

Analiza mikrostrukture i svojstava zavarenog spoja aluminijske legure EN AW-5083

Perak, Domagoj

Master's thesis / Diplomski rad

2023

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:235:111341>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-13**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentorica:

Prof. dr. sc. Vera Rede, dipl. ing.

Student:

Domagoj Perak

Zagreb, 2023.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentorica:

Prof. dr. sc. Vera Rede, dipl. ing.

Student:

Domagoj Perak

Zagreb, 2023.

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

Zahvaljujem mentorici prof. dr. sc. Veri Rede na iznimnoj pomoći i razumijevanju koje je pokazala tijekom izrade diplomskog zadatka, ali i tijekom cjelokupnog studiranja. Također se zahvaljujem asistentici mag. ing. mech. Heleni Lukšić na pomoći pri ispravljanju rada i tehničkom suradniku Ivanu Vovku na pruženoj pomoći prilikom provedbe eksperimentalnog dijela rada te ostalim djelatnicima Fakulteta strojarstva i brodogradnje. Zahvaljujem se mag. ing. mech. Ivani Andrić, djelatnici Zavoda za ispitivanje i tehnologiju, d.o.o. u Zagrebu na pomoći oko eksperimentalnog dijela diplomskog rada.

Posebno se zahvaljujem svojim roditeljima, prijateljima, najviše bratu i sestrama koji su mi bili najveća podrška tijekom razdoblja studija.

Domagoj Perak



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



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

| | |
|--|-----------------------|
| Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje | |
| Datum: | Prilog: |
| Klasa: | 602 – 04 / 23 – 6 / 1 |
| Ur. broj: | 15 - 1703 - 23 - |

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **DOMAGOJ PERAK** Mat. br.: 0035213351

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Analiza mikrostrukture i svojstava zavarenog spoja aluminijske legure EN AW-5083**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Analysis of the microstructure and properties of EN AW-5083 aluminium alloy welded joint**

Opis zadatka:

Zbog niske gustoće, dobre kemijske postojanosti i dobre oblikovljivosti, aluminijske legure se sve više primjenjuju i istiskuju klasične konstrukcijske materijale u mnogim područjima primjene. U odnosu na čelične konstrukcije, primjenom aluminijskih legura može se smanjiti masa konstrukcija za oko 50 %. Zavarivanje aluminijskih legura je složenije od zavarivanja konstrukcijskih čelika, a zavareni spojevi mogu predstavljati „slabo mjesto“ u konstrukciji. Zato je kontrola kvalitete zavara i kod ove skupine materijala vrlo važna aktivnost.

U teorijskom dijelu diplomskog rada potrebno je opisati mikrostrukturu i svojstva te primjenu gnječanih aluminijskih legura. Navesti mikrostrukturne promjene koje mogu nastati u području zavarenog spoja te obraditi recentna istraživanja koja se bave analizom utjecaja mikrostrukturnih promjenama na svojstva. U eksperimentalnom dijelu rada potrebno je provesti analizu mikrostrukture u osnovnom materijalu, zoni utjecaja topline i metalu zavara te ispitivanje mehaničkih svojstava zavarenog spoja aluminijske legure oznake EN AW-5083 H111. Dobivene rezultate analizirati i na temelju analize donijeti odgovarajuće zaključke o kvaliteti zavarenog spoja.

Zadatak zadan:
17. studenog 2022.

Rok predaje rada:
19. siječnja 2023.

Predviđeni datum obrane:
23. siječnja do 27. siječnja 2023.

Zadatak zadao:
prof. dr. sc. Vera Rede

Rede

Predsjednica Povjerenstva:
prof. dr. sc. Biserka Runje

Runje

SADRŽAJ

| | |
|---|------|
| SADRŽAJ | I |
| POPIS SLIKA | III |
| POPIS TABLICA..... | VI |
| POPIS OZNAKA | VII |
| POPIS KRATICA | VIII |
| SAŽETAK..... | IX |
| SUMMARY | X |
| 1. UVOD..... | 1 |
| 2. ALUMINIJ I NJEGOVE LEGURE | 2 |
| 2.1 Primjena aluminijevih legura | 3 |
| 2.2 Aluminijeve legure..... | 5 |
| 2.2.1 Precipitacijsko očvršćivanje aluminijevih legura | 6 |
| 2.2.2 Lijevene aluminijeve legure..... | 8 |
| 2.2.2.1 Al-Si lijevene legure („silumin“)..... | 10 |
| 2.2.2.2 Al-Mg lijevene legure | 10 |
| 2.2.2.3 Al-Si-Mg lijevene legure | 10 |
| 2.2.2.4 Al-Cu lijevene legure | 10 |
| 2.2.2.5 Al-Si-Cu lijevene legure | 11 |
| 2.2.3 Gnječene aluminijeve legure..... | 11 |
| 2.2.3.1 Al-Mg-Si precipitacijski očvrstljive legure („antikorodal“)..... | 13 |
| 2.2.3.2 Al-Cu-Mg precipitacijski očvrstljive legure („dural“)..... | 13 |
| 2.2.3.3 Al-Zn-Mg precipitacijski očvrstljive legure | 13 |
| 2.2.3.4 Al-Zn-Mg-Cu precipitacijski očvrstljive legure („konstruktal“)..... | 13 |
| 3. ZAVARIVANJE ALUMINIJA I NJEGOVIH LEGURA | 14 |
| 3.1 Greške u zavarima aluminijevih legura | 18 |
| 3.2 Postupci zavarivanja aluminija i aluminijevih legura | 21 |

| | | |
|-------|--|----|
| 3.2.1 | Elektrolučno zavarivanje aluminija i njegovih legura pod zaštitom inertnog plina | 21 |
| 3.2.2 | Postupak zavarivanja netaljivom elektrodom pod zaštitom plina..... | 23 |
| 4. | EKSPERIMENTALI DIO | 27 |
| 4.1 | Ciljevi eksperimentalnog dijela i provođenje ispitivanja..... | 27 |
| 4.2 | Materijal za ispitivanje..... | 27 |
| 4.3 | Analiza kemijskog sastava osnovnog materijala | 29 |
| 4.4 | Analiza makrostrukture zavarenog spoja | 30 |
| 4.5 | Analiza mikrostrukture zavarenog spoja..... | 30 |
| 4.5.1 | Priprema metalografskog uzorka | 30 |
| 4.5.2 | Analiza mikrostrukture zavarenog spoja u poliranom stanju | 32 |
| 4.5.3 | Analiza mikrostrukture zavarenog spoja u nagriženom stanju | 35 |
| 4.6 | Ispitivanje mikrotvrdoće | 44 |
| 4.7 | Ispitivanje vlačne čvrstoće | 46 |
| 4.8 | Savojno ispitivanje..... | 48 |
| 5. | ZAKLJUČAK..... | 51 |
| 6. | LITERATURA | 52 |

POPIS SLIKA

| | | |
|-----------|--|----|
| Slika 1. | Područja primjene aluminija i njegovih legura [3]..... | 3 |
| Slika 2. | Primjer primjene Al-legura u građevinarstvu – konstrukcija heliodroma na platformi [4] | 4 |
| Slika 3. | Primjer ambalaže izrađene od aluminija [5]..... | 5 |
| Slika 4. | Precipitacijsko očvršćivanje Al-Cu legure s 4 % Cu [2]..... | 6 |
| Slika 5. | Tipovi precipitata [4]..... | 7 |
| Slika 6. | Prikaz općeg postupka precipitacijskog očvršćivanja [6] | 8 |
| Slika 7. | Primjer lijevanih aluminijevih legura [8] | 9 |
| Slika 8. | Primjer gnječeni poluproizvoda aluminijeve legure [8]..... | 11 |
| Slika 9. | Primjer zavarivanja aluminijeve legure TIG metodom [11] | 14 |
| Slika 10. | Lim izrađen od aluminijske legure EN AW-5083 [12]..... | 16 |
| Slika 11. | Mikrostruktura legure EN AW-5083 u nagriženom stanju, snimljena pri povećanju od 50× [12]..... | 17 |
| Slika 12. | Mikrostruktura legure EN AW-5083 u poliranom stanju, snimljena pri povećanju 500× [12] | 17 |
| Slika 13. | Shematski prikaz najčešćih grešaka koje nastaju pri zavarivanju aluminijevih legura [10] | 18 |
| Slika 14. | Poroznost u zavarenom spoju Al-Mg legure [13] | 19 |
| Slika 15. | Pojava pukotina na zavaru nakon hlađenja [14]..... | 19 |
| Slika 16. | Predgrijavanje aluminijeve legure [15] | 20 |
| Slika 17. | Shematski prikaz MIG/MAG zavarivanja [16] | 22 |
| Slika 18. | Na lijevoj (a) strani prikazana je oprema korištena pri ovom ekpserimentu, a na slici (b) shemtaski prikaz kombinacije električnih lukova [17] | 23 |
| Slika 19. | Djelovanje različitih struja na materijal zavarivanja [16] | 24 |
| Slika 20. | Shematski prikaz TIG zavarivanja [18]..... | 24 |
| Slika 21. | Razlika u poroznosti između osnovnog (lijevo) i dodatnog materijala za zavarivanje (desno) [19]..... | 25 |
| Slika 22. | Povećanje penetracije TIG zavara (desno) korištenjem reagensa SiO ₂ u odnosu na klasičan TIG postupak (slijevo) [20]..... | 26 |
| Slika 23. | Detalj pripreme zavara – „V“ spoj | 28 |
| Slika 24. | Shematski prikaz redoslijeda zavarivanja | 28 |
| Slika 25. | Poprečni presjek zavarenog spoja | 29 |

| | | |
|-----------|---|----|
| Slika 26. | Prikaz spektrometra LECO GDS 850A za ispitivanje kemijskog sastava uzorka | 29 |
| Slika 27. | Uzorak za vizualno ispitivanje | 30 |
| Slika 28. | Uređaj za rezanje uzoraka | 31 |
| Slika 29. | Uređaj za brušenje i poliranje uzoraka | 31 |
| Slika 30. | Metalografski uzorak zavarenog spoja nakon poliranja | 32 |
| Slika 31. | Svjetlosni mikroskop za analizu mikrostrukture | 32 |
| Slika 32. | Mikrostruktura osnovnog materijala uz rub ploče u poliranom stanju, snimljena pri povećanju 100× | 33 |
| Slika 33. | Mikrostruktura osnovnog materijala u sredini ploče u poliranom stanju, snimljena pri povećanju 100× | 34 |
| Slika 34. | Mikrostruktura u tjemenu metala zavara u poliranom stanju, snimljena pri povećanju od 100× | 34 |
| Slika 35. | Mikrostruktura u sredini metala zavara u poliranom stanju, snimljena pri povećanju od 100× | 35 |
| Slika 36. | Nagrizanje materijala za analizu mikrostrukture | 36 |
| Slika 37. | Mikrostruktura osnovnog materijala uz rub ploče snimljena pri povećanju 100× | 37 |
| Slika 38. | Mikrostruktura osnovnog materijala u sredini ploče u snimljena pri povećanju 100× | 37 |
| Slika 39. | Mikrostruktura osnovnog materijala, snimljena pri povećanju 500× | 38 |
| Slika 40. | Mikrostruktura metala zavara u sredini, snimljena pri povećanju od 100× | 39 |
| Slika 41. | Mikrostruktura metala zavara u tjemenu, snimljena pri povećanju od 500× | 39 |
| Slika 42. | Mikrostruktura metala zavara u korijenu, snimljena pri povećanju od 500× | 40 |
| Slika 43. | Mikrostruktura ZUT-a u tjemenu zavara s lijeve strane, snimljena pri povećanju 100× | 41 |
| Slika 44. | Mikrostruktura ZUT-a u tjemenu zavarenog spoja s desne strane, snimljena pri povećanju od 100× | 41 |
| Slika 45. | Mikrostruktura ZUT-a u sredini zavarenog spoja s lijeve strane, snimljena pri povećanju od 100× | 42 |
| Slika 46. | Mikrostruktura ZUT-a u sredini zavarenog spoja s desne strane, snimljena pri povećanju od 100× | 42 |
| Slika 47. | Mikrostruktura ZUT-a u korijenu zavarenog spoja s lijeve strane, snimljena pri povećanju od 100× | 43 |
| Slika 48. | Mikrostruktura ZUT-a u korijenu zavarenog spoja s desne strane, snimljena pri povećanju od 100× | 43 |

| | | |
|-----------|--|----|
| Slika 49. | Uređaj za mjerenje mikrotvrdoće | 44 |
| Slika 50. | Pozicije mjerenja mikrotvrdoće na zavarenom spoju..... | 45 |
| Slika 51. | Izgled otiska nakon mjerenja mikrotvrdoće | 45 |
| Slika 52. | Kidalica 30 TUZ 757 za mjerenje vlačne čvrstoće | 47 |
| Slika 53. | Uzorci nakon ispitivanja vlačne čvrstoće | 47 |
| Slika 54. | Izgled trna kojim se utiskuje pločica za savojno ispitivanje | 49 |
| Slika 55. | Prikaz zavarenog spoja nakon savijanja | 50 |
| Slika 56. | Poprečni presjek zavarenog spoja nakon savijanja | 50 |

POPIS TABLICA

| | |
|---|----|
| Tablica 1. Fizikalna i mehanička svojstva aluminijske legure [2]..... | 2 |
| Tablica 2. Osnovna svojstva lijevanih aluminijskih legura [2]..... | 9 |
| Tablica 3. Podjela gnječanih aluminijskih legura [2]..... | 12 |
| Tablica 4. Legure aluminijske s mehaničkim svojstvima. [10] | 15 |
| Tablica 5. Kemijski sastav aluminijske legure EN AW-5083 zajamčen od proizvođača..... | 27 |
| Tablica 6. Kemijski sastav dodatnog materijala za zavarivanje..... | 28 |
| Tablica 7. Rezultati analize kemijskog sastava osnovnog materijala | 29 |
| Tablica 8. Izmjerene vrijednosti mikrotvrdoće HV0,2..... | 46 |
| Tablica 9. Dimenzije epruvete za ispitivanje i rezultati provedenog ispitivanja..... | 48 |

POPIS OZNAKA

| Oznaka | Mjerna jedinica | Opis oznake |
|---------------|------------------------|------------------------------------|
| F | N | sila |
| R_m | MPa | Vlačna čvrstoća |
| $R_{p0,2}$ | MPa | Konvencionalna granica razvlačenja |
| f | Hz | frekvencija |
| ρ | kg/m ³ | gustoća |
| HV0,2 | - | mikrotvrdoća po Vickersu |
| Θ | - | nekoherentni intermetalni spoj |
| α | - | kristal mješanac |

POPIS KRATICA

| Kratika | Opis |
|----------------|---|
| TIG | engl. <i>Tungsten Inert Gas</i> / elektrolučno zavarivanje netaljivom elektrodom |
| MIG | engl. <i>Metal Inert Gas</i> / elektrolučno zavarivanje uz zaštitu inertnog plina |
| ZUT | zona utjecaja topline |
| REL | ručno elektrolučno zavarivanje |
| EPP | zavarivanje pod zaštitom praška |
| EPT | zavarivanje pod troskom |
| FSW | engl. <i>friction stir welding</i> / zavarivanje trenjem |

SAŽETAK

Cilj ovoga rada bila je analiza zavarenog spoja legure aluminijske oznake EN AW-5083. To je gnječena legura aluminijska s najvećim udjelom magnezija kao legirnog elementa. Zavareni spoj izveden je TIG tehnikom spajanja uz prethodno predgrijavanje na 150 °C.

U teorijskom dijelu obrađene su vrste aluminijske i njegovih legura te načini zavarivanja istih. Objašnjene su moguće pogreške koje se mogu pojaviti tijekom ili nakon zavarivanja.

U eksperimentalnom dijelu rada analizirana je makrostruktura zavarenog spoja, te mikrostruktura osnovnog materijala, zone utjecaja topline i metala zavara. Osim toga provedeno je ispitivanje mikrotvrdoće HV0,2, statičko vlačno i savojno ispitivanje. U strukturi nisu uočene nikakve nepravilnosti koje bi negativno utjecale na kvalitetu zavarenog spoja. U odnosu na mikrotvrdoću osnovnog materijala (oko 68 HV0,2), mikrotvrdoća u ZUT-u i metalu zavara je viša za oko 20 %. Vrijednost vlačne čvrstoće u osnovnom materijalu je 330 MPa, a u metalu zavara 280 MPa. Tijekom savojnog ispitivanja do kuta od 180° nisu uočene pukotine u zavarenom spoju.

Ključne riječi: aluminij, zavareni spoj, mikrostruktura, mehanička svojstva

SUMMARY

The aim of this work was the analysis of the welded joint of aluminum alloy EN AW-5083. It is a wrought aluminum alloy with the highest proportion of magnesium as an alloying element. The welded joint was made using the TIG joining technique with preheating to 150 °C.

In the theoretical part, the types of aluminum and its alloys and methods of welding them are covered. Possible errors that may occur during or after welding are explained.

In the experimental part of the work, the macrostructure of the welded joint was analyzed, as well as the microstructure of the base material, the heat-affected zone and the weld metal. In addition, a microhardness test of HV0.2, a tensile and bend test, was performed. No irregularities were observed in the structure that would negatively affect the quality of the welded joint. In relation to the microhardness of the base material (about 68HV0.2), the microhardness in ZUT and weld metal is higher by about 20%. The value of the tensile strength in the base material is 330 MPa, and in the weld metal 280 MPa. During the bending test, no cracks were observed in the welded joint up to an angle of 180°.

Key words: Aluminum, welded joint, microstructure, mechanical properties

1. UVOD

Povećanje upotrebe aluminija i aluminijskih legura u raznim granama industrije prvenstveno se može pripisati izvrsnoj kombinaciji mehaničkih, toplinskih, električnih i sličnih svojstava koje posjeduje ovaj materijal. Zbog svoje odlične korozijske postojanosti, visoke toplinske i električne vodljivosti te zbog relativno visoke čvrstoće i niske gustoće, a samim time i ukupne mase nekoga proizvoda, aluminij i njegove legure upotrebljavaju se u automobilskoj i brodskoj industriji, prehrambenoj industriji, građevinarstvu, elektroindustriji i mnogim drugim područjima. Osim navedenih i najčešće spominjanih svojstava, legure aluminija odlikuju i visoka lomna žilavost, dobra lomna žilavost na kriogenim temperaturama, jednostavnost zavarivanja, dobra obradivost, odlična mogućnost lemljenja i slično [1].

Prema navedenim svojstvima aluminij i njegove legure mogu se uz dobru pripremu i ispitivanje primijeniti u gotovo svakoj grani industrije. Zbog odličnog odnosa čvrstoće i gustoće, legure aluminija postupno zamjenjuju neke vrste čelika prilikom čega se zadovoljavaju svi zahtjevi na materijal, a pritom se uspijeva postići i do 50 % manja masa konstruiranog proizvoda ili postrojenja.

Za većinu proizvoda nastalih od aluminija u svim navedenim industrijama kao najčešća tehnika spajanja materijala koristi se zavarivanje. Aluminij i njegove legure specifične su po pitanju zavarivanja zbog oksidnog sloja koji nastaje na površini prilikom čega se koriste drugačiji parametri u odnosu na ugljične čelike. Dva najčešća postupka zavarivanja koja se koriste za legure aluminija su elektrolučno zavarivanje netaljivom elektrodom (engl. *Tungsten Inert Gas - TIG*) i elektrolučno zavarivanje uz zaštitu inertnog plina (engl. *Metal Inert Gas - MIG*).

Osim spomenutih postupaka, koristi se i spajanje zakovicama, zavarivanje pristiskom (hladno, trenjem i sl.), zavarivanje laserom i zavarivanje trenjem. Svi navedeni načini spajanja aluminija i njegovih legura mogu znatno promijeniti mikrostrukturu samog materijala, a samim time mehanička, fizikalna i kemijska svojstva. Stoga je iznimno bitno razmotriti sve parametre koji mogu utjecati na eventualne promjene u mikrostrukturi prilikom izbora određene tehnike spajanja. Isto tako, bitno je uzeti u obzir moguće obrade prije samog spajanja materijala koje mogu odrediti buduća svojstva nekog gotovog proizvoda [1].

2. ALUMINIJ I NJEGOVE LEGURE

Sve do kraja devetnaestoga stoljeća proizvodnja aluminija bila je iznimno zahtjevan i skup proces. Promjena se dogodila zahvaljujući znanstvenicima C.M. Hallu i P. Heraultu koji su uz pomoć kriolita (Na_3AlF_6) omogućili znatno jeftiniju proizvodnju. Daljnji razvoji postupaka, poput Bayerovog, doveli su do pojave tehničkog aluminija koji se pokazao kao izvrstan materijal za primjenu u raznim područjima tadašnje, ali i trenutne industrije [2].

