

Karakterizacija mikrostrukture zavara aluminijskih legura 5083 i 6082 zavarenih postupkom AC MIG

Dupko, Domagoj

Master's thesis / Diplomski rad

2024

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:744416>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-20**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Domagoj Dupko

Zagreb, 2024.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentori:

Prof. dr. sc. Darko Landek, dipl. ing.

Student:

Domagoj Dupko

Zagreb, 2024.

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

Zahvaljujem se mentoru prof. dr. sc. Darku Landeku na pruženoj pomoći, savjetima, uputama prilikom izrade ovog rada, stručnim pristupom i velikom strpljenju tijekom pisanja diplomskog rada.

Zahvaljujem se svojim roditeljima na strpljenu i bezuvjetnoj ljubavi i potpori. Hvala!

Zahvaljujem se posebno svojim „Ojte pastirima“ na pruženoj ogromnoj podršci i motivaciji za pisanje diplomskog rada. Leo, Kiki, Zambul, Sila, Tetka, Jaro, Janki, hvala!

Zahvaljujem i svojoj drugoj ekipi s kvarta, Buba Baliću, Snajpu, Hreneccu i Bljeksu. Samo mogu reći nevjerojatni ste.

Zadnji ali ne i najmanje važan, Mateju Antoniu Bajiću, hvala ti za sve. Napisao bi više, ali me ovo predefinirano ograničava.

Domagoj Dupko



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite

Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:

Proizvodno inženjerstvo, inženjerstvo materijala, industrijsko inženjerstvo i menadžment,
mehatronika i robotika, autonomni sustavi i računalna inteligencija



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

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Domagoj Dupko** JMBAG: 0082057990

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Karakterizacija mikrostrukture zavara aluminijskih legura 5083 i 6082 zavarenih postupkom AC MIG**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Characterization of the weld microstructure of aluminum alloys 5083 and 6082 welded by the AC MIG process**

Opis zadatka:

Zavarivanje aluminija i njegovih legura impulsno promjenljivom izmjeničnom strujom postupkom AC-MIG-P daje niz prednosti u odnosu na zavarivanje MIG postupkom s istosmjernom strujom, od kojih se ističu bolja kvaliteta zavara i manji unos topline za istu debljinu zavara. U teorijskom dijelu rada treba usporediti karakteristike MIG postupka s izmjeničnom i istosmjernom strujom te opisati toplinske, mehaničke i mikrostrukturne pojave u zavarima aluminijskih legura iz serije 5XXX i 6XXX.

U eksperimentalnom dijelu rada treba provesti ispitivanje mikrotvrdoće i karakterizaciju mikrostrukture sučeljenog i kutnog zavara na uzorcima od aluminijskih legura EN AW 5083-H321 i EN AW 6082-T6 zavarenih postupkom AC-MIG-P te odrediti širinu zone utjecaja topline. Na temelju rezultata analize mikrostrukture preporučiti postupak pripreme zavarenog spoja i naknadnu toplinsku obradu zavara.

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

Zadatak zadan:

Datum predaje rada:

Predviđeni datumi obrane:

9. svibnja 2024.

11. srpnja 2024.

15. – 19. srpnja 2024.

Zadatak zadao:

Prof. dr. sc. Darko Landek

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Ivica Garašić

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA.....	IV
POPIS OZNAKA	V
SAŽETAK.....	VI
SUMMARY	VII
1. UVOD.....	1
2. TEHNIČKI ČISTI ALUMINIJ	2
3. ALUMINIJSKE LEGURE	8
3.1. Osnovna podjela aluminijskih legura.....	8
3.2. Legirni elementi	9
3.3. Označavanje aluminijskih legura	10
3.4. Toplinski neobradive legure.....	14
3.4.1. Nelegirani aluminiij (serija 1XXX)	14
3.4.2. Aluminijske legure s manganom (serija 3XXX).....	14
3.4.3. Aluminijske legure sa silicijem (serija 4XXX).....	15
3.4.4. Aluminijske legure s magnezijem (serija 5XXX).....	15
3.5. Toplinski obradive legure	17
3.5.1. Aluminijske legure s bakrom (serija 2XXX)	17
3.5.2. Aluminijske legure s magnezijem i silicijem (serija 6XXX)	18
3.5.3. Aluminijske legure s cinkom i magnezijem (serija 7XXX)	20
3.5.4. Ostale legure (serija 8XXX)	21
4. ELEKTROLUČNO ZAVARIVANJE U ZAŠTITNOG ATMOSFERI INERTNOG PLINA – MIG.....	23
4.1. Dodatni materijal za MIG zavarivanje.....	25
4.2. Uloga zaštitnih plinova pri MIG zavarivanju	25
4.3. Parametri MIG zavarivanja.....	26
4.4. Prijenos metala električnim lukom pri MIG zavarivanju.....	28
4.5. AC – MIG zavarivanje	31
4.5.1. Polaritet MIG zavarivanja	31
4.5.2. Parametri AC – MIG zavarivanja	32
4.6. Priprema elemenata konstrukcije za MIG zavarivanje	37
5. TOPLINSKE, MEHANIČKE I MIKROSTRUKTURNE POJAVE U ZAVARUALUMINIJSKIH LEGURAMA.....	39
5.1. Greške u zavarima.....	39
5.2. Zona utjecaja topline	39
5.3. Mehaničke pojave u zavaru.....	41
5.3.1. Poroznost zavara	41
5.3.2. Zaostala naprezanja u zavaru	43
5.3.3. Pukotine u zavaru.....	44

6. PLAN POKUSA I PRIPREMA UZORAKA.....	47
6.1. Izbor materijala i parametara zavarivanja pokusa.....	47
6.2. Oznake uzoraka.....	48
7. REZULTATI I DISKUSIJA.....	50
7.1. Makrosnimke zavarenih uzoraka	50
7.2. Analiza mikrostrukture zavara	53
7.3. Ispitivanje i analiza tvrdoće zavara.....	63
8. ZAKLJUČAK.....	68
LITERATURA.....	70
PRILOZI.....	72

POPIS SLIKA

Slika 1. Aluminij (Al) [3]	2
Slika 2. Područja primjene aluminija [6]	4
Slika 3. Potrošnja aluminija po industriji, tisuća tona [7]	5
Slika 4. Potrošnja i proizvodnja aluminija u svijetu, milijuna tona [8].....	5
Slika 5. Potrošnja aluminija u industrijskim sektorima 2020. godini u odnosu na predviđenu potrošnju 2030. godine, u milijunima tona [9]	6
Slika 6. Proizvodnja aluminija u svijetu za 2023. godinu [10]	7
Slika 7. Mikrostruktura aluminijske legure 5083 [30]	16
Slika 8. Mikrostruktura aluminijske legure 6082 [31]	19
Slika 9. Postupak MIG zavarivanja [12]	23
Slika 10. Shematski prikaz uređaja za MIG zavarivanje [19].....	24
Slika 11. Dijagram napon - struja luka kod različitih zaštitnih plinova [19]	26
Slika 12. Vrste prijenosa metala [23]	29
Slika 13. Grafički prikaz impulsnog postupka i način okidanja kapljice [21]	30
Slika 14. Učinak polariteta na dubinu prodiranja [23]	32
Slika 15. Tipični strujni valovi AC – MIG zavarivanja [25]	33
Slika 16. Utjecaj EN omjera na dubinu penetracije [22].....	33
Slika 17. Utjecaj visokog EN omjera na kvalitetu zavara [22]	34
Slika 18. Odnos između brzine taljenja žice i struje zavarivanja s obzirom na EN omjer [24]	35
Slika 19. Utjecaj EN omjera na popunjavanje praznina/razmaka [22]	36
Slika 20. Dubina penetracije ovisno o frekvenciji [22].....	36
Slika 21. Estetika zavara ovisno o frekvenciji [22].....	36
Slika 22. Očišćena površina gdje će se zavarivati [21]	37
Slika 23. Prikaz kutnog i sučeonog spoja [32]	38
Slika 24. Krivi smjer zavarivanja (crni zavar) [21].....	38
Slika 25. Shematski prikaz najčešćih grešaka zavara kod Al legura [13].....	39
Slika 26. Zona utjecaja topline [26]	40
Slika 27. Prikaz tvrdoće u ZUT pri konstantnom unosu topline [27]	41
Slika 28. Topivost vodika u čistom aluminiju [27].....	42
Slika 29. Poroznost u zavarenom spoju [28].....	43
Slika 30. Zaostala naprezanja u zavarenim spojevima [29]	44
Slika 31. Utjecaj legirnih elemenata na nastanak pukotina u zavaru [27]	45
Slika 32. Osjetljivost na stvaranje pukotina aluminijskih legura sa više legirnih elemenata [27]	46
Slika 33. Nagrizanje uzoraka	48
Slika 34. Svjetlosni mikroskop Olympus GXx51	54
Slika 35. Tvrdomjer Zwick/Roell.....	63
Slika 36. Analiza tvrdoće Z6-DC-6X-6 i Z8-AC-6X-6	64
Slika 37. Analiza tvrdoće Z13-DC-5X-8 i Z15-AC-5X-8	64
Slika 38. Analiza tvrdoće Z1-DC-6X-10 i Z4-AC-6X-10	65
Slika 39. Analiza tvrdoće Z9-DC-5X-10 i Z12-AC-5X-10	66

POPIS TABLICA

Tablica 1. Svojstva aluminija, titana, bakra i željeza [4]	3
Tablica 2. Kemijski sastav aluminijske legure 5083-H321 [14].....	16
Tablica 3. Fizikalna svojstva aluminijske legure 5083-H321 [14]	17
Tablica 4. Mehanička svojstva aluminijske legure 5083-H321 [15]	17
Tablica 5. Kemijski sastav aluminijske legure 6082-T651 [17]	19
Tablica 6. Fizikalna svojstva aluminijske legure 6082-T651 [17].....	20
Tablica 7. Mehanička svojstva aluminijske legure 6082-T651 [17,18].....	20
Tablica 8. Parametri zavarivanja.....	47
Tablica 9. Zavari legure EN AW 6082-T651 na limu debljine 6mm	49
Tablica 10. Zavari legure EN AW 5083-H321 na limu debljine 8 mm.....	49
Tablica 11. Zavari legure AW 6082-T651 na limu debljine 10mm.....	49
Tablica 12. Zavari legure EN AW 5083-H321 na limu debljine 10 mm.....	49
Tablica 13. Makrosnimke zavora na limovima od legure EN AW 6082-T651 debljine 6 mm	50
Tablica 14. Makrosnimke zavora na limovima od legure EN AW 5083-H321 debljine 8 mm	51
Tablica 15. Makrosnimke zavora na limovima od legure EN AW 6082-T651 debljine 10 mm	52
Tablica 16. Makrosnimke zavora na limovima od legure EN AW 5083-H321 debljine 10 mm	53
Tablica 17. Analiza mikrostrukture uzoraka Z6-DC-6X-6 i Z8-AC-6X-6	55
Tablica 18. Analiza mikrostrukture uzoraka Z13-DC-5X-8 i Z15-AC-5X-8	57
Tablica 19. Analiza mikrostrukture uzoraka Z1-DC-6X-10 i Z4-AC-6X-10	59
Tablica 20. Analiza mikrostrukture uzoraka Z9-DC-5X-10 i Z12-AC-5X-10	61
Tablica 21. Tvrdóće uzoraka	72

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
Mt		Milijun tona
MIG		Elektrolučno zavarivanje u zaštiti inertnog plina
Ar		Argon
He		Helij
DCEN		Direct Current Electrode Positive
DCEP		Direct Current Electrode Negative
I	A	Struja
I_{EN}	A	Jačina prosječne struje na negativnom polu
I_{EP}	A	Jačina prosječne struje na pozitivnom polu
MIG - P		Elektrolučno impulsno zavarivanje u zaštiti inertnog plina
T_{EN}	s	Vrijeme trajanja negativnog impulsa
T_{EP}	s	Vrijeme trajanja pozitivnog impulsa
U	V	Napon
AC		Alternating current
DC		Direct current

SAŽETAK

U okviru ovog rada najviše se govori o aluminiju i njegovim legurama i o zavarivanju postupcima DC – MIG i AC – MIG.

U teorijskom djelu opisan je tehnički aluminij i njegova svojstva te primjena. Napravljena je detaljna klasifikacija aluminijskih legura te su detaljno opisane sve serije Al legura. Detaljno su opisani konvencionalni DC – MIG postupak i suvremeni AC – MIG postupak zavarivanja. Navedeni su parametri i posebnosti svakog od postupka. Spomenute su i greške koje je javljaju pri zavarivanju Al legura, te kako one djeluju na zavar i kako ih maksimalno eliminirati.

U eksperimentalnom djelu provedeno je zavarivanje Al legura EN AW 5083 – H321 i EN AW 6082 – T651 postupcima zavarivanja DC – MIG i AC – MIG. Kako je i debljina materijala bitan faktor pri zavarivanju, korišteni su uzorci debljina 6, 8 i 10 mm. Napravljena je analiza mikrostrukture zavara i tvrdoće i dani su određeni zaključci zavara.

Ključne riječi: aluminij, aluminijske legure, EN AW 5083-H321, EN AW 6082-T651, DC-MIG, AC-MIG, zavarivanje

SUMMARY

In the framework of this work, aluminum and its alloys and welding with the DC - MIG and AC - MIG processes are mostly discussed.

In the theoretical work, technical aluminum and its properties are described and applied. A detailed classification of aluminum alloys was made, and all series of Al alloys were described in detail. The conventional DC – MIG process and the modern AC – MIG welding process are described in detail. The parameters and peculiarities of each procedure are listed. Errors that occur when welding Al alloys are also mentioned, as well as how to proceed with the weld and how to eliminate them as much as possible.

In the experimental work, the welding of Al alloys EN AW 5083-H321 and EN AW 6082-T651 was carried out using DC – MIG and AC – MIG welding procedures. Since the thickness of the material is also an important factor during welding, samples with a thickness of 6, 8 and 10 mm were used. An analysis of weld microstructure and hardness was made, and certain conclusions were given.

Key words: aluminium, aluminum alloy, EN AW 5083-H321, EN AW 6082-T651, DC-MIG, AC-MIG, welding

1. UVOD

Strojarstvo, kao temeljna grana inženjerskih znanosti, igra ključnu ulogu u razvoju i održavanju moderne industrije. Jedna od najvažnijih tehnika u ovoj disciplini je zavarivanje, proces koji omogućuje trajno spajanje materijala, najčešće metala. Zavarivanje se koristi u širokom spektru primjena, od građevinarstva i proizvodnje vozila do zrakoplovne industrije i proizvodnje energetske opreme.

Zavarivanje aluminijskih legura predstavlja značajan izazov u modernoj industriji zbog specifičnih svojstava ovih materijala, kao što su visoka toplinska vodljivost i sklonost oksidaciji. Među različitim vrstama aluminijskih legura, legure serije 5XXX i 6XXX su posebno interesantne zbog njihove primjene u konstrukcijama koje zahtijevaju visoku čvrstoću i otpornost na koroziju. U ovom radu će se ispitivati zavari aluminijskih legura EN AW 5083 i EN AW 6082, koje su naširoko korištene u industriji brodogradnje, zrakoplovnoj industriji, te u proizvodnji transportne opreme [12].

Razvoj novih tehnologija i materijala postavlja nove izazove i zahtjeve pred stručnjake za zavarivanje, koji moraju osigurati visoku kvalitetu i pouzdanost zavarenih spojeva. U tom kontekstu, istraživanja i inovacije u metodama zavarivanja, izboru materijala i optimizaciji procesa ključni su za unapređenje proizvodnih postupaka i povećanje efikasnosti.

2. TEHNIČKI ČISTI ALUMINIJ

Aluminij (Al) je najzastupljeniji metalni element u Zemljinoj kori (8 % težinski) i najrašireniji obojeni metal. Zbog svoje kemijske aktivnosti aluminij se u prirodi nikad ne pojavljuje u metalnom obliku, ali njegovi spojevi su prisutni u većoj ili manjoj mjeri u gotovo svim stijenama, vegetaciji i životinjama. Naziv aluminij potječe od latinske riječi *alumen*, koja se koristi za opisivanje kalijeve stipse ili aluminijevog kalijevog sulfata, $KAl(SO_4)_2 \cdot 12H_2O$ [1][2].

Slika 1.prikazuje komad aluminija.



Slika 1. Aluminij (Al) [3]

Aluminij i njegove legure uobičajeno se uspoređuju s ostalim široko korištenim materijalima željeznim materijalima, titanijem i njegovim legurama te bakrom i legurama bakra.

Tablica 1. prikazuje fizikalna svojstva navedenih metala u usporedbi s aluminijem.

Tablica 1. Svojstva aluminija, titana, bakra i željeza [4]

	Mjerna jedinica	Aluminij	Titan	Bakar	Željezo
Kristalna struktura	/	FCC	HCP 882 °C ↓ BCC	FCC	BCC 910 °C ↓ FCC 1410 °C ↓ BCC
Gustoća	g cm ⁻³	2,7	4,5	8,9	7,8
Temperatura taljenja	°C	660	1660	1085	1535
Specifična toplina	cal g ⁻¹ °C	0,215	0,124	0,092	0,114
Koef. ekspanzije	x 10 ⁶	23,5	8,9	17	12
Toplinska vodljivost	W mK ⁻¹	238	17	397	71
Električna provodnost	%	64	4	100	17
Elektrokemijski potencijal	V	- 1,7	- 1,6	+ 0,34	- 0,4
Korozivna otpornost	M-R-B-E	Dobra	Odlična	Dobra	Regularna
Modul elastičnosti	GPa	70	120	130	200
Vlačna čvrstoća	MPa	700	1400	220	1600

Aluminij je duktilan materijal s dobrom električnom i toplinskom vodljivošću. Posjeduje nisku gustoću od 2,7 g cm⁻³ u usporedbi s gustoćom željeza (7,9 g cm⁻³). Duktilnost i sposobnost oblikovanja aluminija posljedica su visoke simetrije i termodinamičke stabilnosti FCC kristalne rešetke i njezine visoke energije greške slaganja. U tehnički čistom obliku, aluminij ima nizak modul elastičnosti i nisku vlačnu čvrstoću. Međutim, njegov specifični modul, odnosno modul elastičnosti podijeljen s gustoćom, gotovo je jednak onome za željezo, titan ili magnezij.

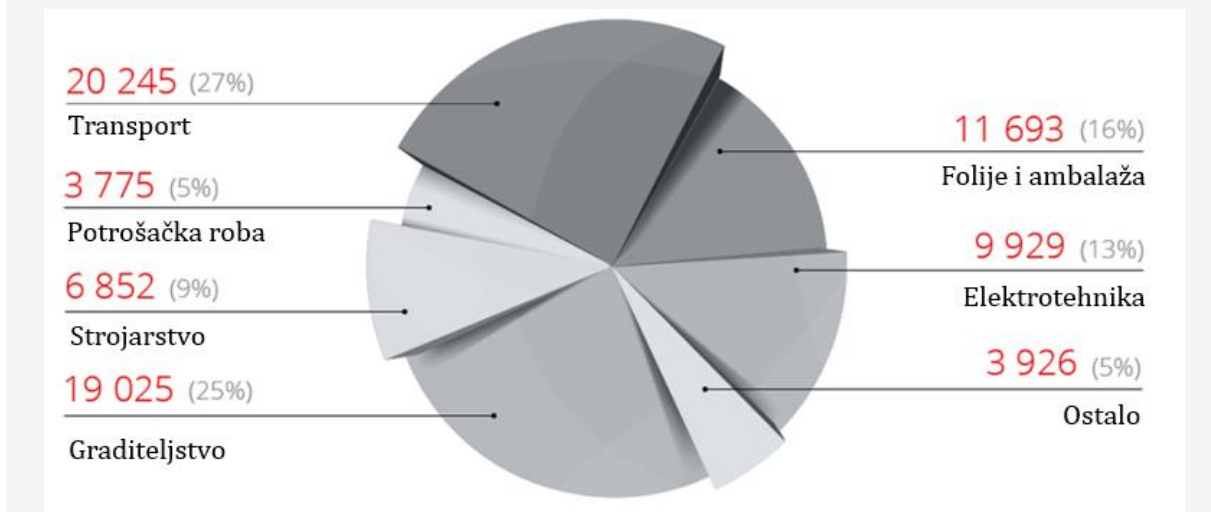
Povoljno kemijsko svojstvo aluminija je njegova reaktivnost s kisikom, koja dovodi do stvaranja gustog sloja Al_2O_3 na površini, koji štiti aluminij od daljnjih interakcija s okolišem [4]. Zbog male težine, aluminijske legure se koriste u transportnoj industriji, gdje se intenzivno koristi u proizvodnji automobila, zrakoplova i vlakova čime značajno doprinosi u smanjenju potrošnje goriva i emisiji štetnih plinova. Osim toga, također se koristi u proizvodnji bicikala, čamaca i drugih rekreacijskih vozila. Druga velika primjena aluminija je u građevinskoj industriji, u proizvodnji prozora, vrata i drugih građevinskih elemenata, te u izgradnji mostova i nosivih građevinskih konstrukcija. Industrija ambalaže također se uvelike oslanja na aluminij, u izradi limenki i folija koje se naširoko koriste za pakiranje hrane i pića, gdje je aluminij izvrsna barijera djelovanju svjetlosti, vlage i zraka i pomaže u očuvanju kvalitete i svježine proizvoda te za pakiranje lijekova, kozmetike i proizvoda za osobnu njegu. Tehnički čisti aluminij najznačajniju primjenu nalazi u elektroindustriji za proizvodnju električnih vodiča i elektroničkih uređaja jer je dobar vodič električne energije i ima malu gustoću, što ga čini idealnim za upotrebu u nadzemnim električnim vodovima. Mala gustoća i visoka toplinsku vodljivost, omogućuju primjenu aluminija za izmjenjivače topline, hladila i grijalice [5].

Slika 2. prikazuje primjenu aluminija u raznim industrijama i svakodnevnim primjena.



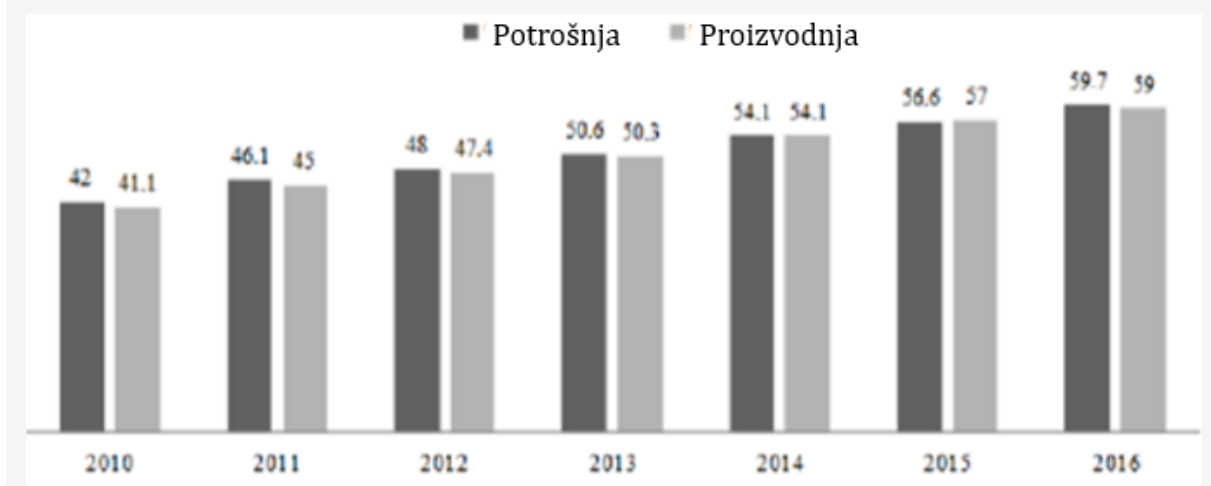
Slika 2. Područja primjene aluminija [6]

Slika 3. prikazuje korištenje aluminija u milijunima tona po industrijskim sektorima. Iz 2014. godine vidljivo je da je aluminij najviše korišten u transportnoj (27 %) i građevinskoj industriji (25 %) [7].



