alpha \ge 50°$ | $4 \le b \le 10$ | $c = 3$ |

# 5. EKSPERIMENTALNI RAD

Eksperimentalni dio završnog rada izveden je u Laboratoriju za zavarivanje Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. U eksperimentalnom dijelu rada odabrana je tehnologija zavarivanja aluminijske legure 6082. Strojnom obradom sukladno normi HRN EN ISO 9692-3 pripremljene su dvije ploče. Provedeno je sučeono zavarivanje radnih komanda impulsnim MIG postupkom. Naposlijetku su provedena nerazorna ispitivanja penetrantima i ispitivanje savijanjem te je izvršena makroskopska i mikroskopska analiza. Na temelju dobivenih rezultata eksperimentalnog rada donesen je zaključak.

## 5.1. Oprema za zavarivanje

Za eksperiment je bio korišten inverterski izvor struje za zavarivanje Welbee P500L, Daihen Varstroj. Uređaj (slika 38.) pri kontroli elektrolučnog zavarivanja koristi nanotehnološki procesor Welbee. Ovaj procesor omogućuje visokokvalitetno zavarivanje uz preciznu kontrolu struja i napona zavarivanja. U tablici 10. prikazane su tehničke karakteristike izvora struje za zavarivanje.



*Slika 38. Daihen Varstroj WB- P500L*

*Tablica 10. Tehničke karakteristike izvora struje WB P500L [24]*

| Izvor struje | WB P500L | |
|---|---|---|
| Način rada | DC | impulsno |
| Priključni napon [V] | 400 +/- 15% | |
| Nazivna ulazna snaga [kVA] | 25 | |
| Struja zavarivanja [A] | 30-500 | 30-400 |
| Napon zavarivanja [V] | 12-39 | 12-34 |
| Težina [kg] | 83 | |
| Dimenzije (DxŠxV) [mm] | 710x395x592 | |
| Intermitencija | 60% | 80% |
| Statička karakteristika | Ravna - Constant Voltage | |




*Slika 39. Sučelje za podešavanje načina rada i parametara na izvoru struje*

Na slici 39. plavom kružnicom označeno je podešenje parametara primjenom sinergijskih krivulja. Kad je ovo podešavanje parametara uključeno, dovoljno je odabrati postupak zavarivanja, vrstu osnovnog materijala (preko odabira dodatnog materijala), promjer dodatnog materijala, vrstu zaštitnog plina i postaviti struju zavarivanja (brzinu dodavanja žice) i ostali parametri zavarivanja automatski se podese. Ovo podešenje je korišteno prilikom eksperimentalnog rada.

## 5.2. Osnovni i dodatni materijal

Kao osnovni materijal u eksperimentu korištene su ploče aluminijske legure 6082, debljine 12 mm, širine 140 mm te duljine 300 mm. U tablici 10. prikazana su mehanička svojstva, a u tablici 11. prikazan je kemijski sastav ispitne ploče aluminijske legure 6082 prema atestu osnovnog materijala.

*Tablica 11. Prikaz mehaničkih svojstva ispitne ploče prema atestu osnovnog materijala*

| | |
|---|---|
| Vlačna čvrstoća, $R_m$, MPa | 331 |
| Granica razvlačenja, $R_e$, MPa | 255 |
| Produljenje, A, % | 15 |

*Tablica 12. Prikaz kemijskog sastava ispitne ploče prema atestu osnovnog materijala*

| Udio kemijskog elementa % | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Si | Fe | Cu | Mn | Mg | Cr | Ni | Zn | Ti | Ga | V | Al |
| 1,1 | 0,31 | 0,09 | 0,7 | 1,1 | 0,15 | 0,01 | 0,07 | 0,02 | 0,01 | 0,01 | Ostatak |

Kao dodatni materijal pri izradi eksperimentalnog rada korištena je žica (slika 40.) proizvođača Böhler Union oznake AlSi5 (4043) promjera 1,2 mm. Na tablici 13. prikazana su očekivana mehanička svojstva dodatnog materijala, dok je na tablici 14. vidljiv orijentacijski kemijski sastav dodatnog materijala.




*Slika 40. Dodatni materijal Union AlSi 5*

*Tablica 13. Mehanička svojstva dodatnog materijala [24]*

| | |
|---|---|
| Vlačna čvrstoća, $R_m$, MPa | 120 |
| Granica razvlačenja, $R_e$, MPa | 40 |
| Produljenje, A, % | 8 |

*Tablica 14. Orijentacijski kemijski sastav dodatnog materijala [24]*

| Udio kemijskog elementa % | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Si | Fe | Cu | Mn | Mg | Zn | Ti | Al |
| 4,5-6 | < 0,6 | < 0,3 | < 0,15 | < 0,2 | < 0,1 | < 0,15 | Ostatak |