Upotreba tehničkog aluminija može se pripisati nekim od specifičnih svojstava koja stavljaju ovaj materijal ispred drugih. Tri su glavna svojstva koja stavljaju aluminij u povoljan položaj naspram drugih materijala: specifična čvrstoća (R_m/ρ), povoljan omjer električne vodljivosti i gustoće te korozivna postojanost [2].

Visoka specifična čvrstoća omogućava primjenu aluminijevih legura prvenstveno u proizvodnji zrakoplova i automobila. Vrlo visoki omjer električne vodljivosti i gustoće čini aluminij povoljnijim od svih drugih metala za prijenos električne energije.

Korozivna postojanost aluminija zasniva se na gustom i nepropusnom oksidnom sloju koji se pojavljuje na površini materijala. Usprkos mogućem oštećenju sloja oksida, aluminij kroz oksidaciju trenutno nadomješta novi te ta sposobnost ovoga materijala donosi razne tehničke prednosti u usporedbi s drugim materijalima [2].

U tablici 1 prikazana su glavna fizikalna i mehanička svojstva koja odlikuju aluminij.

Tablica 1. Fizikalna i mehanička svojstva aluminija [2]

| | | |
|-------------------------|------------------------------|-----------|
| Gustoća | kg/m^3 | 2700 |
| Talište | $^{\circ}\text{C}$ | 660 |
| Modul elastičnosti | MPa | 69000 |
| Toplinska rastezljivost | $10^{-6}/\text{K}$ | 23,8 |
| Električna vodljivost | $\text{m}/\Omega\text{mm}^2$ | 36...37,8 |
| Granica razvlačenja | MPa | 20...120 |
| Vlačna čvrstoća* | MPa | 40...180 |
| Istezljivost* | % | 50...4 |

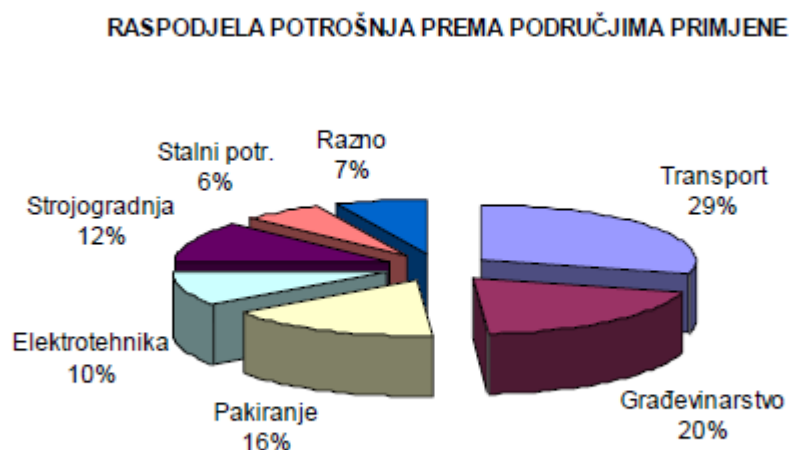
*ovisno o stanju

Osim navedenih prednosti koje krasi ovaj materijal, aluminij i njegove legure koriste se pri izradi nosača zbog niskog modula elastičnosti u odnosu na čelike što takvim konstrukcijama donosi znatno bolju gipkost [2].

Aluminij ima kubičnu, plošno centriranu kristalnu rešetku (engl. „*face-centered cubic*“ - FCC) i zahvaljujući tome posjeduje izvanrednu toplu i hladnu oblikovljivost deformiranjem. Zbog toga, postupcima poput isprešavanja i valjanja mogu se proizvoditi profili kompleksnih oblika, ali i folije debljine samo nekoliko mikrometara koje se najčešće koriste u pakiranju industrijskih i prehrambenih proizvoda.

2.1 Primjena aluminijevih legura

Zbog svojih specifičnih fizikalnih i mehaničkih svojstava, aluminij i njegove legure primjenu nalaze i gotovo svim područjima industrije. Najveći udio primjene aluminija zauzima područje transporta. S obzirom na odličan omjer gustoće i čvrstoće, aluminij doprinosi smanjenju mase različitih transportnih sredstava, a istodobno zadovoljava sve zahtjeve čvrstoće koji se stavljaju ispred njega. Na slici 1 prikazana su područja primjene u raznim industrijama s njihovim udjelima.



Slika 1. Područja primjene aluminija i njegovih legura [3]

Osim transporta, aluminij ponajviše pronalazi primjenu u građevinarstvu. Razlozi primjene gotovo su identični kao u području transporta uz dodatni uvjet korozijske postojanosti koji se traži u građevinarstvu. Na slici 2 prikazan je heliodrom čija je konstrukcija izrađena od aluminijskih legura [4].



Slika 2. Primjer primjene Al-legura u građevinarstvu – konstrukcija heliodroma na platformi [4]

Primjena u području pakiranja i ambalaže zauzima treće mjesto po udjelu uporabe aluminija. Zbog svojih antikorozivnih svojstava izvrsno služi kao zaštitna ambalaža za razne prehrambene proizvode, slika 3. Karakteristika koja također doprinosi korištenju aluminija u ove svrhe je i njegova izvrsna mogućnost recikliranja prilikom čega njegova mehanička svojstva gotovo ostaju nepromijenjena. Isto tako, aluminij služi kao odlična zaštita od svjetla i bakterija koje ubrzavaju kvarenje prehrambenih proizvoda.



Slika 3. Primjer ambalaže izradene od aluminija [5]

2.2 Aluminijeve legure

Unos legirnih elemenata u sastav čistog aluminija ima za posljedicu poboljšavanje mehaničkih svojstava, prvenstveno vlačne čvrstoće koja je za čisti aluminij znatno niža u odnosu na čelike istih dimenzija. Osim na čvrstoću, legiranjem se utječe i na povećanje tvrdoće, krutosti, rezljivosti, a ponekad i livljivosti [2].

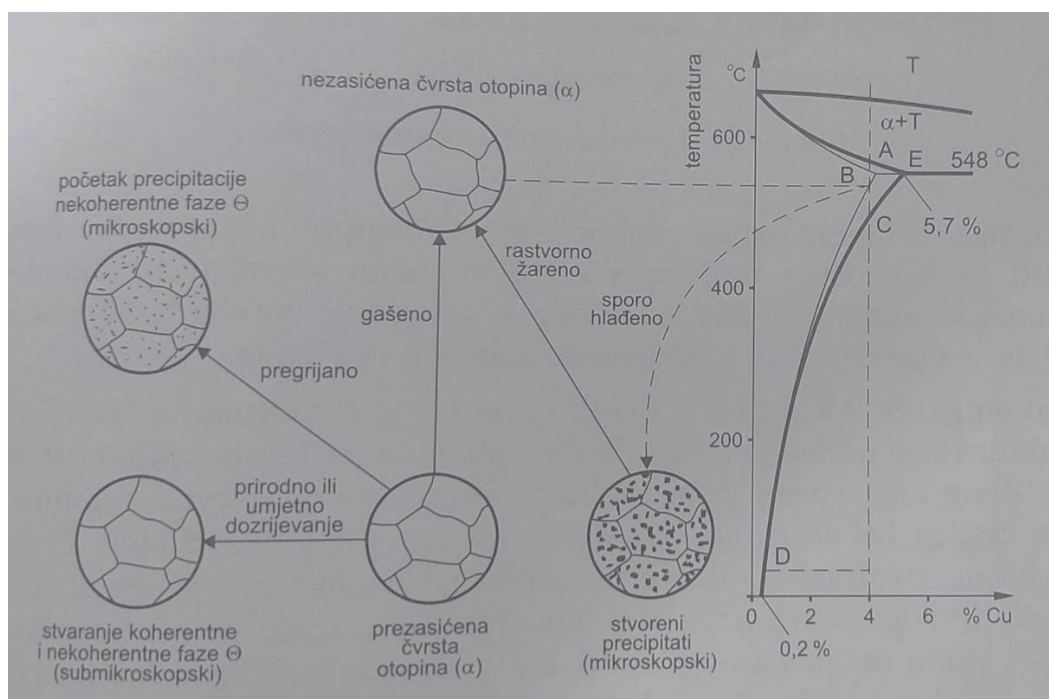
Osnovna podjela aluminijevih legura napravljena je prema postupku prerade pa tako postoje legure aluminija u lijevanom stanju i u gnječenom stanju. Osim legiranjem, svojstva se mogu poboljšati i precipitacijskim očvršćivanjem, toplinskom obradom kojom se mogu poboljšati svojstva nekih aluminijevih legura. Ipak, veliki broj legura koristi se bez takve i sličnih obrada.

Legirni elementi koji se koriste najčešće za poboljšavanje svojstava aluminijevih legura su: bakar (Cu), magnezij (Mg), silicij (Si), cink (Zn) i mangan (Mn). Osim navedenih, u manjoj količini se koriste još i željezo (Fe), krom (Cr) i titanij (Ti). Kombinacijom legirnih elemenata nastaju složenije legure kojima je poboljšana čvrstoća, tvrdoća, rezljivost itd. Pri dovoljno visokim temperaturama zagarantirana je potpuna topljivost legirnih elemenata u kristalu mješancu aluminija. Osim topljivosti, na fizikalna, mehanička i kemijska svojstva utječu i udjeli pojedinih faza te oblik i raspodjela intermetalnih spojeva.

2.2.1 Precipitacijsko očvršćivanje aluminijevih legura

Slučajno se došlo do spoznaje da gašenjem nekih aluminijevih legura u vodi s temperatura od oko 500 °C, a koje su na sobnoj temperaturi heterogene i sadrže intermetalni spoj, te držanjem tih legura na temperaturi okoline, dolazi do porasta čvrstoće. Maksimalna vrijednost čvrstoće postiže se nakon tjedan dana držanja legure na sobnoj temperaturi. Prva takva legura nazvana je „dural“ te se koristila tijekom I. svjetskog rata u konstrukciji zračnog broda „Graf von Zeppelin“.

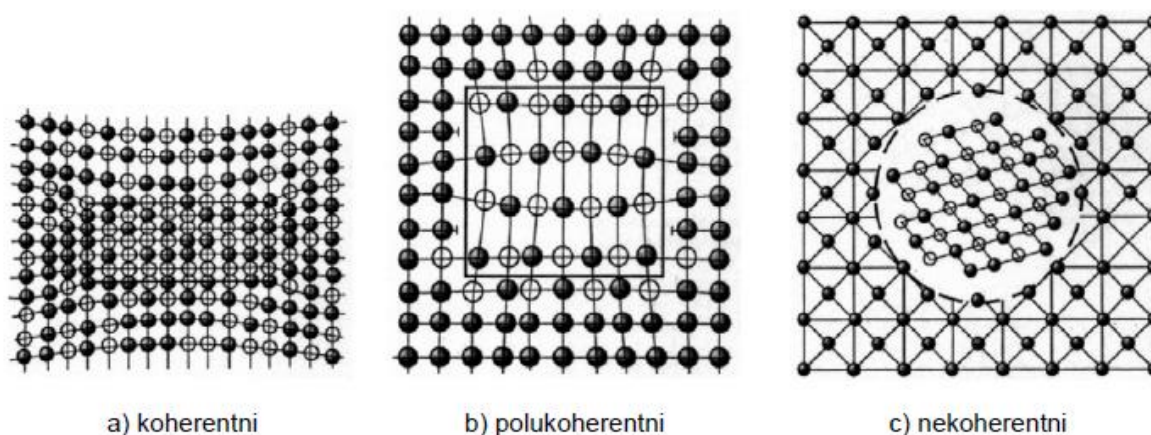
Ukoliko homogeniziranu leguru ostavimo nakon gašenja na sobnoj temperaturi, ona prolazi kroz fazu prirodnog dozrijevanja u kojoj se u strukturi izlučuju sitni precipitati intermetalnog spoja. Zbog ove mikrostrukturne promjene dolazi do povišenja čvrstoće i tvrdoće. Prirodni postupak dozrijevanja može se ubrzati ako gašenu leguru zagrijavamo do temperature od oko 180 °C. Takvo dozrijevanje zove se umjetno dozrijevanje. Ovaj postupak koji uključuje homogenizaciju i dozrijevanje naziva se „precipitacijsko očvršćivanje“ ili „precipitacijsko otvrdnuće“. Razlog očvršćivanja i otvrdnuća legura pripisuje se stvaranju koherentnih i polukoherentnih precipitata unutar rešetke kristala mješanca. Postupak precipitacijskog očvršćivanja prikazan je na Al-Cu leguri s 4 % Cu, slika 4.



Slika 4. Precipitacijsko očvršćivanje Al-Cu legure s 4 % Cu [2]

Nakon što se taljevina ohladi ispod točke A (570 °C), čvrsta otopina sastoji se od α -kristala mješanaca aluminijskih u kojima je otopljeno 4 % Cu. Nekoherentni precipitati intermetalnog spoja Al_2Cu (Θ) nastajat će tijekom sporog hlađenja od točke C prikazane na dijagramu do okolne temperature nakon čega će u aluminijsku ostati otopljeno samo 0,2 % Cu (točka D). Takva legura ima slaba mehanička svojstva i poprilično je krhka zbog postojanja krupnijih čestica Al_2Cu na granicama zrna. Ako se hlađenje od točke C provede brzo, neće se izlučiti intermetalni spoj i dobit će se prezasićena otopina bakra u aluminijsku na sobnoj temperaturi. Nakon otprilike 6 dana stajanja ove legure, u strukturi se izlučuju sitni precipitati intermetalnog spoja i postižu se optimalna mehanička svojstva, tj. maksimalna čvrstoća i tvrdoća. Ključ uspješnog očvršćenja aluminijskih legura leži upravo u činjenici da se zbog prezasićenja krute otopine u strukturi izlučuje višak atoma bakra u obliku nekoherentnog precipitata Al_2Cu .

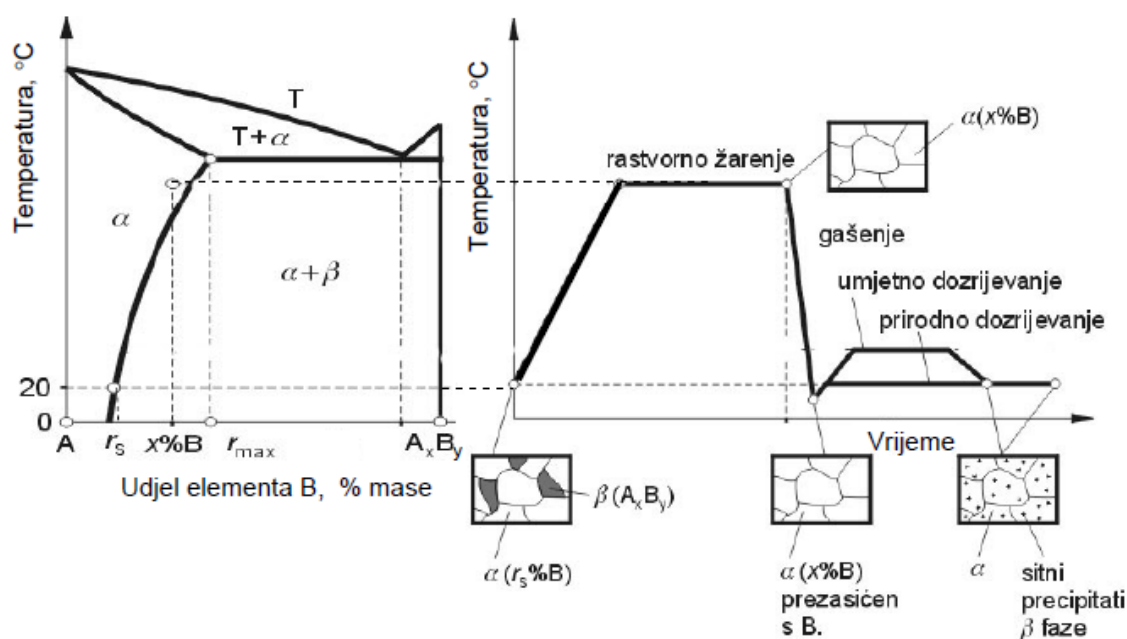
Na slici 5 prikazani su tipovi precipitata koji se izlučuju u leguri Al-Cu [2].



Slika 5. Tipovi precipitata [4]

Ipak, zbog spore difuzije atoma bakra iz aluminijske rešetke ne dolazi do izlaska atoma bakra, nego se događa određeno gibanje i atomi bakra zauzimaju položaje unutar rešetke aluminijske u obliku koherentnih precipitata prikazanih na slici 5. Takvi precipitati su kontinuirano povezani s osnovnom rešetkom aluminijske. U slučaju distorzije pojavljuju se unutarnja naprezanja koja uspješno ometaju gibanje dislokacija te samim time povećavaju granicu razvlačenja [2].

Na slici 6 prikazan je opći postupak precipitacijskog očvršćivanja aluminijskih legura pomoću kojeg se povisuju mehanička svojstva.



Slika 6. Prikaz općeg postupka precipitacijskog očvršćivanja [6]

Najčešća upotreba precipitacijskog očvršćivanja javlja se upravo kod aluminijevih legura, ali moguće je i kod drugih legura s pogodnim sastavima, u kojima se može, zbog povećanja topljivosti legirnih elemenata s temperaturom, doći iz heterogenog u homogeno područje [2].

2.2.2 Lijeivane aluminijeve legure

Četiri su osnovne skupine lijeivanih legura aluminija. To su: Al-Si, Al-Mg, Al-Cu i Al-Zn legure. Sve lijeivane legure aluminija mogu se proizvoditi jednako dobro u pijesku, kokili i tlačno. Naknadno se određene legure mogu toplinski očvrstnuti, ali i gnječiti. One koje ne spadaju u tu kategoriju koriste se u svrhe gdje je važnija krutost i korozijska postojanost nego primjerice čvrstoća [2].

U tablici 2 Tablica 2. Osnovna svojstva lijeivanih aluminijevih legura [2] prikazana su osnovna svojstva nekih lijeivanih aluminijevih legura.

Tablica 2. Osnovna svojstva lijevanih aluminijevih legura [2]

| Mehanička otpornost | Livljivost | Rezljivost | Korozijska postojanost | Tip legure | Predstavnik | |
|--|-------------------|------------|------------------------|------------|----------------------|-----------------------------------|
| mala | srednja | dobra | vrlo dobra | AlMg | AlMg3, AlMg5 | |
| | | | | Al-Si-Mg | AlSi10Mg AlSi7Mg1 | Mg omogućuje toplinsko očvrnuće |
| mala | vrlo dobra | slaba | dobra | AlSi | AlSi12 | |
| | | | | Al-Si-Cu | AlSi5Cu1 AlSi6Cu2 | Si negativno utječe na rezljivost |
| osrednja (uz toplinsku obradu) | slaba | dobra | vrlo slaba | Al-Cu | AlCu4MgTi | Ti i Mg usitnjuju zrno |

Primjer lijevanih aluminijevih legura prikazan je na slici 7.



Slika 7. Primjer lijevanih aluminijevih legura [8]

2.2.2.1 Al-Si lijevane legure („silumin“)

Al-Si legure najprikladnije su za tlačno lijevanje i to one legure s 10-13 % silicija i ponekad s malom količinom bakra. Približno su eutektičkog sastava i njihov interval skrućivanja poprilično je uzak. Osim tlačnog lijevanja, moguće je lijevanje i u pijesku prilikom čega nastaje gruba eutektička mikrostruktura. Takva mikrostruktura usitnjava se postupkom koji se naziva cijepljenje. Postupak se sastoji od dodavanja natrija u kalup prije ulijevanja te se na taj način pomiče eutektička točka sastava u desno. Pomoću tog načina odgađa se nukleacija silicija kad se dostigne normalna eutektička legura. Zbog pomicanja eutektičke točke, u cijepljenim legurama može biti prisutno i više od 15 % silicija, a rezultat svega je pojava razmjerno sitnozrnate eutektičke mikrostrukture. Osim sitnije strukture, cijepljenjem se povećava vlačna čvrstoća sa 120 MPa na otprilike 200 MPa, te istezljivost za nešto više od 10 %. Razlog dobre duktilnosti je taj što α -kristal mješanac aluminijski čini 90 % ukupne mikrostrukture, dok je ostatak sačinjen od tvrde faze silicija. Tako aluminij služi kao „mekani jastuk“ za visoku tvrdoću silicijevih faza [2].

2.2.2.2 Al-Mg lijevane legure

Al-Mg legure zbog prisutnosti magnezija svoju svrhu najčešće pronalaze u pomorskoj industriji zbog izvrsne korozivne postojanosti. Aluminijske legure s višim udjelima magnezija imaju lošu livljivost pa se zbog toga uglavnom koriste legure s udjelom od 3 do 5 % [2].