Slika 3. Potrošnja aluminija po industriji, tisuća tona [7]

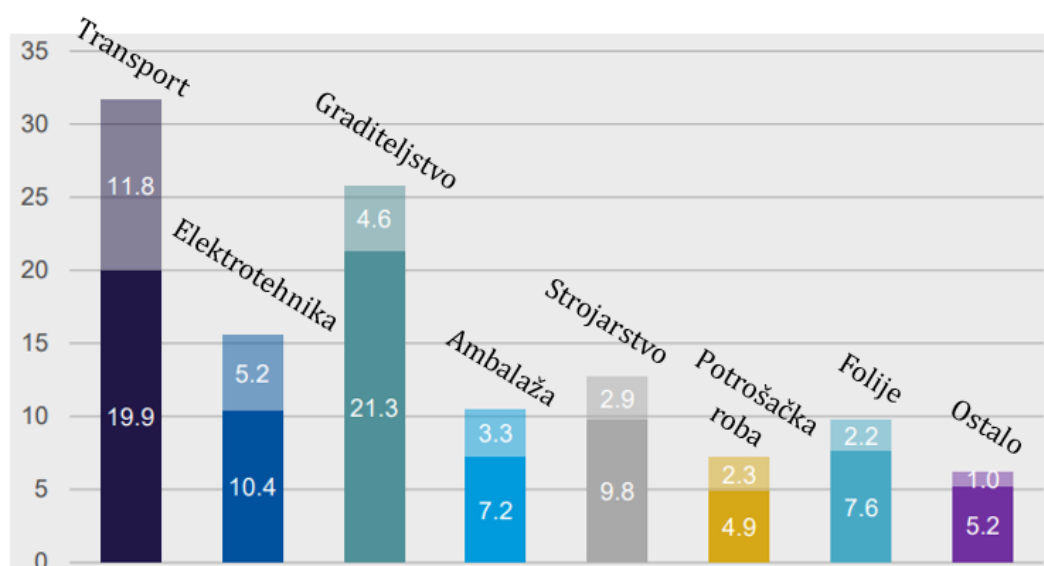
Slika 4. prikazuje strukturu svjetske potrošnje aluminija u razdoblju od 2010. do 2016. godine. Prosječna potrošnja aluminija po glavi stanovnika u svijetu krajem 2015. procijenjena je na 7,7 kg, a očekuje se da će do 2020. ta brojka porasti na gotovo 9 kg. Najviša razina potrošnje aluminija trenutačno je zabilježena u zemljama s visoko razvijenom automobilskom industrijom – Njemačkoj i Južnoj Koreji, gdje razina potrošnje po stanovniku prelazi 26 kg po stanovniku godišnje [8].



Slika 4. Potrošnja i proizvodnja aluminija u svijetu, milijuna tona [8]

Očekuje se da će politika dekarbonizacije i održivog razvoja u svijetu imati značajan utjecaj na potražnju za aluminijem. Usvajanje obnovljivih izvora energije i električnih vozila (EV), kao i implementacija održivih rješenja u sektorima ambalaže i graditeljstva predstavljat će velike prilike za industriju aluminija. Očekuje se da će ukupna potrošnja aluminija porasti za 33,3 Mt u sljedećem desetljeću, s 86,2 Mt u 2020. na 119,5 Mt u 2030. Predviđa se da će oko 75 % ovog rasta potražnje doći iz sektora transporta (35 %), elektrotehnike (16 %), građevinarstva (14 %) i sektora ambalaže (10 %) zajedno.

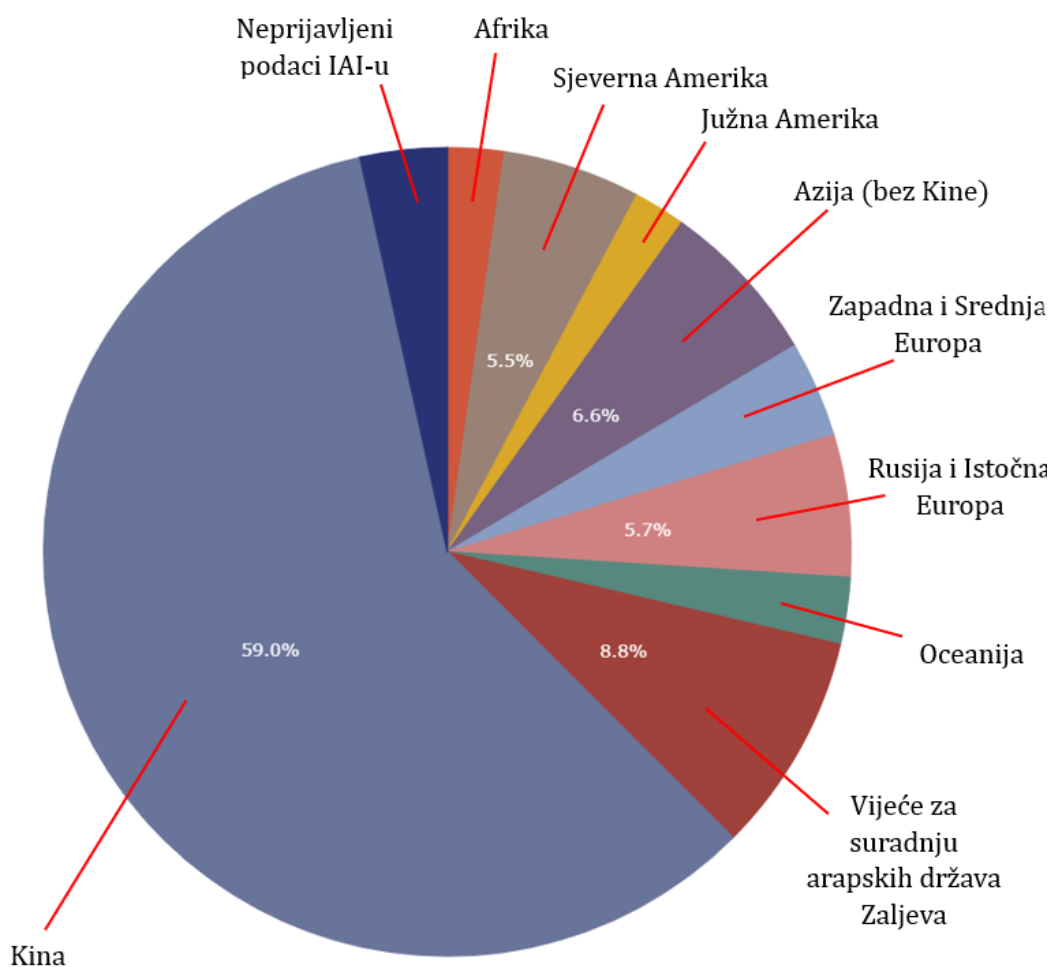
Slika 5. prikazuje potrošnju aluminija po industrijskim sektorima za 2020. godinu u odnosu na 2030. godinu [9].



Slika 5. Potrošnja aluminija u industrijskim sektorima 2020. godini u odnosu na predviđenu potrošnju 2030. godine, u milijunima tona [9]

Što se tiče primarne proizvodnje aluminija, prema Međunarodnom Institutu za Aluminij (eng. IAI) prošle godine, 2023., proizvedeno je oko 70,5 milijuna tona aluminija u svijetu. Najveći udjel u svjetskoj proizvodnji aluminija zauzima Kina sa 60 % proizvodnje, koja je u 2023. godini proizvela nešto više od 40 milijuna tona aluminija.

Slika 6. prikazuje dijagram primarne proizvodnje aluminija u svijetu za 2023. godinu [10].



Slika 6. Proizvodnja aluminijske u svijetu za 2023. godinu [10]

3. ALUMINIJSKE LEGURE

3.1. Osnovna podjela aluminijskih legura

Legiranje aluminija provodi se s ciljem poboljšanja mehaničkih svojstva, prvenstveno vlačne čvrstoće i tvrdoće, potom krutosti i rezljivosti, a ponekad žilavosti ili livljivosti.

Aluminijske legure upotrebljavaju se u dva stanja: u gnječenom i u lijevanom.

- **Lijevanje legure**

Postoje tri osnovne grupe lijevanih legura: Al-Si, Al-Mg i Al-Cu, a njihovom kombinacijom mogu se postići legure s poboljšanim svojstvima u odnosu na tehnički čisti aluminij. Lijevanje aluminijskih legura može se provesti na tri glavna načina: u pijesku, u kokili i tlačno. Neke od lijevanih legura mogu se još dodatno precipitacijski očvrnuti, a neke i gnječiti. Legure koje nisu namijenjene toplinskom očvršćivanju koriste se za opće namjene gdje su krutost konstrukcije, dobra korozijska postojanost i žitkost taljevine od veće važnosti nego čvrstoća. Tipične ljevačke aluminijske legure su Al-Si, Al-Mg i Al-Cu.

Kod Al-Si legura osnovni element je silicij koji pogoduje dobroj livljivosti, te su zbog toga ove legure najrasprostranjenije u grupi lijevanih legura (komercijalno nazvane „silumini“). Uobičajeni sastav Al-Si legura sadrži 10 % do 13 % Si poput legure AlSi12. Ove legure su približno eutektičkog sastava i kako takve posjeduju imaju uzak temperaturni interval skrućivanja što ih čini pogodnim za tlačni ljev.

Al-Mg legure karakterizira dobra korozijska postojanost, te zbog toga mogu postići visoki sjaj. Neke od ovih legura otporne su na udarce stoga se upotrebljavaju u pomorstvu za umjereno opterećene dijelove. Legura s 10 % Mg posjeduje najbolju kombinaciju čvrstoće i žilavosti, ali je jedna od teže livljivih legura zbog pojava poroznosti, loše žitkosti i stvaranju troske. Zbog toga su legure s 3 % i 5 % Mg najupotrebljavanije (npr. AlMg3, AlMg5).

Al-Cu legure su toplinski očvrstljive legure koje karakterizira srednja visoka čvrstoća, srednja ili slaba udarna otpornost, dobra rezljivost i dobra otpornost na povišenim temperaturama. S druge strane slabe su livljivosti, a korozijska postojanost im je najslabija među svim aluminijskim legurama (npr. AlCu4MgTi).

- **Gnječene legure**

Osnovna podjela gnječanih legura izvedena je prema kemijskom sastavu i mogućnosti precipitacijskog očvrnuća i očvrnuća deformacijom.

Od legura koje očvršćuju hladnim deformiranjem traži se dovoljna čvrstoća i krutost u hladnom stanju te dobra korozivna postojanost. Većina ovih legura posjeduje mikrostrukturu koja se u cijelosti sastoji od čvrste otopine što pridonosi njihovoj visokoj duktilnosti i dobroj korozivnoj postojanosti. Legure s većim postotkom magnezija koriste se u brodskoj nadgradnji zbog izvrsne postojanosti u morskoj i pomorskoj atmosferi. Ove legure zahtijevana mehanička svojstva postižu stupnjem ugnječenja primijenjenim u zadnjoj fazi hladnog oblikovanja. One se uglavnom isporučuju u mekom stanju ili nakon određenog stupnja hladnog ugnječenja. Glavni nedostatak ovih legura je u tome da se mehanička svojstva materijala koji je proizveden na konačne dimenzije ne mogu više promijeniti osim mekšanja postupkom žarenja.

Kada se traži povoljan omjer čvrstoće i gustoće prednost imaju precipitacijski očvrstljive legure. Osnovu ovih legura čine legirni elementi, a to su bakar, magnezij, cink i silicij koji tvore intermetalne spojeve s aluminijem (bakar) ili međusobno (magnezij, silicij i cink). Precipitacijom se postiže veće očvršćenje od onog hladnim oblikovanjem, zbog toga se za povećanje čvrstoće i tvrdoće prethodno ugnječenih legura koristi precipitacijsko očvršćenje kao glavni postupak očvršćenja [11].

3.2. Legirni elementi

Najbitniji legirni elementi aluminijskih legura su bakar (Cu), magnezij (Mg), silicij (Si), cink (Zn) i mangan (Mn). Kao dodaci ili primjese (nečistoće) zastupljeni su u manjoj količini željezo (Fe), krom (Cr) i titan (Ti). Njihovom međusobnom kombinacijom te u dodatak i ostalih legirnih elemenata dolazi do unapređenja svojstva osnovne legure (npr. čvrstoća, tvrdoća, omogućeno toplinsko očvršćenje, usitnjenje zrna, bolja rezljivost itd.). Također dodaju se i ostali elementi za posebne svrhe kao što su nikel (Ni), kobalt (Co), litij (Li), srebro (Ag), vanadij (V), cirkonij (Zr), kositar (Sn), olovo (Pb), kadmij (Cd) i bizmut (Bi). Topljivost elemenata je ograničena u kristalima mješancima, a neotopljeni elementi formiraju vlastite faze ili intermetalne spojeve. Na definiranje fizičkih, kemijskih i proizvodnih svojstva legura utječe topljivost legirnih elemenata u aluminiju, ali i udio, veličina, oblik te raspodjela intermetalnih spojeva [11]. U pravilu, ukupan zbroj svih legirajućih elemenata u aluminijskim legurama ne prelazi 10 % [13].

Glavni učinci pojedinih legirnih elemenata u aluminijskim legurama jesu slijedeći [12].:

- 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 otpornost na koroziju, duktilnost i zavarljivost.
- Silicij (Si) povećava čvrstoću i duktilnost, u kombinaciji s magnezijem omogućava precipitacijsko očvršćivanje.
- Cink (Zn) značajno povećava čvrstoću, dozvoljava precipitacijsko očvršćivanje, može izazvati napetosnu koroziju.
- Željezo (Fe) povećava čvrstoću čistog aluminijskog aluminija, uglavnom je zaostali element.
- Krom (Cr) povećava otpornost na napetosnu koroziju.
- Nikal (Ni) poboljšava čvrstoću na povišenim temperaturama.
- Titan (Ti) se koristi za smanjenje veličine zrna, naročito u dodatnom materijalu.
- Cirkonij (Zr) se koristi za smanjenje veličine zrna, naročito 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 osobito kod zavarivanja.
- Olovo (Pb) i bizmut (Bi) poboljšavaju svojstva kod obrade odvajanjem čestica.

3.3. Označavanje aluminijskih legura

Prema Europskom povjerenstvu za standardizaciju (eng. CEN) postoje dvije metode klasifikacije aluminijskih legura: prema numeričkoj oznaci i na temelju kemijskog sastava. Detalji označavanja aluminijskih legura prema europskom sustavu su detaljno opisani u normi HRN EN 573-3:2011– „Aluminij i aluminijeve legure – Kemijski sastav i oblik gnječanih proizvoda“.

U europskom sustavu za opisivanje aluminijskih legura postoje sljedeći prefiksi:

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

Gnječene legure se identificiraju četveroznamenkastom oznakom u kojoj prvi broj označava glavni legirajući element.

Koriste se brojevi od 1 do 9 na sljedeći način:

- AW 1XXX – tehnički čisti aluminij,
- AW 2XXX – legure aluminij – bakar,
- AW 3XXX – legure aluminij – mangan,
- AW 4XXX – legure aluminij – silicij,
- AW 5XXX – legure aluminij – magnezij,
- AW 6XXX – legure aluminij – magnezij – silicij,
- AW 7XXX – legure aluminij – cink – magnezij,
- AW 8XXX – ostali elementi poput litija, željeza,
- AW 9XXX – legirna grupa nije definirana.

Kod tehnički čistih aluminijskih legura, zadnje tri znamenke su proizvoljne i služe za označavanje pojedine legure. Međutim, kod čistog aluminija, zadnje dvije znamenke označavaju minimalni postotak aluminija u leguri, npr. legura AW 1098 ima 99,98 %Al, a legura AW 1090 ima 99,90 %Al. Druga znamenka označava koliki je udio nečistoća u leguri.

Postoji ukupno 36 ljevačkih aluminijskih legura, a 29 legura temelji se na sustavu Al-Si.

Ljevačke aluminijske legure dijele se na 11 podskupina :

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

Kao i kod gnječanih legura, treća i četvrta znamenka označavaju pojedinu leguru i mogu biti proizvoljne.

Na mehanička svojstva aluminijskih legura ne utječe njihov kemijski sastav i stanje nakon određene obrade, npr. odžareno, precipitacijski očvršnuto, hladno deformirano. Zbog toga je Europsko povjerenstvo za standardizaciju definiralo sustav sufiksa koji označuju koji toplinskim postupkom je legura bila podvrgnuta ili uvjete njezine toplinske obrade. Postoji pet osnovnih oznaka definiranih jednim slovom iza kojeg može slijediti jedan ili više brojeva kako bi se definiralo točno stanje aluminijske legure.

Osnovne oznake stanja legure jesu sljedeće [12]:

- F – osnovno (isporučeno) stanje. Odnosi se na gnječene legure gdje nije korištena posebna kontrola toplinskog procesa ili procesa očvršćivanja. Za ovo stanje nisu specificirana mehanička svojstva.
- O – žareno. Izvodi se u cilju smanjenja čvrstoće.
- H – hladno deformirano. Postupkom deformacije povećala se čvrstoća. Nakon slova „H“ slijede najmanje dvije znamenke koje označuju postupak hladne deformacije i provedene toplinske obrade kako bi se postigla zahtijevana mehanička svojstva.

Prva znamenka nakon slova „H“ definira osnovno stanje:

- H1 – hladno deformirano.
- H2 – hladno deformirano i djelomično žareno. Odnosi se na legure koje su očvršnute više od potrebnog, pa se provodi niskotemperaturno žarenje kako bi se postigla željena tvrdoća i čvrstoća.
- H3 – hladno deformirano i stabilizirano. Stabilizacija je niskotemperaturna toplinska obrada koja se primjenjuje tijekom ili po završetku proizvodnje. Provodi se kod hladno deformiranih legura koje vremenom omekšaju s ciljem poboljšanja duktilnosti i mehaničkih svojstva.
- H4 – hladno deformirano i zaštićeno prevlakom.

Druga znamenka nakon slova „H“ označava stupanj očvršćenja legure deformacijom. Izražava se brojevima od 0 do 8, veći broj veća čvrstoća, dok broj 9 označava izrazito čvrstu leguru.

Treća znamenka nakon „H“ nije obavezna i koristi se samo kada treba opisati neko specifično stanje legure.

- W – homogenizacijski žareno. Odnosi se na legure koje nakon homogenizacijskog žarenja precipitacijski očvršćuju na sobnim temperaturama.
- T – toplinski obrađeno. Odnosi se na legure u stabilnom stanju koje se postiže procesom dozrijevanja. Također, nakon slova „T“ slijedi jedna ili dvije znamenke za opisivanje specifične toplinske obrade.
 - 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.

Mogu se dodati i dodatne znamenke koje se koriste za označavanje varijacija toplinske obrade ili hladne deformacije koje bitno mijenjaju svojstva proizvoda.

Aluminijske legure najčešće se dijele na dvije skupine: bez strukturnog očvršćivanja (toplinski neobradive) i sa strukturnim očvršćivanjem (toplinski obradive).

Očvršćivanje toplinski neobradivih („nekaljivih“) legura ostvaruje se legiranjem (Mn, Mg, Si, Fe), hladnom deformacijom i žarenjem, pri čemu u krutoj otopini dolazi do disperzijskog otvrdnjavanja intermetalnim spojevima (čisti aluminijski, Al-Mn, Al-Mg-Mn, Al-Mg legure).

Očvršćivanje toplinski obradivih („kaljivih“) legura ostvaruje se legiranjem sa Cu, Si, Mg, Zn i Li, no ovi elementi imaju ograničenu topljivost u aluminijskoj. Najveću topljivost imaju u području od 460 °C do 520 °C, te se ona opada smanjenjem temperature. Kod ovih legura očvršćivanje se postiže otapajućim žarenjem (450-550 °C), brzim hlađenjem (uglavnom u hladnoj vodi), te naknadnim prirodnim (na sobnoj temperaturi) ili umjetnim starenjem (na povišenim temperaturama). Kod pojedinih aluminijskih legura postupak očvršćivanja toplinskom obradom može se kombinirati sa deformacijskim starenjem. Ovu skupinu legura uglavnom čine: Al-Cu, Al-Si-Mg, te Al-Zn-Mg legure [13].

3.4. Toplinski neobradive legure

3.4.1. Nelegirani aluminij (serija 1XXX)

U nelegiranom aluminiju glavne nečistoće su željezo i silicij, te preostali elementi koji ostaju nakon procesa taljenja. Također, elementi poput bakra, mangana i cinka mogu biti prisutni u malim količinama. Maksimalne razine nečistoća variraju ovisno o navedenoj čistoći, npr. legura 1098 (99,98 %Al) sadrži maksimalni udio nečistoća od 0,02 %, što uključuje maksimalno 0,001 %Si, maksimalno 0,006 %Fe, maksimalno 0,0035 %Cu i maksimalno 0,012 %Zn. Kod legura visoke čistoće, nečistoće su prisutne u vrlo malim koncentracijama da su potpuno otopljene. Što se tiče zavarivanja, ima izvrsnu zavarljivost, ali i najnižu čvrstoću od svih aluminijskih legura. Korozijska postojanost je relativno visoka, no ukoliko je u sustavu veći udio željeza može doći do nastanka rupičaste korozije u vodenim atmosferama.

Prilikom zavarivanja žarenog aluminijske niske čistoće kao što je 1200 u strukturi zavara dolazi do stvaranja tri različita područja. Osnovni materijal imati će sitnozrnatu mikrostrukturu s fino raspršenim česticama Fe-Al-Si. U zoni utjecaja topline ne dolazi do bitnijih promjena mikrostrukture, već jedino uz liniju staljivanja gdje dolazi do djelomičnog taljenja konstituenata koji imaju nisko talište, što će rezultirati stvaranjem šupljina i blagim gubitkom čvrstoće. Nelegirani aluminij se koristi u kemijskoj i elektro industriji, građevinarstvu, za izradu cjevovoda i u dekorativne svrhe.

3.4.2. Aluminijske legure s manganom (serija 3XXX)

Kod ovih legura željezo je prisutno kao nečistoća, pa je topivost mangana u aluminiju relativno niska. Pošto je brzina hlađenja nakon lijevanja ili zavarivanja dovoljno velika u zasićenoj otopini ostaje nešto mangana. Daljnjom obradom za dobivanje gnječnog materijala dolazi do taloženja mangana u vidu FeMnAl_6 , a taj precipitat uzrokuje povećanje čvrstoće zbog disperzijskog očvršćivanja. Zone zavara su slične kao kod čistog aluminijske, te jedina razlika je u sastavu precipitata. Unos topline identično utječe na strukturu kao i kod čistog aluminijske, što znači da su precipitati raspoređeni duž granica zrna i da dolazi do smanjenja čvrstoće u žarenim područjima hladno deformiranih legura.

Ove legure vrlo često se koriste. Legura AlMn (3003) uglavnom se koristi za duboka vučenja i izmjenjivače topline. Njena glavna svojstva jesu dobra zavarljivost, odlična plastičnost i dobra otpornost na okolišne uvjete. Legura AlMgMn (3004) pretežito se koristi za izradu konzervi za piće i cijevi izrađenih zavarivanjem trake.

3.4.3. *Aluminijske legure sa silicijem (serija 4XXX)*

Aluminijske legure sa silicijem imaju eutektičku mikrostrukturu s 12 %Si i talištem na 577 °C. Ove legure nemaju intermetalne faze. Dodavanje natrija u malim količinama koristi se za usitnjavanje eutektičke mikrostrukture (tzv. cijepjenje legure) i povećanje čvrstoće disperzijskim očvršćućem. Na smanjenje žilavosti značajno utječe prisutnost željeza već u malim količinama, no to se može eliminirati dodatkom mangana.

Ove legure su vrlo dobro livljive te se najviše koriste za proizvode izrađene tlačnim, kokilnim i lijevom u pješčane kalupe.. Često se legiraju s bakrom i magnezijem kako bi se postiglo traženo precipitacijsko očvršćuće, a dodatkom nikla poboljšavaju se svojstva na povišenim temperaturama. Zbog svoje dobre livljivosti i niske temperature tališta uglavnom se koriste kao dodatni materijal kod zavarivanja.