## 5.3. Zaštitni plin

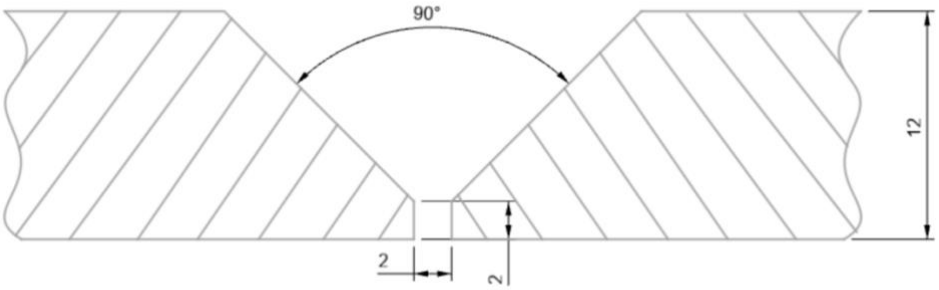
U eksperimentalnom dijelu rada korišten je zaštitni plin Argon 5,0 proizvođača Messer oznake I1 prema normi HRN EN ISO 14175. Volumni udio argona u njemu iznosi 99,999% te je protok plina iznosio 19 l/min.




*Slika 41. Boca zaštitnog plina Argon 5.0*

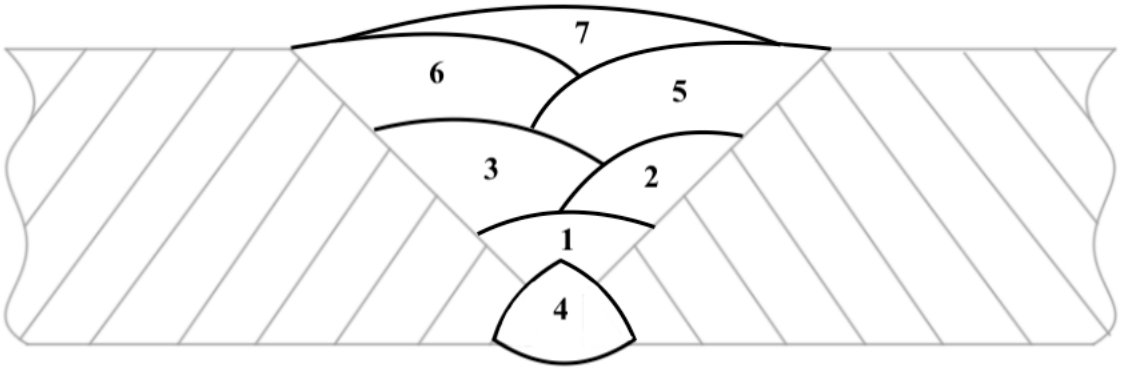
## 5.4. Postupak izrade

Za izradu eksperimenta korištene su dvije ploče koje su sučeono zavarene. Priprema spoja je napravljena prema normi HRN EN ISO 9692-3. Prije početka zavarivanja, obje ploče su očišćene i odmašćene alkoholom kako bi se spriječila onečišćenja zavara. Slika 42. prikazuje pripremu spoja.




*Slika 42. Priprema spoja*

Nakon točnog pozicioniranja ploče su pripojene na početku i kraju budućeg zavara kako ne bi došlo do pomaka tijekom zavarivanja. Ploče su zavarene ručno lijevom tehnikom rada u sedam prolaza, kao što je prikazano na slici 43. Nakon svakog prolaza napravljena je stanka zbog hlađenja ploča. U prvom prolazu (slika 44.) zavaren je korijen, nakon čega je sa drugim (slika 45.) i trećim (slika 46.) prolazom krenula popuna žlijeba. Nakon trećeg prolaza provedeno je brušenje korijena s donje strane ploče (slika 47.). U četvrtom prolazu izveden je provar korijena (slika 48.), te u petom, šestom i sedmom prolazu (slika 49.) potpuna popuna žlijeba.




*Slika 43. Redoslijed zavarivanja*



*Slika 44. Prvi prolaz*



*Slika 45. Drugi prolaz*



*Slika 46. Treći prolaz*



*Slika 47. Pobrušen prvi prolaz*



*Slika 48. Korijen zavara/četvrti prolaz*



*Slika 49. Lice zavara/sedmi prolaz*

Izračunat je unos topline klasičnim analitičkim uvrštavanjem vrijednosti u formulu (1). Stupanj iskoristivosti (η) električnog luka je konstantan i za MIG postupak iznosi 0,8. Svi parametri postupka prikazani su u tablici 12. Nakon svakog prolaza očitana je vrijednost napona zavarivanja s uređaja za zavarivanja i izračunat je unos topline.

$$Q_z = k * \frac{U_z * I_z * 60}{v_z * 1000} \quad (1)$$

gdje su:

$Q_z$ – unesena toplina, kJ/mm

$U_z$ – napon zavarivanja, V

Iz – jakost struje zavarivanja, A

$v_z$ – brzina zavarivanja, mm/min

k – koeficijent iskoristivosti topline električnog luka (k = 0,8 za MIG postupak)