2.2.2.3 Al-Si-Mg lijevane legure

Al-Si-Mg legure zbog prisutnosti magnezija i intermetalnog spoja u mikrostrukтури imaju mogućnost precipitacijskog očvršćuća. Njihova livljivost je značajno bolja u odnosu na Al-Mg lijevane legure zbog prisutnosti silicija. Kao što je slučaj kod legura aluminijski i silicija, ove legure zahtijevaju obavezno cijepljenje. Mogu se upotrijebiti na radnim temperaturama do 200 °C [2].

2.2.2.4 Al-Cu lijevane legure

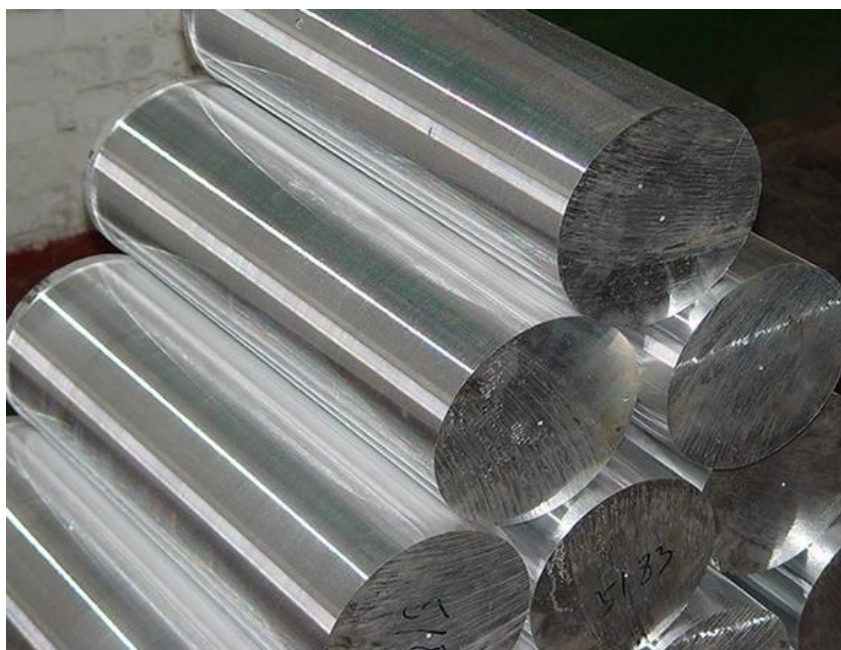
Al-Cu lijevane legure mogu se toplinski očvršćiti te time postići srednju razinu čvrstoće, dobru rezljivost i dobru otpornost na radnim temperaturama do 300 °C. Ipak, ove legure imaju slabu livljivost te najlošiju korozivnu postojanost od svih lijevanih legura aluminijski [2].

2.2.2.5 Al-Si-Cu lijevane legure

Dodatak bakra u ovim legurama doprinosi njihovoj boljoj čvrstoći i rezljivosti, a kao posljedica dodatka bakra je gubitak livljivosti i otpornosti na koroziju. Mogu se toplinski obrađivati čime se dodatno poboljšavaju mehanička svojstva. Prije svega povećava se granica razvlačenja $R_{p0,2}$ do 200 MPa. Ukoliko se u sastav legure doda titanij, ove legure postižu dobru žilavost, otpornost na udarce i dobru obradljivost odvajanjem čestica [2].

2.2.3 Gnječene aluminijeve legure

Glavna podjela gnječenih legura temelji se na načinu očvršćivanja i kemijskom sastavu. Po načinu očvršćivanja legure se dijele na one kojima se mehanička svojstva poboljšavaju hladnim deformiranjem i na precipitacijski očvrstive legure [2]. Primjer gnječenih poluproizvoda aluminijeve legure vidi se na slici 8.



Slika 8. Primjer gnječenih poluproizvoda aluminijeve legure [8]

Legure se mogu oblikovati u hladnom ili toplom stanju, a najčešći postupci za obradu su: valjanje, istiskivanje ili ekstrudiranje, kovanje, provlačenje, duboko vučenje i savijanje. Prije postupka valjanja i istiskivanja uvijek se radi postupak lijevanja u blokove ili trupce, dok prije savijanja ili vučenja uvijek prethodi valjanje. Najčešći postupci kojim se dobivaju gnječene

aluminijeve legure su valjanje i istiskivanje. Tim postupcima dobivaju se poluproizvodi poput profila, cijevi, šipki i žica [3].

U toplinski neobradive legure spadaju serije aluminijske 1xxx, 3xxx i 5xxx. Navedene serije legura mogu očvrnuti samo hladnim oblikovanjem. Toplinski se mogu obrađivati legure iz serija 2xxx, 6xxx i 7xxx, najčešće postupkom precipitacijskog očvrnuća [9].

U tablici 3 **Tablica 3. Podjela gnječanih aluminijeve legura [2]** prikazana je podjela gnječanih aluminijeve legura.

Tablica 3. Podjela gnječanih aluminijeve legura [2]

| Vrsta legure | Način očvrnuća | Vlačna čvrstoća MPa |
|--------------|--------------------------------|---------------------|
| Al-Mn | Deformiranjem u hladnom stanju | 200...350 |
| Al-Mg | | |
| Al-Mg-Mn | | |
| Al-Mg-Si | Precipitacijom | ~ 330 |
| Al-Cu-Mg | | ~ 450 |
| Al-Zn-Mg | | ~ 400 |
| Al-Zn-Mg-Cu | | ~ 550 |
| Al-Li-Cu-Mg | | ~500 |

Od skupine koja očvršćuje hladnim deformiranjem očekuje se dovoljna čvrstoća i krutost u hladnom stanju uz dobru korozivnu postojanost. Veliku duktilnost i visoku otpornost na koroziju ovim legurama osigurava mikrostruktura koja se potpuno sastoji od čvrste otopine. Najpoznatija od njih je legura aluminijske i magnezije koja svoju primjenu pronalazi u brodogradnji. U toj grani industrije koristi se zbog odlične postojanosti u morskoj vodi i pomorskoj atmosferi. Ove legure isporučuju se u mekanom stanju nakon čega slijedi zadnja faza hladnog očvrnuća prilikom čega se postižu zahtijevana mehanička svojstva. Problem legura nastalih hladnim deformiranjem je taj što se mehanička svojstva, nakon oblikovanja materijala na konačne dimenzije, ne mogu mijenjati [2].

Kada tražimo povoljan omjer čvrstoće i gustoće koriste se precipitacijski očvrstljive aluminijeve legure. S obzirom da se ovom metodom postižu više granice čvrstoće i općenito bolja mehanička svojstva, precipitacijsko očvrstnuće ima prednost ispred hladnog deformiranja [2].

2.2.3.1 Al-Mg-Si precipitacijski očvrstljive legure („antikorodal“)

Vlačna čvrstoća ovih legura doseže maksimalnu vrijednost od 330 MPa. Konvencionalna granica razvlačenja ($R_{p0,2}$) postignuta prirodnim dozrijevanjem iznosi oko 110 MPa, a umjetnim dozrijevanjem oko 240 MPa. Prikladne su za spajanje materijala zavarivanjem te su otporne na koroziju. Zbog visokog omjera čvrstoće i električne vodljivosti koji se postiže hladnim deformiranjem ili precipitacijom, ove legure primjenu pronalaze u prijenosu električne energije [2].

2.2.3.2 Al-Cu-Mg precipitacijski očvrstljive legure („dural“)

Djelovanja bakra u ovoj vrsti legure očituje se u smanjenju otpornosti na koroziju pa se one dodatno štite platiniranjem valjanih limova ili prešanih profila. Usprkos tome, „durali“ mogu postići vlačnu čvrstoću do 450 MPa i granicu razvlačenja od oko 290 MPa. Očvrstnuće ovih legura ubrzava se dodavanjem magnezija kao legirnog elementa koji omogućuje stvaranje intermetalnih spojeva [2].

2.2.3.3 Al-Zn-Mg precipitacijski očvrstljive legure

Al-Zn-Mg legure nemaju čvrstoću kao „durali“, ali zbog zamjene bakra s cinkom imaju bolju otpornost na kemijske procese. Može ih se svrstati u sredini raspona svojstava gnječanih aluminijevih legura, s obzirom na odnos čvrstoće, zavarljivosti i korozijske postojanosti [2].

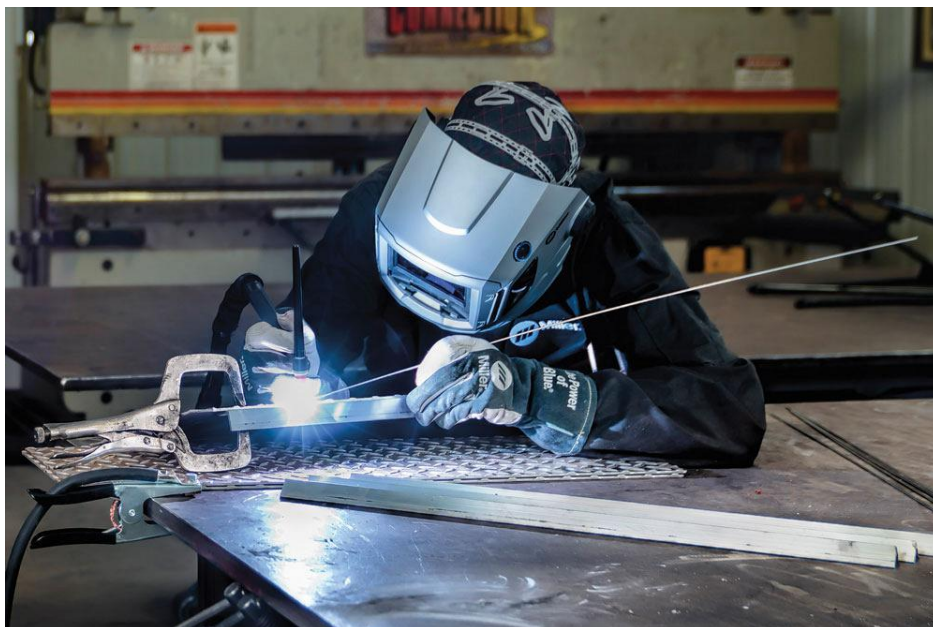
2.2.3.4 Al-Zn-Mg-Cu precipitacijski očvrstljive legure („konstruktal“)

„Konstrukтали“ pripadaju najčvršćim aluminijevim legurama te njihova vlačna čvrstoća iznosi oko 550 MPa. Osnovni nedostatak im je osjetljivost na napetosnu koroziju koja se pokušava suzbiti raznim termomehaničkim postupcima. Glavnu primjenu pronalaze u zrakoplovnoj industriji zbog visokog omjera čvrstoće i gustoće [2].

3. ZAVARIVANJE ALUMINIJA I NJEGOVIH LEGURA

Zbog pojave tankog oksidnog filma (Al_2O_3) debljine 0,01 mm na površini aluminija, zavarivanje aluminija i njegovih legura uvelike se razlikuje od zavarivanja većine drugih metalnih materijala. S obzirom na visoku toplinsku i električnu provodljivost, potreban je višestruko veći unos topline u odnosu na čelike. Kao posljedica te pojave dolazi do veće opasnosti od pojava deformacija pri hlađenju, a samim time i do pojave pukotina [10].

Na slici 9 možemo vidjeti zavarivača koji zavaruje aluminijevu leguru TIG metodom.



Slika 9. Primjer zavarivanja aluminijeve legure TIG metodom [11]

Prema međunarodnim oznakama legure aluminija označavaju se 4-znamenkastom oznakom. Prvi broj u oznaci označava glavni legirni element, a to su: 1 (Al), 2 (Cu), 3 (Mn), 4 (Si), 5 (Mg), 6 (Mg i Si), 7 (Zn), 8 (ostali poput Sn i dr.). Ukupni udio legirajućih elemenata ne prelazi 10 %.

U tablici 4 prikazane su legure aluminija po oznakama za zavarivanje [10].

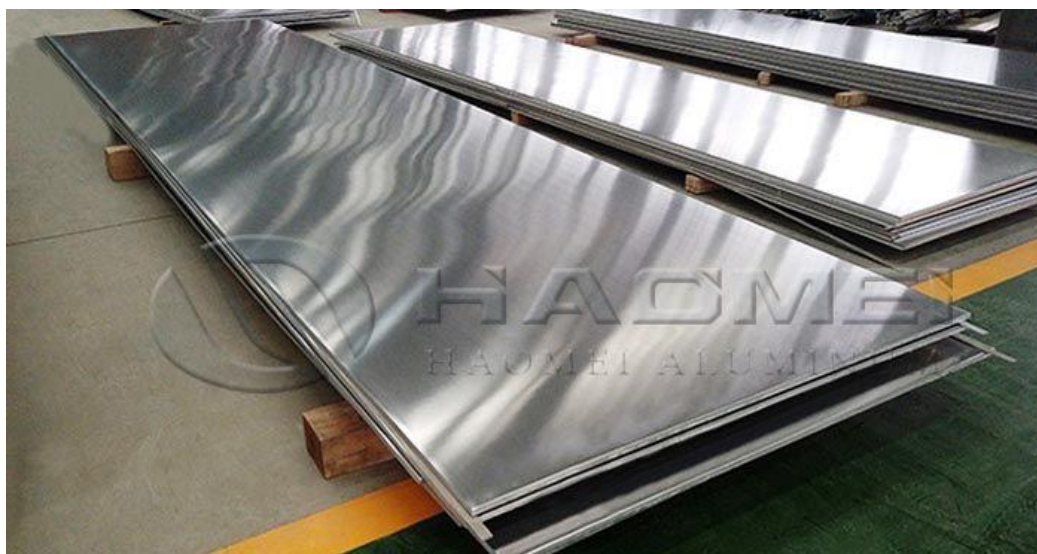
Tablica 4. Legure aluminija s mehaničkim svojstvima. [10]

| Legura | Serijska | Tip | Oznaka | Granica razvlačenja, MPa | Vlačna čvrstoća, MPa |
|---|----------|-------------------|--|--------------------------|----------------------|
| Legure koje toplinskom obradom ne očvršćuju | 1000 | Al | 1050A 1070A 1100 1200 1080 | 20 – 140 | 50 – 180 |
| | 2000 | Al-Mn | 3003 3004 3005 3105 | 50 - 220 | 120 – 300 |
| | 5000 | Al-Mg | 5086 5083 5056A 5456 5052 5005 5053 5754 5254 5182 | 30 - 320 | 110 – 380 |
| Legure koje toplinskom obradom očvršćuju | 2000 | Al-Cu Al-Cu-Mg | 2011 2030 2017A 2618A 2024 (2124) 2014 (2214) 2219 | 250 - 500 | 360 - 530 |
| | 6000 | Al-Si-Mg | 6005 6060 6061 6082 6081 6106 6351 | 140 - 360 | 180 – 380 |
| | 7000 | Al-Zn-Mg | 7020 7021 7039 | 230 - 430 | 360 – 500 |
| | | Al-Zn-Mg-Cu | 7049A 7175 7075 7475 7010 7130 7050 | 350 - 720 | 440 - 760 |

Čisti aluminij oznake „1000“ ima odličnu zavarljivost te najveću primjenu pronalazi u elektroindustriji, kemijskoj industriji, građevinarstvu i u dekorativnim svrhama. Aluminijske legure s manganom imaju oznaku „2000“ te ih odlikuje odlična zavarljivost, plastičnost i otpornost na atmosferske uvjete. Služe za izradu proizvoda dubokim vučenjem te za izradu izmjenjivača topline [10].

Al-Mg legure oznake „5000“ imaju dobru zavarljivost, visoka mehanička svojstva pri niskim temperaturama, a najbitnije svojstvo je visoka otpornost na morsku koroziju te stoga najveću primjenu imaju u brodogradnji, građevinarstvu i sličnim postrojenjima koja su izložena utjecaju morskog okoliša. Važno je za istaknuti da legure iz serije 5000 ne gube značajno na čvrstoći nakon zavarivanja i nisu sklone nastajanju pukotina [3].

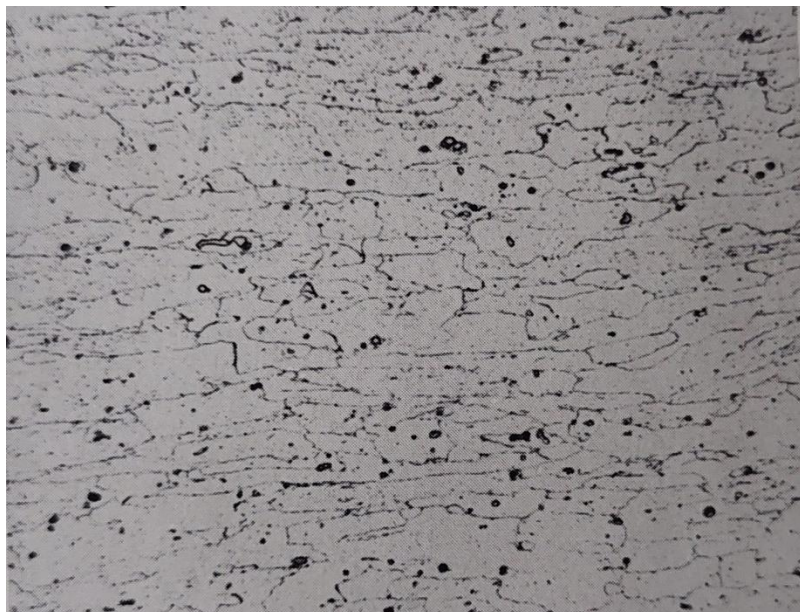
Na slici 10 prikazan je lim izrađen od legure 5083 [10].



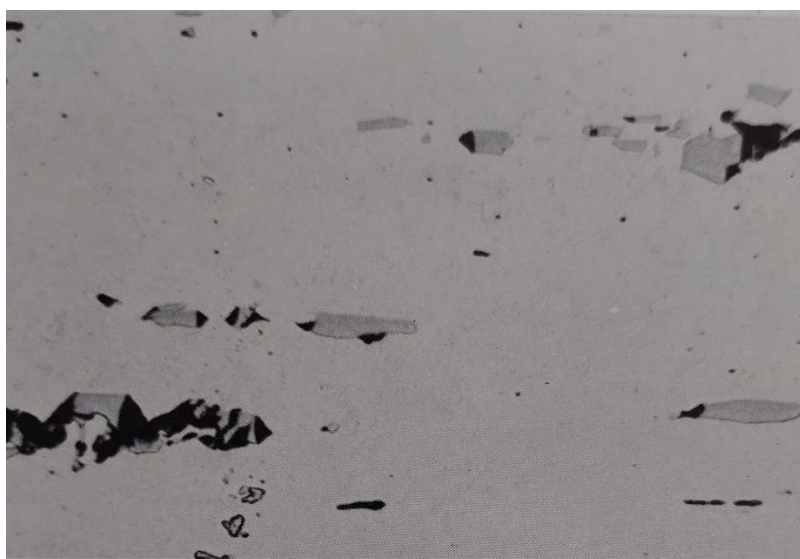
Slika 10. Lim izrađen od aluminijske legure EN AW-5083 [12]

Na slici 11 prikazana je mikrostruktura aluminijske legure EN AW-5083 . Mikrostruktura se sastoji od kristala mješanaca (svijetlo sivo), primarnih čestica spoja $MnAl_6$ (tamno sive, uz granice zrna) i intermetalnog spoja Mg_2Si (sitne, crne čestice) [12].

Na slici 12 može se vidjeti oblik i veličina netopljivijih čestica aluminijske legure EN AW-5083 u poliranom stanju [12].



Slika 11. Mikrostruktura legure EN AW-5083 u nagriženom stanju, snimljena pri povećanju od 50× [12]



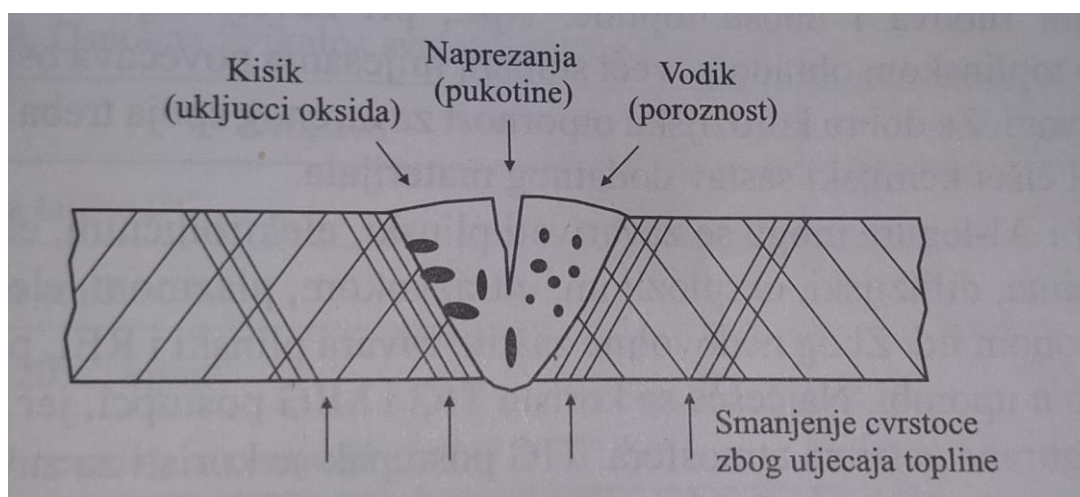
Slika 12. Mikrostruktura legure EN AW-5083 u poliranom stanju, snimljena pri povećanju 500× [12]

Ostale legure koje mogu očvrnuti toplinskom obradom (3xxx, 6xxx i 7xxx) u usporedbi s legurama koje ne mogu očvrnuti toplinskom obradom imaju znatno bolja mehanička svojstva, ali slabiju zavarljivost. Ovisno o primjeni određene legure treba oprezno odrediti zahtjeve koji se stavljaju na proizvod ili cijelo postrojenje [10].