3.4.4. *Aluminijske legure s magnezijem (serija 5XXX)*

Kod ovih legura može se do oko 5 % magnezija otopiti u aluminiju kako bi se doprinijelo procesu očvršćivanja, tj. veći udio magnezija daje veću čvrstoću. Količina magnezija koja se može otopiti u ravnotežnim uvjetima na sobnoj temperaturi je samo nekih 1,4 %. Kako bi se postigla što bolja topivost magnezija, legure s višim sadržajem magnezija se zagrijavaju i polako hlade. Pošto je ova reakcija vrlo spora kod procesa zavarivanja neće doći do bitne promjene u mikrostrukturi osim kod hladno deformiranih legura, gdje će se čvrstoća smanjiti. Standardne aluminijske legure s magnezijem sadrže željezo i silicij kao nečistoće, te se namjerno dodaje oko 0,4 % do 0,7 % mangana za povećanje čvrstoće disperzijskim očvršćivanjem. Također, krom se može dodati umjesto ili uz mangan kako bi se postiglo isto povećanje čvrstoće, pri čemu je 0,2 % kroma ekvivalentno 0,4 % mangana.

Čvrstoća zavara kod aluminijske legure s magnezijem općenito je slična onoj kod žarenog gnječenog metala s istim sastavom. Sučeoni zavari kod osnovnog metala s više od 4 %Mg su ponekad manje čvrstoće nego kod žarene osnovne legure. Kod MIG zavarivanja to može biti zbog gubitka magnezija u električnom luku, te je preporučljivo koristiti legure s više legiranih dodataka kao što je kod legure 5556 (AlMg5.2Cr).

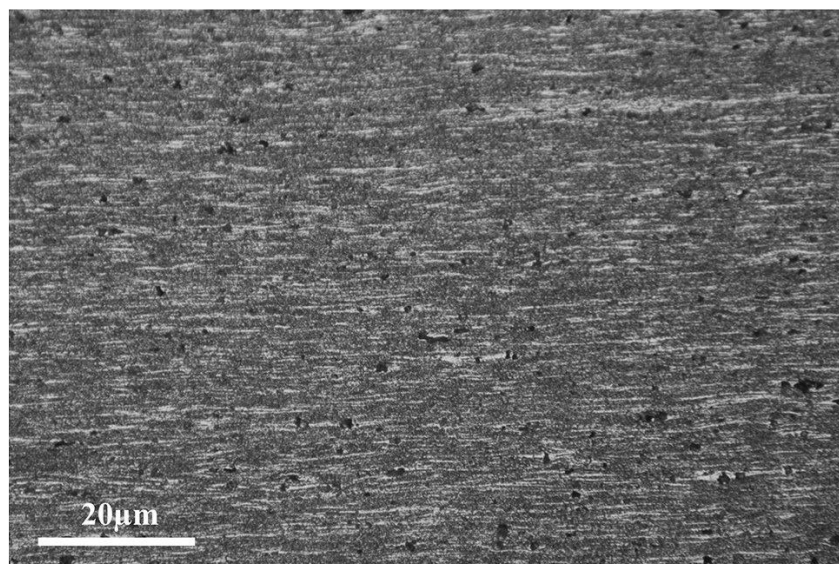
Zavarivanje legure 5083 uglavnom se provodi s dodatnim metalom sličnog sastava, pošto veći udio magnezija povećava rizik od stvaranja pukotina uslijed napetostne korozije.

Legure serije 5XXX koje sadrže između 1 % i 2,5 % magnezija imaju tendenciju pojave toplih pukotina ukoliko su zavarene autogenim zavarivanjem ili s dodatnim metalom sličnog sastava. Rješenje je korištenje visokolegiranog dodatnog metala koji sadrži više od 3,5 % magnezija.

Ove legure se koriste u građevinarstvu, brodogradnji, uređajima za destilaciju morske vode, itd. [12],[13].

U radu će se provesti ispitivanja mikrostrukture zavara na leguri EN AW 5083 H321, kao tipičnom predstavniku skupine legure serije 5XXX. Aluminijska legura 5083 je toplinski neobradiva legura. Oznaka H32 označava da je legura očvrstnuta hladnim valjanjem, a potom stabilizirana na niskoj temperaturi do 1/4 tvrdoće. Ima najveću čvrstoću od legura serije 5XXX, ali se ne preporučuje za upotrebu na temperaturama višim od 65 °C. Ono što karakterizira ovu leguru je vrlo dobra zavarljivost i korozijska postojanost, no vrlo slaba obradljivost zbog visoke čvrstoće. Primjenjuje se u transportu, brodogradnji, kod konstrukcije naftnih platformi, kod cjevovoda za naftu/plin, za izradu tlačnih posuda, itd. [14],[15],[16].

Slika 7. prikazuje mikrostrukturu aluminijske legure 5083.



Slika 7. Mikrostruktura aluminijske legure 5083 [30]

Tablica 2. prikazuje kemijski sastav aluminijske legure 5083 – H321.

Tablica 2. Kemijski sastav aluminijske legure 5083-H321 [14]

Kemijski sastav							
Si %	Fe %	Cu %	Mn %	Mg %	Zn %	Ti %	Cr %
< 0,4	< 0,4	< 0,1	0,4 – 1,0	4,0 – 4,9	< 0,25	< 0,15	0,05 – 0,25

Tablica 3. prikazuje pojedina fizikalna svojstva aluminijske legure 5083 – H321.

Tablica 3. Fizikalna svojstva aluminijske legure 5083-H321 [14]

/	Vrijednost
Gustoća	2,65 kg/cm ³
Temperatura taljenja	570 °C
Modul elastičnosti	72 GPa
Električna otpornost	0,58 x 10 ⁻⁶ Ω.m
Toplinska provodnost	121 W/m.K
Toplinsko istezanje	25 x 10 ⁻⁶ /K

Tablica 4. prikazuje pojedina mehanička svojstva aluminijske legure 5083 – H321.

Tablica 4. Mehanička svojstva aluminijske legure 5083-H321 [15]

/	Vrijednost
Tvrdoća	96 HV
Vlačna čvrstoća	314 MPa
Granica razvlačenja	228 MPa
Istezljivost	min 12 %

3.5. Toplinski obradive legure

3.5.1. Aluminijske legure s bakrom (serija 2XXX)

Aluminijske legure s bakrom su poznate i pod nazivom komercijalnim „durali“. Karakteriziraju ih visoka mehanička svojstva (čak do vrijednosti mekih čelika). Ove legure sastoje se od čvrste otopine bakra u aluminiju kojem povećavaju čvrstoću, no glavno povećanje čvrstoće je uzrokovano stvaranjem precipitata CuAl₂.

Prve aluminijske legure s bakrom su sadržavale između 2 % i 4 %Cu te su bile izuzetno osjetljive na tople pukotine. Stoga su se godinama izbjegavale koristiti u zavarenim konstrukcijama . Naknadno povećanje udjela bakra na 6 %Cu ili više je znato popravilo

zavarljivost Al-Cu legura zahvaljujući velikim količinama eutektika koji popunjavaju nastale tople pukotine. Granica čvrste topljivosti bakra u aluminiju je 5,8 %Cu pri 548 °C.

Tijekom zavarivanja legura očvrnutih starenjem, dolazi do ponovnog otapanja precipitata, što dovodi do 50 % smanjenja krajnje vlačne čvrstoće u leguri sa stanjem T6. Zavarljiva legura 2219 (AlCu6) može nadoknaditi dio ovog gubitka čvrstoće umjetnim starenjem, ali to je obično popraćeno smanjenjem duktilnosti. Manje zavarljiva legura 2014 (AlZnMgCu) također se može toplinski obraditi kako bi se povratio dio krajnje vlačne čvrstoće, ali poboljšanje nije tako veliko kao kod legure 2219 (AlCu6) te može pojaviti i veće smanjenje duktilnosti.

Ove legure se najčešće koriste u zrakoplovnoj i vojnoj industriji te za mehaničke dijelove (zakovice, vijci, itd.).

3.5.2. Aluminijske legure s magnezijem i silicijem (serija 6XXX)

Kod ovih legura glavni konstituent za očvršćivanje je magnezijev silicid (Mg_2Si). Ove legure uglavnom sadrže male količine silicija i magnezija (manje od 1 % svakog elementa), te se mogu dodatno legirati s manganom, bakrom, cinkom i kromom u jednako malim količinama. Sklone su pojavama pukotina, naročito pri zavarivanju korijena zavara osnovnog metala. Ovaj problem može se lako riješiti upotrebom dodatnog materijala koji sadrži veći udio silicija, kao što je 4043, ili upotrebom legure s visokim udjelom magnezija, kao što je 5356, gdje postoji mogućnost od pojave toplih pukotina. Zavarivanje bez dodatnog materijala ili s dodatnim materijalom istog kemijskog sastava kao i osnovni metal se rijetko prakticira zbog opasnosti od pojave toplih pukotina. Zavar koji ima sličan sastav osnovnog materijala se može podvrgnut deformacijskom starenju ili umjetnom starenju kako bi se postigla približno ista čvrstoća osnovnog materijala. Smanjenje čvrstoće kod ovih legura je manje pri prirodnom starenju metala nego pri umjetnom starenju.

Ove legure se dobro zavaruju, antikorozivne su i plastične, te imaju prosječnu vrijednost mehaničkih svojstva u odnosu na ostale toplinski očvrstljive legure. Koriste se kao nosivi elementi (legure bogatije silicijem s dodatkom mangana, kroma i cirkonija), a legure s manjim udjelom silicija i magnezija koriste se za dekoraciju prozora, vrata, fasada, karoserije.

Druga aluminijeva legura koja će se ispitivati u radu je EN AW 6082 – T651. Aluminijaska legura 6082 je legura srednje čvrstoće s izvrsnom otpornošću na koroziju. Ima najveću čvrstoću od legura serije 6XXX. Legura 6082 poznata je kao konstrukcijska legura. Kao relativno nova legura, veća čvrstoća 6082 zamijenila je 6061 u mnogim primjenama. Dodatak velike količine

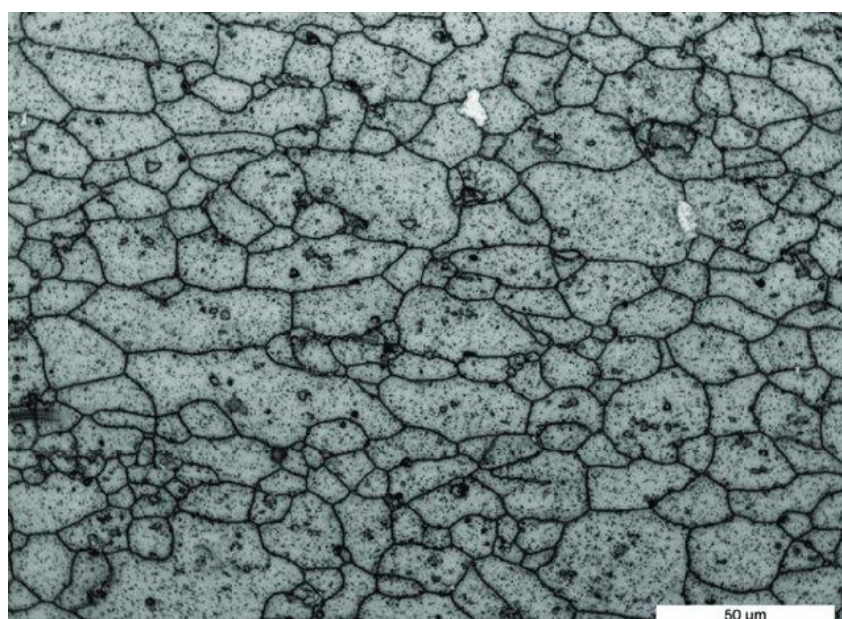
mangana kontrolira strukturu zrna što zauzvrat rezultira većom čvrstoćom legure. Zavarljivost legure je dobra, ali u zavarenom spoju dolazi do pada čvrstoće.

Oznaka T6 označava da je legura homogenizirana, a potom umjetno dozrijevana.

Oznaka T651 označava da je legura homogenizirana, podvrgnuta istezanju u vidu eliminacije zaostalih naprezanja, a potom umjetno dozrijevana.

Primjenjuje se u transportu, kod visoko opterećenih dijelova, kod izrade mostova, za nosače kranova, za pivske bačve, itd. [17].

Slika 8. prikazuje mikrostrukturu aluminijske legure 6082.



Slika 8. Mikrostruktura aluminijske legure 6082 [31]

Tablica 5. prikazuje kemijski sastav aluminijske legure 6082 – T651.

Tablica 5. Kemijski sastav aluminijske legure 6082-T651 [17]

Kemijski sastav							
Si %	Fe %	Cu %	Mn %	Mg %	Zn %	Ti %	Cr %
0,7 – 1,3	< 0,5	< 0,1	0,4 – 1,0	0,6 – 1,2	< 0,20	< 0,10	< 0,25

Tablica 6. prikazuje pojedina fizikalna svojstva aluminijske legure 6082 – T651.

Tablica 6. Fizikalna svojstva aluminijske legure 6082-T651 [17]

/	Vrijednost
Gustoća	2.7 kg/cm ³
Temperatura taljenja	555 °C
Modul elastičnosti	70 GPa
Električna otpornost	0,038 x 10 ⁻⁶ Ω.m
Toplinska provodnost	180 W/m.K
Toplinsko istezanje	24 x 10 ⁻⁶ /K

Tablica 7. prikazuje pojedina mehanička svojstva aluminijske legure 6082 – T651.

Tablica 7. Mehanička svojstva aluminijske legure 6082-T651 [17][18]

/	Vrijednost
Tvrdoća	95 HV
Vlačna čvrstoća	290 MPa
Granica razvlačenja	250 MPa
Istezljivost	min 10 %

3.5.3. *Aluminijske legure s cinkom i magnezijem (serija 7XXX)*

Legure serije 7XXX komercijalno se zovu „*konstruktalni*“ i mogu se sa stajališta zavarivanja podijeliti u dvije skupine. Prva skupina su legure koje sadrže više od 1 % bakra. To su legure, vrlo visoke čvrstoće, ali slabe korozijske postojanost i koje se ne mogu zavarivati (osim u posebnim uvjetima). One se najviše se koriste u zrakoplovnoj i svemirskoj tehnici te naoružanju. Druga skupina *konstruktalna* su legure bez bakra. One su nešto su mekše i veće su korozijske postojanosti od prve skupine. Mogu se zavarivati i najčešće se koriste za izradu nosivih elemenata u građevinskim i strojarским konstrukcijama i u naoružanju.

Zavarivanjem očvrnutih legura visoke čvrstoće dolazi do velikog smanjenja čvrstoće, dok značajno smanjenje čvrstoće dolazi kod visoko očvrnutih legura poput 7022 (AlZn5Mg3Cu)

ili 7075 (AlZn5.5MgCu1.6). Ovo smanjenje čvrstoće može se nadoknaditi toplinskom obradom, ali gubitak duktilnost je toliko velik da je velika mogućnost nastanka krhkog loma. Također, ove legure su sklone toplim pukotinama. Zbog kombinacije ovih nepovoljnih svojstva legure visoke čvrstoće se rijetko zavaruju.

Legure manje čvrstoće koje ne sadrže bakar kao što su 7017 (AlZn5Mg2.5Mn0.7), 7020 (AlZn4.5Mg) i 7039 (AlZn4Mg2.5Mn0.7) lakše su zavarljive. Smanjenje čvrstoće u legurama serije 7XXX je manje od onog u seriji 6XXX, te zbog karakteristika prirodnog starenja, čini ovu leguru popularnim izborom za konstrukcijske primjene gdje mogu biti eventualni popravci i održavanje odrađeni na licu mjesta.

Jedan problem svojstven za legure serije 7XXX je taj da se stvara cinkov oksid prilikom zavarivanja koji utječe na površinsku napetost taline zavara i povećava rizik od naljepljivanja. Zbog toga ove legure zahtijevaju 10 % do 15 % veću struju pri zavarivanju nego legure serije 5XXX [12],[13].

3.5.4. *Ostale legure (serija 8XXX)*

Legure serije 8XXX koriste se za identifikaciju onih legura koje se ne uklapaju ni u jednu drugu skupinu, kao što su 8001 (Al-Ni-Fe) i 8020 (Al-Sn). Međutim, unutar ove skupine nalaze se legure aluminijska i litija (Al-Li), relativno nova obitelj koja daje značajne uštede težine do 15 % i viši Youngov modul u usporedbi s nekim drugim legurama visoke čvrstoće. Svakih 1 % dodanog litija rezultira smanjenjem težine od približno 3 %. Ove prednosti znače da se mogu postići značajne uštede težine u dizajnu zrakoplovnih struktura i da se nezavarljive legure vrlo visoke čvrstoće, poput onih u seriji 2XXX, mogu zamijeniti zavarljivim, lakšim Al-Li legurama.

Al-Li legure općenito sadrže oko 2 % do 3 % litija i male količine bakra i magnezija. Toplinski su obradive, te se stvara niz različitih precipitata, od kojih je glavni Al_3Li . Tipični primjeri ove legure su 8090 i 8091. Zbog velikog afiniteta litija prema kisiku, potrebno je obratiti pozornost tijekom bilo kojeg procesa koji uključuje zagrijavanje ovih legura poput taljenja, lijevanja i zavarivanja. Može doći do stvaranja oksidiranog sloja koji će uzrokovati veliku poroznost od oko 0,2 mm. Ovu poroznost treba naknadno strojno ukloniti. Također, može biti potrebno pročititi stražnju stranu zavara inertnim plinom kako bi se spriječila oksidacija i poroznost. Kao i kod legura serije 7XXX, Al-Li legure slično reagiraju na unos topline u zavaru, gubeći čvrstoću u zoni utjecaja topline (ZUT-u), no veliki dio izgubljene čvrstoće moguće je vratiti naknadnim umjetnim starenjem.

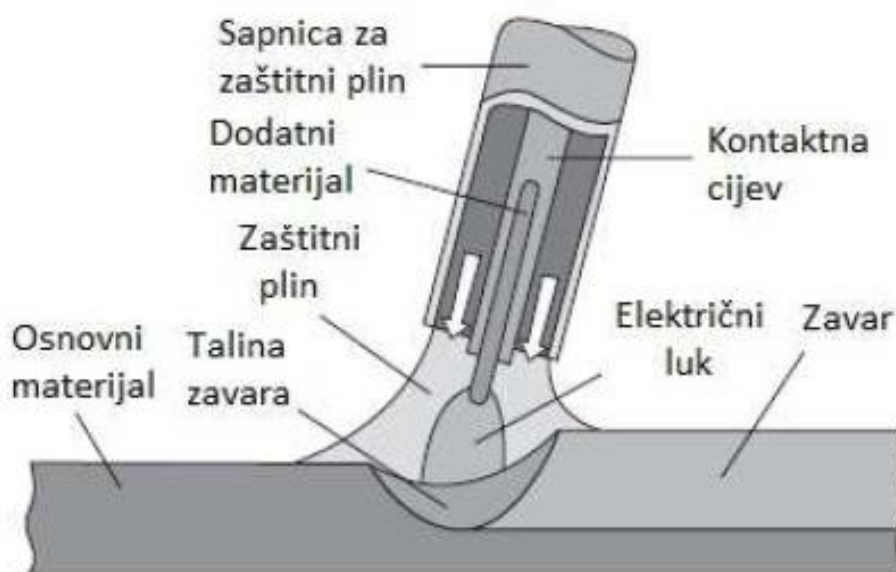
Daljnja obitelji legura koje se mogu svrstati u ovu skupinu su legure koje sadržaj skandij. To su legure koje su dobrim dijelom još uvijek u fazi razvoja. Dokazano je da je skandij vrlo učinkovit u povećanju čvrstoće prilikom očvršćivanja starenjem i pročišćavanju zrna. Skandij će se vjerojatno koristiti u kombinaciji s drugim legirajućim elementima kao što su cirkonij, magnezij, cink ili litij gdje su u laboratorijskim ispitivanjima postignute vlačne čvrstoće od preko 600 N/mm² [12].

4. ELEKTROLUČNO ZAVARIVANJE U ZAŠTITNOG ATMOSFERI INERTNOG PLINA – MIG

Postupak MIG (Metal inert gas) zavarivanja razvio se između 1948. i 1951. godine u Sjedinjenim Američkim Državama (SAD), gdje je ovaj postupak poznat po skraćenici GMAW (Gas metal arc welding).

Elektrolučno zavarivanje taljivom metalnom elektrodom u zaštitnoj atmosferi plinova spada u postupke zavarivanja taljenjem, gdje se električni luk uspostavlja i održava između žice i osnovnog materijala. Proces zavarivanja odvija se u zaštitnoj atmosferi plinova koju osiguravaju inertni plinovi argon (Ar) ili helij (He). Zaštitni plin koristi se kako bi zaštitio električni luk i rastaljeni metal od plinova iz atmosfere (zraka), a dovodi se na mjesto zavarivanja kroz posebnu sapnicu na pištolju. Prilikom zavarivanja metalna elektroda (žica) i osnovni materijal tale se uslijed topline nastale električnim lukom. Pogonski sistem kontinuiranom brzinom dodaje elektrodu (žicu) koja istovremeno služi i kao dodatni materijal. Uglavnom kod ovoga postupka koristi se istosmjerna struja s elektrodom spojenom na pozitivan pol izvora struje. Zavarivanje se ostvaruje tako što se struja dovodi na elektrodu čime se ostvaruje električni luk koji osnovni materijal i dodatni materijal pretvara u talinu zavara [13][19].

Slika 9. prikazuje postupak MIG zavarivanja.



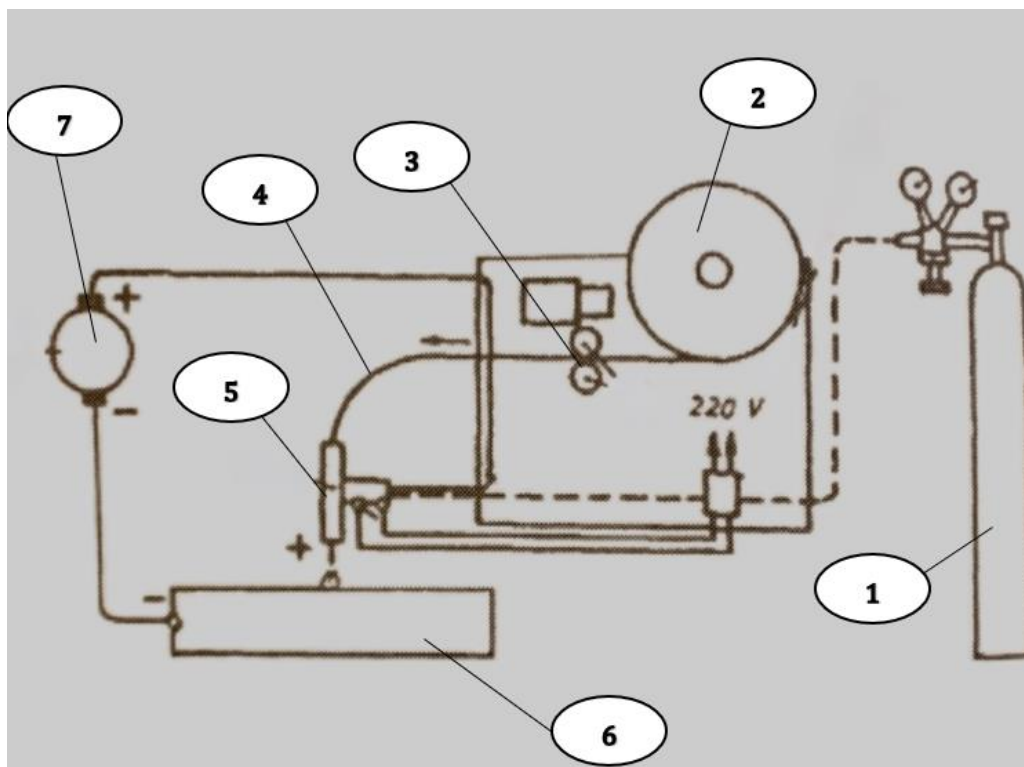
Slika 9. Postupak MIG zavarivanja [12]

Postupak MIG može biti automatski (potpuno mehaniziran), poluautomatski (dovođenje žice u električni luk je mehanizirano, no držanje i vođenje pištolja je ručno) i robotiziran. Robotiziran postupak je programiran, gdje su parametri unaprijed isprogramirani, a zavarivač jedino prati rad robota [13].