*Tablica 15. Odabrani i očitani parametri kod zavarivanja ispitnog uzorka*

| Prolaz | Struja [A] | Napon [V] | Očitana struja [A] | Očitani napon [V] | Brzina zavarivanja [mm/min] | Unos topline [kJ/mm] |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 200 | 26,5 | 207 | 25,8 | 375 | 0,684 |
| 2 | 240 | 26,7 | 244 | 26 | 642,86 | 0,474 |
| 3 | 240 | 26,7 | 245 | 26 | 642,86 | 0,476 |
| 4 | 240 | 26,7 | 247 | 25 | 450 | 0,659 |
| 5 | 240 | 26,7 | 246 | 25,7 | 529,41 | 0,573 |
| 6 | 240 | 26,7 | 248 | 25,6 | 600 | 0,508 |
| 7 | 240 | 26,7 | 237 | 26,7 | 642,86 | 0,472 |

## 5.5. Nerazorno ispitivanje penetrantima

Ispitivanje penetrantima metoda je nerazornog ispitivanja koja omogućuje otkrivanje površinskih nepravilnosti. Postupak se provodi pomoću čistača, penetranta i razvijača. Prije samog postupka površina zavara je očišćena alkoholom. Postupak se sastoji od 3 koraka:

- čišćenje površine zavara čistačem MAGNAFLUX SKC–S
- nanošenje penetranta MAGNAFLUX SKL-WP2 duž cijele dužine zavara i puštanje 7 minuta da penetrant prodre u svaku pukotinu

- ispiranje penetranta mlazom vode, sušenje uzoraka i nanošenje razvijača MAGNAFLUX SKD-S2, pričekano 14 minuta da se radni komad osuši




*Slika 50. Sredstva korištena za ispitivanje penetrantima*

Nakon trećeg koraka postupka lokaliteti s pogreškama odnosno pukotinama vidljivi su crvenim točkama, kako se vidi na slikama 51. i 52.



*Slika 51. Korijen zavara sa nanesenim penetrantom i razvijačem*



*Slika 52. Lice zavara sa nanesenim penetrantom i razvijačem*

## 5.6. Ispitivanje savijanjem

Nakon ispitivanja penetrantima za potrebe ispitivanja savijanjem provedeno je rezanje. Rezanje se provodilo na tračnoj pili tvrtke Imet BS 350 GH, te je prikazano na slici 53. Iz zavarenog komada izrezana su četiri uzorka za ispitivanje savijanjem, te jedan uzorak za mikrostrukturna ispitivanja i makroanalizu.




*Slika 53. Tračna pila korištena za strojno rezanje ispitnih uzoraka*

Slika 54. prikazuje uzorak za ispitivanje savijanjem, duljine 285 mm, širine 10 mm i visine 12 mm.




*Slika 54. Uzorak za ispitivanje savijanjem*

Ispitivanje savijanjem izvršeno je u Laboratoriju za zavarivanje Fakulteta strojarstva i brodogradnje (slika 55.). Četiri uzorka sučeljenog spoja ispitana su bočnim savijanjem prema normi HRN EN ISO 5173:2010.



*Slika 55. Prikaz ispitivanja savijanjem u Laboratoriju za zavarivanje na FSB-u*



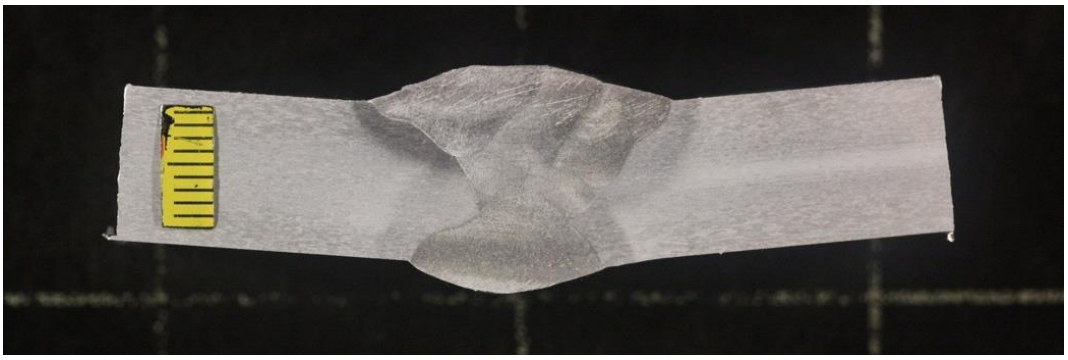

*Slika 56. Rezultati bočnog savijanja*

Iz slike 56. vidljivo je da je kod svih uzoraka došlo do pucanja.