Specifičnost zavarivanja aluminija i njegovih legura očituje se ponajviše u postojanju tankog oksidnog sloja (Al_2O_3) koji ima visoku temperaturu taljenja ($2050\text{ }^\circ\text{C}$). Zbog te temperature koja je znatno veća od tališta samog aluminija potrebno je prije samoga procesa zavarivanja ukloniti sloj oksida s površine. Oksidni film može se ukloniti mehaničkim putem, kemijskim nagrizanjem materijala, zaštitnim praškom pri plinskom zavarivanju ili elektrolučnim postupcima u inertnoj atmosferi (elektroda spojena na „+“ pol) [10].

3.1 Greške u zavarima aluminijevih legura

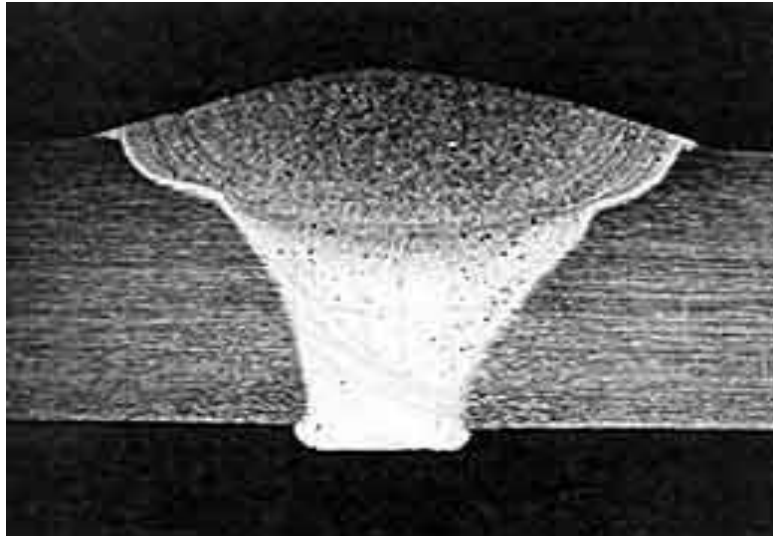
Najveći problemi koji se pojavljuju prilikom zavarivanja aluminijevih legura su uključci oksida, pukotine, pogrubljenje zrna, omekšanja na mjestu zavarenog spoja i poroznost. Na slici 13 prikazane su najčešće greške u zavarenom spoju aluminija i njegovih legura [10].



Slika 13. Shematski prikaz najčešćih grešaka koje nastaju pri zavarivanju aluminijevih legura [10]

Poroznost, kao najčešća greška, nastaje zbog pojave mjehurića vodika iz atmosfere ili vlage u sloju oksida. Ova pojava može se spriječiti predgrijavanjem legure čime se smanjuje odvođenje topline, a samim time i mogućnost nastajanja poroznosti [10].

Na slici 14 prikazana je poroznost zavarenog spoja legure Al-Mg [8].



Slika 14. Poroznost u zavarenom spoju Al-Mg legure [13]

Do pukotina najčešće dolazi kod Al-Mg legura s 0,2-2 % magnezija i kod Al-Si legura. Pojavljuju se u zoni taljenja, a nekada i u zoni utjecaja topline. Mogu biti hladne pukotine koje su češća pojava, a ponekad se pojavljuju i tople pukotine. Pojava pukotina ovisi o kemijskom sastavu osnovnog i dodatnog materijala, načinu kristalizacije, režimu zavarivanja i sl. Do toplih pukotina dolazi kada, zbog velikog koeficijenta naprezanja, nastanu poprečna reakcijska naprezanja, a time i moguća pukotina. Ovaj problem rješava se dodatkom titanija, cirkonija ili kroma u dodatni materijal [10].

Pojava pukotina prikazana je na slici 15.

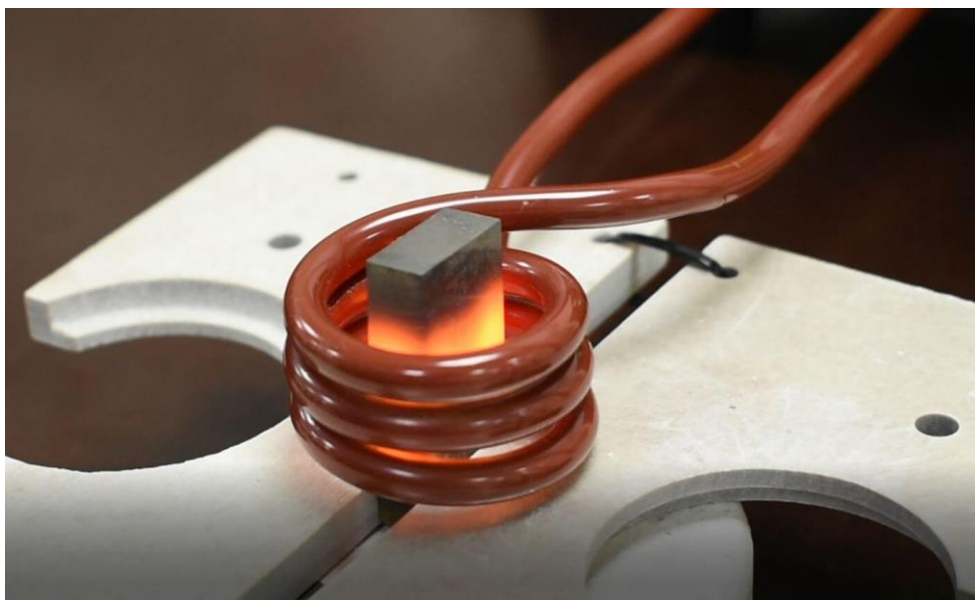


Slika 15. Pojava pukotina na zavaru nakon hlađenja [14]

Do pojave toplih pukotina dolazi prilikom skrućivanja metala zavara i pri hlađenju u zoni utjecaja topline. Točan razlog nastajanja pukotina je izlučivanje niskotaljivih ili netaljivih eutektikuma po granicama zrna prilikom čega nastaju naprezanja koja dovode do pucanja. Kod aluminijske i njegovih legure može doći do skupljanja od čak 7 % [3].

Kod legura očvrnutih hladnim deformiranjem ili toplinskom obradom treba posebnu pažnju obratiti na promjenu mehaničkih svojstava koja se mijenjaju zbog velikog unosa topline tijekom zavarivanja. Porast zrna koji se može dogoditi u ZUT-u direktno utječe na smanjenje čvrstoće i plastičnosti. Zbog visokog unosa topline mogu se poništiti poželjna svojstva dobivena hladnom deformacijom ili toplinskom obradom. Iz tog razloga u avioindustriji većina aluminijskih spojeva izvodi se pomoću zakovica [10].

Ukoliko se zavaruju ploče aluminijske većih debljina potrebno je provesti predgrijavanje zbog visoke toplinske vodljivosti. Ipak, treba biti oprezan s obzirom da predgrijavanje povećava širinu ZUT-a, a samim time može dovesti do poništenja svojstava postignutih toplinskom obradom. U praksi je preporučljivo da temperatura zagrijavanja ne bude veća od temperature umjetnog dozrijevanja. Na slici 16 prikazan je primjer predgrijavanja aluminijske legure.



Slika 16. Predgrijavanje aluminijske legure [15]

3.2 Postupci zavarivanja aluminija i aluminijevih legura

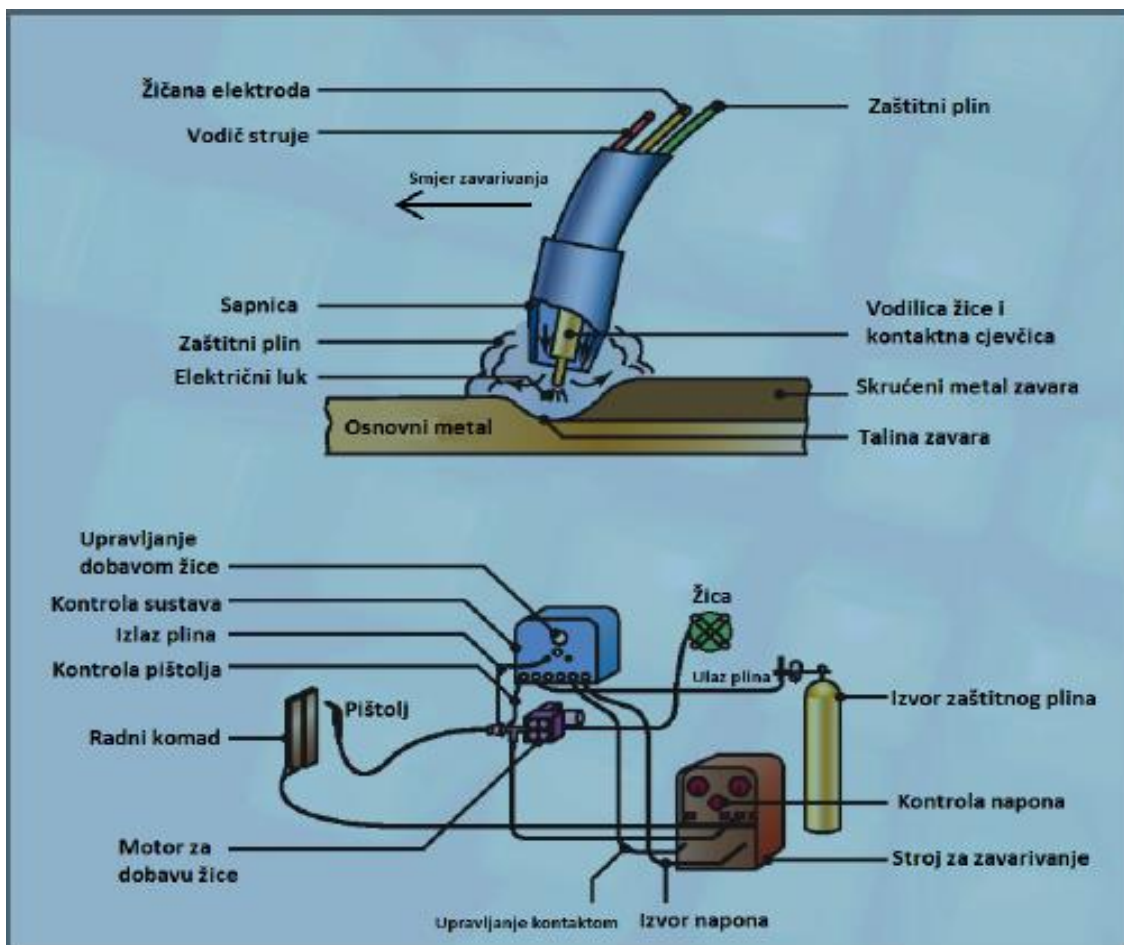
Metode koje se najčešće koriste kao tehnike spajanja aluminija i njegovih legura su elektrolučno zavarivanje netaljivom elektrodom (TIG) i elektrolučno zavarivanje pod zaštitom inertnog plina (MIG). Osim navedenim postupcima, Al-legure mogu se zavarivati plinskim, elektrolučnim, elektrootpornim, difuzijskim, plazmom i drugim postupcima. Zavar je potrebno zaštititi tijekom postupka pa stoga ručno elektrolučno zavarivanje elektrodom (REL) i plinski postupak rijetko pronalaze primjenu u praksi. Ukoliko se limovi aluminija zavaraju elektrolučnim zavarivanjem pod zaštitom praška (EPP) ili elektrolučnim zavarivanjem pod zaštitom troske (EPT), potrebno je koristiti prašak koji uklanja okside s aluminijeve površine.

Točkasto zavarivanje s velikim jakostima struje (do 100 kA) i kratkim vremenima (4-15 perioda izmjenične struje $f=50$ HZ) primjenjivo je zbog visoke toplinske i električne provodljivosti. U posljednje vrijeme izrazito je „popularno“ korištenje pokretnog zavarivanja trenjem (engl. *Friction Stir Welding*- FSW). Prednost ovog postupka je što nema taljenja niti velikih deformacija, a postižu se odlična mehanička svojstva. Zbog toga sve češće nalazi primjenu u zrakoplovnoj industriji i brodogradnji [10].

3.2.1 Elektrolučno zavarivanje aluminija i njegovih legura pod zaštitom inertnog plina

Elektrolučno zavarivanje pod zaštitom inertnog plina (MIG) je tehnika spajanja koja se koristi za zavarivanje dijelova aluminija i njegovih legura debljih od 6 mm. Električni luk uspostavlja se između elektrodne žice koja je u pravilu spojena na „+“ pol izvora. Žica istovremeno služi kao elektroda i dodatni materijal.

Na slici 17 prikazan je shematski postupak MIG/MAG zavarivanja.

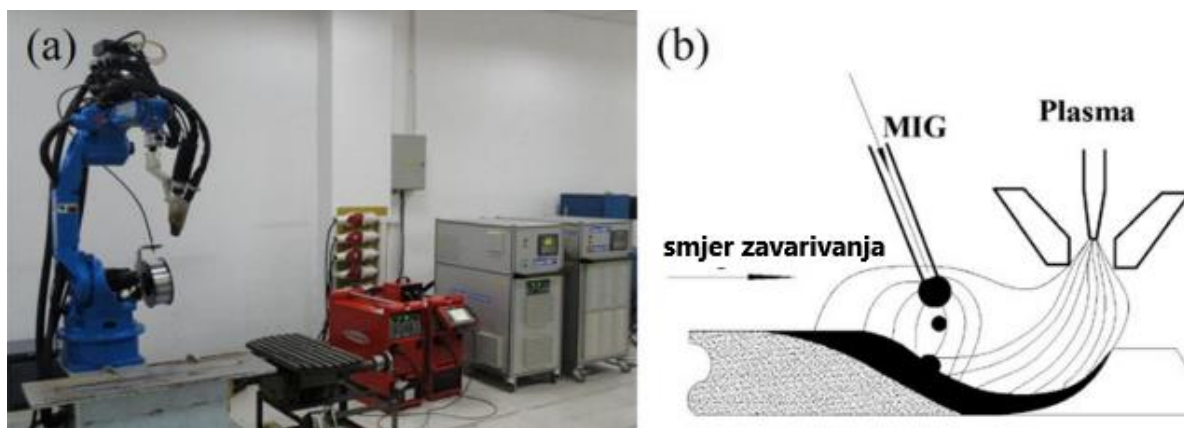


Slika 17. Shematski prikaz MIG/MAG zavarivanja [16]

Plin koji se koristi pri zavarivanju služi kao barijera između kisika iz zraka i rastaljenog metala. U slučaju zavarivanja aluminija i njegovih legura, on sprječava reakciju s okolnim zrakom i nastajanje aluminijevog oksida. Najčešće korišteni plinovi su argon, helij i njihove mješavine. Prije samog postupka zavarivanja potrebno je očistiti površinu materijala kako bi se uklonili već postojeći oksidi. Isti postupak potrebno je ponoviti nakon svakog položenog sloja zavara. Osim toga, dobro je i prije zavarivanja plamenom osušiti površinu oko spoja zavarivanja radi uklanjanja vlage i vodika koji može dovesti do nastajanja poroznosti. Kako bi se spriječila mogućnost nastajanja pukotina kod zavarivanja aluminijevih legura, dodatni materijal bi trebao sadržavati veću količinu legirajućih elemenata u usporedbi s osnovnim materijalom. Nikako se ne smije koristiti žica za zavarivanje od čistoga aluminija. Ukoliko je lim koji se zavaruje deblji od 10 mm, preporučuje se provesti predgrijavanje mjesta zavara u temperaturnom rasponu između 150 i 200 °C [10].

U sklopu ispitivanja zavarivanja aluminija i njegovih legura razvijaju se nove hibridne metode zavarivanja. Jedna od njih je i plazma-MIG zavarivanje. Ovim načinom pokušale su se iskoristiti prednosti jedne i druge metode [17].

Na slici 18 prikazana je oprema za plazma-MIG zavarivanje (a) i shematski prikaz postupka (b).

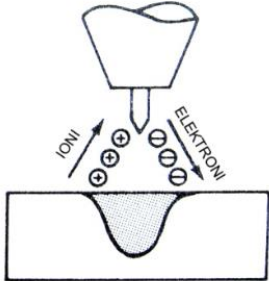
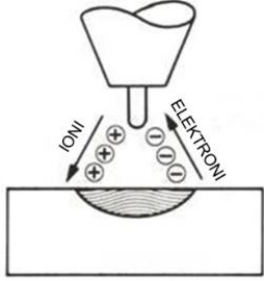
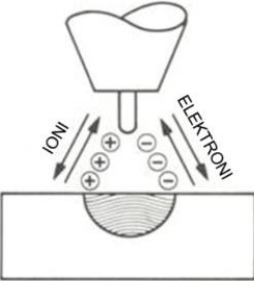


Slika 18. Na lijevoj (a) strani prikazana je oprema korištena pri ovom ekpserimentu, a na slici (b) shemtaski prikaz kombinacije električnih lukova [17]

Ovim eksperimentom postignuta je puno veća brzina zavarivanja koja svakako ima utjecaj na krajnja svojstva zavarenog spoja. Zbog različitih djelovanja toplina jedne i druge metode došlo je do segregacije mikrostrukture u zoni zavara. Ipak, granica vlačne čvrstoće na kraju ispitivanja iznosila je približno 90 % vlačne čvrstoće osnovnog materijala, što se uz puno veću brzinu i penetraciju može okarakterizirati kao uspješna metoda [17].

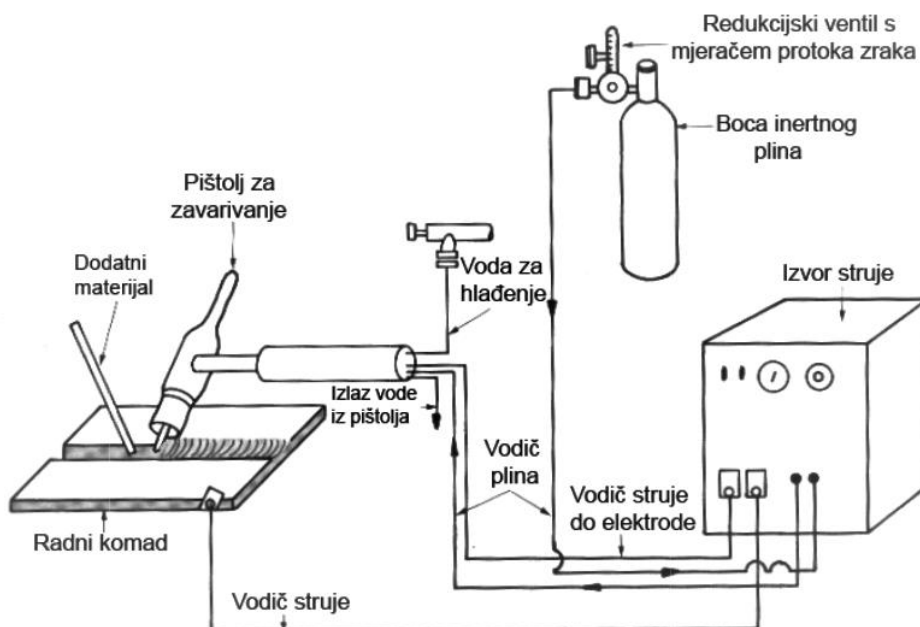
3.2.2 Postupak zavarivanja netaljivom elektrodom pod zaštitom plina

Među najčešće tehnike spajanja aluminija ubraja se zavarivanje netaljivom elektrodom pod zaštitom plina (engl. „Tungsten Inert Gas - TIG). Električni luk uspostavlja se između volframove netaljive elektrode i osnovnog materijala. U praksi se ova tehnika može provoditi sa ili bez dodatnog materijala [10].

| Vrsta struje | DC | DC | AC |
|----------------------|---|--|---|
| Polaritet elektrode | Negativan | Pozitivan | |
| Tok elektrona i iona |  |  |  |
| Čišćenje oksida | Ne | Da | Da- svakih pola ciklusa jedan puta |

Slika 19. Djelovanje različitih struja na materijal zavarivanja [16]

Na slici 19 prikazano je djelovanje različitih vrsta struja tijekom TIG zavarivanja. Za aluminij i njegove legure jedino je prihvatljiva izmjenična struja zbog postojanja sloja aluminijevog oksida na površini. Osim korištenja izmjenične struje, kod zavarivanja aluminija vrh volframove elektrode treba biti zaobljen. Kod svih ostalih metala zavaruje se elektrodom s istosmjernom strujom te zašiljenim vrhom. Na slici 20 shematski je prikazana tehnika spajanja TIG metodom.



