

Analiza primjene AC MIG postupka za zavarivanje tankih limova legure AlMg3

Šeper, Nikolina

Master's thesis / Diplomski rad

2022

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:235:621831>

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

Nikolina Šeper

Zagreb, 2022.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

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

Student:

Nikolina Šeper

Zagreb, 2022.

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

Zahvaljujem se mentoru prof. dr. sc. Ivici Garašiću, asistentu mag. ing. nav. arch. Mislavu Štefoku i laborantu Laboratorija za zavarivanje Krešimiru Sukobljeviću na stručnoj pomoći prilikom izrade ovog rada.

Posebno želim zahvaliti svojim roditeljima, djedovima i bakama na bezuvjetnoj podršci tijekom studiranja bez kojih ovo ne bi bilo moguće. Zahvaljujem Mateu, Denisu, Eni i Fići te prijateljima i kolegama koji su najteže studentske dane učinili ljepšim, jednostavnijim i zabavnijim.

Nikolina Šeper



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



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

| | |
|--|---------|
| Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje | |
| Datum: | Prilog: |
| Klasa: 602-14/22-6/1 | |
| Ur. broj: 15-1703-22- | |

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: NIKOLINA ŠEPER Mat. br.: 0035207102

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Analiza primjene AC MIG postupka za zavarivanje tankih limova legure AlMg3**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Analysis of application of AC MIG process in welding of thin AlMg3 alloy sheets**

Opis zadatka:

U teorijskom dijelu rada potrebno proučiti primjenu i zavarljivost aluminijskih legura, te navesti i opisati postupke primjenjive za zavarivanje tankih limova. Potrebno je navesti primjenjive načine prijenosa metala u električnom luku pri MIG zavarivanju koje se koriste za zavarivanje aluminijskih legura s posebnim naglaskom na AC MIG zavarivanje. Usporediti AC MIG s konvencionalnim pulsним zavarivanjem te pojasniti mogućnosti upravljanja distribucijom topline i posljedično penetracijom.

U eksperimentalnom dijelu rada je potrebno izraditi tehnologiju zavarivanja odabrane aluminijske legure AlMg3 na debljini materijala 3mm. Izvesti zavarivanje sučeljenog spoja s odgovarajućom pripremom spoja. Nakon zavarivanja ispitati zavareni spoj prema zahtjevima norme HRN EN ISO 15614-2:2007 te analizirati postignutu čvrstoću i posebno područje zone utjecaja topline. Na temelju dobivenih podataka ocijeniti prikladnost odabranih parametara AC MIG zavarivanja i predložiti opcije primjene na realnim proizvodima.

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

Zadatak zadan:
5. svibnja 2022.

Rok predaje rada:
7. srpnja 2022.

Predviđeni datum obrane:
18. srpnja do 22. srpnja 2022.

Zadatak zadao:
prof. dr. sc. Ivica Garašić

Predsjednik Povjerenstva:
prof. dr. sc. Diserka Runje

SADRŽAJ

| | |
|--|------|
| POPIS SLIKA | III |
| POPIS TABLICA..... | V |
| POPIS OZNAKA | VI |
| SAŽETAK..... | VII |
| SUMMARY | VIII |
| 1. UVOD..... | 1 |
| 2. ALUMINIJ | 2 |
| 2.1. Glavne karakteristike aluminija | 3 |
| 2.2. Zavarljivost aluminija | 4 |
| 2.2.1. Poroznost..... | 5 |
| 2.2.2. Tople pukotine | 6 |
| 2.3. Aluminijske legure..... | 7 |
| 2.3.1. Precipitacijsko očvrnuće aluminijskih legura | 9 |
| 2.3.2. Lijevene legure..... | 9 |
| 2.3.3. Gnječene legure..... | 10 |
| 2.4. Legura AlMg ₃ | 11 |
| 2.5. Primjena aluminija i aluminijskih legura..... | 12 |
| 3. POSTUPCI POGODNI ZA ZAVARIVANJE TANKIH LIMOVA ALUMINIJA I ALUMINIJSKIH LEGURA..... | 16 |
| 4. MIG POSTUPAK ZAVARIVANJA..... | 18 |
| 4.1. Parametri zavarivanja..... | 19 |
| 4.1.1. Promjer žice i jakost struje zavarivanja | 20 |
| 4.1.2. Napon električnog luka | 20 |
| 4.1.3. Brzina zavarivanja..... | 21 |
| 4.1.4. Zaštitni plin | 21 |
| 4.1.5. Položaj elektrode i dodatnog materijala u odnosu na radni komad | 23 |
| 4.2. Prednosti i primjena MIG zavarivanja | 25 |
| 4.3. AC MIG postupak zavarivanja | 26 |
| 4.3.1. Izvor struje AC MIG postupka zavarivanja | 26 |
| 4.3.2. EN omjer | 27 |
| 4.3.3. Karakteristike AC MIG postupka zavarivanja..... | 28 |
| 4.3.4. Upravljanje distribucijom topline i penetracijom | 29 |
| 4.3.5. Usporedba DC i AC MIG postupaka | 30 |
| 5. EKSPERIMENTALNI RAD..... | 33 |
| 5.1. Oprema za zavarivanje..... | 33 |
| 5.2. Osnovni i dodatni materijal..... | 34 |
| 5.3. Priprema ploča | 36 |
| 5.4. Zavarivanje uzoraka | 37 |
| 5.5. DC zavarivanje ploča | 38 |
| 5.6. AC zavarivanje ploča | 39 |
| 5.7. Ispitivanje zavara | 40 |
| 5.7.1. Vizualni pregled..... | 42 |