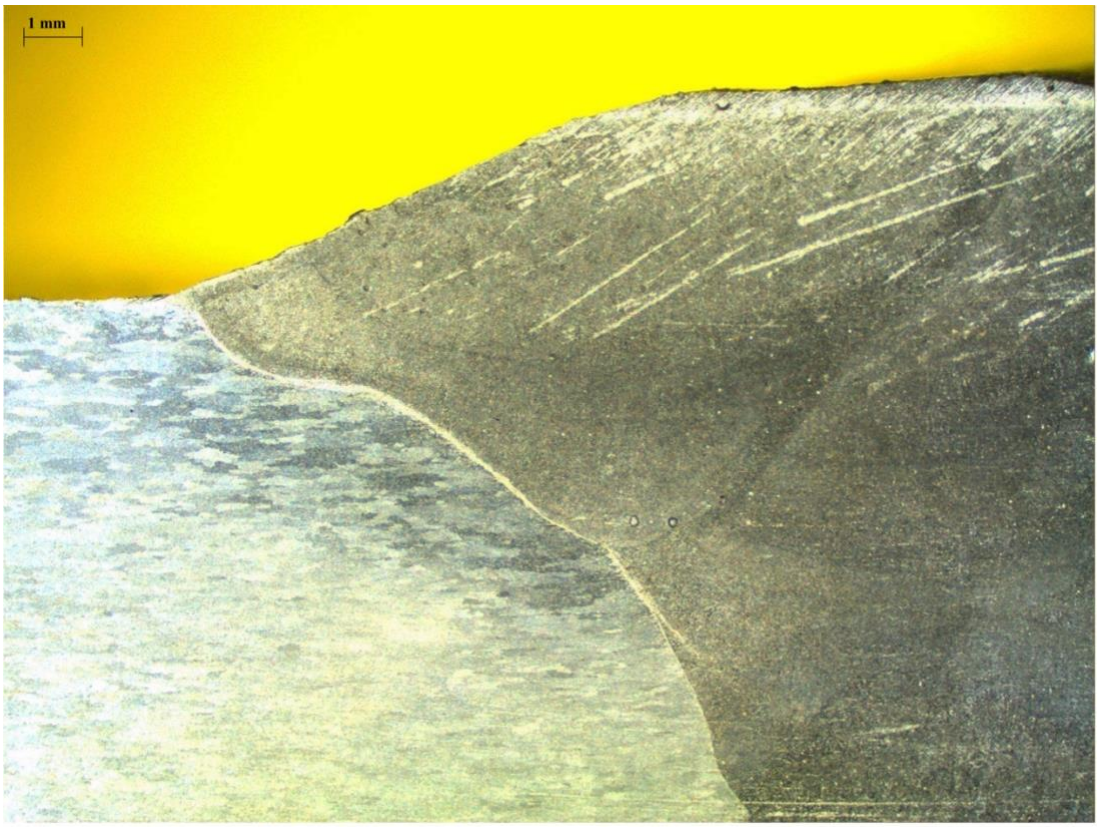
## 5.7. Makroskopska i mikroskopska analiza

### 5.7.1. Makro izbrusak

Uzorci za makro i mikroskopsku analizu izrezani su u Laboratoriju za zavarivanje FSB, nakon čega su polirani u Laboratoriju za materijalografiju na FSB-u. Nakon poliranja uzorak je bilo potrebno elektrolitski nagristi u Kellerovom reagentu. Postupak nagrizanja se provodi kako bi se bolje vidjela makrostruktura zavara. Nakon nagrizanja uzorak se isprao u vodi te ostavio da se osuši. Dobiveni makro izbrusak vidljiv je na slikama 57., 58., 59. i 60.