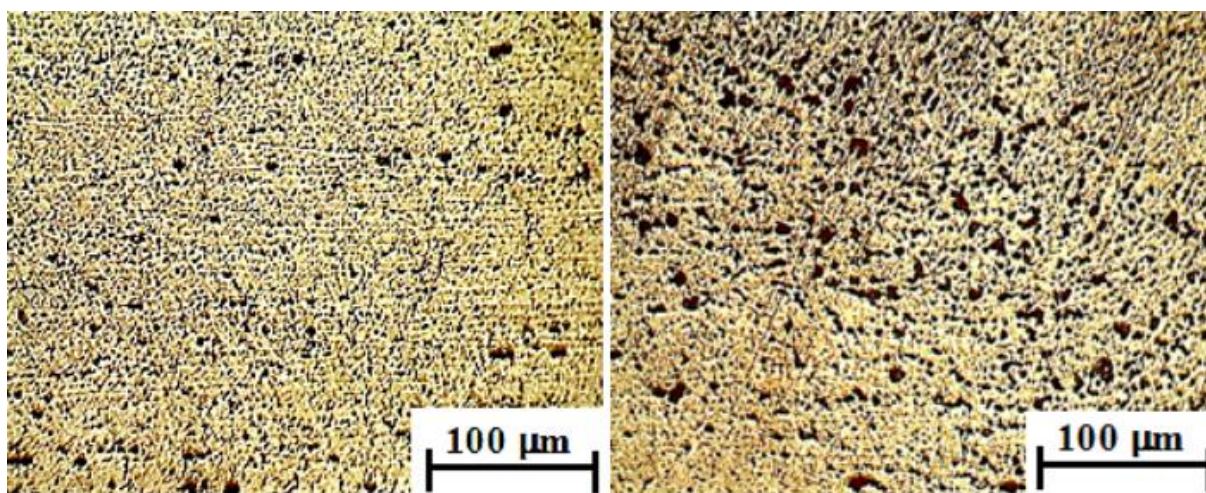
Slika 20. Shematski prikaz TIG zavarivanja [18]

Za aluminijeve legure bitan faktor je i kemijski sastav elektrode. Preporučuje se korištenje elektroda legiranih cirkonijem.

Zbog ekonomičnosti postupka, TIG zavarivanje primjenjuje se za aluminijske limove debljine do 6 mm. Osim zaštite argonom koja se koristi i u MIG zavarivanju, TIG postupak prikladan je ponajviše što nema prijenosa kapljice u električnom luku. Isto kao i kod ostalih metoda potrebno je prije zavarivanja očistiti površinu materijala radi uklanjanja oksida i odmašćivanja. Kod limova debljine do 2 mm nije potreban dodatni materijal nego se osnovni materijal pretaljuje. Limove između 2 i 4 mm zavaruju se pripremom „I“ spoja, a za limove iznad 6 mm preporučuje se izrada „V“ spoja uz predgrijavanje prije zavarivanja kako bi se spriječilo naglo odvođenje topline [5].

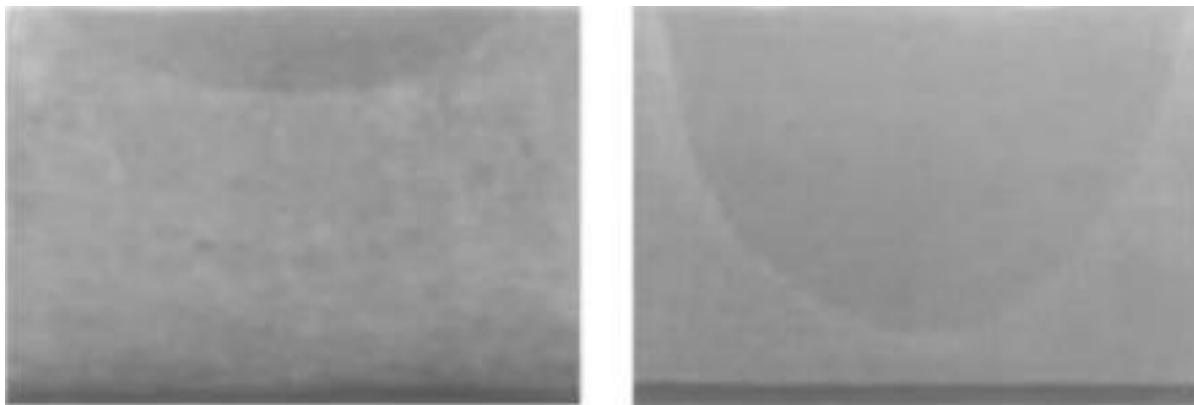
Greške koje mogu nastati prilikom TIG zavarivanja vrlo su slične greškama kod ostalih postupaka zavarivanja aluminijske legure. Svakako treba obratiti pažnju na dodatni materijal koji treba biti iz iste skupine kao i osnovni, ali uz viši udio legirajućih elemenata. Bitan faktor je i količina taline u zavaru koja ne smije biti prevelika jer time raste zrno i pada čvrstoća [5].

Na slici 21 prikazana je razlika u poroznosti osnovnog materijala i dodatnog materijala prilikom TIG zavarivanja. Dodatni materijal preporučeno sadrži veće količine magnezija koji sprječava nastajanje vrućih pukotina [18].



Slika 21. Razlika u poroznosti između osnovnog (lijevo) i dodatnog materijala za zavarivanje (desno) [19]

U svrhu poboljšanja kvalitete zavarivanja razvijaju se nove metode TIG spajanja aluminijskih legura. Jedna od takvih je A-TIG zavarivanje koje koristi aktivni reagens u obliku SiO_2 . Taj aktivni reagens poboljšava penetraciju do tri puta u odnosu na klasičan TIG postupak, slika 22 [20].



Slika 22. Povećanje penetracije TIG zavara (desno) korištenjem reagensa SiO_2 u odnosu na klasičan TIG postupak (s lijevo) [20]

4. EKSPERIMENTALI DIO

4.1 Ciljevi eksperimentalnog dijela i provođenje ispitivanja

Glavni cilj eksperimentalnog dijela je analiza mikrostrukture i ispitivanje mehaničkih svojstava zavarenoga spoja aluminijske legure oznake EN AW-5083.

U svrhu ostvarenja navedenog cilja napravljeno je sljedeće:

- Analiza kemijskog sastava legure
- Analiza mikrostrukture zavarenoga spoja
- Ispitivanje mikrotvrdoće u osnovnome materijalu, zoni utjecaja topline i metalu zavara
- Ispitivanje vlačne čvrstoće
- Savojno ispitivanje

4.2 Materijal za ispitivanje

Sva planirana ispitivanja u eksperimentalnom dijelu provedena su na zavarenom spoju ploča izrađenih od aluminijske legure oznake EN AW-5083.

Kemijski sastav aluminijske legure EN AW-5083 zajamčen od strane proizvođača prikazan je u tablici 5.

Tablica 5. Kemijski sastav aluminijske legure EN AW-5083 zajamčen od proizvođača

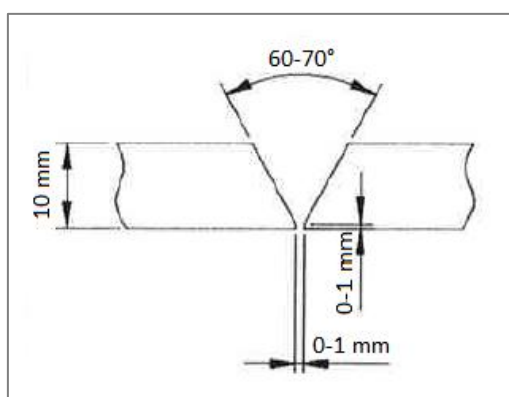
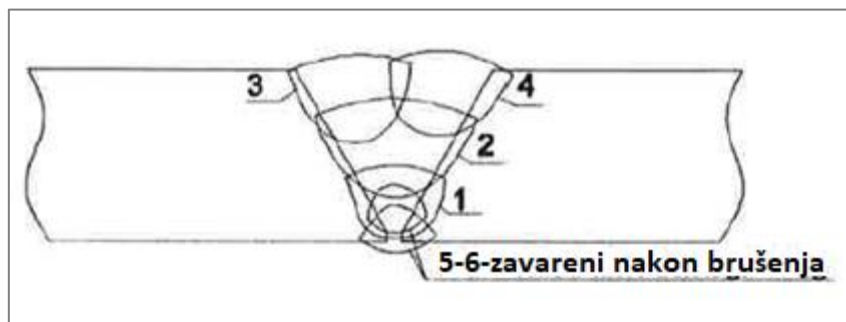
| Maseni udio elemenata, % | | | | | | | | |
|--------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|---------|
| Si | Fe | Mn | Mg | Cu | Ti | Cr | Zn | Al |
| 0,109 | 0,301 | 0,423 | 4,256 | 0,044 | 0,010 | 0,069 | 0,161 | ostatak |

Debljina ploča za zavarivanje iznosila je 10 mm. Zavarivanje je izvedeno netaljivom volframovom elektrodom TIG (engl. *Tungsten Inert Gas*) postupkom pod zaštitom plina argona čistoće 99,9 %. S obzirom da je lim debljine veće od 6mm, provedeno je predgrijavanje uzorka na 150 °C. Zavarivanje je izvedeno u vodoravnom položaju (PA) pri čemu se kao dodatni materijal koristila žica oznake ESAB_OK Autorod 5183. Kemijski sastav dodatne žica prikazan je u tablici 6.

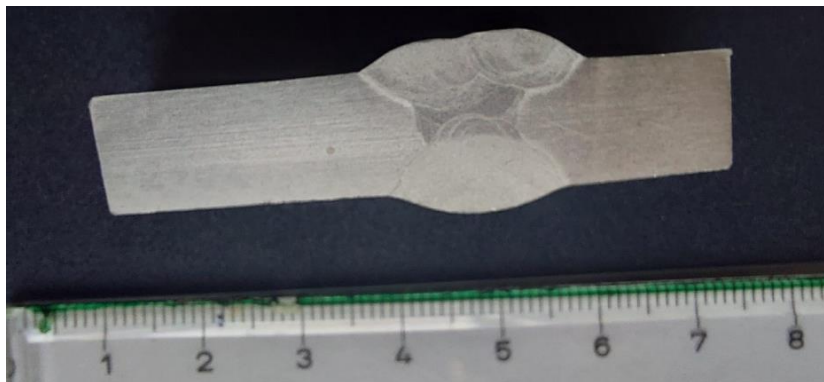
Tablica 6. Kemijski sastav dodatnog materijala za zavarivanje

| Maseni udio elemenata, % | | | | | | | | | |
|--------------------------|------|------|-----|--------|------|------|-------|----------|---------|
| Si | Fe | Mn | Mg | Cu | Ti | Cr | Zn | Be | Al |
| 0,06 | 0,09 | 0,55 | 4,7 | < 0,01 | 0,01 | 0,06 | <0,01 | < 0,0001 | ostatak |

Priprema spoja prikazana je na slici 23, a redoslijed zavarivanja svih šest prolaza vidi se naslici 24. Uzorak je prije zavarivanja izbrušen i očišćen acetonom zbog odmaščivanja i uklanjanja neželjenih spojeva na površini materijala.

**Slika 23. Detalj pripreme zavara – „V“ spoj****Slika 24. Shematski prikaz redoslijeda zavarivanja**

Na slici 25 prikazan je poprečni presjek zavarenog spoja s jasno vidljivim metalom zavara i pojedinim prolazima.



Slika 25. Poprečni presjek zavarenog spoja

4.3 Analiza kemijskog sastava osnovnog materijala

Kemijski sastav materijala ploča analiziran je u Laboratoriju za analizu metala na Zavodu za materijale Fakulteta strojarstva i brodogradnje, na uređaju spektrometar LECO GDS 850A koji radi na principu optičke emisijske spektroskopije s tinjajućim izbojem, slika 26.

U tablici 7 prikazani su dobiveni rezultati koji se ne razlikuju značajno od zajamčenog kemijskog sastava.



Slika 26. Prikaz spektrometra LECO GDS 850A za ispitivanje kemijskog sastava uzorka

Tablica 7. Rezultati analize kemijskog sastava osnovnog materijala

| Maseni udio elemenata, % | | | | | | | | |
|--------------------------|-------|-------|-------|-------|------|-------|------|---------|
| Si | Fe | Mn | Mg | Cu | Ti | Cr | Zn | Al |
| 0,105 | 0,304 | 0,423 | 4,251 | 0,040 | 0,01 | 0,067 | 0,14 | ostatak |

4.4 Analiza makrostrukture zavarenog spoja

Analiza makrostrukture provodi se golim okom ili uz pomoć povećala (do 24×). Površina uzorka je intenzivno nagrižena pri sobnoj temperaturi određeno vrijeme prema normi ISO/TR 16060:2003. Sredstvo za nagrizanje bila je otopina sljedećeg sastava:

- HCl 300 mL
- HF 50 mL
- H₂O 350 mL.
- HNO₃ 50 mL

Makronagriženi zavareni spoj prikazan je na slici 27. Jasno se vide pojedini prolazi i geometrija zavara. Vizualnim pregledom nisu uočene nikakve nepravilnosti.



Slika 27. Uzorak za vizualno ispitivanje

4.5 Analiza mikrostrukture zavarenog spoja

Priprema metalografskog uzorka i analiza mikrostrukture provedena je u Laboratoriju za materijalografiju na Zavodu za materijale Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu.

4.5.1 Priprema metalografskog uzorka

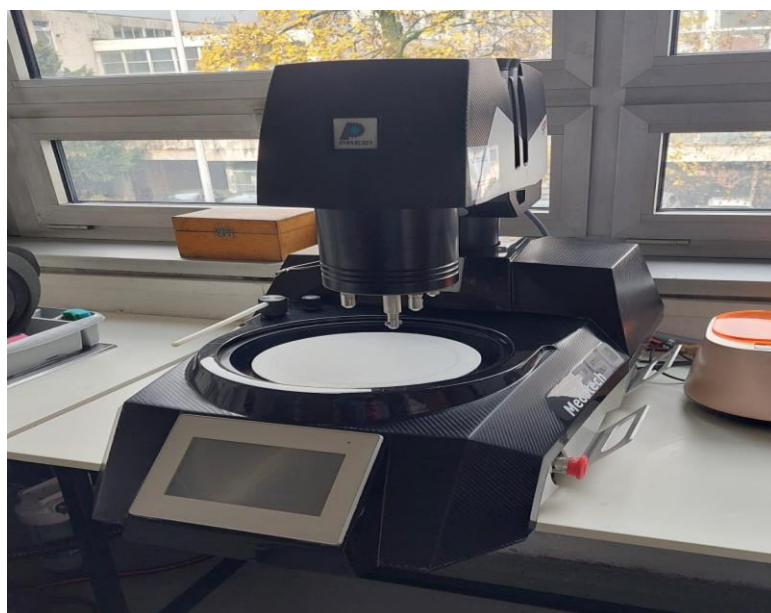
Uzorak za ispitivanje mikrostrukture izrezan je u području zavarenog spoja i zaliven u masu zbog lakšeg rukovanja tijekom ispitivanja. Na slici 28 prikazan je uređaj za rezanje uzoraka sa stalnim dotokom vode. Stalni dotok vode potreban je kako ne bi došlo do promjene mikrostrukture zbog povećanja temperature.

Nakon izrezivanja i zalijevanja u kalup, površina uzorka se brusi i polira na uređaju prikazanom na slici 29. Tijekom brušenja uzorak se hladi vodom koja ujedno služi za odnošenje abradiranih čestica s površine. Tijekom poliranja disk se okreće brzinom od 300 min⁻¹. Poliranje se izvodi

u dva koraka. Prvo se polira dijamantnom pastom veličine zrna 3 μm uz podmazivanje lubrikantom, a u drugom koraku za poliranje se koristi tekućina s abrazivnim česticama veličine od 0,03 μm .

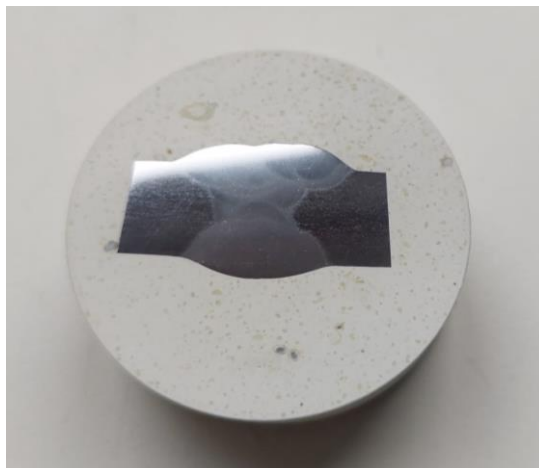


Slika 28. Uređaj za rezanje uzoraka



Slika 29. Uređaj za brušenje i poliranje uzoraka

Nakon poliranja uzorak je spreman za analizu mikrostrukture u poliranom stanju. Na slici 30 prikazan je metalografski uzorak sa ispoliranom površinom.



Slika 30. Metalografski uzorak zavarenog spoja nakon poliranja

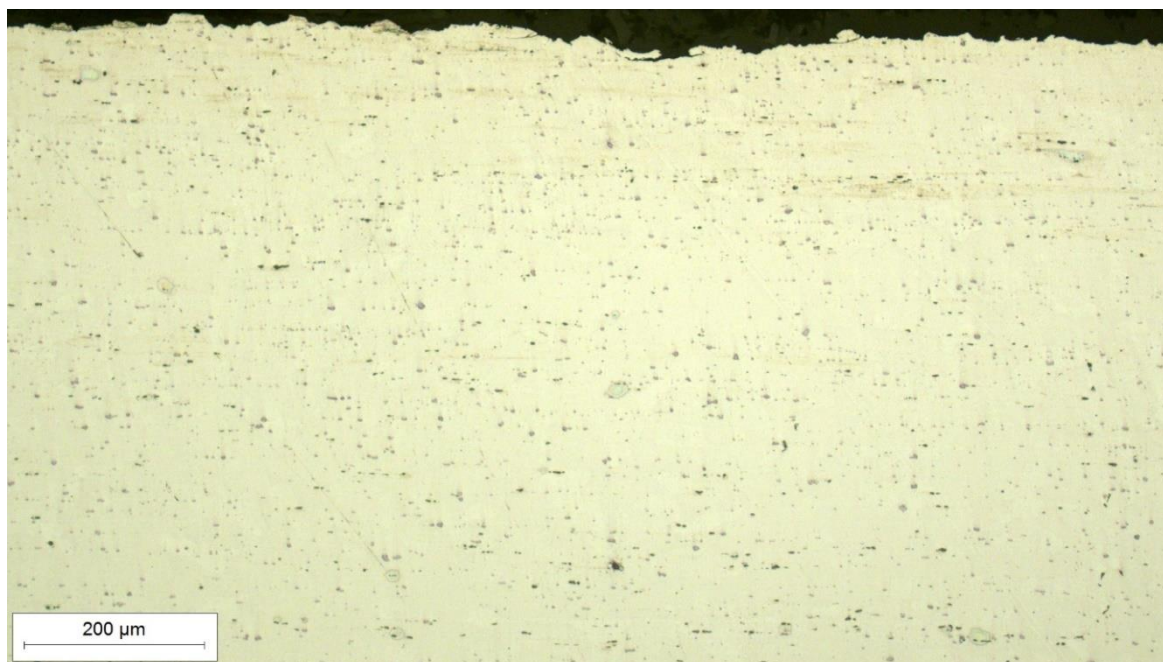
4.5.2 Analiza mikrostrukture zavarenog spoja u poliranom stanju

Analiza mikrostrukture zavarenog spoja legure EN AW-5083 provedena je na svjetlosnom mikroskopu Olympus GX51, prikazanom na slici 31. Polirana površina uzorka promatrana je pri povećanjima od 50 do 1000 \times . Ispitivanje je provedeno u metalu zavara, ZUT-u i osnovnom materijalu pri povećanjima od 100 \times i 500 \times .