Uređaj za MIG zavarivanje sastoji se od sljedećih dijelova [19]:

1. Plinska boca s regulatorom (zaštitni plin),
2. Spremnik žice (elektrode),
3. Dodavač žice,
4. Kabel pištolja,
5. Pištolj,
6. Osnovni materijal,
7. Izvor struje.

Slika 10. prikazuje shemu i sve prethodno numerirane dijelove uređaja za MIG zavarivanje.



Slika 10. Shematski prikaz uređaja za MIG zavarivanje [19]

4.1. Dodatni materijal za MIG zavarivanje

Kod MIG zavarivanja koriste se pune i praškom punjene žice. Pune žice mogu biti promjera 0,6, 0,8, 1,0 i 1,2 mm, te se namotavaju na kolute. Kako bi zavarivanje bilo kvalitetno žice moraju zadovoljiti određene uvjete u vidu kemijskog sastava, kvalitete površine, odmotavanje s koluta tijekom zavarivanja i dr. Kemijski sastav žice mora biti sličan osnovnom materijalu koji se zavaruje, a zbog boljeg električnog kontakta i veće otpornosti na koroziju pune žice moraju biti pobakrene ili poniklane. Površina žice mora biti glatka, točnih dimenzija i uredno namotana na kolute.

Uloga praška je da zaštiti rastaljene i očvrsnute zone taljenja metala od zraka, ali i da oblikuje površinu zavara, spriječi njegovo hlađenje, nadomjesti gubitak legirajućih elemenata koji ispare ili izгоре. Također, služi da poboljša stabilnost električnog luka povećanjem provodljivosti lučnog prostora.

Praškom punjene žice mogu imati različite poprečne presjeke, što ovisi o načinu proizvodnje. Koriste se uz plinsku zaštitu, no postoje i one koje same stvaraju zaštitnu atmosferu raspadanjem jezgre.

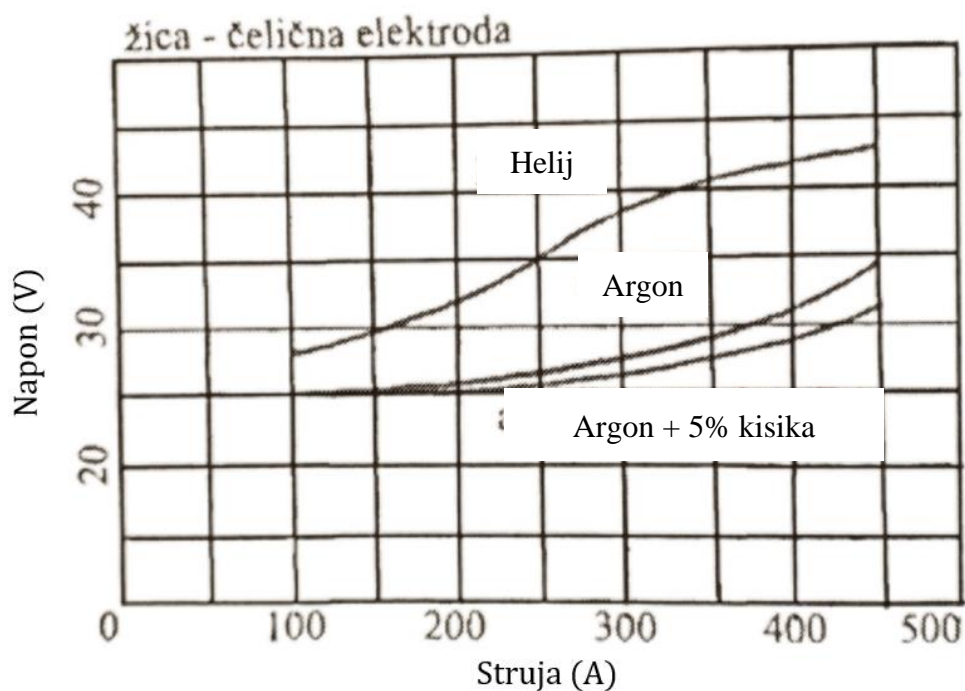
Praškom punjene žice pogodne su za zavarivanje na terenu i za tvrdo navarivanje. Ukoliko je žica punog presjeka zavaruje se u svim položajima zavarivanja, dok se punjenom žicom zavaruje isključivo u okomitom i vodoravnom položaju [13].

4.2. Uloga zaštitnih plinova pri MIG zavarivanju

Uloga zaštitnih plinova kod MIG zavarivanja je da zaštite mjesto zavarivanja i kapljice rastaljenog metala pri prolazu električnim lukom i talinom od okolne atmosfere (zraka). Inertni zaštitni plinovi (Ar, He ili njihova mješavina) ne reagiraju s rastaljenim metalom. Plinovi se kroz posebnu sapnicu na pištolju dovode na mjesto zavarivanja.

Uloga plinova manifestira se na električno – fizikalna svojstva električnog luka (geometrija električnog luka, oblik jezgre, potrebna energija za ionizaciju plinova, itd.), metalurške reakcije u talini zavara (reducirajuće, oksidirajuće i neutralne), te na tehnološke parametre (dubina vara, širina vara, itd.) [13].

Za istu dužinu električnog luka i struje, napon luka je veći kod helija nego kod argona, što prikazuje sljedeći dijagram (Slika 11.).



Slika 11. Dijagram napon - struja luka kod različitih zaštitnih plinova [19]

Iz dijagrama je vidljivo da je bolje koristiti helij, ili smjesu argon – helij (sa visokom udjelom helija) za zavarivanje aluminija i njegovih legura velikih debljina zbog dobrog provođenja topline. Obratno, argon je bolje koristiti pri zavarivanju manjih debljina i za pozicionirana zavarivanja [19].

4.3. Parametri MIG zavarivanja

Parametri zavarivanja koji bitno utječu na kvalitetu zavarenog spoja MIG postupkom su:

- Jakost struje zavarivanja,
- Napon električnog luka,
- Promjer žice,
- Brzina zavarivanja,
- Duljina slobodnog kraja žice i
- Količina zaštitnog plina.

Kod MIG impulsnog zavarivanja parametri koji su također biti su:

- Impulsna struja,
- Srednja struja,
- Trajanje impulsa i
- Frekvencija impulsa.

Pri MIG zavarivanju jakost struje je uglavnom od 130 A do 300 A.

Optimalna jakost struje zavarivanja ovisi o:

- Vrsti i debljini materijala,
- Promjeru žice,
- Obliku spoja,
- Položaju zavarivanja.

Jakost struje zavarivanja određuje se prema brzini dovođenja žice (veća brzina > veća jakost struje). Povećanjem jakosti struje zavarivanja povećava se dubina zavarivanja i učinak taljenja. Ukoliko se previše poveća jakost struje zavarivanja, može doći do prskanja materijala tijekom zavarivanja. Upotrebom žice većeg promjera povećava se učinak taljenja, ali i zahtijeva veću jakost struje. Također, veći promjer žice pruža širi zavar.

Za definiranu jakost struje zavarivanja bira se i optimalan napon električnog luka. Ako je pre nizak napon zavar će biti uzak i ispučen, dok previsok napon daje širok i nizak zavar uz jako rasprskavanje i slaba mehanička svojstva zavara. Iznos napona električnog luka određuje se prema duljini luka (veća duljina električnog luka > veći napon). Prevelikim porastom napona ili duljine luka smanjuje se zaštita rastaljenog materijala, a sukladno tome pogoršavaju se i mehanička svojstva zavarenog spoja. Za postizanje što boljih mehaničkih svojstva zavara, kod određene jakosti struje zavarivanja treba odabrati najniži napon električnog luka.

Bitno je uspostaviti optimalan odnos između brzine zavarivanja i količine taline. Mala brzina zavarivanja i velika količina taline i obrnuto dovodi naljepljivanja kao karakteristične pogreške MIG zavarivanja.

Količina zaštitnog plina koji će se koristiti ovisi o promjeru žice, obliku spoja, jakosti struje zavarivanja, mjestu i uvjetima zavarivanja. Ako se zavaruje kratkim i mješoviti lukom, količina zaštitnog plina treba iznositi 10x promjeru žice za optimalnu potrošnju plina, dok kod štrcajućeg i impulsnog luka treba više plina [13].

4.4. Prijenos metala električnim lukom pri MIG zavarivanju

Kod zavarivanja MIG postupkom način prijenosa metala električnim lukom ovisi o:

- Polaritetu elektrode,
- Jakosti struje zavarivanja,
- Naponu zavarivanja,
- Vrsti zaštitnog plina,
- Kemijskom sastavu žice,
- Karakteristikama izvora struje.

Prijenos metala ovisno o jakosti struje i naponu električnog luka može se odvijati na slijedeća četiri načina:

- Kratki luk ($I=50 - 70$ A, $U=13 - 21$ V)
- Prijelazni (miješani) luk ($I=170 - 235$ A, $U=22 - 25$ V)
- Štrcajući luk ($I=200 - 600$ A, $U=25 - 40$ V)
- Impulsni luk

Prijenos metala kratkim lukom koristiti se pri zavarivanju žicama promjera 0,8, 1,0 i 1,2 mm, te je u pitanju zavarivanje u kratkim spojevima. Zbog male duljine luka, metalna kap povećava se na vrhu elektrode i u određenom trenutku dotakne rastaljeni metal. U tom trenutku nastaje kratki spoj, električni luk se trajno prekida, a napon pada na 0 V. U tom momentu dolazi do naglog porasta struje zavarivanja koja pomaže okidanju metalne kapi s vrha elektrode. Nakon okidanja kapi s vrha elektrode, ponosno se uspostavlja električni luk i ciklus se ponavlja. Unutar jedne sekunde izvrši se 150 – 250 ciklusa. Pošto je ovo zavarivanje u kratkim spojevima s vrlo malom količinom rastaljenog metala, ovaj način zavarivanja najčešće se koristi kod tankih limova, korijenskog zavara i prisilnog položaja zavarivanja.

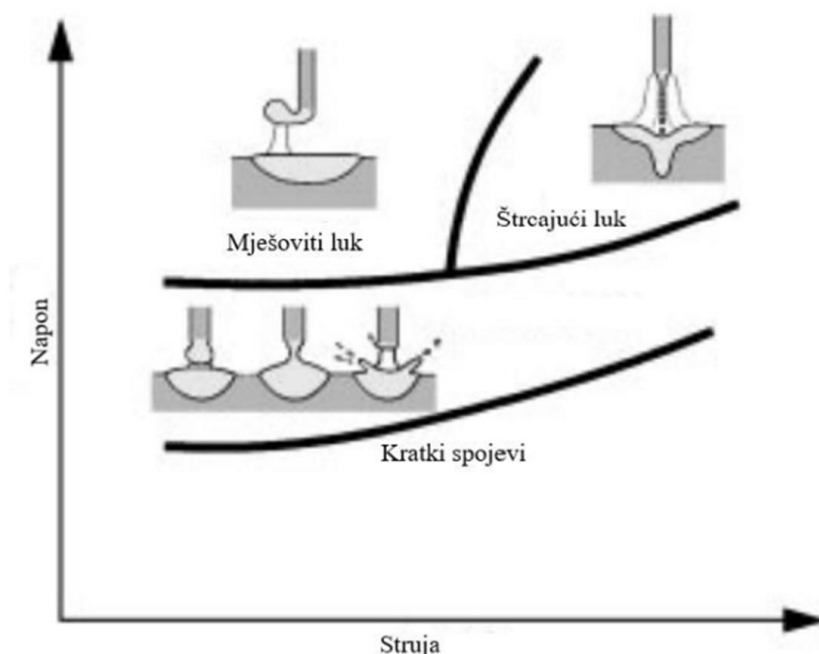
Prijenos metala štrcajućim lukom karakterizira jaka struja zavarivanja i visoki napon. Ova karakteristika uzrokuje snažan tzv. „pinch – efekt“ koji dovodi do odvajanja mlaza finih kapljica koje padaju u kupku. Kod ovog prijenosa metala vrijeme zagrijavanja kapi na elektrodi je kratko zbog brzog prijelaza kapi s elektrode, što rezultira kraćim trajanjem metalurških reakcija. Zbog toga je odgor legirajućih i pratećih elemenata mali. Električni luk se nikada ne prekida jer metalne kapljice nemaju kontakt s rastaljenim metalom i ne dolazi do kratkog spoja. Ovaj način zavarivanja omogućava visok učinak taljenja i ekonomičnost postupka zbog gustoće struje od 300 A/mm². Kod zavarivanja koriste se žice najvećeg promjera od 1,2 do 2 mm.

Primjenjuje se kod popunjavanja žlijebova na debelim limovima, navarivanju detalja te kod zavarivanja debelih komada isključivo u vodoravnom položaju (jer bi u drugim položajima talina iscurila iz zavara). To je posebno izraženo kod zavarivanja MIG postupkom gdje je električni luk praktički uronjen u rastaljeni metal.

Prijenos metala prijelaznim (mješovitim) lukom odvija se tako da se metal djelomično prenosi kratkim spojevima, a djelomično prolaskom kapi kroz luk (kao pri zavarivanju štrcajućim lukom). Zbog toga je omogućeno okidanje manjih kapi koje poprilično prskaju naokolo.

Prijenos metala kratkim, mješovitim i štrcajućim lukom spada u tzv. prirodni prijenos metala.

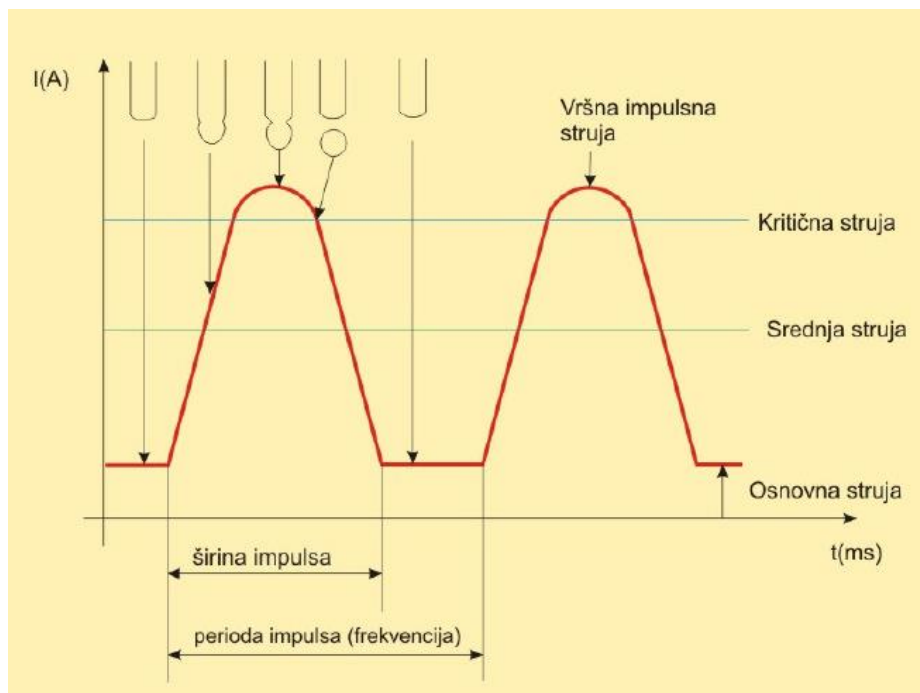
Slika 12. prikazuje različite vrste prijenosa metala u ovisnosti o struji i naponu.



Slika 12. Vrste prijenosa metala [23]

Prijenos metala impulsnim (pulsirajućim) lukom danas se sve više koristi. Prijenos metala ovom metodom može se postići samo u zaštiti argona ili u mješavinama bogatim s argonom. Kod ovih uređaja za zavarivanje, generator impulsa (pulsator) ima ulogu za stvaranje karakterističnih strujnih impulsa određene frekvencije i trajanja. Pulsator generira promjenjiv oblik struje (impuls), koji omogućava okidanje samo jedne kapljice tijekom impulsa, a količina prijenosa materijala se regulira promjerom žice i frekvencijom (brojem impulsa). Slika 13. prikazuje grafički prikaz impulsnog postupka i način okidanja kapljice. Osnovna jakost struje tali vrh elektrode, te dolazi do okidanja kapi koja se prenosi odabranim strujnim impulsom. Ovom

metodom se lijepo i kontrolirano zavaruju tanki materijali i provaruju korijeni, te izvodi zavarivanje u prisilnim položajima. Frekvencija impulsa, a shodno time i broj kapi, može se podešavati (optimalna frekvencija je 50 Hz). Pri prijenosu kapi ne dolazi do kratkih spojeva. Upotrebom MIG impulsnog zavarivanja u svim se položajima dobivaju glatki, estetski lijepi zavari bez štrcanja materijala [13][21].



Slika 13. Grafički prikaz impulsnog postupka i način okidanja kapljice [21]

Glavne prednosti impulsnog prijenosa metala jesu:

- Smanjeno prskanje,
- Jednoličan zavar,
- Široko područje struje zavarivanja za pojedine promjere žice,
- Stabilan luk i kod manjih jakosti struje,
- Upotreba žica većih promjera za tanje materijale,
- Mogućnost zavarivanja u svim položajima [13].

4.5. AC – MIG zavarivanje

MIG zavarivanje izmjeničnom strujom je relativno novi postupak kod MIG zavarivanja. Razvio se krajem prošlog stoljeća, a najviše se koristi u Japanu, dok u Europu je došao tek početkom 2000-ih godina.

Kod zavarivanja materijala malih debljina i debljih materijala niske gustoće konvencionalnim postupcima dolazilo je do velikih problema, poput nemogućnosti potpunog spajanja materijala, zavarenog spoja koji ne ispunjava zahtjeve i progaranja. Zbog toga, razvijen je AC – MIG postupak zavarivanja koji omogućava kvalitetnije, brže i efikasnije zavarivanje modernih materijala u usporedbi s konvencionalnim postupcima zavarivanja [22][23].

4.5.1. Polaritet MIG zavarivanja

Između elektrode i osnovnog materijala nastaje luk za zavarivanje, čime se električna energija pretvara u izvor topline. Elektroda i osnovni materijal mogu biti spojeni na pozitivan ili negativan pol, tj. polaritet izvora struje.

Kod MIG zavarivanja istosmjernom strujom elektroda se najčešće spaja na pozitivan pol (+), a osnovni materijal na negativan pol (–) izvora struje. Ovakav način spajanja naziva se DCEP (eng. Direct Current Electrode Positive).

Karakteristike električnog luka kod DCEP spoja su:

- Stabilan luk,
- Dublja penetracija,
- Učinak čišćenja oksida.

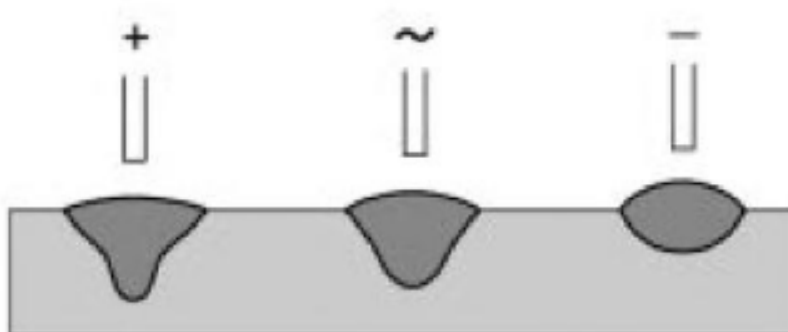
Ukoliko se kod MIG zavarivanja istosmjernom strujom elektroda spoji na negativan pol (–), a osnovni materijal na pozitivan pol (+) izvora struje, ostvaruje se spoj DCEN (eng. Direct Current Electrode Negative).

Karakteristike električnog luka kod DCEN spoja jesu slijedeće:

- Manje stabilan luk,
- Manja penetracija,
- Veća količina taline.

Kod AC – MIG zavarivanja obuhvaćaju se prednosti DCEP i DCEN postupka jer se postižu u isto vrijeme. AC – MIG zavarivanje omogućuje relativno duboku penetraciju, stabilan električni luk i čišćenje oksida [24].

Slika 14. pokazuje kako polaritet elektrode utječe na dubinu prodiranja tj. penetracije.



Slika 14. Učinak polariteta na dubinu prodiranja [23]

4.5.2. Parametri AC – MIG zavarivanja

Dva su ključna parametra kod AC – MIG zavarivanja:

- EN omjer pozitivnog i negativnog polariteta,
- Frekvencija.

Pomoću EN omjera izražava se tijek struje, tj. on predstavlja omjer struje negativnog polariteta i ukupne struje u trajanju jednog ciklusa izmjenične struje. EN omjer definiran je sljedećom jednadžbom [25]:

$$EN = \frac{(I_{EN} \times T_{EN})}{(I_{EP} \times T_{EP}) + (I_{EN} \times T_{EN})} \times 100\% \quad (1)$$

gdje je :

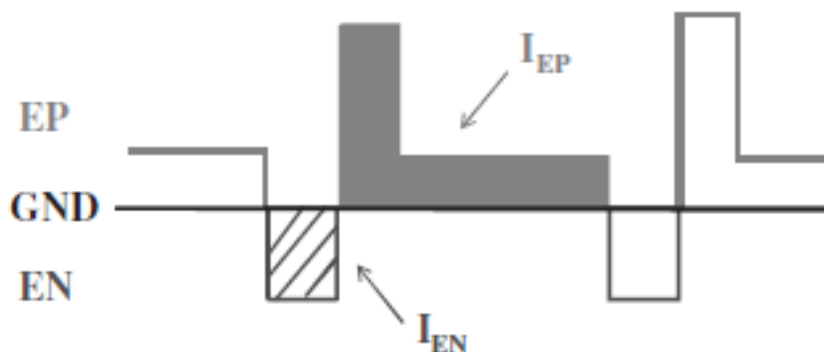
I_{EN} – jačina prosječne struje na negativnom polu (A),

I_{EP} – jačina struje na pozitivnom polu (A),

T_{EN} – vrijeme trajanja negativnog impulsa (A),

T_{EP} – vrijeme trajanja pozitivnog impulsa (A).

Slika 15. prikazuje valni oblik struje kod AC – MIG zavarivanja.

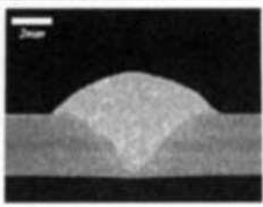
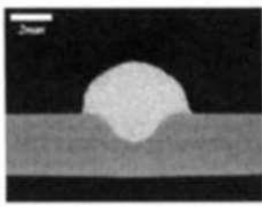
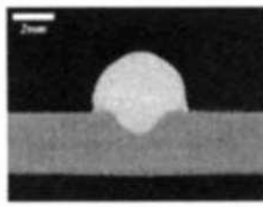
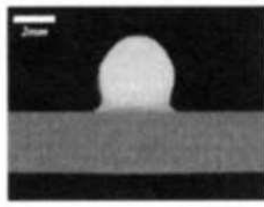


Slika 15. Tipični strujni valovi AC – MIG zavarivanja [25]

EN omjer je najvažniji parametar kod AC – MIG zavarivanja. Njime je moguće kontrolirati unos topline, dubinu prodiranja i količinu depozita. Također, može se eliminirati problem pripreme spoja gdje je veliki razmak između materijala.

Ako se pri konstantnoj brzini dodavanja žice, poveća EN omjer, dolazi do smanjenja struje, a time i širine i dubine penetracije, dok nadvišenje zavara se povećava.