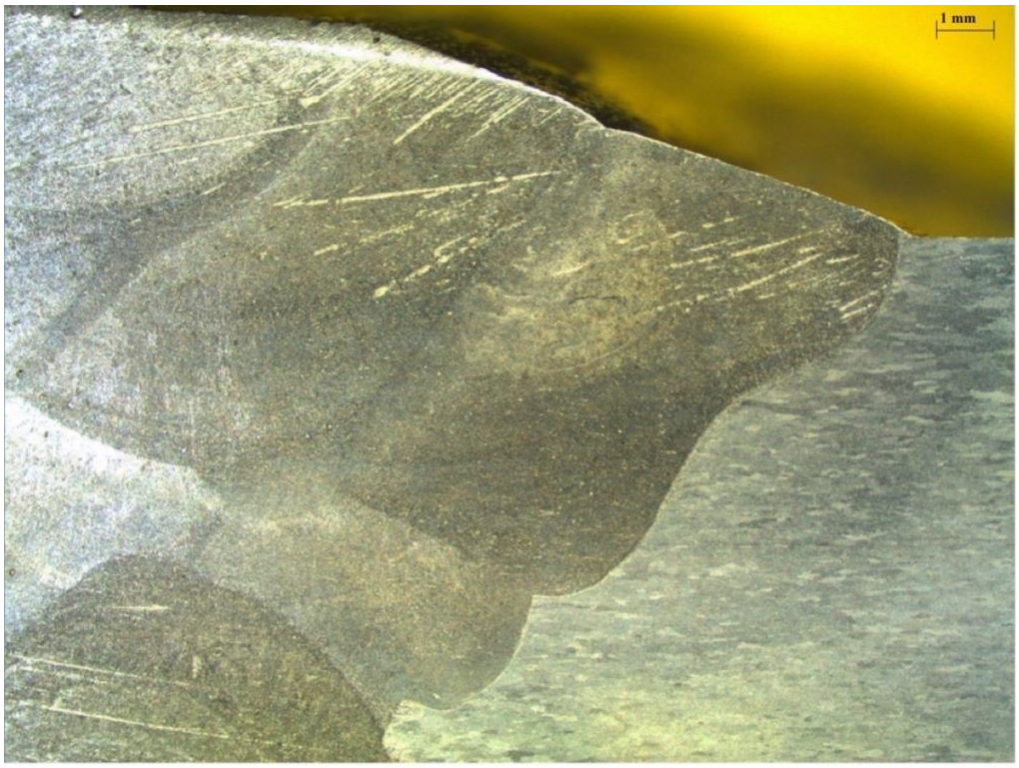


*Slika 57. Makroizbrusak nakon postupka nagrizanja*

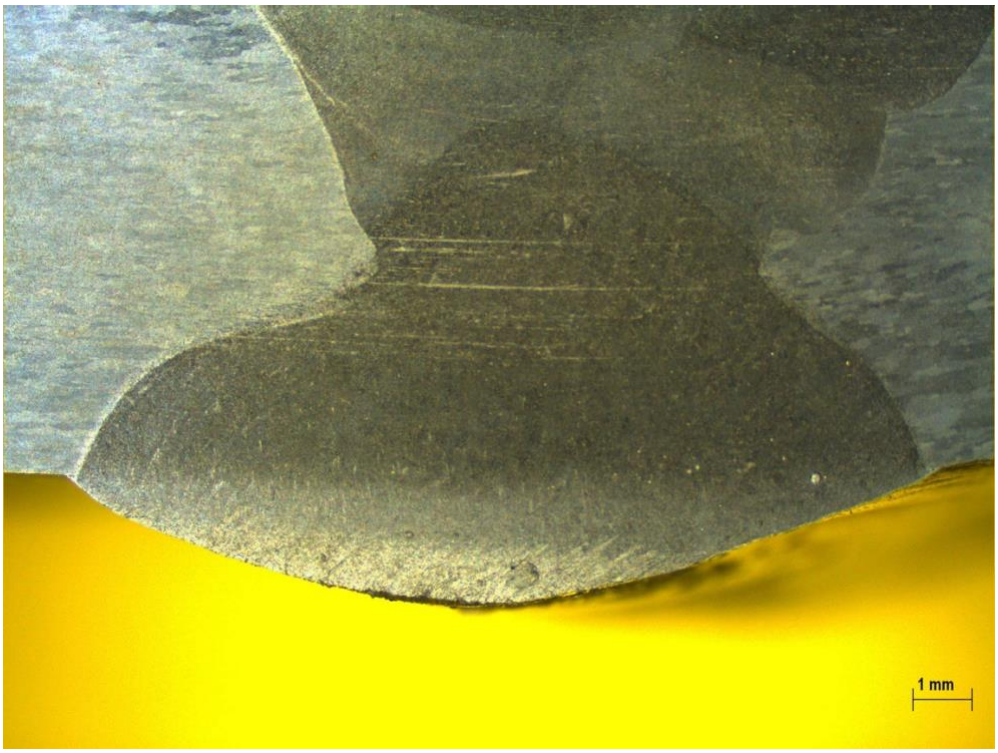



*Slika 58. Makroizbrusak lica zavara lijevo*

Iz slike 58. može se vidjeti prisutnost pora u metalu zavara.