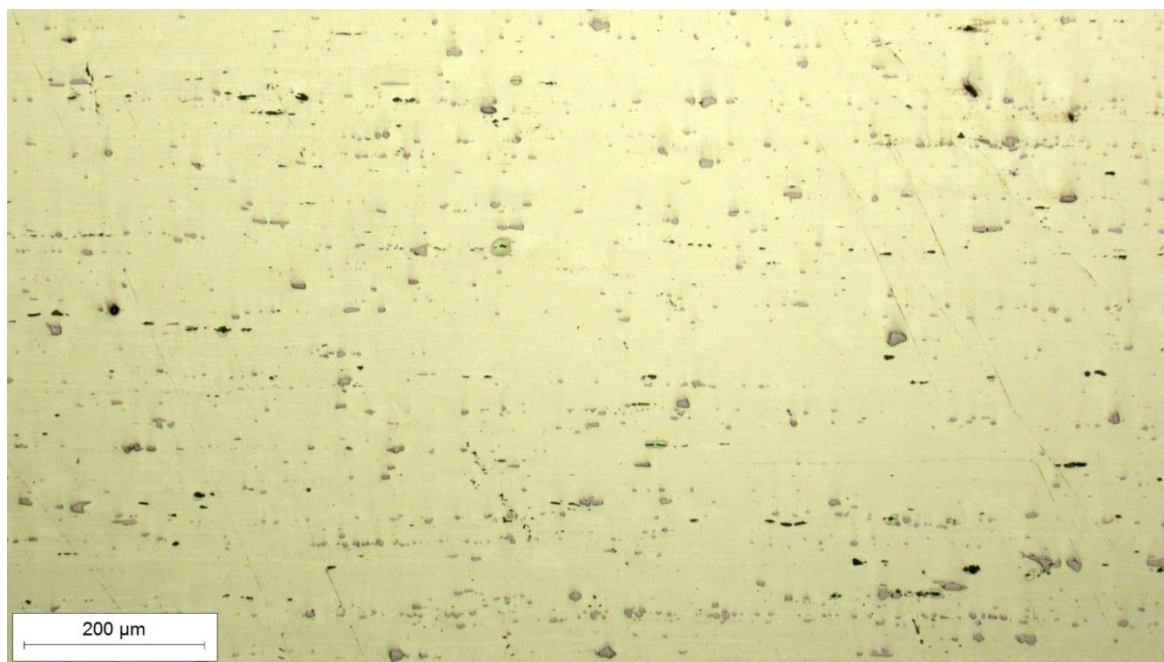


Slika 31. Svjetlosni mikroskop za analizu mikrostrukture

Na slici 32 i slici 33 prikazana je mikrostruktura osnovnog materijala u poliranom stanju uz rub i u sredini ploče. Fotografije su snimljene pri povećanju od 100×. Iako je površina uzorka u poliranom stanju, u mikrostrukтури se mogu uočiti sitne nakupine neotopljene faze. S obzirom na kemijski sastav legure, spomenute faze mogle bi biti spojevi bogati manganom i magnezijem (Mg_2Si). Između mikrostrukture ruba i sredine ploče nema velike razlike, nakupine neotopljene faze nešto su krupnije u sredini ploče.

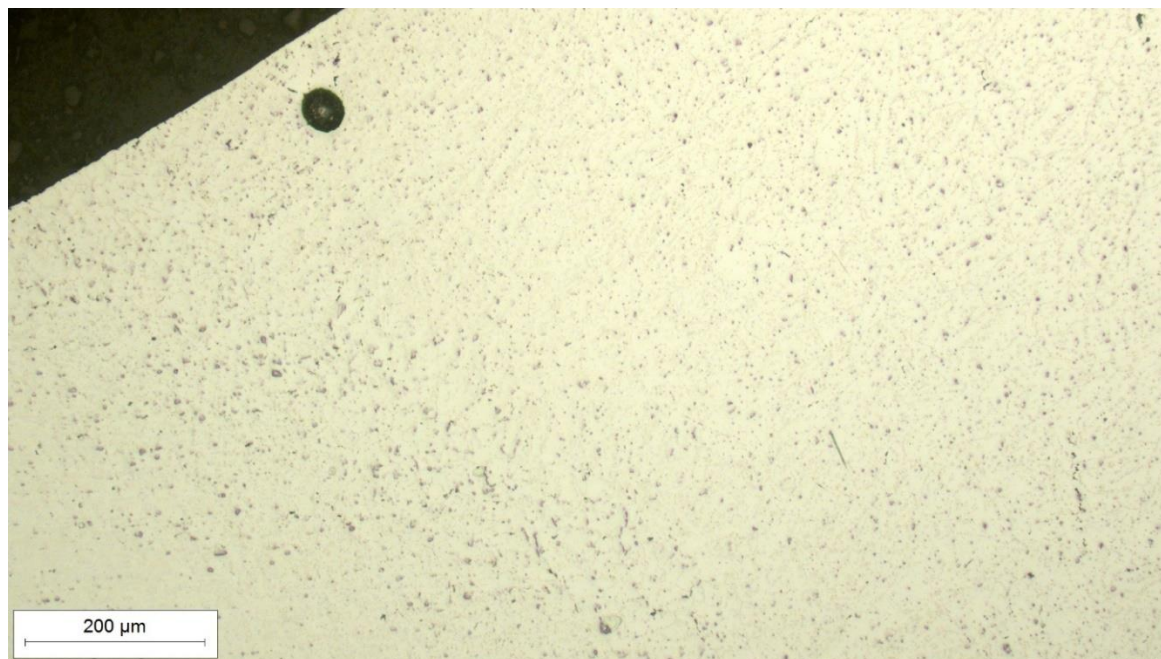


Slika 32. Mikrostruktura osnovnog materijala uz rub ploče u poliranom stanju, snimljena pri povećanju 100×



Slika 33. Mikrostruktura osnovnog materijala u sredini ploče u poliranom stanju, snimljena pri povećanju 100×

Na slici 34 i slici 35 prikazana je mikrostruktura metala zavara u poliranom stanju pri povećanju od 100×, u tjemenu i u sredini zavara. Mjestimice se mogu vidjeti sitne pore, a druge nepravilnosti se ne uočavaju.



Slika 34. Mikrostruktura u tjemenu metala zavara u poliranom stanju, snimljena pri povećanju od 100×



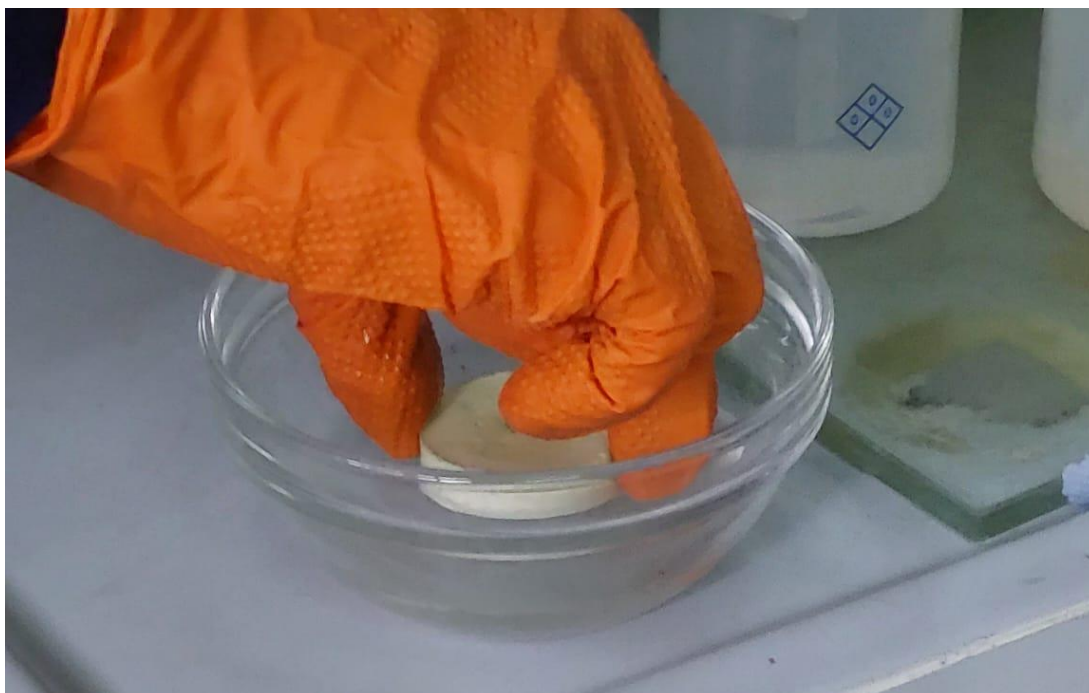
Slika 35. Mikrostruktura u sredini metala zavara u poliranom stanju, snimljena pri povećanju od 100×

4.5.3 Analiza mikrostrukture zavarenog spoja u nagrženom stanju

Kako bi se u potpunosti otkrila mikrostruktura zavarenog spoja, površinu uzorka potrebno je nagrži odgovarajućim sredstvom za nagržanje, slika 36. Sredstvo za nagržanje bila je otopina sljedećeg sastava:

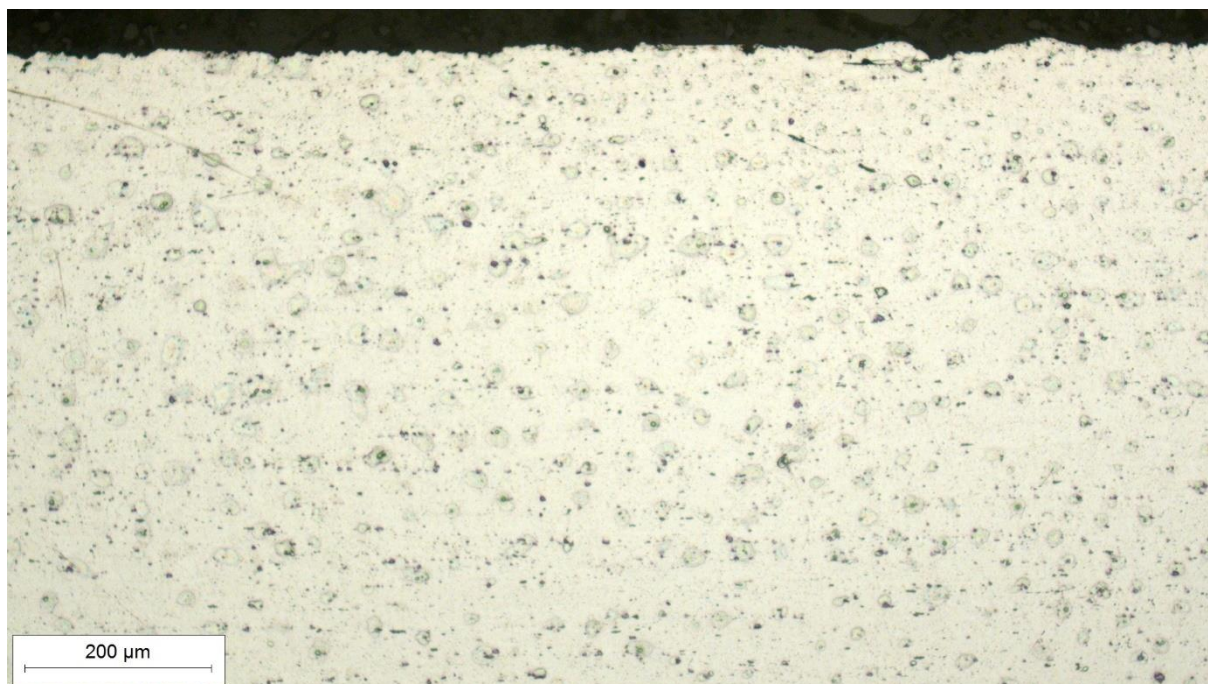
- HCl 15 mL
- HF 10 mL
- H₂O 85 mL.

Uzorak se drži određeno vrijeme u navedenoj otopini, a nakon toga se ispere u vodi kako bi se prekinula kemijska reakcija. Nakon sušenja uzorak je spreman za daljnju analizu.

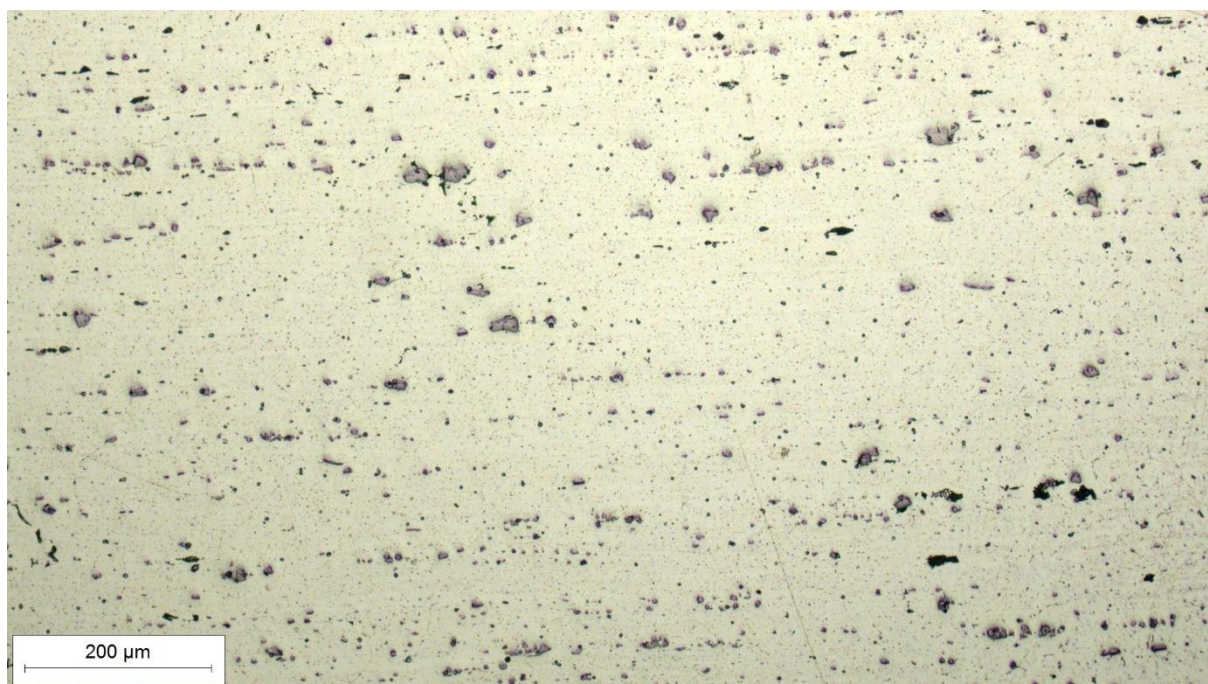


Slika 36. Nagrizanje materijala za analizu mikrostrukture

Na slici 37 i slici 38 prikazana je mikrostruktura osnovnog materijala u nagriženom stanju, uz rub i u sredini, snimljena pri povećanju $100\times$. S obzirom na kemijski sastav legure, mikrostruktura se sastoji od kristala mješanaca i intermetalnih spojeva. Primijenjeno sredstvo za nagrizanje nije nagrizlo granice zrna, ni površinu kristala mješanaca (svijetlo siva površina). U odnosu na polirano stanje, nakupine neotopljenih faza intermetalnih spojeva jasnije su izražene (tamno siva i crna površina). Navedene nakupine krupnije su u sredini ploče nego uz rub.

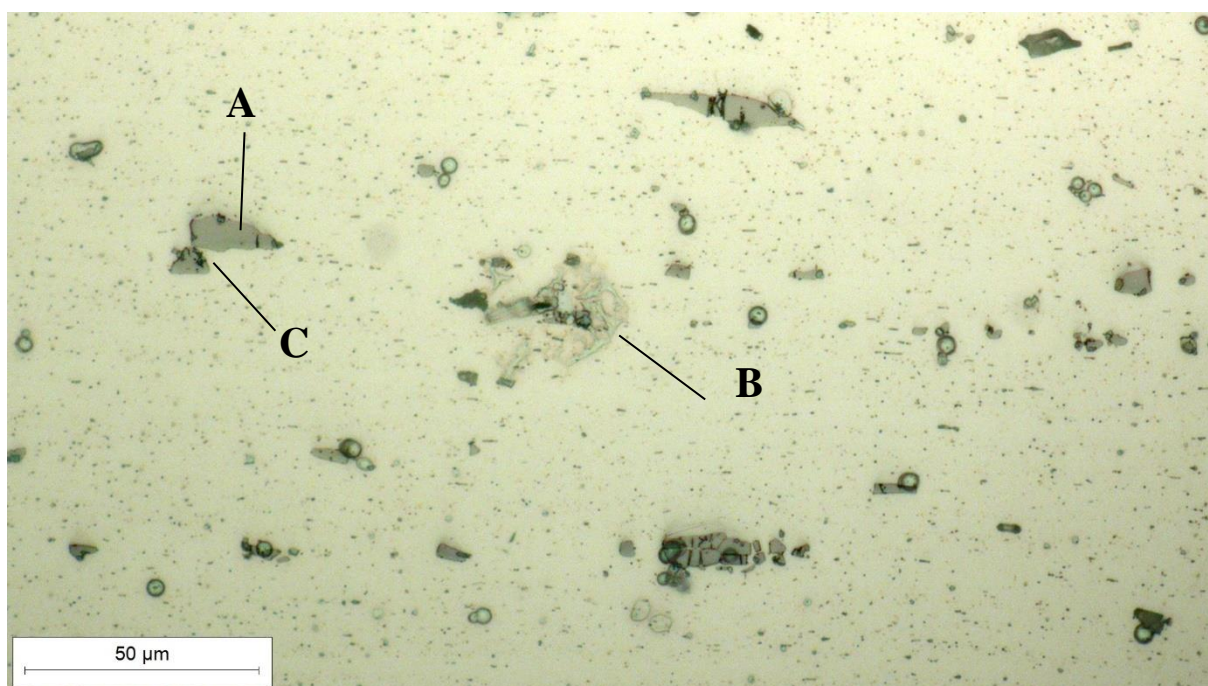


Slika 37. Mikrostruktura osnovnog materijala uz rub ploče snimljena pri povećanju 100×



Slika 38. Mikrostruktura osnovnog materijala u sredini ploče u snimljena pri povećanju 100×

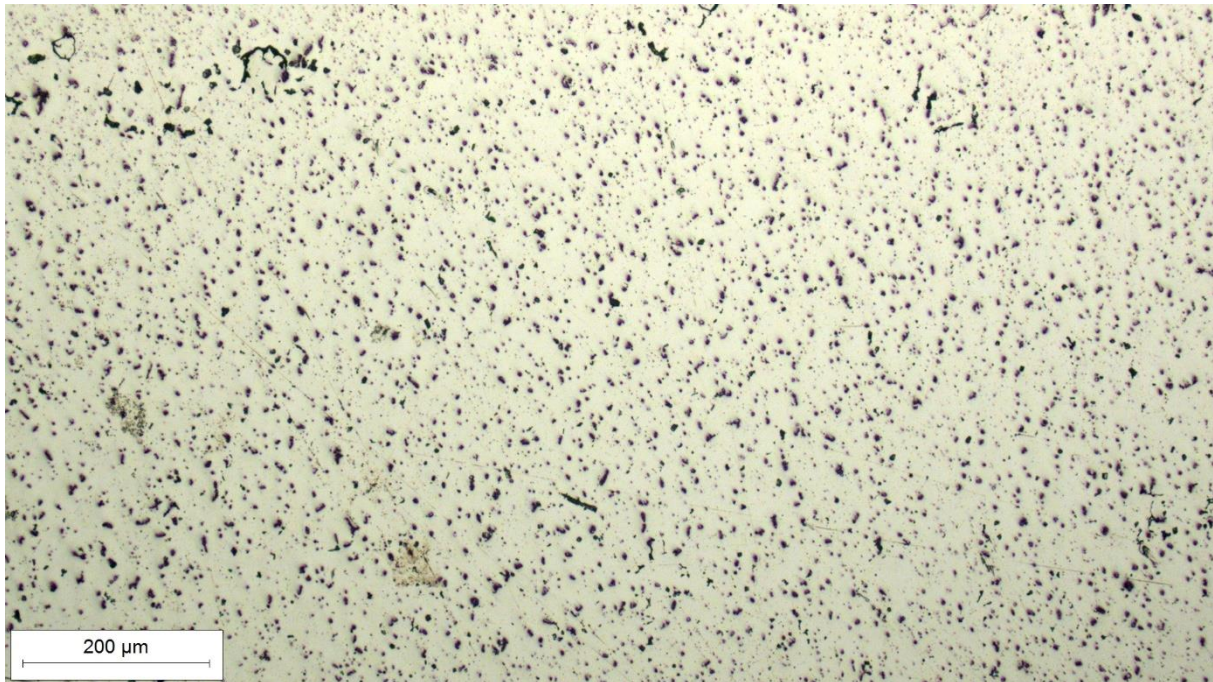
Na slici 39 prikazana je mikrostruktura osnovnog materijala snimljena pri povećanju 500×. Jasnije se mogu vidjeti formacije neotopljenih spojeva. Slovom A označeni su spojevi $(\text{Fe,Mn})_3\text{SiAl}_{12}$, a slovom B kompleksna intermetalna faza poznata pod nazivom „Kinesko pismo“. Slovom C označene su pukotine uz krupnije netopljive faze nastale tijekom hladnog oblikovanja. Po cijeloj promatranoj površini mogu se uočiti fino dispergirane tamno sive čestice precipitata Mg_2Si .