| | |
|--|----|
| 5.7.2. Ispitivanje penetrantima..... | 42 |
| 5.7.3. Statičko vlačno ispitivanje | 46 |
| 5.7.4. Ispitivanje savijanjem | 52 |
| 5.7.5. Analiza makrostrukture zavara | 55 |
| 6. ZAKLJUČAK..... | 60 |
| LITERATURA..... | 62 |

POPIS SLIKA

| | |
|--|----|
| Slika 1. Shematski prikaz dobivanja aluminija [3] | 2 |
| Slika 2. Zavareni spoj u kojem je vidljiva poroznost u obliku sitnih mjehurića [1] | 6 |
| Slika 3. Omjer topivosti vodika i temperature u aluminiju i njegovim legurama [1] | 6 |
| Slika 4. Tople pukotine kod zavarivanja aluminija i aluminijevih legura | 7 |
| Slika 5. Aluminijska kupola za skladištenje ugljena [4] | 12 |
| Slika 6. Platforme za helikoptere [4]..... | 13 |
| Slika 7. Krovna konstrukcija Inter-American Exhibition Centre, San Paolo, Brazil - u izgradnji [4] | 13 |
| Slika 8. Aluminijska folija [11]..... | 13 |
| Slika 9. Aluminijske felge za automobile [12]..... | 14 |
| Slika 10. Limenke [13]..... | 14 |
| Slika 11. Pregled aluminijskih legura i ostalih materijala korištenih u konstrukciji karoserije Audija A6 [14]..... | 15 |
| Slika 12. TIG zavarivanje aluminija dodavanjem taljive žice [16]..... | 16 |
| Slika 13. MIG postupak zavarivanja [18] | 18 |
| Slika 14. Princip MIG postupka zavarivanja [17]..... | 19 |
| Slika 15. Primjeri pogrešaka u zavarenim spojevima [19]..... | 21 |
| Slika 16. Utjecaj nagiba pištolja na oblik zavara [23]..... | 24 |
| Slika 17. Pogrešna i ispravna tehnika zavarivanja aluminija [15] | 24 |
| Slika 18. Slobodni kraj žice (L) i udaljenost sapnice od radnog komada (B) [24] | 25 |
| Slika 19. Promjena polariteta struje u različitim varijantama MIG zavarivanja [28] | 27 |
| Slika 20. Valni oblik struje za AC MIG [27] | 28 |
| Slika 21. Utjecaj balansa negativnog polariteta na oblik zavara i geometriju spoja [29] | 29 |
| Slika 22. Makro presjeci sučeljeno zavarenih spojeva obzirom na prosječnu jačinu struje zavarivanja te EN omjer [27] | 30 |
| Slika 23. Prikaz karakteristike struje i napona kod DC MIG-a [30] | 31 |
| Slika 24. Prikaz karakteristike struje i napona kod AC MIG-a [30]..... | 31 |
| Slika 25. Uređaj za zavarivanje Welbee W400 | 33 |
| Slika 26. Manometar s protokom zaštitnog plina..... | 36 |
| Slika 27. Primjer ispitnog komada za sučeljeni spoj ploča s potpunom penetracijom [33]..... | 36 |
| Slika 28. Pripremljene ploče za sučeljeno zavarivanje DC MIG postupkom | 37 |
| Slika 29. Bakrena podloga korištena kod DC i AC zavarivanja uzoraka | 37 |
| Slika 30. Stegnute ploče pripremljene za DC MIG postupak zavarivanja..... | 38 |
| Slika 31. Lice i korijen zavarenog uzorka DC MIG postupkom..... | 39 |
| Slika 32. Lice i korijen zavarenog uzorka AC MIG postupkom..... | 40 |
| Slika 33. Pozicije ispitnih uzoraka na ploči koja je sučeljeno zavarena [33]..... | 41 |
| Slika 34. DC zavareni uzorak s označenim pozicijama za izradu ispitnih uzoraka | 42 |
| Slika 35. Sredstva koja se koriste kod ispitivanja penetrantima | 43 |
| Slika 36. Postupak ispitivanja penetrantima na licu AC zavara..... | 44 |
| Slika 37. Rezultati ispitivanja penetrantima na korijenu AC zavara..... | 45 |
| Slika 38. Rezultati ispitivanja penetrantima na licu DC zavara..... | 45 |