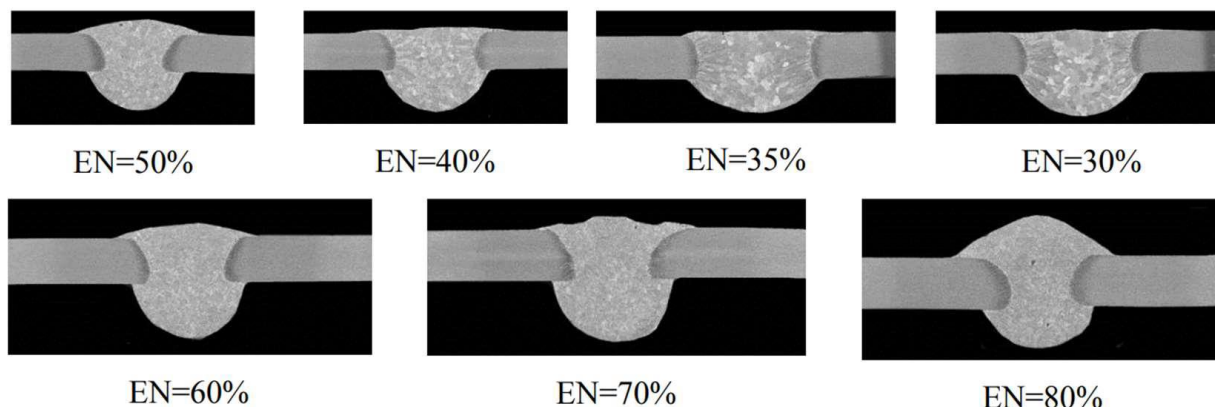
Slika 16. prikazuje različite oblike zavara pri konstantnoj brzini zavarivanja s različitim EN omjerima [22].

EN omjer 0%	EN omjer 10%	EN omjer 20%	EN omjer 40%
$I_a = 98A / V_a = 17.6V$	$I_a = 88A / V_a = 16.2V$	$I_a = 83A / V_a = 15.6V$	$I_a = 65A / V_a = 15.6V$
			
Brzina taljenja žice: 600 cm/min ; Brzina zavarivanja: 60 cm/min			

Slika 16. Utjecaj EN omjera na dubinu penetracije [22]

Kod tankih limova, povećanje EN omjera pozitivno utječe na dubinu penetracije, no ako se pretjera s povećanjem EN omjera dolazi do zavara niže kvalitete (javlja se nadvišenje zavara, što rezultira nepravilnom geometrijom zavara) [22].

Slika 17. prikazuje utjecaj prevelikog povišenja EN omjera na kvalitetu zavora.

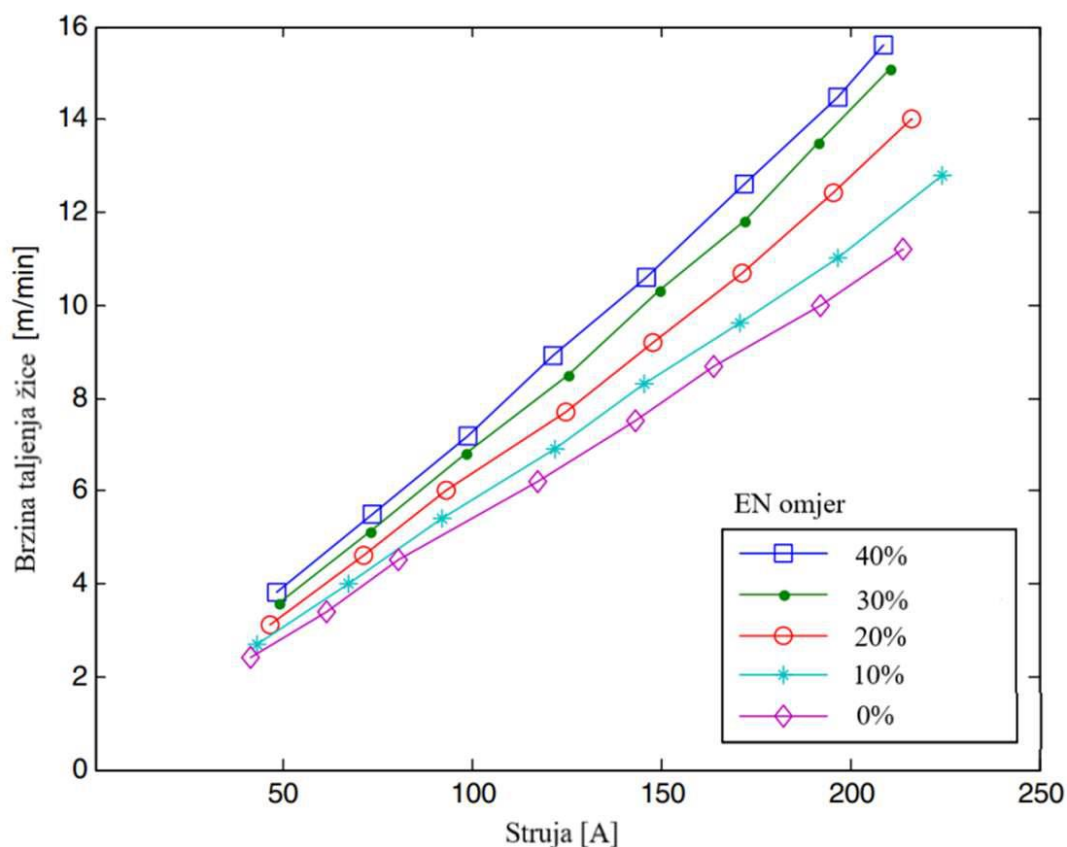


Slika 17. Utjecaj visokog EN omjera na kvalitetu zavora [22]

Količina depozita je parametar na koji je također moguće utjecati povećanjem EN omjera. Razlog tome je način na koji je žica spojena u električnom luku te njeno ponašanje u električnom luku. Spajanjem žice na negativan pol (-), električni luk raspoređiti će se na veću površinu dodatnog materijala i više će ga zagrijavati, a kapljice će biti krupnije. Ukoliko je žica spojena na pozitivan pol (+), električni luk je centriran na vrhu žice i dovodi do visokog zagrijavanja jedne kapljice i velikog unosa topline. Kod AC – MIG zavarivanja, odvijaju se oba slučaja, gdje je trajanje pozitivnog pola zaduženo za prijenos dodatnog materijala u talinu, a trajanje negativnog pola za smanjenje unosa topline i reguliranje penetracije.

Moguće je zaključiti kako će se povećanjem EN omjera, produžiti trajanje negativnog impulsa što će povećati količinu depozita pri konstantnom iznosu struje. Ukoliko se želi zadržati jednaka količina depozita, potrebno je smanjiti iznos struje, a to će pozitivno utjecati na unos topline i mogućnost progaranja [24].

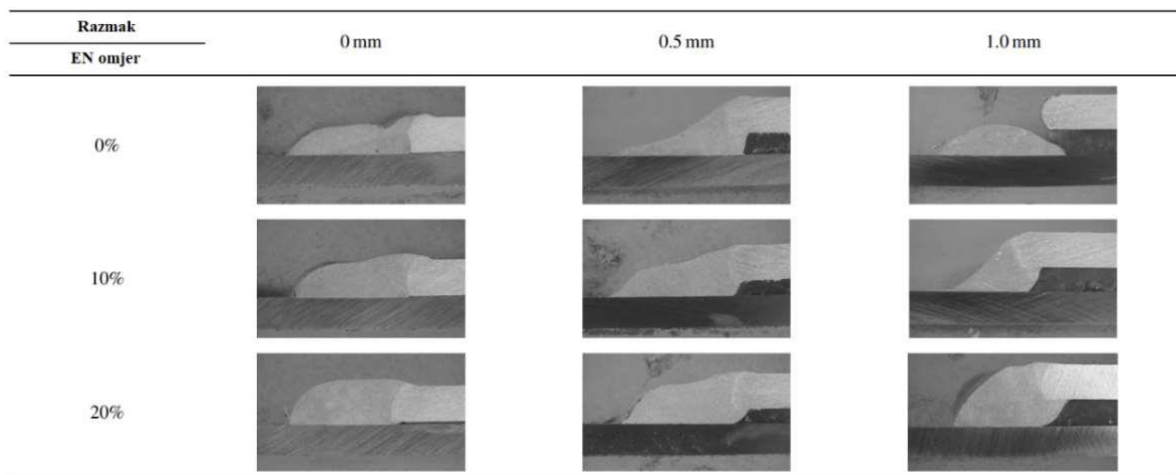
Slika 18. prikazuje odnos između brzine taljenja žice i struje zavarivanja s obzirom na EN omjer.



Slika 18. Odnos između brzine taljenja žice i struje zavarivanja s obzirom na EN omjer [24]

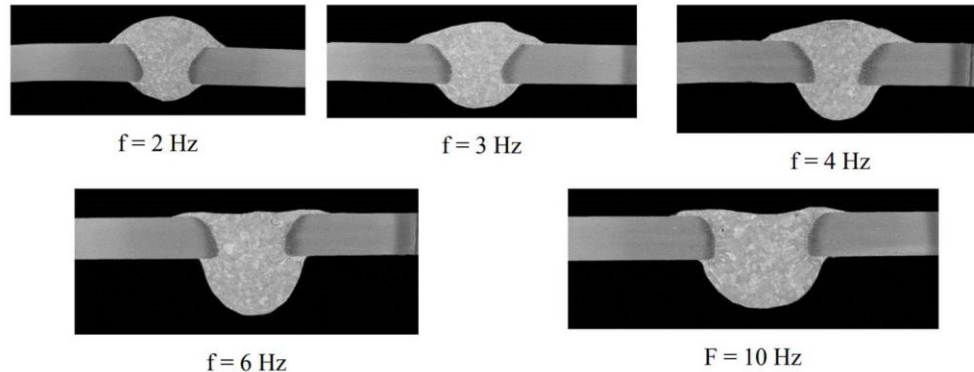
Pomoću AC – MIG zavarivanja moguće je popuniti razmake/praznine između materijala. Pošto se kod zavarivanja tankih aluminijskih dijelova, primarno koristi preklopni spoj, postoji mogućnost nastanka nepravilnosti u zavaru zbog nepotpune difuzije i deformacije materijala uslijed prekomjernog unosa topline. Tanke ploče aluminija koje imaju vrlo mali razmak između, moguće je zavariti postupkom MIG – P, no i tu postoji mogućnost progaranja ukoliko je osnovni materijal male debljine. Postupak AC – MIG nudi rješenje ovoga problema, tako da se poveća EN omjer. Rješenje je u povećanju količine taline koju omogućuje negativan pol, koji ujedno i stvara kapljice većeg volumena. Uz to, smanjen je iznos struje i napona koji sprečavaju mogućnost progaranja [22].

Slika 19. prikazuje utjecaj EN omjera na popunjavanje praznina/razmaka između materijala.



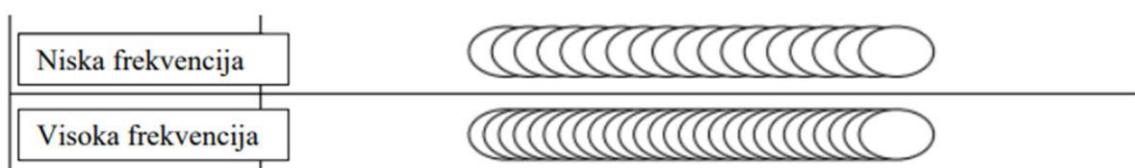
Slika 19. Utjecaj EN omjera na popunjavanje praznina/razmaka [22]

Frekvencija je parametar koji utječe na kvalitetu i geometriju zavara. Ona definira koliko impulsa se odvija u jednoj sekundi (1 Hz znači jedan kompletni impuls u sekundi). Ukoliko se poveća frekvencija, povećava se i dubina penetracije (Slika 20.).



Slika 20. Dubina penetracije ovisno o frekvenciji [22]

Također, estetski izgled zavara se određuje visinom frekvencije (Slika 21.) [22].



Slika 21. Estetika zavara ovisno o frekvenciji [22]

4.6. Priprema elemenata konstrukcije za MIG zavarivanje

Priprema metalnih površina za zavarivanje uobičajeno se sastoji od četiri faze: čišćenja, zavarivanja podloge na korijen zavara, određivanje smjera zavara i priprema plinske mješavine za zaštitu taline u zavaru od oksidacije i drugih onečišćenja. Kod provedbe ovih faza treba primijeniti slijedeće preporuke:

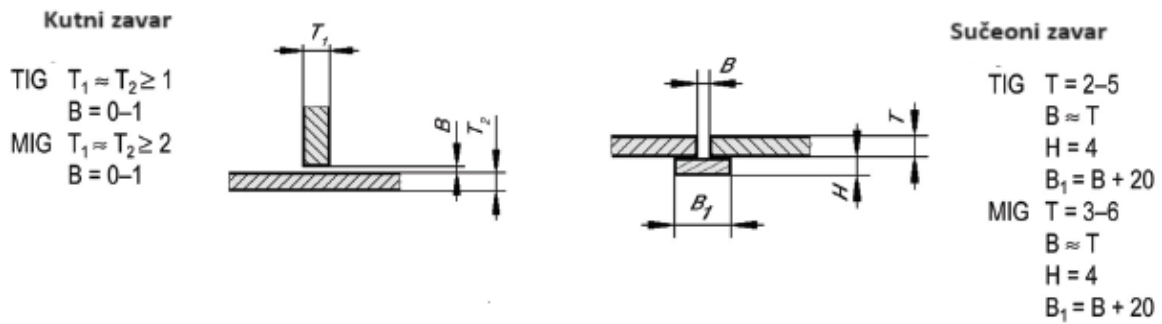
1. Na predmetu koji se zavaruje treba dobro očistiti površinu i metalnom četkom od nehrđajućeg čelika skinuti površinu oksida gdje će se provesti zavarivanje. Također, treba dobro očistiti i odmastiti elektrodu (žicu).

Slika 22. prikazuje očišćenu površinu gdje će se provesti zavarivanje.



Slika 22. Očišćena površina gdje će se zavarivati [21]

2. Ukoliko se radi o zavarivanju u sučeonom položaju, obavezno je koristiti podlogu kako bi se talina što prije skrutila. Materijal podloge mogu biti CrNi čelik, bakar ili aluminij. Slika 23. prikazuje kutni i sučeoni spoj, te parametre za TIG ili MIG postupak zavarivanja.



Slika 23. Prikaz kutnog i sučeonog spoja [32]

3. Smjer zavarivanja je s desno na lijevo, a gorionik se drži pod kutom $75 - 80^\circ$ suprotno od smjera zavarivanja, a razlog tome je bolji učinak čišćenja oksida.

Slika 24. prikazuje crni zavar, koji nastaje prilikom zavarivanja u krivom smjeru od propisanog.



Slika 24. Krivi smjer zavarivanja (crni zavar) [21]

4. Za zaštitnu atmosferu preporučuje se čisti argon (99,99 %). Potreban protok plina je za manje struje (tanji materijali) oko 10 l/min, dok je za jače struje i štrcajući luk protok od 12 do 22 l/min [21].

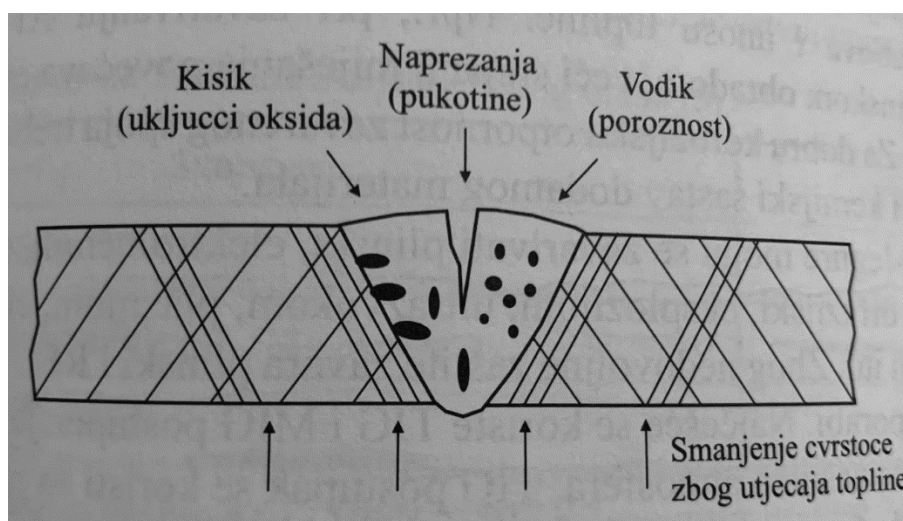
5. TOPLINSKE, MEHANIČKE I MIKROSTRUKTURNE POJAVE U ZAVARUALUMINIJSKIH LEGURAMA

5.1. Greške u zavarima

Prilikom zavarivanja bilo kojeg metala, a tako i aluminijskih i njegovih legura, dolazi do toplinskih, mehaničkih i mikrostrukturnih pojava u materijalu zavara i oko njega te pojave grešaka. Na stvaranje grešaka utječu razni faktori kao što su kemijski sastav osnovnog i dodatnog materijala, brzina i parametri zavarivanja, odabir prikladne tehnologije zavarivanja, ljudski faktor, iskustvo zavarivača, okolišni uvjeti, itd.

Najznačajnija toplinsko – mikrostrukturna pojava u zavaru je nastanak zone utjecaja topline (ZUT) oko zavara. Mehaničke pojave u zavaru obuhvaćaju nastanak zaostalih napreznja, pukotina i poroznosti. Najznačajnije mikrostrukturne pojave u zavaru obuhvaćaju nastanak i izlučivanje novih faza poput intermetalnih spojeva i uključaka.

Slika 25. prikazuje najčešće greške koje se javljaju pri zavarivanju aluminijskih legura.

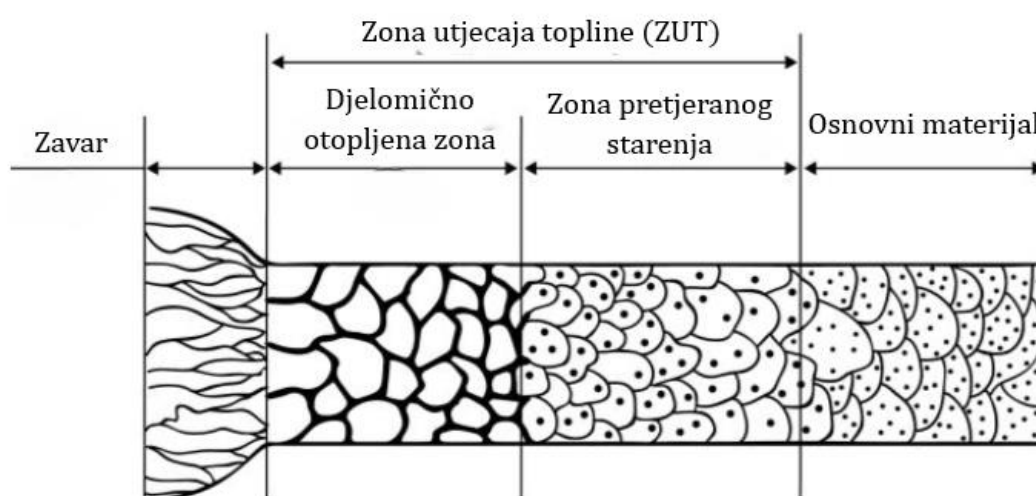


Slika 25. Shematski prikaz najčešćih grešaka zavara kod Al legura [13]

5.2. Zona utjecaja topline

Zona utjecaja topline (ZUT) se stvara u blizini zone zavarivanja i rezultira smanjenjem mehanička svojstva u ZUT-u i mikrostrukturne promjene koje uzrokuju gubitak tvrdoće u ZUT-u. Ova degradacija svojstava je uzrokovana mikrostrukturnim promjenama povezanim s povišenim temperaturama u ovoj zoni. Tijekom zavarivanja metal u blizini zone taljenja izložen je toplini, a zona utjecaja topline (ZUT) kao izotermna zona može se podijeliti na dvije podzone

(Slika 26.). Prva podzona koja je bliže zavaru je zona više temperature i naziva se djelomično otopljena zona. U ovoj zoni mikrostruktura materijala ima tendenciju starenja na prirodan način. Druga podzona koja je bliže osnovnom materijalu je zona niže temperature i naziva se zona pretjeranog starenja. Ova zona izložena je različitim temperaturama gdje dolazi do fenomena starenja i prekomjernog starenja. Temperatura ZUT-a definirana je između dvije dobro definirane temperature, tj. temperature umjetnog starenja legure i temperature taljenja legure. Uobičajena metoda za određivanja širine i opsega ZUT-a je mjerenje tvrdoće u ovoj zoni.



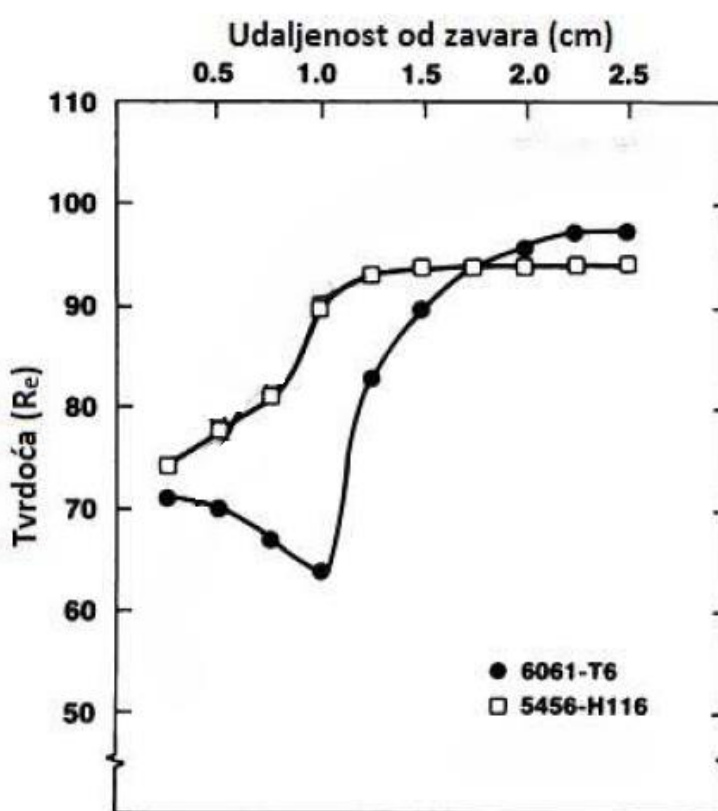
Slika 26. Zona utjecaja topline [26]

ZUT zavarenih spojeva kod toplinski obradivih legura značajno se razlikuje od toplinski neobradivih legura. U toplinski obradivim legurama čvrstoća ZUT-a može biti znatno slabija ako se koristi prekomjeran unos topline. Kod toplinski obradivih aluminijskih legura, ZUT se ističe po otapanju ili rastu precipitata. Glavna mikrostrukturalna promjena kod aluminijskih legura serije 6XXX je rast precipitata u ZUT-u. Na smanjenje promjena u ZUT-u kod toplinski obradivih legura moguće je utjecati većim brojem prolaza kod zavarivanja, kontrolom temperature između prolaza i izbjegavanjem predgrijavanja. Najveće čvrstoće zavara kod toplinski obradivih legura postiže se kada temperature između prolaza ne prelaze 65 °C i kada je unos topline prilikom zavarivanja sveden na minimum.

Kod toplinski neobradivi legura učinkovitost zavarivanja je veća, jer se u ZUT-u ne pojavljuje otapanje ili izlučivanje precipitata. Time se izbjegava potreba za debelim spojevima ili

toplinskom obradom nakon zavarivanja i daje se prednost upotrebi zavarenih konstrukcija u zavarenom stanju. Kod zavarivanja toplinski neobradivih legura u ZUT-u nastaju mikrostrukturna oštećenja. Za razliku od toplinski obradivih legura gdje se u ZUT-u precipitati za očvršćenje otope ili rastu, kod toplinski neobradivih legura očvršćenje u ZUT-u ograničeno je na obnavljanje, rekristalizaciju ili pogrubljenje zrna. Prema tome, gubitak čvrstoće u ZUT-u nije ni približno tako ozbiljan kao onaj koji se javlja kod toplinski obradivih legura [26][27].