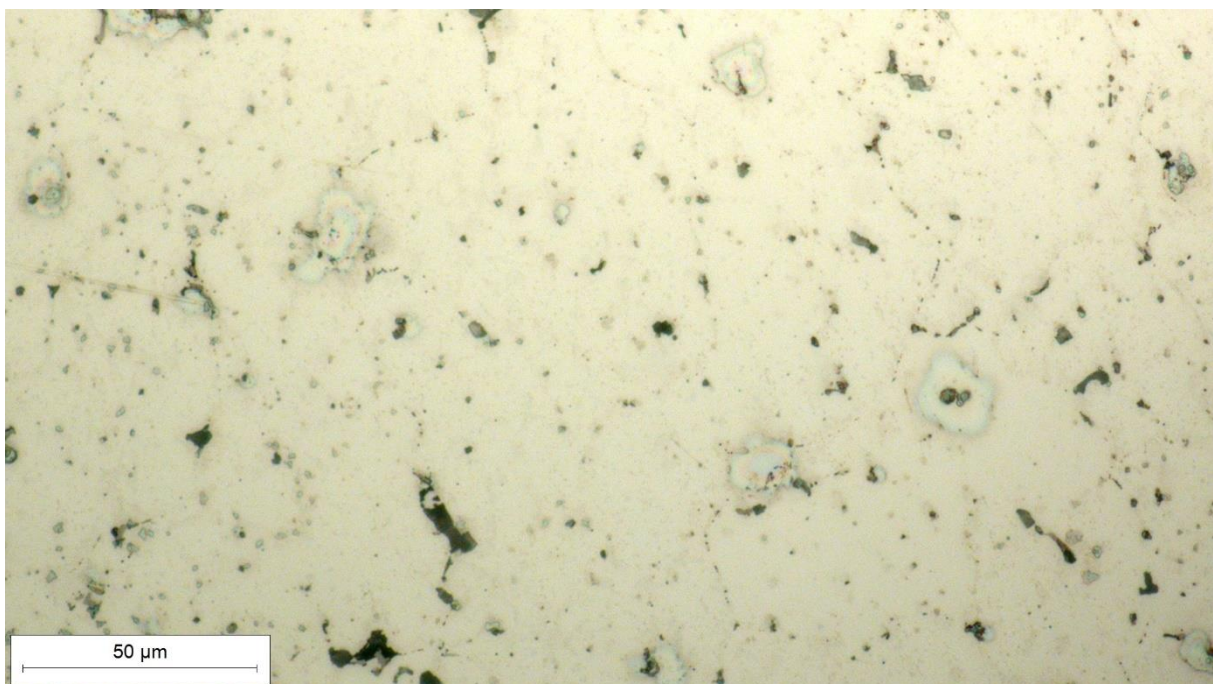
Slika 39. Mikrostruktura osnovnog materijala, snimljena pri povećanju 500×

Na slici 40 prikazana je mikrostruktura sredine metala zavara u nagriženom stanju, snimljena pri povećanju 100×. Na slici 41 i slici 42 prikazane su mikrostrukture u tjemenu i korijenu metala zavara, snimljene pri povećanju 500×.

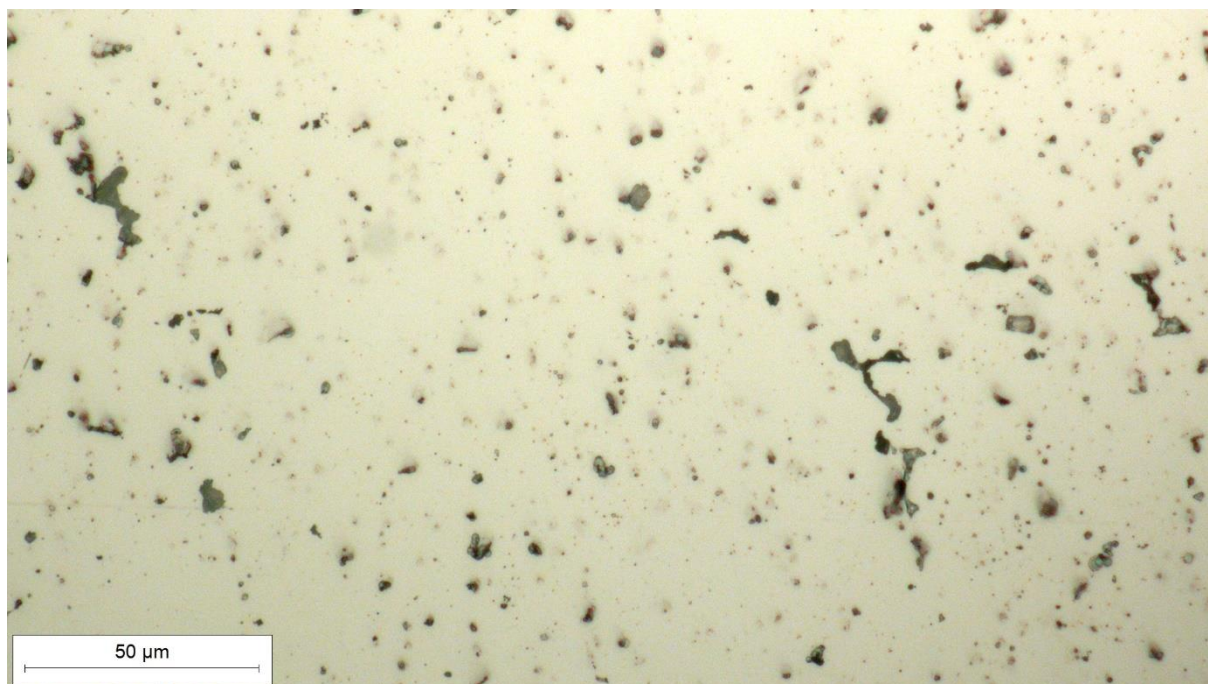
Na svim slikama može se vidjeti tipična ljevačka dendritna mikrostruktura. Ni u jednom području nisu uočene nikakve nepravilnosti. I ovdje se vide izlučeni intermetalni spojevi. Njihove formacije malo su drugačije nego u gnječenom osnovnom materijalu.



Slika 40. Mikrostruktura metala zavara u sredini, snimljena pri povećanju od 100×



Slika 41. Mikrostruktura metala zavara u tjemenu, snimljena pri povećanju od 500×

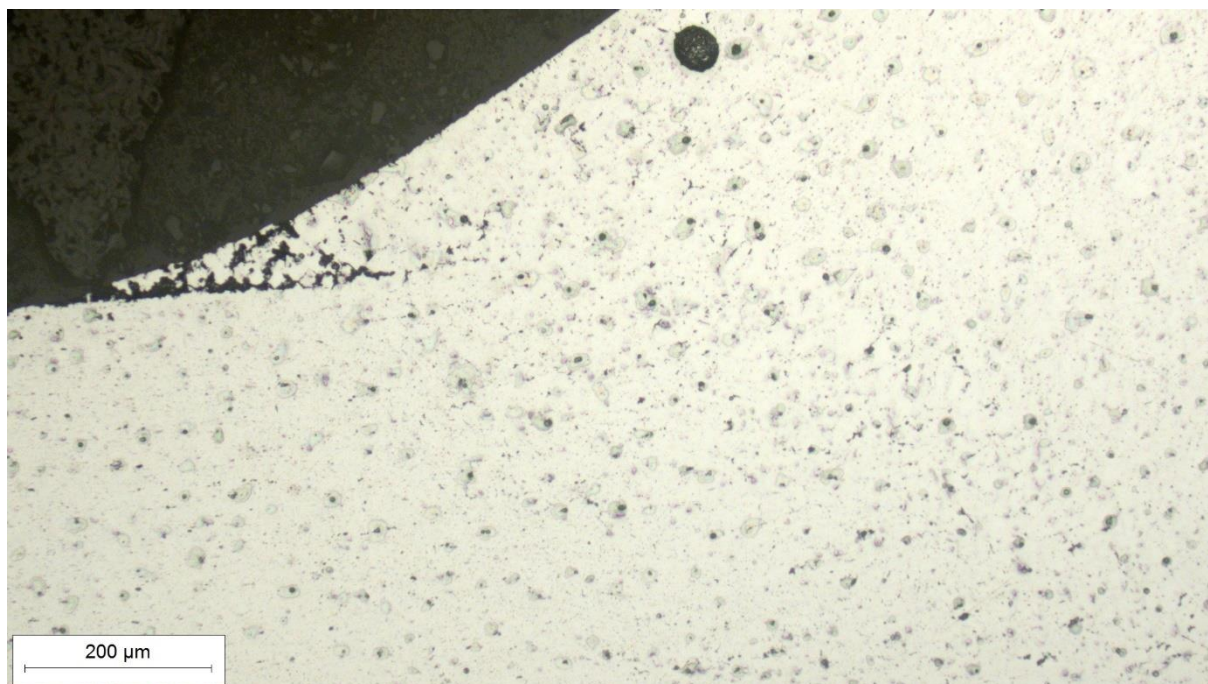


Slika 42. Mikrostruktura metala zavara u korijenu, snimljena pri povećanju od 500×

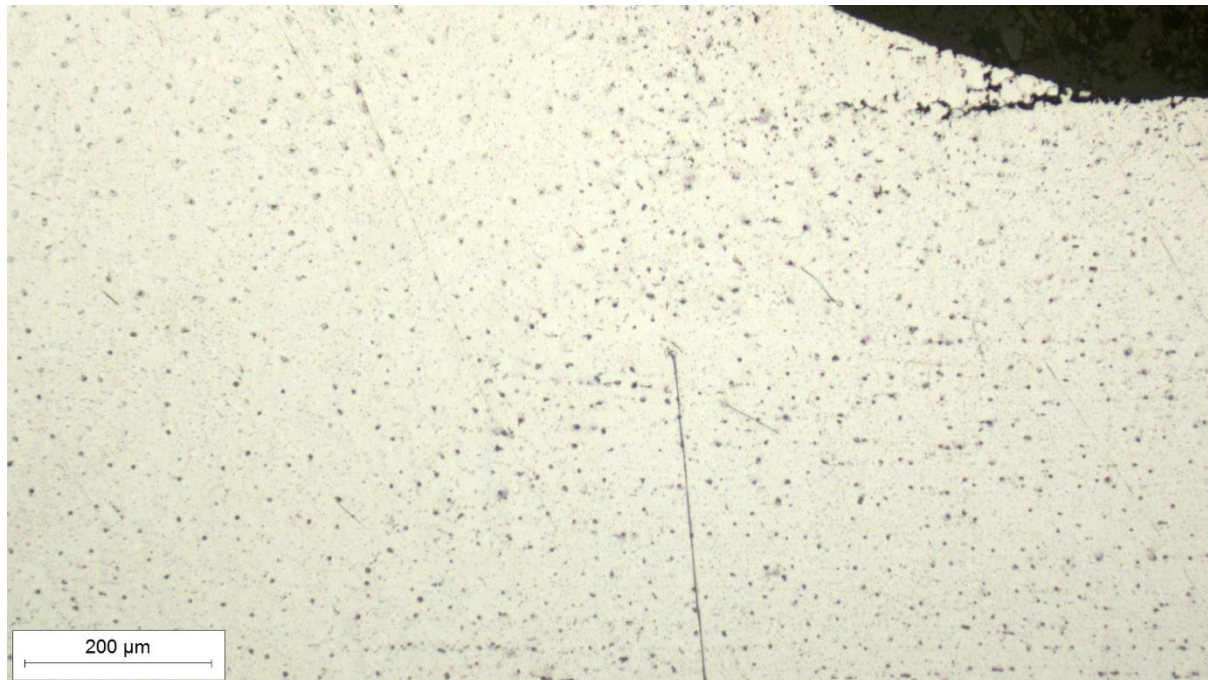
Na slici 43 prikazana je mikrostruktura u zoni utjecaja topline (ZUT) u tjemenu zavarenog spoja s lijeve strane, u nagriženom stanju snimljena pri povećanju od 100×. Linija staljivanja nije izražena i teško se može procijeniti širina zone utjecaja topline. Ne vide se pojedinačna zrna kristala mješanca, a nakupine intermetalnih faza su nešto sitnije u metalu zavara nego u osnovnom materijalu. Slična mikrostruktura uočava se u ZUT-u tjemena zavara s desne strane, slika 44.

Na slici 45 prikazana je mikrostruktura zone utjecaja topline u sredini zavarenog spoja s lijeve strane, a na slici 46 s desne strane zavarenog spoja. S obje strane je vrlo slična mikrostruktura. Linija staljivanja nije izražena, a širina ZUT-a ne može se jasno odrediti. Nakupine intermetalnih faza u metalu zavara puno su sitnije i gušće raspoređene u odnosu na osnovni materijal.

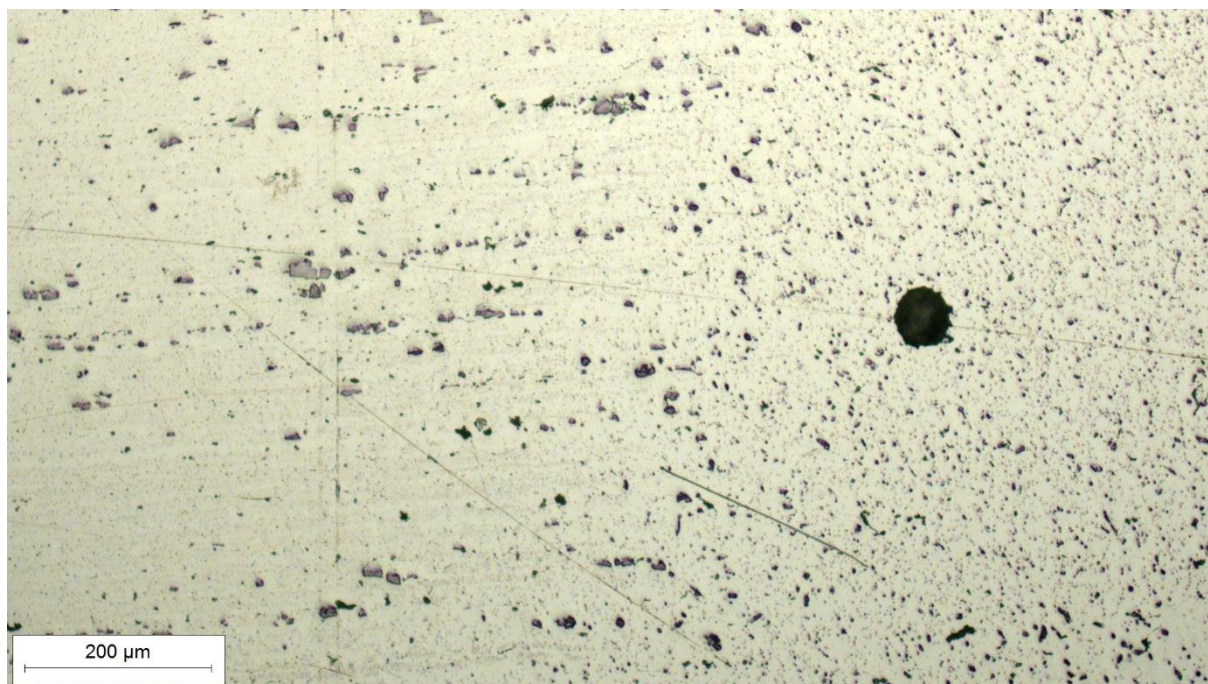
Na slici 47 prikazana je mikrostruktura zone utjecaja topline u korijenu zavarenog spoja s lijeve strane, a na slici 48 s desne strane zavarenog spoja. I ovdje je mikrostruktura slična s obje strane zavarenog spoja. Linija staljivanja nije izražena, kao ni zona utjecaja topline. Nakupine intermetalnih spojeva sitnije su i gušće u metalu zavara nego u osnovnom materijalu.



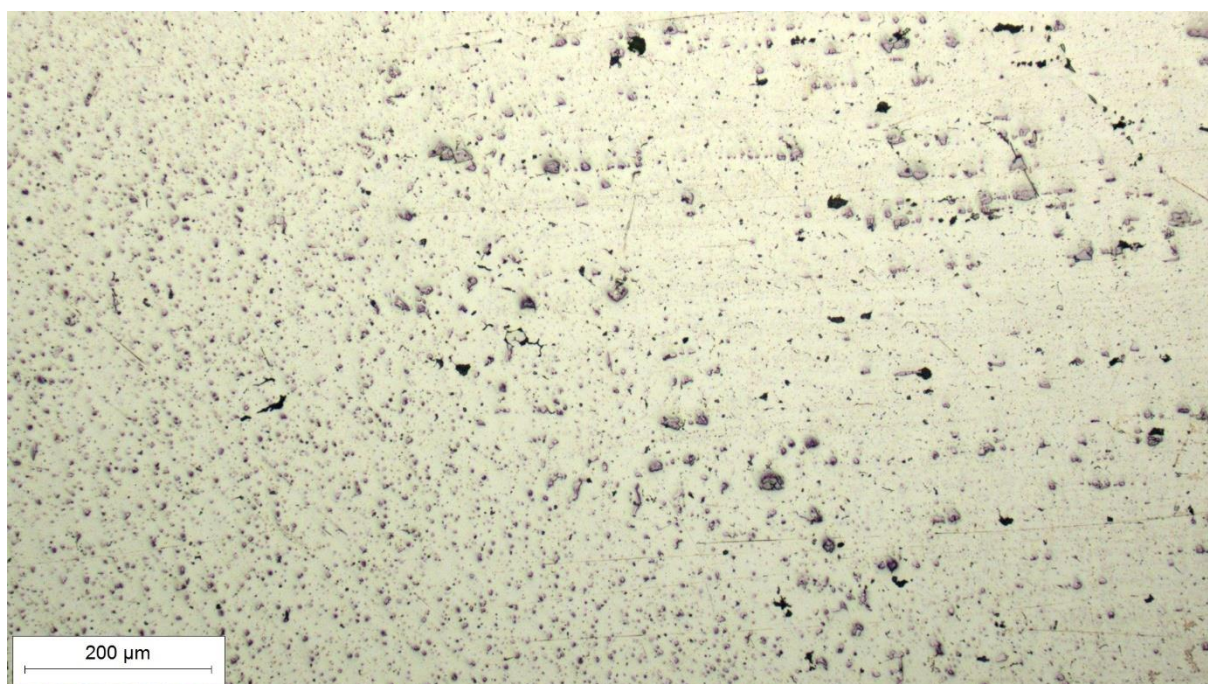
Slika 43. Mikrostruktura ZUT-a u tjemenu zavora s lijeve strane, snimljena pri povećanju 100×



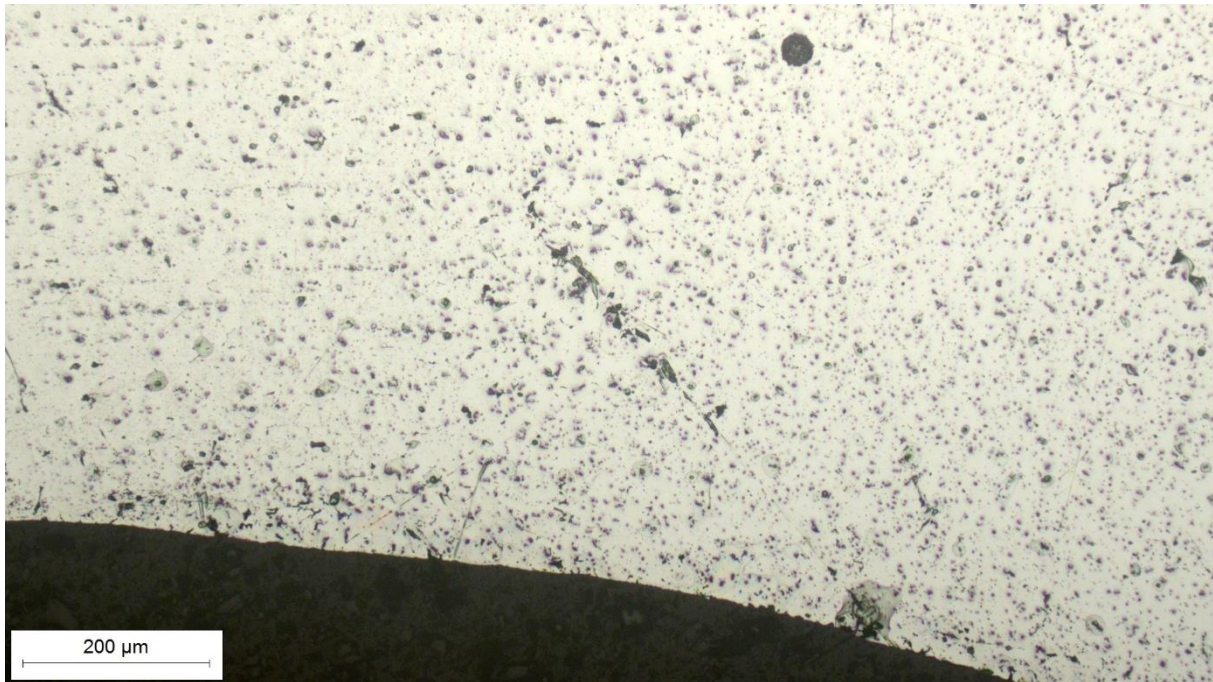
Slika 44. Mikrostruktura ZUT-a u tjemenu zavarenog spoja s desne strane, snimljena pri povećanju od 100×