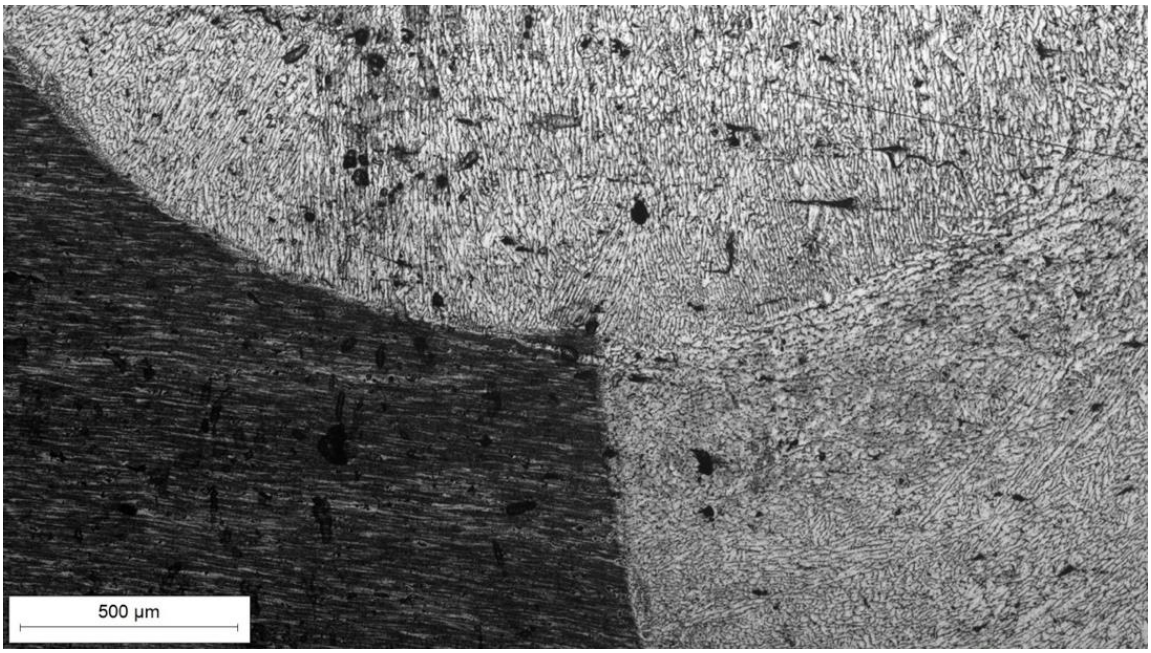

*Slika 59. Makroizbrusak lica zavara desno*



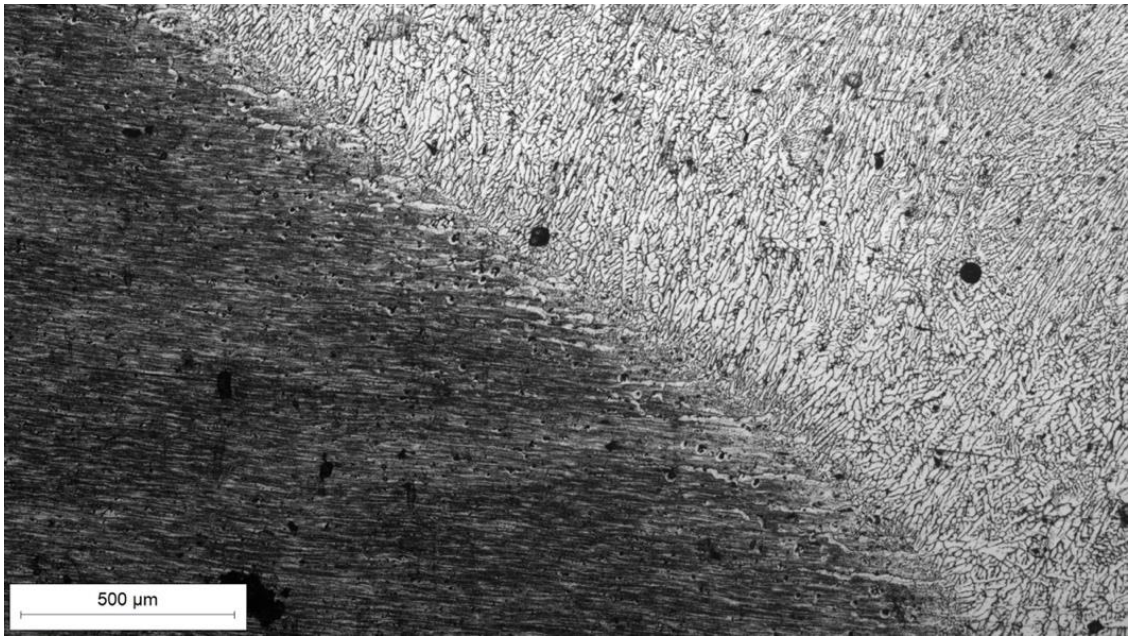

*Slika 60. Makroizbrusak korijena zavara*

## 5.7.2. Mikroskopska analiza

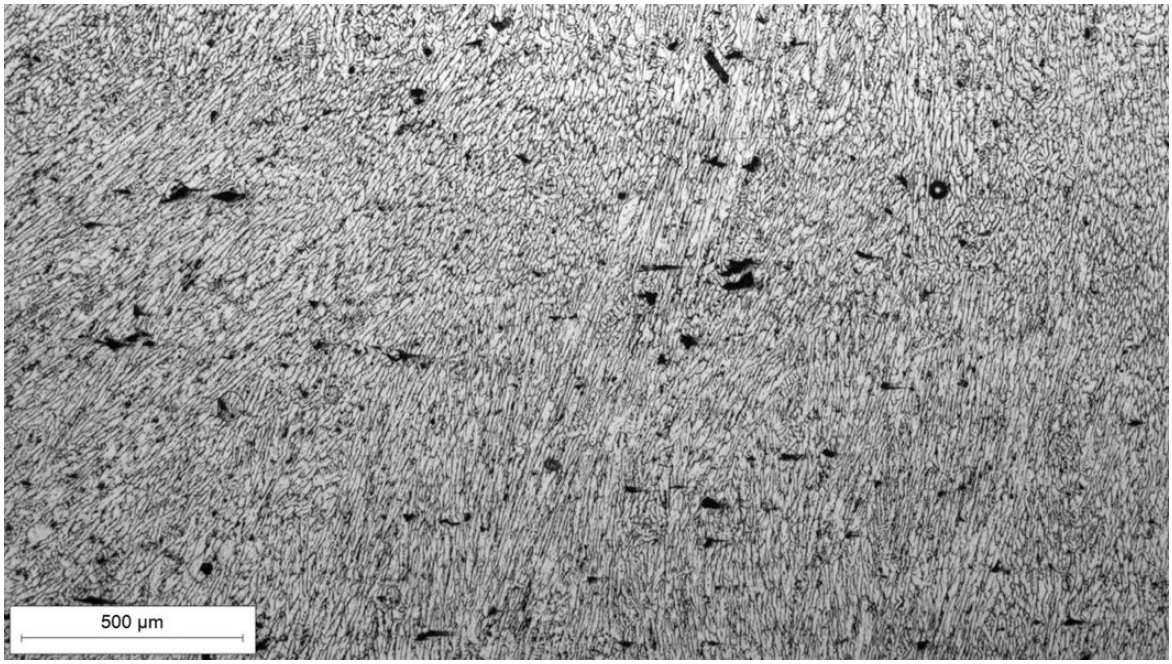
Mikroskopska analiza izrađena je u Laboratoriju za materijalografiju na FSB-u. Makro izbrusci analizirani su na mikroskopu Olympus GX51, a povećanje je iznosilo 50x. Na slikama 61., 62., 63., 64., 65. i 66. prikazani su detalji makro izbruska uzorka.