Slika 27. prikazuje tvrdoću u ZUT-u kod aluminijskih legura serije 5XXX i 6XXX pri konstantnom unosu topline.



Slika 27. Prikaz tvrdoće u ZUT pri konstantnom unosu topline [27]

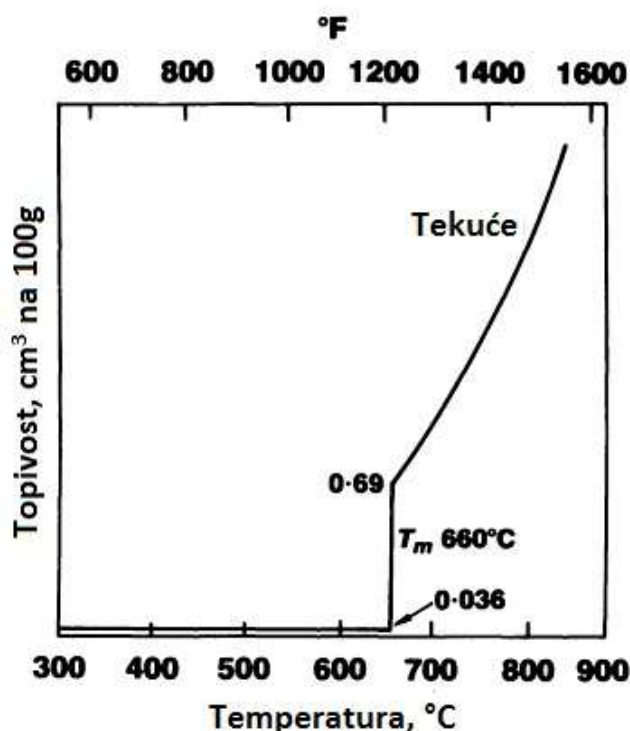
5.3. Mehaničke pojave u zavaru

5.3.1. Poroznost zavara

Poroznost je jedna od najzastupljenijih grešaka u zavarenom spoju, a nastaje kada plin vodik ostaje zarobljen tijekom skrućivanja. Poroznost se pojavljuje zbog mjehurića vodika (iz atmosfere, vlaga u sloju Al_2O_3 s osnovnog ili dodatnog materijala, naglo smanjenje topivosti vodika u krutom stanju), ali i zbog Mg i Zn koji lako isparavaju pri visokim temperaturama

zavarivanja. Dakle, poroznost u zavarivanju može smanjiti žilavost, zamor materijala i duktilnost u zavarenom spoju, ali i uzrokovati promjene u mikrostrukturi čime se direktno narušavaju mehanička svojstva zavarenog spoja. Vodik ima visoku topljivost u rastaljenom aluminiju i nisku topljivost u krutini.

Slika 28. prikazuje topivost vodika u čistom aluminiju na temperaturama koje predstavljaju kruto i tekuće stanje.



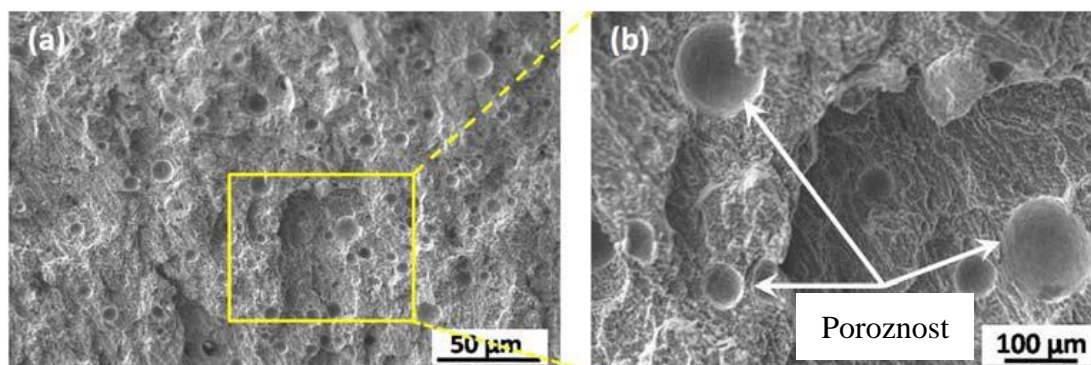
Slika 28. Topivost vodika u čistom aluminiju [27]

Mikroporoznost nastaje zbog dva mehanizma, poroznosti skupljanja uzrokovane skupljanjem tijekom procesa skrućivanja taline i plinske poroznosti uzrokovane hvatanjem zraka i neotopljenog vodika. Na stvaranje pora kod mikroporoznosti utječe plin H_2 i skupljanje materijala pri hlađenju. Poroznost može utjecati na rast mikrostrukture, dok mikroporoznost ne utječe na formiranje mikrostrukture. Mikroporoznost može uzrokovati smanjenu vlačnu čvrstoću i umor materijala. Veličina mikroporoznosti općenito je manja od 5 mm.

Makroporoznost ima veličinu iznad 5 mm. Makroporoznost može uzrokovati greške u zavarivanju koje rezultiraju smanjenom čvrstoćom zavarenog spoja. Makroporoznost uzrokuje nedovoljni dovod rastaljenog metala da se kompenzira volumensko skupljanje povezano s transformacijom krute faze u tekuću. Velika topljivost vodika uzrokuje makroporoznost.

Makroporoznost se može smanjiti ako se kontrolira sadržaj vodika, brzina protoka zraka i sobna temperatura [13][28].

Slika 29. prikazuje primjer poroznosti u zavarenom spoju.



Slika 29. Poroznost u zavarenom spoju [28]

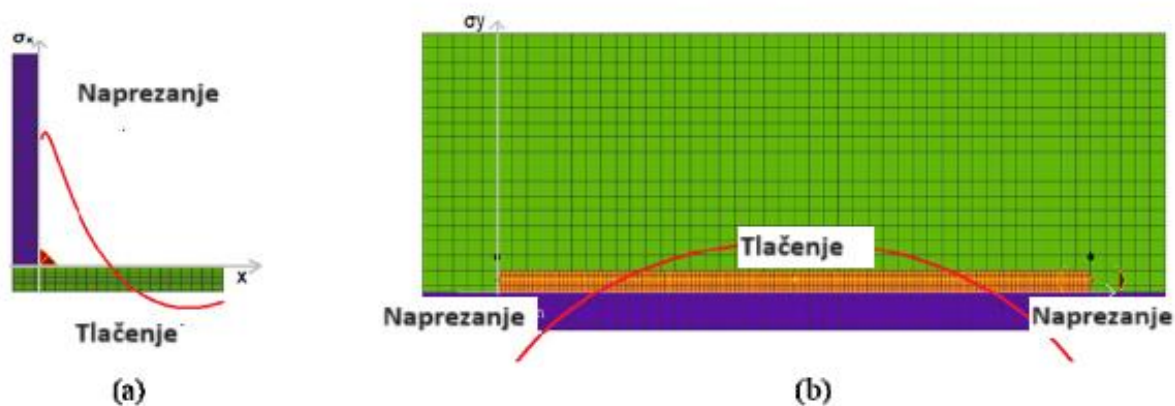
Na količinu poroznosti u zavarenom spoju utječu parametri zavarivanja i položaj zavarivanja. Prikladna brzina zavarivanja važan je parametar koji utječe na smanjenje otopljenog vodika u području zavara, čime se smanjuje poroznost zavarenog spoja. Pri manjim brzinama zavarivanja dolazi do sporijeg skrućivanja što omogućuje lakši izlazak mjehurića plina iz zavara. Najmanju poroznost stvara vertikalni položaj zavarivanja prema gore, pošto mjehurići plina najjednostavnije mogu izaći. Nadglavno zavarivanje stvara najveću količinu poroznosti i to posebno u korijenu zavara. Kod MIG zavarivanja potrebno je koristiti kvalitetni dodatni materijal i pravilno ga skladištiti kako bi se smanjila poroznost [27][28].

5.3.2. Zaostala naprezanja u zavaru

Jedna od najčešćih tehnika zavarivanja aluminijskih legura je MIG zavarivanje, koje nudi prednosti poput dubokog prodiranja, glatkog zavarivanja, velike brzine zavarivanja, velike količine taloženja dodatnog metala, manje prskanja, manje izobličenja i skupljanja, i manje vjerojatnost od poroznosti i pojave mjehura i uključaka u talini. Ovaj proces, zbog visokih temperatura, uzrokuje termomehaničko izobličenje i stvaranje zaostalih naprezanja, što može dovesti do prijevremenog kolapsa zavarene konstrukcije. Zaostala naprezanja igra važnu ulogu u nastanku i širenju pukotine u metalnim dijelovima. Zaostala naprezanja su ona naprezanja koja ostaju nakon deformacije s uklanjanjem svih vanjskih sila, a javljaju se u materijalima i mehaničkim komponentama tijekom proizvodnje iz mnogih procesa kao što su plastična deformacija ili oblikovanje, procesi strojne obrade ili zavarivanja, između ostalog. Stanje

zaostalog naprezanja ovisi o prethodnim procesima kroz koje je materijal bio podvrgnut i o svojstvima materijala koji se odnose na mehanički proces. Kod posebnih slučajeva procesa zavarivanja, zaostala naprezanja uzrokovana su primjenom intenzivnog toplinskog opterećenja na zavarenom spoju, što uzrokuje pojavu plastične deformacije materijala neposredno uz zavareni spoja, dok hladniji materijal oko zavara ostaje u stanju elastične deformacije i ograničava širenje materijala zavarenog spoja. Plastične deformacije koje nastaju kao rezultat ovih naprezanja dovode do zaostalih naprezanja u materijalu nakon što se temperature vrate na razinu okoline. U procesu zavarivanja, vlačna i tlačna naprezanja mogu nastati duž lima i duž zavarenog ruba [29].

Slika 30. prikazuje tipičnu raspodjelu uzdužnih (a) i poprečnih (b) zaostalih naprezanja u zavarenim spojevima.



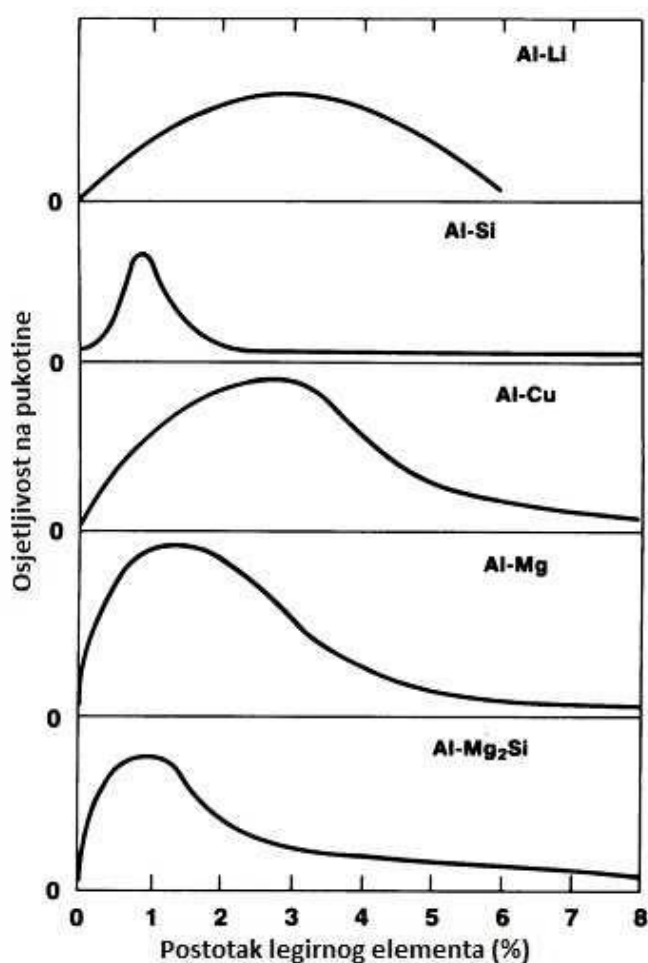
Slika 30. Zaostala naprezanja u zavarenim spojevima [29]

5.3.3. Pukotine u zavaru

Pukotine kod zavarivanja aluminijski legura nastaju zbog velikog toplinskog širenja aluminija, velike promjene volumena nakon skrućivanja i širokog raspona temperatura skrućivanja. Toplinski obradive legure posebno su osjetljive na pukotine zbog velike količine legirajućih elemenata u kemijskom sastavu. Pukotine u zavarenim spojevima u aluminijskim legurama mogu se podijeliti u dvije osnovne kategorije na temelju mehanizma koji je odgovoran za pucanje i lokacije pukotine. Pukotine uslijed skrućivanja odvijaju se unutar zone taljenja zavara i obično se pojavljuju duž središta zavara ili na završnim kraterima. Likvacijske pukotine pojavljuju se uz zonu fuzije i mogu, ali i ne moraju biti odmah vidljive.

Tople ili (solidifikacijske) pukotine, nastaju uslijed visokih toplinskih rastezanja i sakupljanja tijekom skrućivanja taline. Kombinacija mehaničkih, toplinskih i mikrostrukturnih faktora utječe na tople pukotine kod svih aluminijski legura. Tople pukotine nastaju u talini, a na njih utječe sastav dodatnog materijala i parametri zavarivanja. Veliki unos topline, zbog velike jakosti struje zavarivanja i male brzine zavarivanja, pridonosi pucanju zavara prilikom skrućivanja. Glavni način za sprječavanje pojava pukotina u zavarima aluminijskih legura je upravljanje sastavom metala zavara korištenjem odgovarajućeg dodatnog materijala.

Slika 31. prikazuje utjecaj legirnih elemenata na nastanak pukotina u zavaru.



Slika 31. Utjecaj legirnih elemenata na nastanak pukotina u zavaru [27]

S ciljem smanjenja osjetljivost na pojavu pukotina prilikom odabira dodatnog materijala najčešće se koriste krivulje za binarni sustav materijala. Kod legura s većim udio legirnih elemenata (npr. Al-Zn-Mg-Cu, Al-Mg-Si-Cu i Al-Cu-Mg), mali dodaci pojedinih elemenata mogu znatno utjecati na osjetljivost prema pukotinama tako što proširuju raspon temperatura

kod kojih se ostvaruje koherentna struktura skrućivanja. Slika 32. prikazuje navedeni učinak.

U svim slučajevima krivulje pokazuju značajni učinak na osjetljivost prema pojavi pukotina dodavanjem manjih količina legirnih elemenata, kao što su bakar ili magnezij. Povećana osjetljivost na pojavu pukotina također se postiže prilikom zavarivanja različitih aluminijskih legura, poput serije 2XXX sa serijom 5XXX [27].



Slika 32. Osjetljivost na stvaranje pukotina aluminijskih legura sa više legirnih elemenata [27]

6. PLAN POKUSA I PRIPREMA UZORAKA

6.1. Izbor materijala i parametara zavarivanja pokusa

Zadatak eksperimentalnog dijela rada je provedba i karakterizacije mikrostrukture zavarenog spoja aluminijskih legura EN AW 5083 – H321 i EN AW 6082 – T651. Za provedbu ispitivanja mikrostrukture zavara tijekom izrade rada bili su dostupni samo sučeoni zavareni spojevi, dok T – spojevi (kutni) nisu bili realizirani. S aspekta utvrđivanja utjecajnih toplinskih, mehaničkih i mikrostrukturnih pojava i ocjenu kvalitete zavara postupcima DC – MIG i AC – MIG zavarivanja, analiza sučeonih zavara daje dovoljno informacija koje se u budućim ispitivanjima mogu primijeniti i na T – zavare.

Zavarivanje ispitnih uzoraka provedeno je konvencionalnim DC MIG – P i suvremenim AC MIG – P postupkom zavarivanja kao dio preliminarnih istraživanja na HRZZ projektu **IP-2022-10-9298: Pouzdane metode za proračun aluminijskih konstrukcija koje odgovaraju zahtjevima budućnosti.**

Osim izbora aluminijske legure i postupka zavarivanja, u pokusima je varirana i debljina lima.

Debljine zavarenih limova ispitnih uzoraka i legura bile su sljedeće:

- $d = 6 \text{ mm}$ (EN AW 6082 – T651)
- $d = 8 \text{ mm}$ (EN AW 5083 – H321)
- $d = 10 \text{ mm}$ (EN AW 5083 – H321 , EN AW 6082 – T651)

Na zavarenim limovima provedene usporedbe mikrostrukture zavara od iste legure proizvedene postupkom DC – MIG – P odnosno AC – MIG – P. Zavarivanje uzorka je provedeno u Laboratoriju za zavarivanje na fakultetu strojarstva i brodogradnje.

Tablica 8. prikazuje parametre zavarivanja postupcima DC – MIG – P i AC – MIG – P.

Tablica 8. Parametri zavarivanja

Parametar	AC – MIG – P	DC – MIG – P
Napon (U)	28 V	31 V
Struja (I)	200 A	250 A
Brzina zavarivanja (v_{zice})	16,6 m/min	16,6 m/min
Protok zaštitnog plina (q_p)	21 L/min	21 L/min

Nakon zavarivanja ispitni uzorci su izrezani iz zavarenih limova te metalografski brušeni i polirani. Nakon poliranja provedeno je nagrivanje mikrostrukture u vodenoj otopini sljedećeg kemijskog sastava: 15 ml HCl, 10 ml HF, 85 ml H₂O u trajanju od 30 s. Nakon nagrivanja uzorci su isprani destiliranom vodom i osušeni na zraku.

Slika 33. prikazuje postupak nagrivanja uzoraka.



Slika 33. Nagrivanje uzoraka

6.2. Oznake uzoraka

Oznaka pojedinog ispitnog uzoraka zavara je definirana tako da je prvo naveden redni broj uzorka, potom postupak zavarivanja, oznaka legure i na kraju debljina lima.

U donje četiri tablice navedeni su i međusobno uspoređeni uzorci i njihove oznake.

Tablica 9. Zavari legure EN AW 6082-T651 na limu debljine 6 mm

Oznaka	Uzorak	Postupak zavarivanja	Legura	Debljina
Z6-DC-6X-6	Z6	DC – MIG – P	EN AW 6082-T651	d = 6 mm
Z8-AC-6X-6	Z8	AC – MIG – P	EN AW 6082-T651	d = 6 mm

Tablica 10. Zavari legure EN AW 5083-H321 na limu debljine 8 mm

Oznaka	Uzorak	Postupak zavarivanja	Legura	Debljina
Z13-DC-5X-8	Z13	DC – MIG – P	EN AW 5083-H321	d = 8 mm
Z15-AC-5X-8	Z15	AC – MIG – P	EN AW 5083-H321	d = 8 mm

Tablica 11. Zavari legure AW 6082-T651 na limu debljine 10 mm

Oznaka	Uzorak	Postupak zavarivanja	Legura	Debljina
Z1-DC-6X-10	Z1	DC – MIG – P	EN AW 6082-T651	d = 10 mm
Z4-AC-6X-10	Z4	AC – MIG – P	EN AW 6082-T651	d = 10 mm

Tablica 12. Zavari legure EN AW 5083-H321 na limu debljine 10 mm

Oznaka	Uzorak	Postupak zavarivanja	Legura	Debljina
Z9-DC-5X-10	Z9	DC – MIG – P	EN AW 5083-H321	d = 10 mm
Z12-AC-5X-10	Z12	AC – MIG – P	EN AW 5083-H321	d = 10 mm

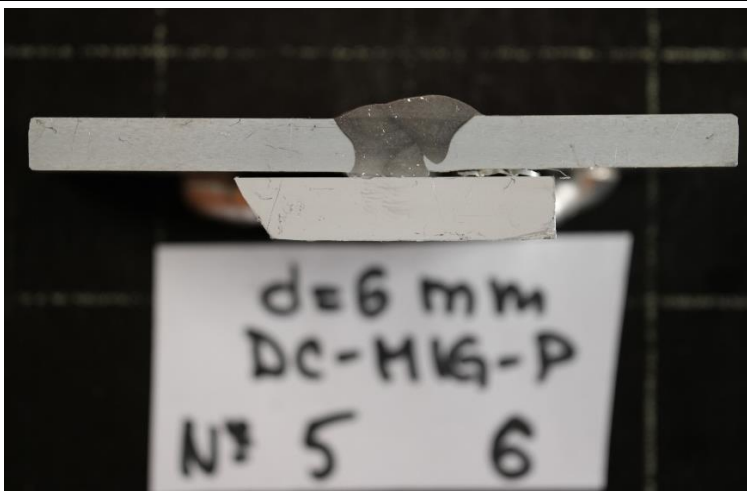
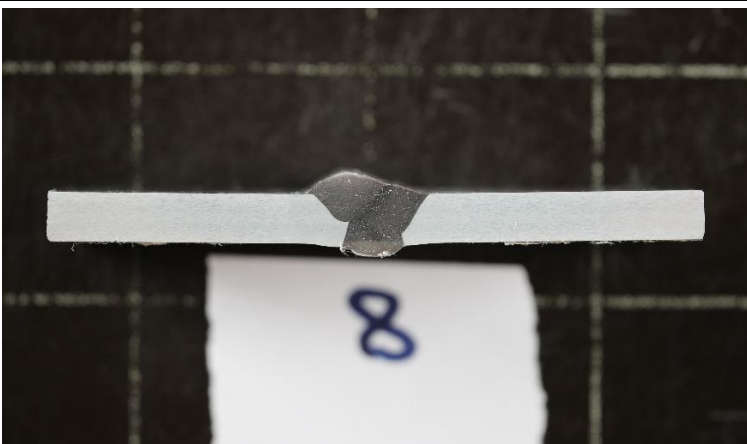
7. REZULTATI I DISKUSIJA

7.1. Makrosnimke zavarenih uzoraka

U sljedeće četiri tablice prikazane su makrosnimke ispitnih uzoraka grupirane prema planu analize.


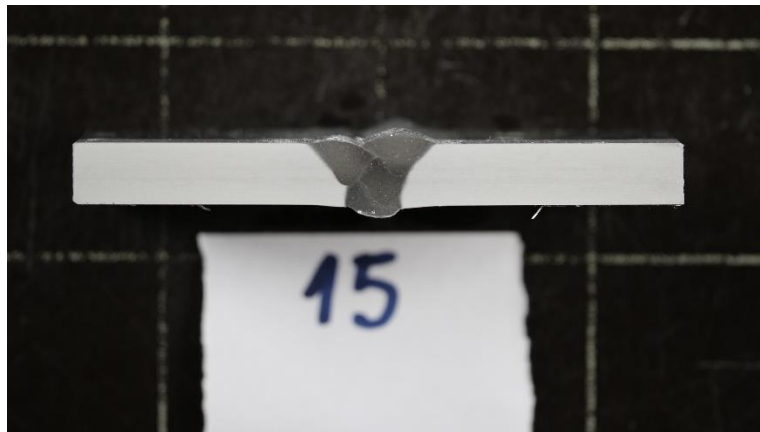
Tablica 13. prikazuje makrosnimke uzoraka zavara na limovima debljine 6 mm od legure EN AW 6082 – T651.

Tablica 13. Makrosnimke zavara na limovima od legure EN AW 6082-T651 debljine 6 mm

Z6-DC-6X-6	
Z8-AC-6X-6	


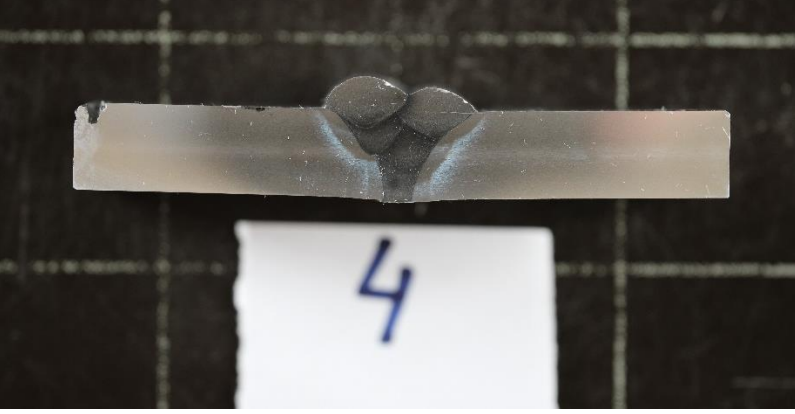
Tablica 14. prikazuje su makrosnimke uzoraka zavara na limovima debljine 8 mm od legure EN AW 5083 – H321.