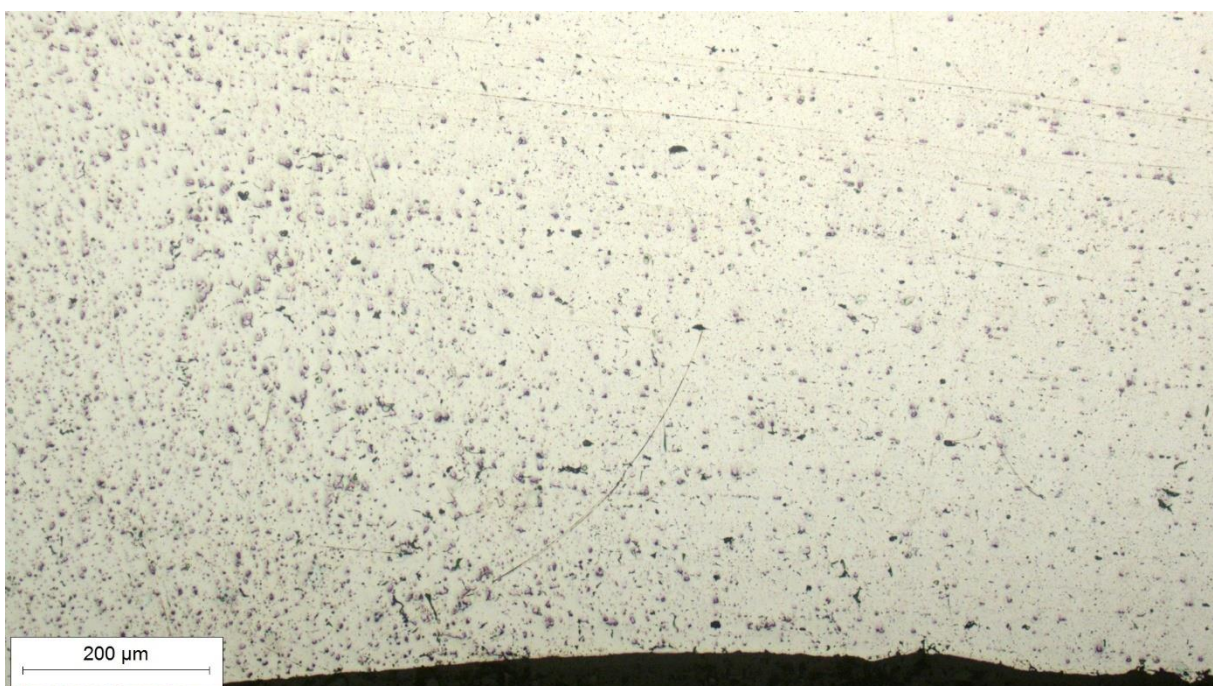
Slika 45. Mikrostruktura ZUT-a u sredini zavarenog spoja s lijeve strane, snimljena pri povećanju od 100×



Slika 46. Mikrostruktura ZUT-a u sredini zavarenog spoja s desne strane, snimljena pri povećanju od 100×



Slika 47. Mikrostruktura ZUT-a u korijenu zavarenog spoja s lijeve strane, snimljena pri povećanju od 100×



Slika 48. Mikrostruktura ZUT-a u korijenu zavarenog spoja s desne strane, snimljena pri povećanju od 100×

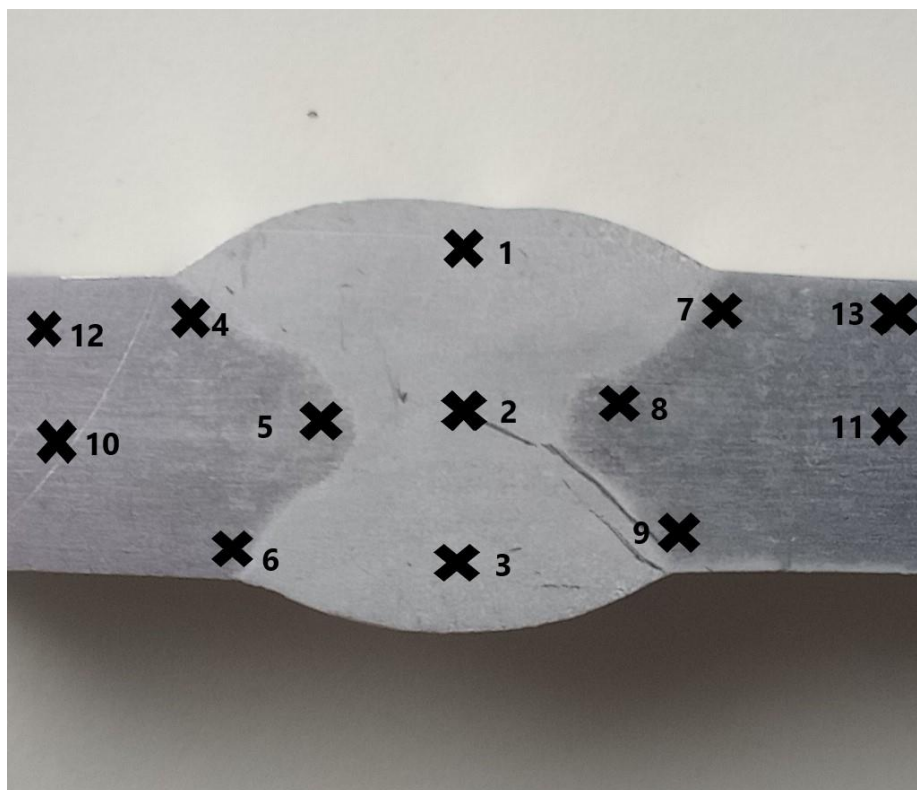
4.6 Ispitivanje mikrotvrdoće

Ispitivanje mikrotvrdoće HV0,2 provedeno je Vickersovom metodom u Laboratoriju za materijalografiju na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. Tvrdomjer kojim je provedeno ispitivanje prikazan je na slici 49.



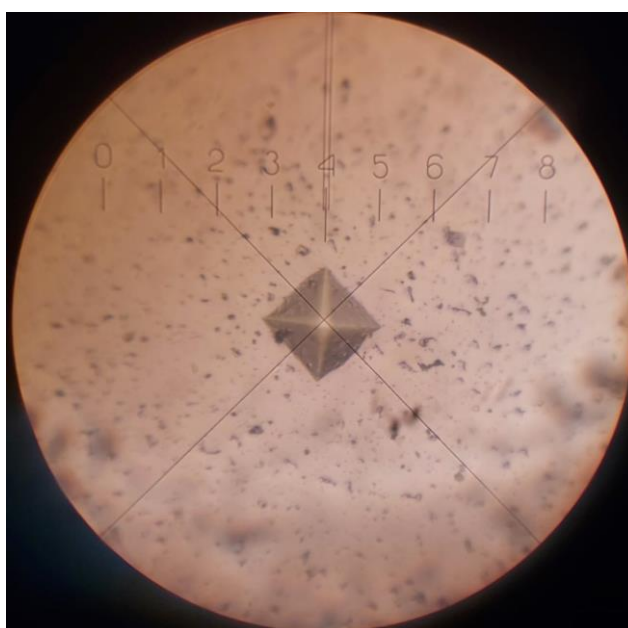
Slika 49. Uređaj za mjerenje mikrotvrdoće

Sila pritiska iznosila je 1,962 N, a ostvarivala se pomoću utega mase 200 g. Vrijeme pritiska iznosilo je 15 sekundi. Ukupno je provedeno 41 mjerenje, a mjesta ispitivanja označena su na slici ispitnog uzorka. Za svaku mjerenu lokaciju označenu brojem na slici 50 provedena su po tri mjerenja, osim na točkama 10 i 11 gdje su napravljena četiri otiska. Nakon provedenih mjerenja izračunata je srednja vrijednost mikrotvrdoće.



Slika 50. Pozicije mjerenja mikrotvrdoće na zavarenom spoju

Na slici 51 prikazan je izgled otiska koji se može vidjeti svjetlosnim mikroskopom nakon utiskivanja.



Slika 51. Izgled otiska nakon mjerenja mikrotvrdoće

Nakon utiskivanja dijamentnom piramidom izmjeri se razmak između krajnjih točaka otiska s lijeve i desne strane te se pomoću sljedeće formule izračuna stvarna vrijednost dijagonale otiska (d):

$$(D - L) \times 0,302 = d \quad (1)$$

Prema dobivenoj vrijednosti dijagonale očitava se vrijednost mikrotvrdoće HV0,2 iz tablica.

U tablici 8 prikazani su rezultati mjerenja mikrotvrdoće.

Tablica 8. Izmjerene vrijednosti mikrotvrdoće HV0,2

| | Osnovni materijal (lijevo) | ZUT (lijevo) | Metal zavara | ZUT (desno) | Osnovni materijal (desno) |
|---------|----------------------------|--------------|--------------|-------------|---------------------------|
| Tjeme | 66,5 | 81,1 | 72,7 | 72,6 | 71,9 |
| Sredina | 67,0 | 77,4 | 53,4 | 68,3 | 67,2 |
| Korijen | - | 78,2 | 80,4 | 72,4 | - |

Rezultati ispitivanja pokazali su da je najveća srednja mikrotvrdoća izmjerena u zoni utjecaja topline s lijeve strane u tjemenu zavara. Najniža mikrotvrdoća izmjerena je u sredini metala zavara (53,4 HV0,2). U tjemenu i korijenu metala zavara izmjerene su puno više mikrotvrdoće. Nema značajnije razlike u vrijednosti mikrotvrdoće u osnovnom materijalu između sredine i ruba poprečnog presjeka ploče.

Najniža tvrdoća u sredini metala zavara vjerojatno je posljedica redoslijeda zavarivanja koji je omogućio da se središnji dio metala zavara maksimalno odžari.

4.7 Ispitivanje vlačne čvrstoće

Ispitivanje vlačne čvrstoće provedeno je u Zavodu za zavarivanje, ispitivanje i tehnologiju d.o.o. u Zagrebu. Ispitane su tri epruvete. Dvije su izrezane iz zavarenog spoja legure aluminija EN AW-5083, dok je jedna epruveta izrezana iz osnovnog materijala. Ispitivanje je provedeno na univerzalnoj kidalici 30 TUZ 757 proizvođača Otto Wolpert Werke GmbH, prikazanoj na slici 52.



Slika 52. Kidalica 30 TUZ 757 za mjerenje vlačne čvrstoće

Prije samog ispitivanja izmjerena je poprečni presjek uzoraka. Mjerila se sila pri kojoj je došlo do puknuća epruvete. Izmjerenu silu podijeljena je s površinom poprečnog presjeka kako bi dobili iznos vlačne čvrstoće. Na slici 53 prikazani su ispitni uzorci nakon mjerenja vlačne čvrstoće.



Slika 53. Uzorci nakon ispitivanja vlačne čvrstoće

U tablici 9 prikazani su rezultati statičkog vlačnog ispitivanja čvrstoće

Tablica 9. Dimenzije epruvete za ispitivanje i rezultati provedenog ispitivanja

| Oznaka epruvete | Dimenzije presjeka, mm × mm | Poprečna površina, mm ² | Maksimalna sila, N | Vlačna čvrstoća, MPa |
|-----------------------|-----------------------------|------------------------------------|--------------------|----------------------|
| Č-1(sa zavarom) | 25,01×9,81 | 245,35 | 70200 | 286 |
| Č-2(sa zavarom) | 25,04×9,93 | 248,65 | 71400 | 287 |
| OM(osnovni materijal) | - | - | - | 330 |

Rezultati su pokazali da je vlačna čvrstoća zavarenog spoja niža od čvrstoće osnovnog materijala. To je u skladu s očekivanjima zbog promjene mikrostrukture. U ovome slučaju, povećanje tvrdoće u zavarenom spoju u odnosu na osnovni materijal rezultiralo je smanjenom čvrstoćom. Mogući uzroci pada čvrstoće mogu biti povećani unos topline u zavar, ali i pogrubljenje zrna.

4.8 Savojno ispitivanje

Savojno ispitivanje u tri točke provedeno je na spomenutoj univerzalnoj kidalici 30 TUZ 757. Na slici 54 je prikazana kidalica i trn koji se utiskuje u materijal koji ispitujemo. Ispitana su četiri uzorka dimenzija 40×10. Na dvije epruvete vlačno je opterećen korijen zavora, a na dvije tjemem zavora. Oslonci su postavljeni na razmak od 65 mm, a promjer trna iznosio je 35 mm. Uzorci su savijani do kuta od 180 °. Kroz ovo ispitivanje nastoji se utvrditi otpornost područja zavarenog spoja na savijanje.



Slika 54. Izgled trna kojim se utiskuje pločica za savojno ispitivanje

Na slici 55 i slici 56 prikazani su uzorci zavora nakon provedenog savojnog ispitivanja. Na području zavarenog spoja nema vidljivih pukotina. Ukoliko bi postojale pukotine, one ne smiju biti veće od 3 mm kako bi se zavareni spoj smatrao ispravnim. Može se vidjeti da na spoju zavora nema jasno vidljivog oštećenja te se time zavar smatra ispravnim.



Slika 55. Prikaz zavarenog spoja nakon savijanja



Slika 56. Poprečni presjek zavarenog spoja nakon savijanja

5. ZAKLJUČAK

Na temelju ispitivanja provedenih na zavarenom spoju dviju ploča aluminijske legure oznake EN AW-5083 i pritom dobivenih rezultata te njihove analize, može se zaključiti sljedeće:

- Analiza kemijskog sastava osnovnog materijala pokazala je da se udio svih analiziranih elemenata nalazi u granicama koje jamči proizvođač i koje su uobičajene za ovu leguru.
- Analiza makrostrukture pokazala je urednu geometriju zavarenog spoja i pojedinih prolaza pri zavarivanju. Nisu uočene nikakve nepravilnosti na makroskopskoj razini.
- Pri analizi mikrostrukture u poliranom stanju uočeno je nekoliko relativno sitnih pora u metalu zavara, što je u granicama dopuštenog pri zavarivanju Al-legura. Već u poliranom stanju mogu se uočiti različite faze u mikrostrukturi osnovnog materijala i metala zavara.
- Analiza mikrostrukture u nagriženom stanju otkrila je mikrostrukturu osnovnog materijala koja se sastoji od Al - kristala mješanaca i različitih netopljivih intermetalnih spojeva. Prema sastavu legure i obliku nakupina razlikuju se tri vrste intermetalnih spojeva: krupnije čestice sastava $(Fe,Mn)_3SiAl_{12}$, spojevi karakterističnog oblika poznati pod nazivom „Kinesko pismo“ te fino dispergirane tamno sive čestice precipitata Mg_2Si .
- Metal zavara ima tipičnu ljevačku mikrostrukturu bez uočenih nepravilnosti. U odnosu na osnovni materijal, nakupine netopljivih intermetalnih spojeva su sitnije, gušće i ravnomjernije raspoređene. Zona utjecaja topline nije jasno razlučiva, a linija staljiva nije izražena.
- Mikrotvrdoća $HV_{0,2}$ u zoni utjecaja topline i metalu zavara viša je za oko 20 % od tvrdoće osnovnog materijala, što je u granicama dopuštenog. Najniža tvrdoća izmjerena je u sredini metala zavara (53,4 $HV_{0,2}$), vjerojatno zbog najvećeg stupnja odžarivanja tijekom polaganja slojeva zavara.
- Vlačna čvrstoća osnovnog materijala iznosila je 330 MPa, a zavarenog spoja 285 MPa. Dobivene vrijednosti su u granicama dopuštenog.
- Pri savojnom ispitivanju, koje se provodilo do kuta od 180° , nisu se pojavile nikakve pukotine pa se može zaključiti da je zavar kvalitetno izveden i da zavareni spoj ima zadovoljavajuća svojstva.

6. LITERATURA

- [1] Gungor B, Kaluc E, Taban E. Mechanical, fatigue and microstructural properties of friction stir welded 5083-H111 and 6082-T651 aluminum alloys. 2014. doi: 10.1016/j.matdes.2013.10.090
- [2] Filetin T, Kovačiček F, Indof J. Svojstva i primjena materijala. Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2013.
- [3] Duplančić I, Krnić N. Materijali 3. FESB, Split, 2011.
- [4] Dokšanović T, Džeba I, Markulak D. Applications of aluminium alloys in civil engineering. 2017. doi: 10.17559/tv-20151213105944
- [5] Advantages of Aluminum Foils Packaging [Internet]. (pristupljeno: 07.01.2023.). Dostupno na: <https://www.emalufoil.com/news/advantages-of-aluminum-foils-packaging.html>
- [6] Ćorić D, Filetin T. Materijali u zrakoplovstvu. Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2010.
- [7] Layman T, Boyer H. E, Carnes W, Unterweiser P. Atlas od Microstructures pf Industrial Alloys. American society for metals. Ohio, 1972.
- [8] Everything You Need to Know About Cast Aluminum [Internet]. (pristupljeno: 10.01.2023.). Dostupno na: <https://www.investmentcastchina.com/cast-aluminum/>
- [9] Smith W. F. Principles of materials science and engineering. McGraw-Hill Publishing Company, 1990.
- [10] Gojić M. Tehnike spajanja i razdvajanja materijala. Metalurški fakultet, Sisak, 2008.
- [11] How to TIG weld aluminum – The Welder [Internet]. (pristupljeno: 02.01.2023.). Dostupno na: <https://www.thefabricator.com/thewelder/article/arcwelding/how-to-tig-weld-aluminum>
- [12] Marine grade aluminum sheet: 5083-H111 VS 5083-H321 [Internet]. (pristupljeno: 05.01.2023.). Dostupno na: <https://www.marinealu.com/a/marine-grade-aluminum-sheet-5083-h111-vs-5083-h321.html>
- [13] Porosity and the mechanical properties of aluminum welds [Internet]. (pristupljeno: 07.01.2023.). Dostupno na: <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/faq-what-is-the-influence-of-porosity-on-the-mechanical-properties-of-aluminium-welds>

- [14] How to avoid cracking in aluminum alloys [Internet]. (pristupljeno: 09.01.2023.). Dostupno na: <http://www.alcotec.com/us/en/education/knowledge/qa/How-to-Avoid-Cracking-in-Aluminum-Alloys.cfm>
- [15] Preheating of titanium and aluminum alloys [Internet]. (pristupljeno: 04.01.2023.). Dostupno na: <https://ultraflexpower.com/induction-heating-applications/materials-research-and-testing/preheating-of-titanium-aluminum-alloys/>
- [16] Sinanović A. Primjena keramičkih podloga kod MIG zavarivanja aluminija [Internet]. 2016. Dostupno na: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:790543>
- [17] Guo Y, Pan H, Ren L, Quan G. An investigation on plasma-MIG hybrid welding of 5083 aluminum alloy. 2018. doi: 10.1007/s00170-018-2206-4
- [18] Elektrolučno zavarivanje netačljivom elektrodom u zaštitnoj atmosferi inertnog plina (TIG ili WIG ili GTAW) [Internet]. (pristupljeno: 10.01.2023.). Dostupno na: <https://tsi.webador.com/tois-2-1-2-tig-postupak>
- [19] Li Y, Zou W, Lee B, Babkin A, Chang Y. Research progress of aluminum alloy welding technology. 2020. doi: 10.1007/s00170-020-05606-1
- [20] Mechanical tables – wrought aluminum and aluminum alloy designation system [Internet]. (pristupljeno: 15.01.2023.) Dostupno na: <https://harshparmar.wordpress.com/2013/04/02/mechanical-tables-wrought-aluminum-and-aluminum-alloy-designation-system/>