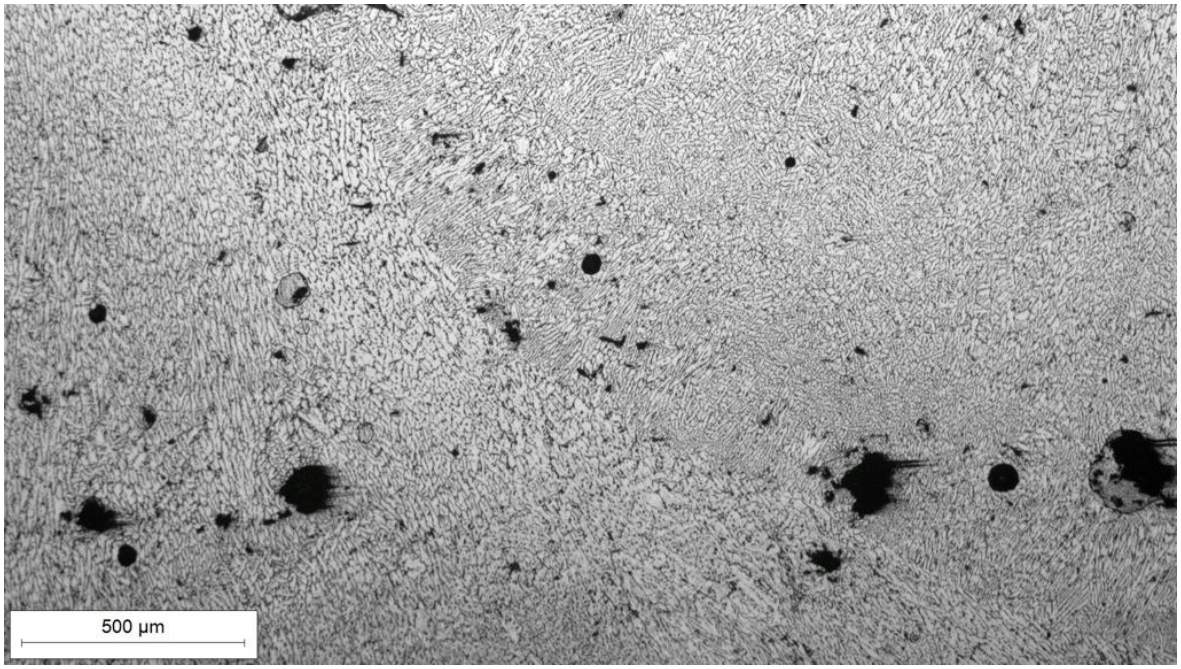

*Slika 61. Mikroskopska snimka metala zavara i ZUT–a – lice zavara, lijevo*




*Slika 62. Mikroskopska snimka metala zavara i ZUT–a – korijen zavara*




*Slika 63. Mikroskopska snimka metala zavara – usmjerenost zrna*




*Slika 64. Mikroskopska snimka metala zavara – linija staljivanja*

# 6. ZAKLJUČAK

Atraktivan omjer čvrstoće i specifične težine i dobra korozijska postojanost samo su neka od specifičnih svojstva aluminijskih legura koja ih čine svestranim i ekonomski atraktivnim materijalom pogodnim za primjenu u brodograđevnoj industriji. Najčešće korištene aluminijske legure u brodogradnji su: 5083, 5059, 6005, 6082. One su postupcima poput MIG-a, TIG-a, plazma, laserskog i zavarivanja trenjem uz ispunjenje određenih uvjeta, poput prikladnog dodatnog materijala, zaštitnog plina, opreme, parametara zavarivanja i dr., većinom lako zavarljive. Uz poroznost kao osnovnu prateću pojavu zavarivanja aluminijevih legura postoji opasnost od toplih pukotina, naljepljivanja, redukcije korozijske otpornosti i redukcije čvrstoće u području metala zavara i ZUT-a. U eksperimentalnom dijelu rada strojnom obradom sukladno normi HRN EN ISO 9692-3 pripremljene su dvije ploče, definirana je tehnologija zavarivanja sa pratećim parametrima te je napravljen sučeoni zavar impulsnim MIG postupkom. Korištena je aluminijska legura 6082, u kombinaciji sa dodatnim materijalom 4043 te se zavarivalo ručno. Nakon zavarivanja provedena su nerazorna i razorna ispitivanja. Nerazornim ispitivanjem penetrantima uočeni su ozbiljniji lokaliteti pukotina na licu zavara. Pri ispitivanju savijanjem došlo je do pucanja sva četiri ispitna uzorka u području metala zavara. Uzrok pucanju pripisuje se neadekvatnoj kombinaciji osnovnog i dodatnog materijala, te je potrebna detaljnija analiza i eventualno ponovno ispitivanje. Makroanalizom uzoraka vidljiva je određena količina poroznosti u metalu zavara koja je najvjerojatnije unesena vlažnim i nečistim dodatnim materijalom. Mikroskopskom analizom uzoraka može se zaključiti da je na uzorcima postignuta vrlo slična homogena mikrostruktura. Vidljivo je nešto poroznosti, ali bez pojave pukotina. U konačnici zbog loših rezultata ispitivanja savijanjem zaključuje se da ova tehnologija MIG zavarivanja nije primjenjiva.