Tablica 14. Makrosnimke zavara na limovima od legure EN AW 5083-H321 debljine 8 mm

Z13-DC-5X-8	
Z15-AC-5X-8	

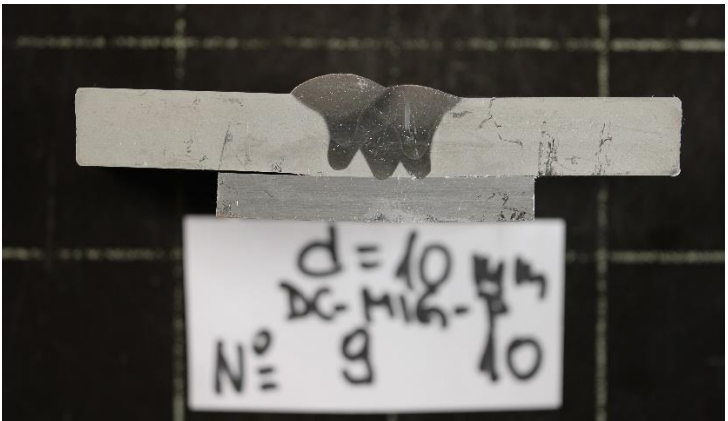
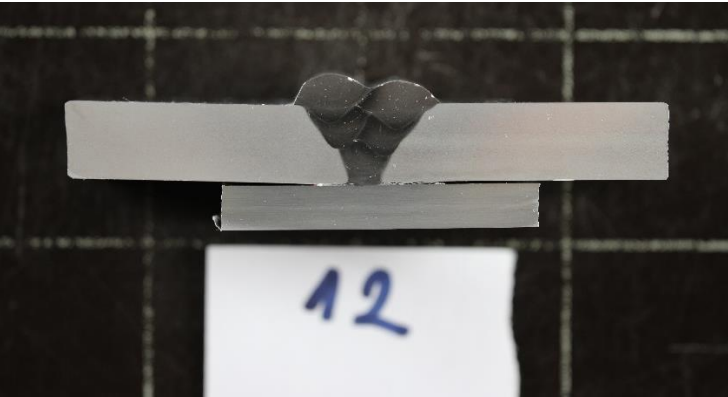
TTablica 15. prikazuje makrosnimke uzoraka zavara na limovima debljine 10 mm od legure EN AW 6082 – T651.

Tablica 15. Makrosnimke zavora na limovima od legure EN AW 6082-T651 debljine 10 mm

Z1-DC-6X-10	
Z4-AC-6X-10	

TTablica 16. prikazuje makrosnimke. uzoraka zavora na limovima debljine 10 mm legure EN AW 5083 – H321.

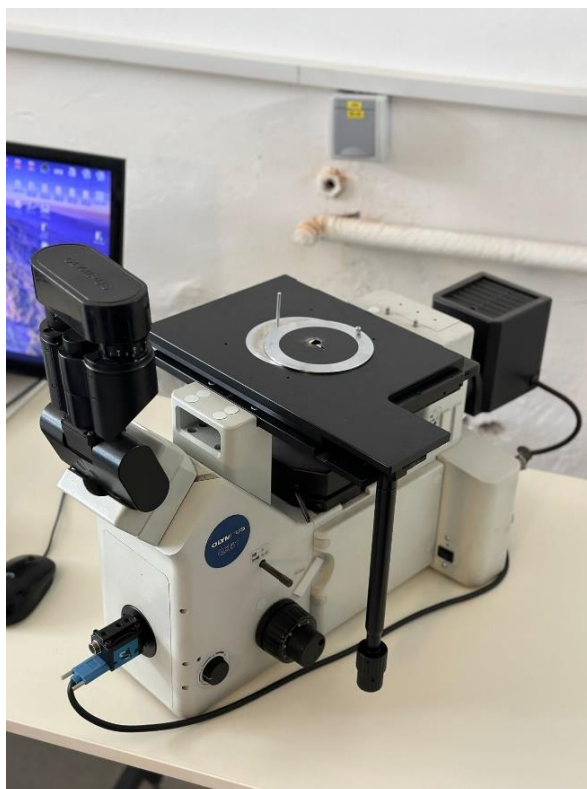
Tablica 16. Makrosnimke zavora na limovima od legure EN AW 5083-H321 debljine 10 mm

Z9-DC-5X-10	
Z12-AC-5X-10	

Na ispitnim uzorcima zavora nakon nagrizanja jasno se uočava materijal zavora i broj prolaza tijekom zavarivanja. Vizualnom analizom makrosnimki zavora ne uočavaju se makropukotine niti makroporoznosti. U svim zavarima proizvedenim postupkom DC – MIG – P uočava se miješanje dodatnog i osnovnoga materijala u korijenu zavora. Kod zavora proizvedenih postupkom AC – MIG – P korijen zavora je dobro popunjen i kompaktan bez značajnijeg miješanja s osnovnim materijalom.

7.2. Analiza mikrostrukture zavora

Analiza mikrostrukture zavora provedena je na svjetlosnom mikroskopu Olympus GX51 (Slika 34.) u Laboratoriju za materijalografiju na Fakultetu strojarstva i brodogradnje.



Slika 34. Svjetlosni mikroskop Olympus GX51

U sljedeće četiri tablice prikazana je mikrostruktura karakterističnih zona na ispitnim uzorcima zavara:

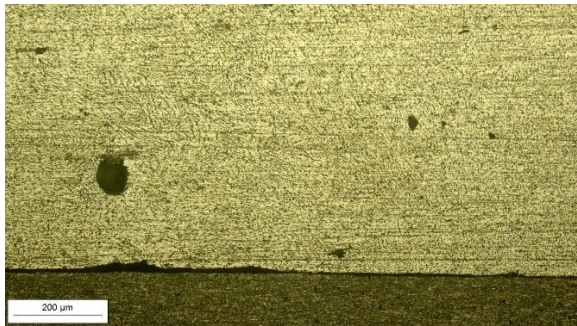
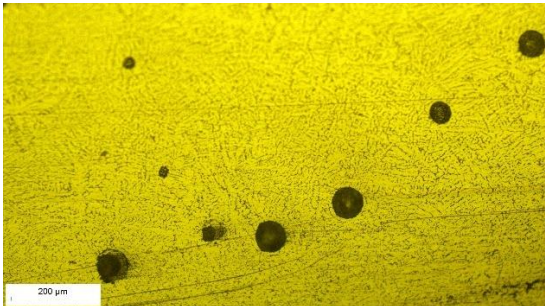
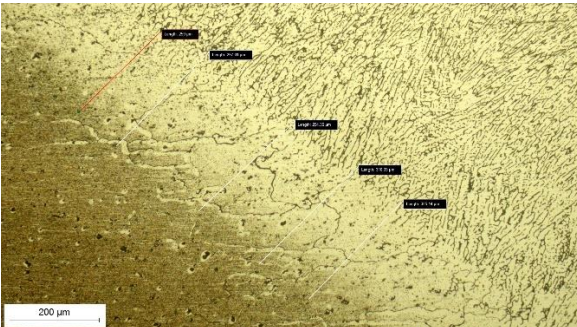


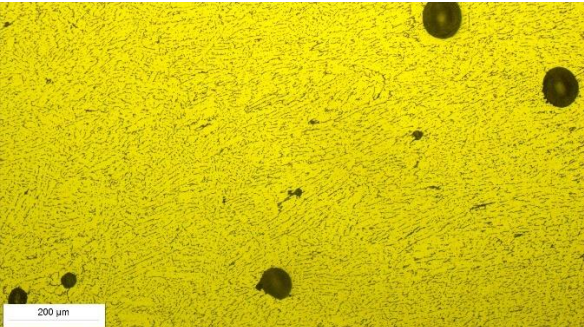
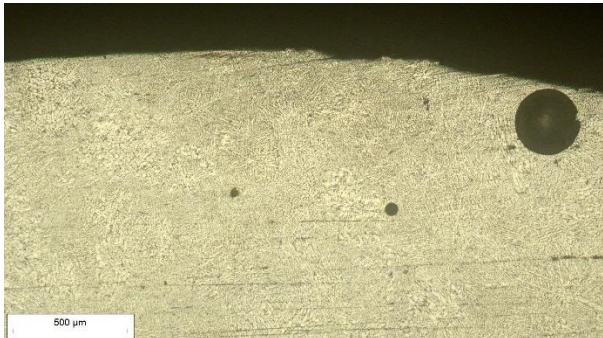
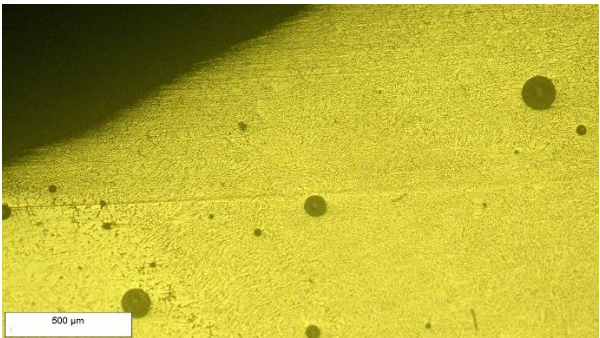
- Zona korijena zavara
- Zona utjecaja topline (ZUT)
- Sredina zavara
- Vrh zavara

U tablicama su uspoređene mikrostrukture zavara na istoj debljini lima, od iste aluminijeve legure proizvedene različitim postupcima: DC – MIG – P i AC – MIG – P.

Radi jasnijeg opisa uvedena je sljedeća klasifikacija veličine mjehurića zarobljenog plina u zavaru:

- mali i vrlo mali mjehurići – mjehurići promjera manjeg od 0,1 mm
- srednje veliki mjehurići – mjehurići promjera između 0,1 do 0,50 mm
- veliki mjehurići – mjehurići promjera između 0,5 do 1,50 mm
- vrlo veliki mjehurići – mjehurići promjera većeg od 1,5 mm.

Tablica 17. Analiza mikrostrukture uzoraka Z6-DC-6X-6 i Z8-AC-6X-6

Područje	Z6-DC-6X-6	Z8-AC-6X-6
Korijen zavara		
ZUT		
Sredina zavara		
Vrh zavara		


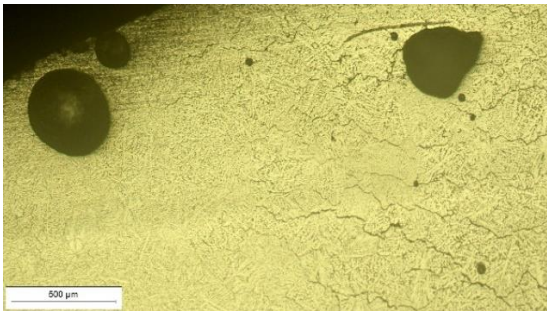
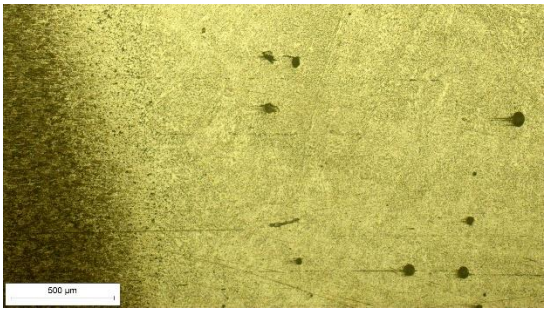
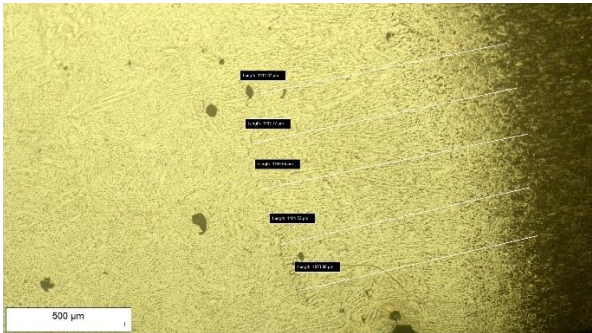



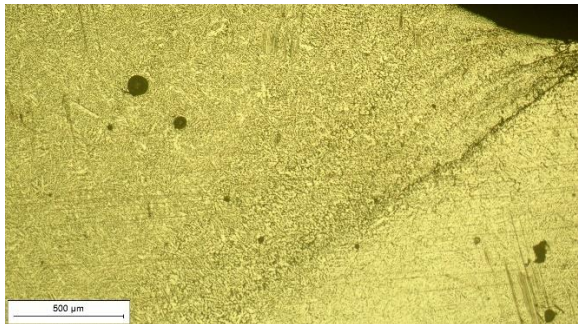
Usporedbom mikrostrukture na zavarima limova debljine 6 mm od legure EN AW 6082 – T651 u korijenu zavara na uzorku Z6-DC-6X-6 vidi se prisustvo jednog većeg mjehurića i nekoliko sitnijih. U korijenu zavara kod uzorka Z8-AC-6X-6 vidi se veće prisustvo mjehurića srednje veličine.

U području ZUT-a kod uzorka Z6-DC-6X-6 jasno se vide granice zrna. Kod oba uzorka jasno se vidi smjer skrućivanja i hlađenja taline, pri čemu je širina promjene mikrostrukture u ZUT-u veća kod uzorka Z8-AC-6X-6.

U sredini zavara kod uzorka Z6-DC-6X-6 prisutna je dendritna mikrostruktura koja se uobičajeno pojavljuje kod brzog skrućivanja taline dodatnog materijala u zavaru. U sredina zavara kod uzorka Z8-AC-6X-6 vidi se prisustvo mjehurića plina i nekoliko sitnih zrna intermetalnih spojeva.

U vrhu zavara kod uzorka Z6-DC-6X-6 i uzorka Z8-AC-6X-6 vidi se prisustvo mjehurića plina.

Tablica 18. Analiza mikrostrukture uzoraka Z13-DC-5X-8 i Z15-AC-5X-8

Područje	Z13-DC-5X-8	Z15-AC-5X-8
Korijen zavara		
ZUT		
Sredina zavara		
Vrh zavara		

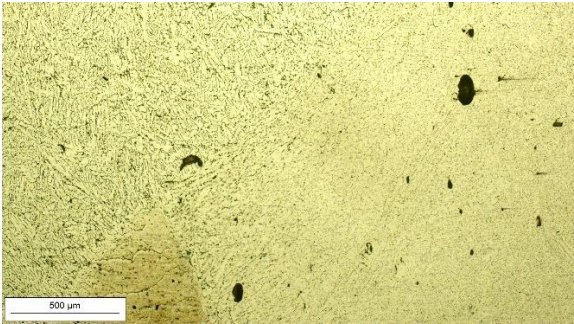
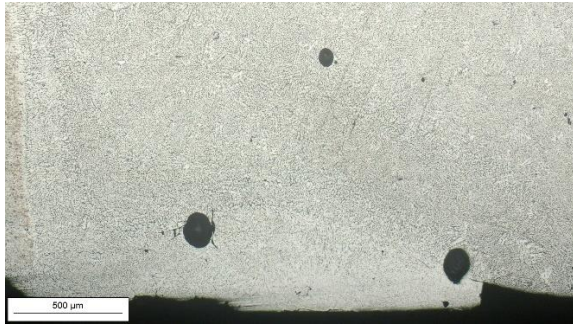
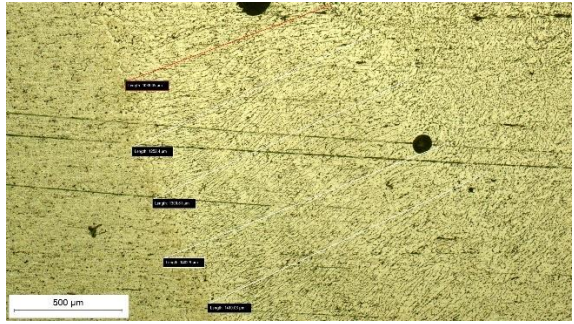
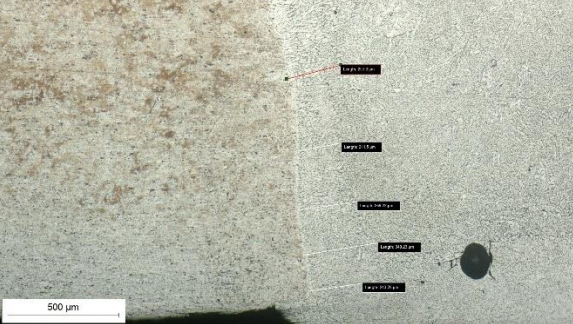
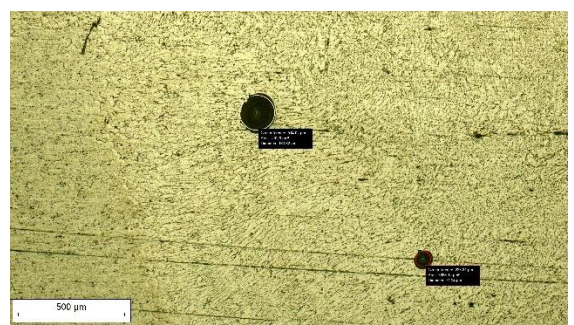

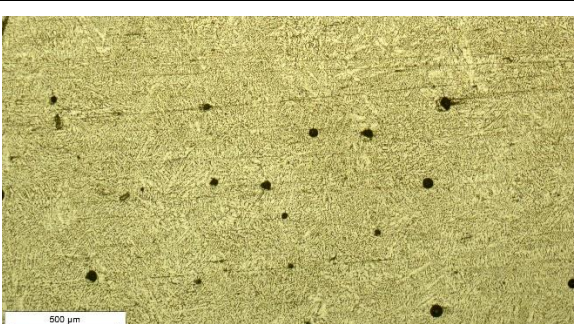

Usporedbom mikrostrukture na zavarima limova debljine 8 mm od legure EN AW 5083 – H321 u korijenu zavara kod uzorka Z13-DC-5X-8 jasno se vidi smjer skrućivanja taline, te je prisutan jedan manji mjehurić. U korijenu zavara uzorka Z15-AC-5X-8 vidi se prisustvo većih mjehurića i nastanak mikropukotina po granicama zrna.

Promjena izgleda mikrostrukture u području ZUT-a kod oba uzorka slične je širine. Također se na oba uzorka u osnovnom materijalu javlja pogrubljenje zrna i prisustvo intermetalnih spojeva.

U sredini zavara kod uzorka Z13-DC-5X-8 uočava se prisustvo mjehurića srednjih veličina, no vidi se da je prisutna i vertikalna pukotina uzrokovana mjehurićem zarobljenog plina. U sredini zavara kod uzorka Z15-AC-5X-8 prisutna je dendritično skrućena mikrostruktura (tipična za brzo skrućivanje metala zavara) u kojoj su kristali aluminijske eutektičke pomiješani s kristalima intermetalnih spojeva.

U vrhu zavara kod uzorka Z13-DC-5X-8 i uzorka Z15-AC-5X-8 vide se pukotine na samom spoju osnovnog materijala i zavara. Vrh zavara također je na oba uzorka skrućen dendritičnom mikrostrukturom.

Tablica 19. Analiza mikrostrukture uzoraka Z1-DC-6X-10 i Z4-AC-6X-10

Područje	Z1-DC-6X-10	Z4-AC-6X-10
Korijen zavara		
ZUT		
Sredina zavara		
Vrh zavara		

Usporedbom mikrostrukture na zavarima limova debljine 10 mm od legure EN AW 6082 – T651 uočava se da se kod uzorka Z1-DC-6X-10 pojavilo miješanje metala zavara i osnovnog metala. Također u korijenu zavara se nalazi prisustvo mjehurića i nekoliko zrna intermetalnih

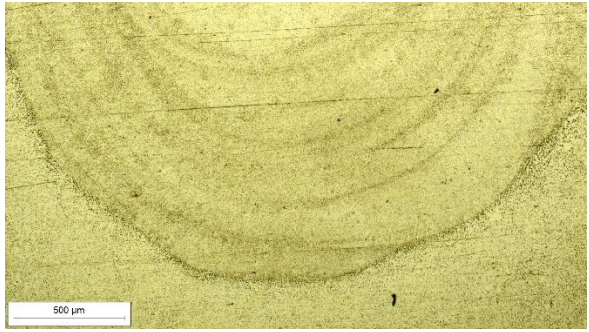

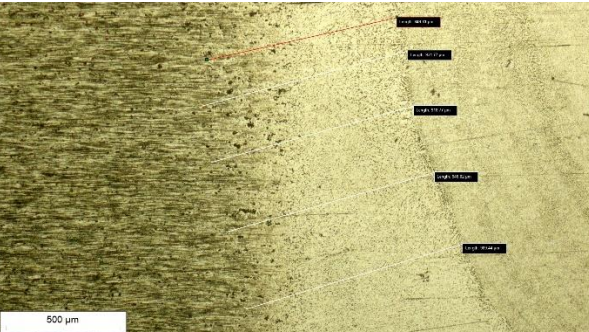
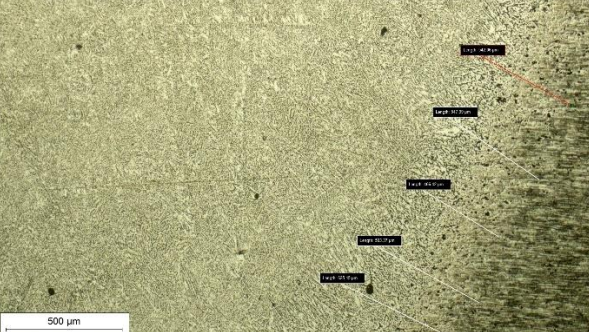

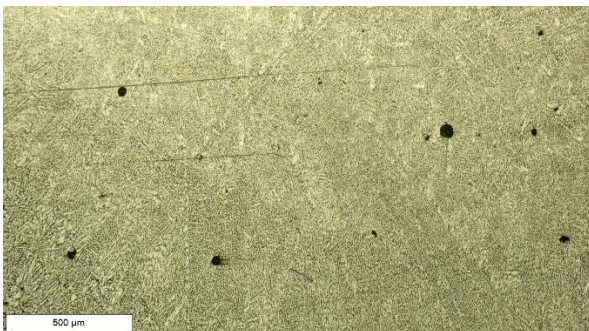


spojeva. U korijenu zavara kod uzorka Z4-AC-6X-10 vidi se prisustvo mjehurića, a kod najvećeg mjehurića su se počele stvarati mikropukotine.

Područje promijenjene mikrostrukture ZUT-a šire je kod uzorka Z1-DC-6X-10, nego kod uzorka Z4-AC-6X-10.

Sredina zavara kod oba uzorka je vrlo slične mikrostrukture s dendritično skrućenim zrnima aluminija i pomiješanim sa zrnima silicija i intermetalnih faza uz prisustvo nekoliko malih mjehurića.

Vrh zavara kod uzorka Z1-DC-6X-10 pokazuje izraženu dendritičnu mikrostrukturu s prisustvom puno malih mjehurića. Kod uzorka Z4-AC-6X-10 vidi se pukotina uzrokovana zaostalim mjehurom plina koji je izlazio iz zavara.

Tablica 20. Analiza mikrostrukture uzoraka Z9-DC-5X-10 i Z12-AC-5X-10

Područje	Z9-DC-5X-10	Z12-AC-5X-10
Korijen zavora		
ZUT		
Sredina zavora		
Vrh zavora		

Usporedbom mikrostrukture na zavarima limova debljine 10 mm od legure EN AW 5083 – H 321 uočava se da je u korijenu zavora na uzorku Z9-DC-5X-10 vrlo izražen smjer skrućivanja i hlađenja taline. Nema prisustvo pukotina, mjehurića niti šupljina. Korijen zavora uzorka Z12-

AC-5X-10 vrlo je sličan uzorku Z9-DC-5X-10, jedino nije toliko izražen smjer skrućivanja i hlađenja.