| | |
|--|----|
| Slika 39. Rezultati ispitivanja penetrantima na korijenu DC zavara..... | 46 |
| Slika 40. Epruvete uzete od DC i AC uzoraka spremne za statičko vlačno ispitivanje | 47 |
| Slika 41. Univerzalna kidalica WPM Njemačka, model EU 40 MOD | 47 |
| Slika 42. Dijagram sila-produljenje za prvi DC zavareni uzorak | 48 |
| Slika 43. Prikaz uzorka 1b DC zavarenog spoja na kidalici | 49 |
| Slika 44. Uzorak 1a i 1b DC zavarenog spoja nakon ispitivanja na kidalici | 49 |
| Slika 45. Dijagram sila-produljenje za uzorak 1b DC zavarenog spoja..... | 50 |
| Slika 46. Uzorci 2a i 2b AC zavarenog spoja nakon ispitivanja na kidalici | 51 |
| Slika 47. Dijagram sila-produljenje za uzorak 2a AC zavarenog spoja..... | 51 |
| Slika 48. Dijagram sila-produljenje za uzorak 2b AC zavarenog spoja..... | 52 |
| Slika 49. Epruvete uzete od DC uzoraka spremne za ispitivanje savijanjem | 52 |
| Slika 50. Epruvete uzete od AC uzoraka spremne za ispitivanje savijanjem | 53 |
| Slika 51. Stroj za ispitivanje savijanjem | 54 |
| Slika 52. Korijeni i lica DC zavara ispitanih savijanjem | 54 |
| Slika 53. Korijeni i lica AC zavara ispitanih savijanjem | 55 |
| Slika 54. Stroj za brušenje makro uzoraka | 56 |
| Slika 55. Nagrizanje uzorka u Keller otopini | 56 |
| Slika 56. Slikanje makro uzoraka zavara | 57 |
| Slika 57. Makro-uzorak DC zavarenog spoja | 57 |
| Slika 58. Makro-uzorak AC zavarenog spoja | 58 |
| Slika 59. Usporedba rezultata analize profila DC i AC zavara | 59 |

POPIS TABLICA

| | |
|---|----|
| Tablica 1. Fizikalna i mehanička svojstva aluminiya [2]..... | 3 |
| Tablica 2. Utjecaj i popis glavnih legirnih elemenata kod aluminiya [2] | 8 |
| Tablica 3. Osnovna svojstva lijevanih aluminijevih legura [2]..... | 10 |
| Tablica 4. Podjela i osnovne značajke gnječeni h aluminijevih legura [2]..... | 11 |
| Tablica 5. Kemijski sastav legure AlMg3 [9] | 11 |
| Tablica 6. Fizikalna svojstva materijala AlMg3 [10]..... | 12 |
| Tablica 7. Utjecaj argona i mješavine helija i argona na profil zavara [21] | 23 |
| Tablica 8. Karakteristike Welbee W400 uređaja za zavarivanje [31]..... | 34 |
| Tablica 9. Kemijski sastav korištenog 5086 osnovnog materijala | 34 |
| Tablica 10. Orijentacijski kemijski sastav žice [32] | 35 |
| Tablica 11. Mehanička svojstva dodatnog materijala [32] | 35 |
| Tablica 12. Parametri zavarivanja kod DC MIG postupka | 38 |
| Tablica 13. Parametri zavarivanja kod AC MIG postupka | 39 |
| Tablica 14. Kemijski sastav Keller reagensa | 56 |