# LITERATURA


[1] G. Mathers, The welding of aluminium and its alloys, Cambridge: CRC Press, 2002.

[2] ALCAN Aerospace , Aluminium and the sea, Paris: Transportation and Industry, 2004.

[3] S. Ferraris and L. M. Volpone, Aluminium alloys in third millennium shipbuilding: materials, technologies, perspectives, Tokyo: The Fifth International Forum on Aluminum Ships, 2005.

[4] B. Ertuğ and L. C. Kumruoğlu, 5083 type Al-Mg and 6082 type Al-Mg-Si alloys for ship building, vol. 4, American Journal of Engineering Research (AJER), 2015, pp. 146-150.

[5] SSC, Aluminum structure design and fabrication guide, Springfield: U.S. Department of Commerce, 2007.

[6] R. Lumley, Fundamentals of aluminium metallurgy, Philadelphia: Woodhead Publishing, 2011.

[7] https://www.shutterstock.com/image-photo/bauxite-ore-aluminum-141265522, dostupno 1.6.2021.

[8] T. Ivanek, Utjecaj parametara anodizacije aluminija na strukturu oksidne prevlake, Diplomski rad, Zagreb: FSB, 2021.

[9] https://www.vijesti.me/vijesti/ekonomija/385769/vrhovni-sud-na-strani-kap-a-i-drzave, dostupno 1.6.2021.

[10] N. Radiković, Korozijska svojstva aluminijske legure dobivene postupkom aditivne proizvodnje električnim lukom i žicom (WAAM), Diplomski rad, Zagreb: FSB, 2019.

[11] https://www.dt-ref.com/product/calcined-aluminahtml.html, dostupno 1.6.2021.

[12] M. Liber, Optimizacija parametara za aditivnu proizvodnju legure Al-Mg električnim lukom i žicom, Diplomski rad, Zagreb: FSB, 2018.

[13] N. R. Mandal, Ship Construction and Welding, Kharagpur: Springer, 2017.

[14] M. Stubičar, Mehanizmi poboljšanja čvrstoće aluminija i aluminijskih legura, Zagreb: FSB, 2020.

[15] A. Jurišić, Utjecaj dozrijevanja na svojstva aluminijeve legure, Završni rad, Zagreb: FSB, 2021.

[16] B. Milkereit, O. Kessler and C. Schick, Precipitation and Dissolution Kinetics in Metallic Alloys with Focus on Aluminium Alloys by Calorimetry in a Wide Scanning Rate Range, Switzerland: Springer International Publishing, 2016.

[17] H. Kos, Zavarljivost aluminijske legure AW 6082, Diplomski rad, Zagreb: FSB, 2014.

[18] M. A. Wahid, A. N. Siddiquee and Z. A. Khan, Aluminum alloys in marine construction: characteristics, application, and problems from a fabrication viewpoint, Sociedade Brasileira de Engenharia Naval, 2019.

[19] L. Jeffus, Welding Principles and Applications, Boston: Cengage Learning, 2017.

[20] D. Gjurtek, Tehnologija zavarivanja aluminijskih oklopljenih sabirnica, Diplomski rad, Zagreb: FSB, 2016.

[21] Ć. Tin, MIG zavarivanje Al legura, Završni rad, Zagreb: FSB, 2017.

[22] M. Špehar, Primjena impulsnih struja pri robotiziranom mag zavarivanju, Završni rad, Zagreb: FSB, 2017.

[23] J. Šimun, Zavarivanje automobilskih karoserija. Diplomski rad, Zagreb: FSB, 2020.

[24] D. H. Phillips, Welding Engineering An Introduction, Chichester: Wiley, 2016.

[25] D. Kantolić, Robotizirano MAG zavarivanje, Zagreb: FSB, 2018.

[26] M. Mikulić, Modificirani MAG postupci za visokoučinsko zavarivanje, Diplomski rad, Zagreb: FSB, 2018.

[27] M. Bušić, Zavarivanje trenjem aluminijskih sendvič panela rotirajućim alatom, Doktorski rad, Zagreb: FSB, 2015.

[28] Norma HRN EN ISO 9692-3:2016, Zavarivanje i srodni procesi - Preporuke za pripremu spoja - 3. dio: MIG i TIG zavarivanje aluminija i aluminijskih legura.

[29] http://www.otc-daihen.de/index.php?id=2586, dostupno 26.06.2021.

[30] Lincoln Electric, Aluminium GMAW, Cleveland: The lincoln electric company, 2016.

[31] https://www.digitalweld.co.nz/wp-content/uploads/2019/04/Bohler-Union-AlSi5-Data-Sheet.pdf, dostupno 29.6.2021.