Promjena mikrostrukture u području ZUT-a šira je kod uzorka Z9-DC-5X-10, nego kod uzorka Z12-AC-5X-10, uz jasno vidljivo pogrubljenje zrna u osnovnom materijalu.

U sredini zavara kod uzorka Z9-DC-5X-10 vidi se prisustvo većih mjehurića. Kod uzorka Z12-AC-5X-10 u sredini zavara ima prisustvo manjih mjehurića.

Vrh zavara kod oba uzorka je slične mikrostrukture. Vidi se prisustvo manjih mjehurića i dendritično skrućena mikrostruktura.

7.3. Ispitivanje i analiza tvrdoće zavara

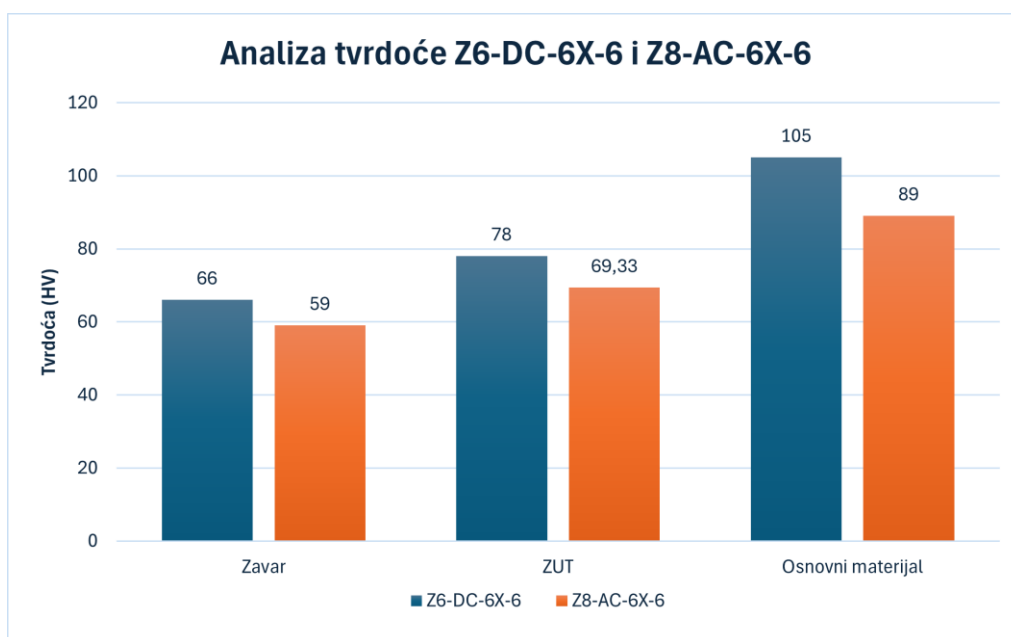
Ispitivanje tvrdoće provedeno je u laboratoriju za mehanička ispitivanja na Fakultetu strojarstva i brodogradnje na tri područja zavarenih uzorka, u osnovnom materijalu, u zavaru i u ZUT-u. Na svakom od tih područja dijagonalno je izmjereno tri otiska tvrdoće. Mjerenje tvrdoće provedeno je na tvrdomjeru Zwick/Roell (Slika 35.), prema metodi Vickers HV1.

Sve vrijednosti tvrdoće navedene su u prilogu rada.



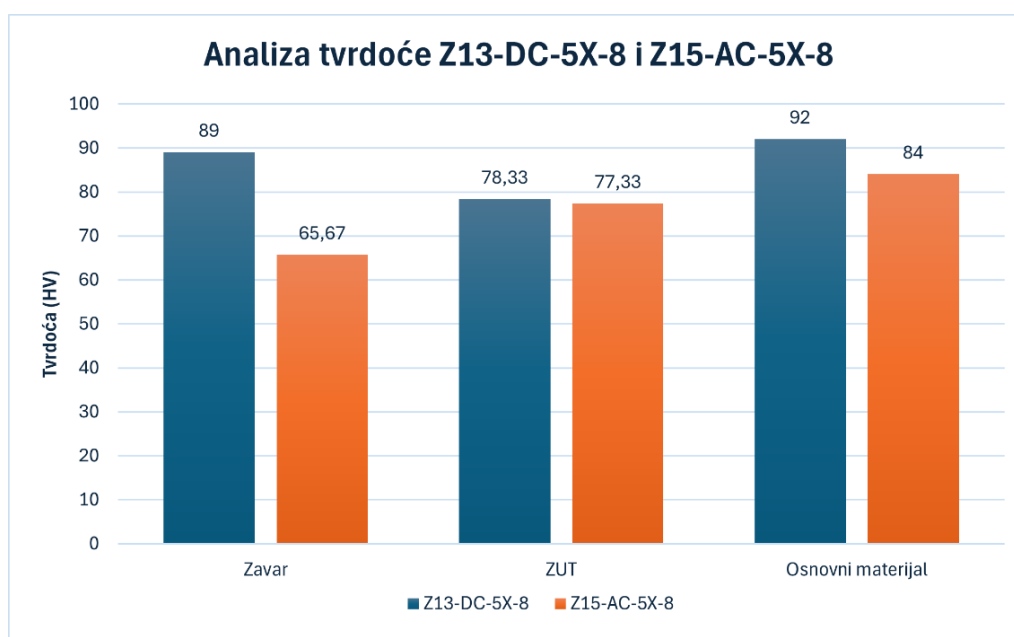
Slika 35. Tvrdomjer Zwick/Roell

Rezultati ispitivanja tvrdoće zavarenih uzoraka prikazani su na slikama 36. do 39.



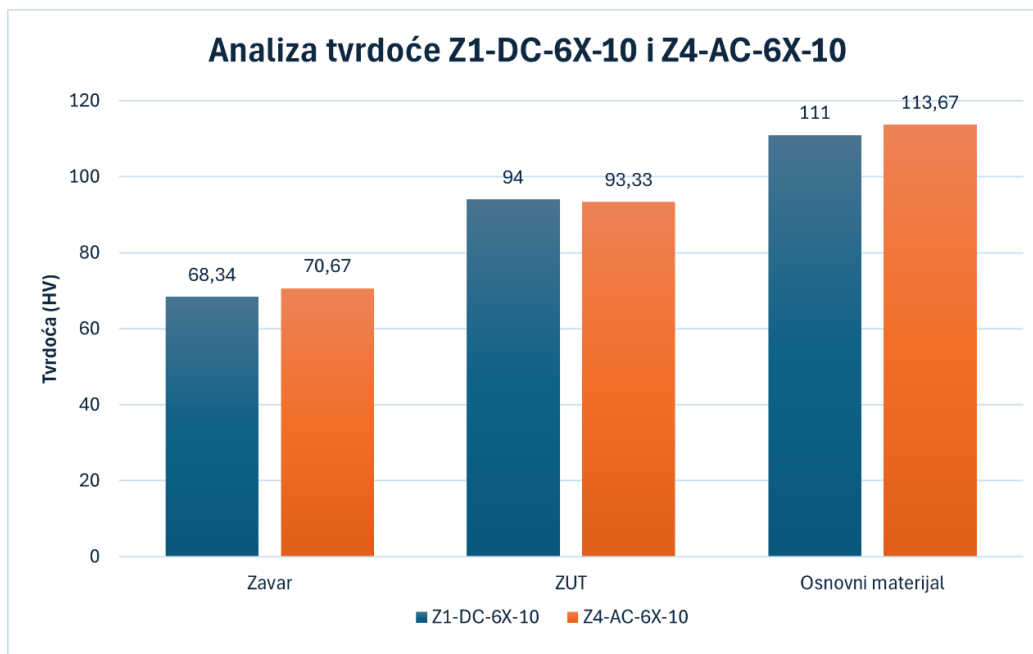
Slika 36. Analiza tvrdoće Z6-DC-6X-6 i Z8-AC-6X-6

Iz gornjeg dijagrama (Slika 36.) može se vidjeti da uzorak Z6-DC-6X-6 ima veću tvrdoću na sva tri područja mjerenja. Najznačajnija razlika u tvrdoći nastala je u području osnovnog materijala, međutim ona nije uzrokovana postupkom zavarivanja, već postupkom pripreme zavara i odstupanjima u svojstvima polaznog materijala.



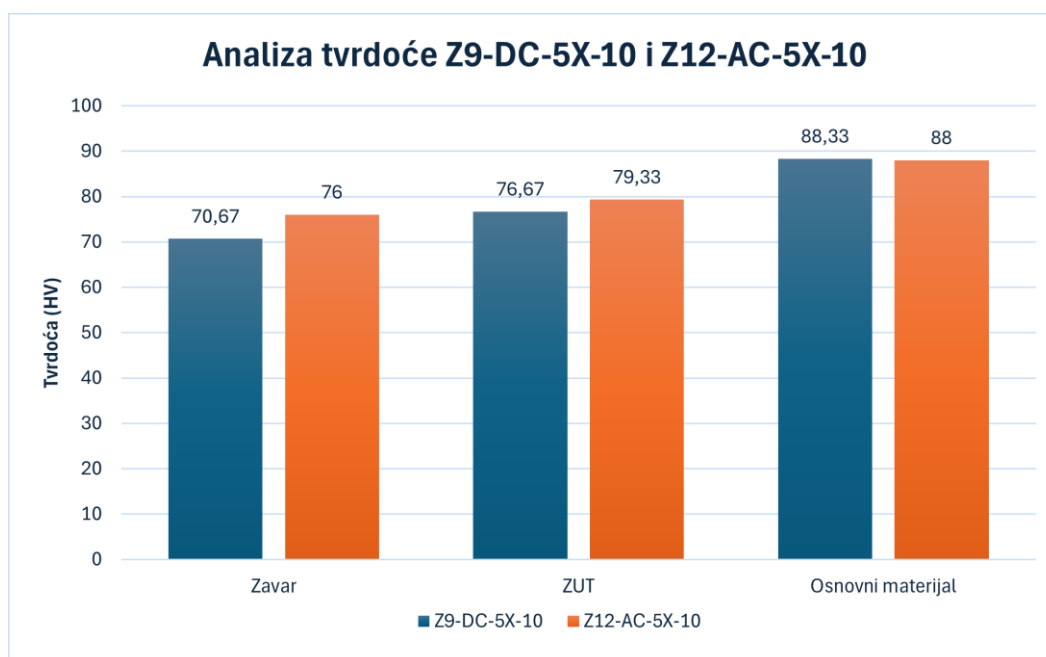
Slika 37. Analiza tvrdoće Z13-DC-5X-8 i Z15-AC-5X-8

Iz gornjeg dijagrama (Slika 37.) vidi da uzorak Z13-DC-5X-8 ima značajno veću tvrdoću u području zavora, dok je u području osnovnog materijala razlika u tvrdoći zanemariva. U ZUT-u oba uzorka imaju praktički jednaku tvrdoću.



Slika 38. Analiza tvrdoće Z1-DC-6X-10 i Z4-AC-6X-10

Iz gornjeg dijagrama (Slika 38.) vidi da uzorci Z4-DC-6X-10 i Z1-DC-6X-10 imaju praktički jednaku tvrdoću na sva tri područja mjerenja. Ipak, uzorak Z4-DC-6X-10 ima zanemarivo veću tvrdoću u području zavora, dok uzorak Z1-DC-6X-10 ima zanemarivo veću tvrdoću u području ZUT-a.



Slika 39. Analiza tvrdoće Z9-DC-5X-10 i Z12-AC-5X-10

Iz gornjeg dijagrama (Slika 39.) vidi da uzorak Z9-DC-5X-10 ima neznatno veću tvrdoću u području zavarera i ZUT-a. Oba uzorka su pokazala sličnu vrijednost tvrdoće u osnovnom materijalu.

Usporedbom rezultata srednjih vrijednosti tvrdoće prikazanih na slikama 36. do 39. zaključuje se sljedeće:

- Tvrdoća limova debljine 6 mm od legure EN AW 6082 – T651 razlikuje se na uzorcima zavarenim različitim postupcima. Tvrdoća u vrijednosti od 105 HV1 uobičajena je za precipitacijski očvršnuto stanje ove legure. Tvrdoća osnovnog materijala od 89 HV1 može se objasniti utjecajem zagrijavanja uzorka tijekom izrezivanja iz trake lima rezanjem plazmom, pri čemu je nastupila pojava žarenja i redukcije zaostalih naprezanja.
- Tvrdoća materijala zavarera slična je na svim ispitanim uzorcima (68 – 72 HV1), jer je materijal žice ER5356 koji formira zavar bio isti.
- Značajne razlike u tvrdoći između uzorka različitih aluminijskih legura nalaze se u ZUT-u. U zavarima na limovima od legure EN AW 6082 – T651 dolazi do prestarijevanja precipitacijski očvršćene mikrostrukture i smanjenja tvrdoće u odnosu na tvrdoću osnovnog metala za 15 – 20 %. U ZUT-u zavarima od legure EN AW 5083 – H321 pojavljuje se rekristalizacija deformacijom obrađene mikrostrukture i smanjenje zaostalih

naprezanja. Ove pojave smanjuju tvrdoću ZUT-a u odnosu na osnovni materijal za 10 – 15 %.

- Razlike u vrijednostima tvrdoće zavara i ZUT-a na istoj leguri i debljini limova nisu značajno ovisne o postupku zavarivanja te iznose manje od 5 %.

8. ZAKLJUČAK

Na temelju provedenog eksperimentalnog djela i analize rezultata, doneseni su sljedeći zaključci:

- Prilikom procesa zavarivanja konvencionalnim postupkom DC – MIG ili suvremenim AC – MIG greške u zavarenom spoju su neizbježne. Greške mogu biti toplinske, mehaničke ili mikrostrukturne prirode. Cilj je postići zavar s što manje grešaka, pošto one bitno utječu na mehanička svojstva zavara. Također, pri zavarivanju treba uzeti u obzir i debljinu materijala, pošto i ona znatno utječe na zavarivanje i mehanička svojstva zavara. Najčešća greška je poroznost koja nastaje kada plinski mjehurić ostane zarobljen u materijalu. Upravo iz ove greške postoji velika tendencija nastanka nove, a to su mikropukotine i pukotine. Područje ZUT-a je neizbježno u procesu zavarivanja i uzrokuje veliko narušavanje mehaničkih svojstva, a pogotovo smanjenje tvrdoće.
- Analizom mikrostrukture zavara na uzorcima Z6-DC-6X-6 i Z8-AC-6X-6 debljine 6 mm legure EN AW 6082-T651 možemo zaključiti sljedeće.

Kod uzorka Z6-DC-6X-6 zavarenim DC – MIG postupkom, mikrostruktura zavara u području korijena zavara, ZUT-a, sredine zavara i vrha zavara je s puno manje grešaka, nego kod uzorka Z8-AC-6X-6 zavarenim AC – MIG postupkom.

Analizom tvrdoće, vidi se veća tvrdoća u području zavara i ZUT-a kod uzorka Z6-DC-6X-6, nego kod uzorka Z8-AC-6X-6.

Zavarivanje legure EN AW 6082-T651 debljine 6 mm bolje je izvedeno postupkom DC – MIG.

- Analizom mikrostrukture zavara na uzorcima Z13-DC-5X-8 i Z15-AC-5X-8 debljine 8 mm legure EN AW 5083-H321 možemo zaključiti sljedeće.

Kod uzorka Z13-DC-5X-8 zavarenim DC – MIG postupkom, mikrostruktura zavara u području korijena zavara i vrha zavara je s manje grešaka, dok uzorak Z15-AC-5X-8 zavarenim AC – MIG postupkom, ima manje grešaka u području ZUT-a i sredine zavara.

Analizom tvrdoće, vidi se veća tvrdoća u području zavara kod uzorka Z13-DC-5X-8, nego kod uzorka Z15-AC-5X-8. To povećanje može se pripisati većoj tvrdoći u osnovnom materijalu uzorka Z13-DC-5X-8. Tvrdoća u području ZUT-a je ista kod oba uzorka.

Zavarivanje legure EN AW 5083-H321 debljine 6 mm podjednako dobro je izvedeno postupkom DC – MIG i AC – MIG.

- Analizom mikrostrukture zavara na uzorcima Z1-DC-6X-10 i Z4-AC-6X-10 debljine 10 mm legure EN AW 6082-T651 možemo zaključiti sljedeće.

Kod uzorka Z1-DC-6X-10 zavarenim DC – MIG postupkom, mikrostruktura zavara u području krojena zavara i ZUT- je s puno manje grešaka, dok uzorak Z4-AC-6X-10 zavaren AC – MIG postupkom ima manje grešaka u području sredine i vrha zavara.

Analizom tvrdoće oba uzorka imaju praktički jednake vrijednosti tvrdoće u području zavara i ZUT-a.

Zavarivanje legure EN AW 6082-T651 debljine 10 mm bolje je izvedeno postupkom DC – MIG.

- Analizom mikrostrukture zavara na uzorcima Z9-DC-5X-10 i Z12-AC-5X-10 debljine 10 mm legure EN AW 5083-H321 možemo zaključiti sljedeće.

Kod uzorka Z9-DC-5X-10 zavarenim DC – MIG postupkom, mikrostruktura zavara u području korijena zavara i vrha zavara ima više grešaka, u odnosu na uzorak Z12-AC-5X-10 zavaren AC – MIG postupkom. Uzorak Z12-AC-5X-10 ima relativno dobru mikrostrukturu na svim područjima uz neke sitne greške u području sredine i vrha zavara.

Analizom tvrdoće uzorak Z12-AC-5X-10 ima malo veću tvrdoću u području zavara i ZUT-a od uzorka Z9-DC-5X-10.

Zavarivanje legure EN AW 5083-H321 debljine 10 mm bolje je izvedeno postupkom AC – MIG.

LITERATURA

- [1] https://www.aluminiumleader.com/about_aluminium/what_is_aluminum/(pristup: 25.06.2024.)
- [2] <https://www.britannica.com/science/strontium>(pristup: 25.06.2024.)
- [3] <https://en.wikipedia.org/wiki/Aluminium>(pristup: 25.06.2024.)
- [4] S. Mridha; Reference Module in Materials Science and Materials Engineering, Metallic Materials; Elsevier Inc., 2016.
- [5] S. Mavinkere Rangappa, Sunita M. Doddamani, S. Siengchin, M. Doddamani; Lightweight and Sustainable Composite Materials, Preparation, Properties and Applications; Elsevier Inc., 2023.
- [6] <https://www.hnkyal.com/en/media/aluminum-application-industries-and-daily-life-2568> (pristup: 28.06.2024.)
- [7] https://aluminiumleader.com/economics/how_aluminium_market_works/(pristup: 28.06.2024.)
- [8] G.V. Galevsky, V.V. Rudneva, V.S. Aleksandrov; Current state of the world and domestic aluminium production and consumption; IOP Conference Series Materials Science and Engineering, 2018.
- [9] Opportunities for aluminium in a post-Covid economy; Prepared for the International Aluminium Institute; CRU International Ltd, 2022.
- [10] <https://international-aluminium.org/> (pristup: 30.06.2024.)
- [11] T. Filetin, F. Kovačiček, J. Indof; Svojstva i primjena materijala, Fakultet strojarstva i brodogradnje; Zagreb, 2006.
- [12] G. Mathers; The welding of aluminium and its alloys; Woodhead Publishing Ltd., Cambridge, England, 2002.
- [13] M. Gojić: Tehnike spajanja i razdvajanja materijala, Metalurški fakultet, Sisak, 2008.
- [14] https://www.aalco.co.uk/datasheets/Aluminium-Alloy-5083-H32-Sheet_140.ashx (pristup: 05.07.2024.)
- [15] https://www.matweb.com/search/datasheet_print.aspx?matguid=1efe7441a72f4a22a53c0dc1bd9c87ec (pristup: 05.07..2024.)
- [16] https://www.atlassteels.com.au/documents/Atlas_Aluminium_datasheet_5083_rev_Oct_2013.pdf (pristup: 05.07.2024.)
- [17] https://www.aalco.co.uk/datasheets/Aluminium-Alloy_6082-T6~T651_148.ashx (pristup: 05.07..2024.)

- [18] https://www.matweb.com/search/datasheet_print.aspx?matguid=fad29be6e64d4e95a241690f1f6e1eb7 (pristup: 05.07..2024.)
- [19] R. M. Milićević; Zavarivanje (postupci, ispitivanje, zaštita); AGM knjiga; Beograd, 2011.
- [20] S. Kralj, Š. Andrić, Osnove zavarivačkih i srodnih postupaka; Fakultet strojarstva i brodogradnje; Zagreb, 1992.
- [21] M. Rudan; MIG zavarivanje tankih aluminijskih limova, 5. SEMINAR, Aluminij i aluminijske legure – rukovanje, priprema, zavarivanje; Pula, 2008.
- [22] K. Nemeč; Usporedba konvencionalnog pulsno i AC MIG zavarivanja aluminijske legure 5083 uz primjenu Ar-He mješavine, Diplomski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2023.
- [23] Weman K. Linden G. MIG welding guide. Cambridge: Woodhead Publishing Limited Maney Publishing Limited- CRC press. 2006.
- [24] Park HJ, Kim DC, Kang MJ, Rhee S.; The arc phenomenon by the characteristic of EN ratio in AC pulse GMAW. Springer. The international Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2012.
- [25] Park HJ, Rhee S, Kang MJ, Kim DC. Joining of Steel to Aluminum Alloy by AC Pulse MIG Welding. The Japan Institute of Metal. Materials Transactions. 2009.
- [26] S. Baskutis, R. Kreivaitis, A. Zunda; Mechanical properties and microstructure of aluminium alloy AW6082-T6 joints welded by double-sided MIG process before and after aging; ISSN 1392–1207. MECHANIKA, 2019.
- [27] ASM Handbook, Vol.6, Welding, Brazing, and Soldering, ASM International, 1993.
- [28] R. D. Ardika, T. Triyono, N. Muhayat; A review porosity in aluminium welding, IGF26 – 26th International Conference on Fracture and Structural Integrity; Elsevier, 2021.
- [29] S. Costa, M. S. Souza, M. B. Cesar, J. Goncalves, J. E. Ribeiro; Experimental and numerical study to minimize the residual stresses in welding of 6082-T6 aluminum alloy; AIMS Materials Science; 2021.
- [30] F. Bodaghi, M. Atapour, M. Shamanian; Assessment of Microstructure and Stress Corrosion Cracking Susceptibility of Multipass Gas Metal Arc Welded Al 5083-H321 Aluminum Alloy; Technical article; 2021.
- [31] A. A. Naumov, J. Morozova, F. Isupov, I. Golubev, V. Mikhailov; Temperature Influence on Microstructure and Properties Evolution of Friction Stir Welded Al-Mg-Si Alloy; Key Engineering Materials; 2019.
- [32] K. Weman; Welding processes handbook (second edition); Woodhead publishing

PRILOZI

I. Tablica tvrdoće uzoraka

Tablica 21. Tvrdoće uzoraka

Uzorak	Područje mjerenja	Tvrdoća (HV)			Aritmetička sredina (HV)
Z1	Zavar	66	71	68	68,34
	ZUT	99	93	90	94
	Osnovni materijal	112	110	111	111
Z4	Zavar	71	71	70	70,67
	ZUT	96	102	82	93,33
	Osnovni materijal	113	118	110	113,67
Z6	Zavar	64	65	69	66
	ZUT	76	78	80	78
	Osnovni materijal	101	107	107	105
Z8	Zavar	48	65	64	59
	ZUT	71	69	68	69,33
	Osnovni materijal	68	98	101	89
Z9	Zavar	69	71	72	70,67
	ZUT	74	78	78	76,67
	Osnovni materijal	87	90	88	88,33
Z12	Zavar	77	76	75	76
	ZUT	81	78	79	79,33
	Osnovni materijal	87	88	89	88
Z13	Zavar	74	97	96	89
	ZUT	78	78	79	78,33
	Osnovni materijal	91	93	92	92
Z15	Zavar	66	68	63	65,67
	ZUT	77	76	79	77,33
	Osnovni materijal	84	82	86	84