POPIS OZNAKA

| Oznaka | Jedinica | Opis |
|---------------|-------------------|-------------------------------------|
| A | % | istežljivost |
| d | mm | promjer trna |
| E | MPa | modul elastičnosti |
| I_B | A | jakost bazne struje |
| I_{EN} | A | jakost struje negativnog polariteta |
| I_p | A | jakost impulsne struje |
| l | mm | udaljenost između valjaka |
| R_m | MPa | vlačna čvrstoća |
| $R_{p0,2}$ | MPa | granica razvlačenja |
| T_B | s | vrijeme bazne struje |
| T_{EN} | s | vrijeme negativnog polariteta |
| T_p | s | vrijeme impulsne struje |
| t_s | mm | debljina epruvete |
| T_t | °C | temperatura tališta |
| λ | W/mK | koeficijent toplinske vodljivosti |
| ρ | g/cm ³ | gustoća |

SAŽETAK

Tema ovog diplomskog rada je „Analiza primjene AC MIG postupka za zavarivanje tankih limova legure AlMg3“. Rad je podijeljen u dva glavna dijela, a to su teorijski te eksperimentalni.

U teorijskom dijelu prikazane su glavne karakteristike spomenutog materijala od kojih je za ovaj rad najvažnija zavarljivost. Također, opisane su glavne karakteristike MIG te AC MIG postupaka zavarivanja koji se koriste u eksperimentalnom dijelu rada.

U eksperimentalnom dijelu opisano je zavarivanje sučeljenog spoja aluminijske legure 5086 debljine 3 mm konvencionalnim DC te modificiranim AC MIG postupkom. Zavareni spojevi su ispitani, a rezultati analizirani prema normi HRN EN ISO 15614-2. Ispitivanja koja su provedena su vizualni pregled, ispitivanje penetrantima, statičko vlačno ispitivanje, ispitivanje savijanjem te analiza makrostrukture.

Nakon razmatranja teorijskog i eksperimentalnog dijela rezultati su analizirani i na temelju njih donesen je zaključak.

Ključne riječi: aluminij, zavarivanje, MIG, AC MIG, HRN EN ISO 15614-2, sučeljeni spoj

SUMMARY

The topic of this master thesis is "Analysis of application of AC MIG process in welding of thin AlMg3 alloy sheets". The paper is divided into two parts, the first part is theoretical and the second is experimental.

In the theoretical part, the main characteristics of the mentioned material are presented, of which weldability is the most important for this work. Also, the main characteristics of MIG and AC MIG welding procedures used in the experimental part of the work are described.

The experimental part describes the welding of a 3 mm thick 5086 aluminium alloy butt joint by conventional DC and modified AC MIG welding processes. Welded joints were tested, and the results were analyzed according to the HRN EN ISO 15614-2 standard. Performed tests were visual inspection, penetrant testing, transverse tensile testing, transverse bending testing and macroscopic examination.

After considering theoretical and experimental part, the test results were analyzed and conclusion was reached.

Key words: aluminium, welding, MIG, AC MIG, HRN EN ISO 15614-2, butt joint

1. UVOD

Aluminij je često korišten materijal široke primjene u industriji. Ima povoljna svojstva od kojih je za ovaj rad najbitnija zavarljivost. Zbog iznimne otpornosti na koroziju, povoljne gustoće te povoljnih omjera mehaničkih svojstava nezaobilazan je kako u automobilskoj industriji, tako i u brodogradnji, građevini i sl. Današnja industrija ponajprije zahtijeva veliku produktivnost kao i visoku kvalitetu izrade uz minimalne troškove proizvodnje. [1]

MIG postupak zavarivanja smatra se jednim od najboljih postupaka za zavarivanje aluminija te njegovih legura. Zbog potrebe za automatizacijom radi ubrzanja proizvodnje neophodno je unaprijediti taj postupak zavarivanja. U ovom slučaju pod time se smatra razvoj AC MIG zavarivanja. [1]

Mali unos topline glavna je odlika koja upravo AC MIG čini pogodnim za zavarivanje aluminija. Promjenjivi polaritet daje prednost AC MIG-u naspram konvencionalnog postupka. Zbog te karakteristike mali unos topline je moguć na način da dovoljno rastali dodatni materijal, dok osnovni ostavlja u stanju u kakvom treba biti za izradu kvalitetnog zavara. [1]

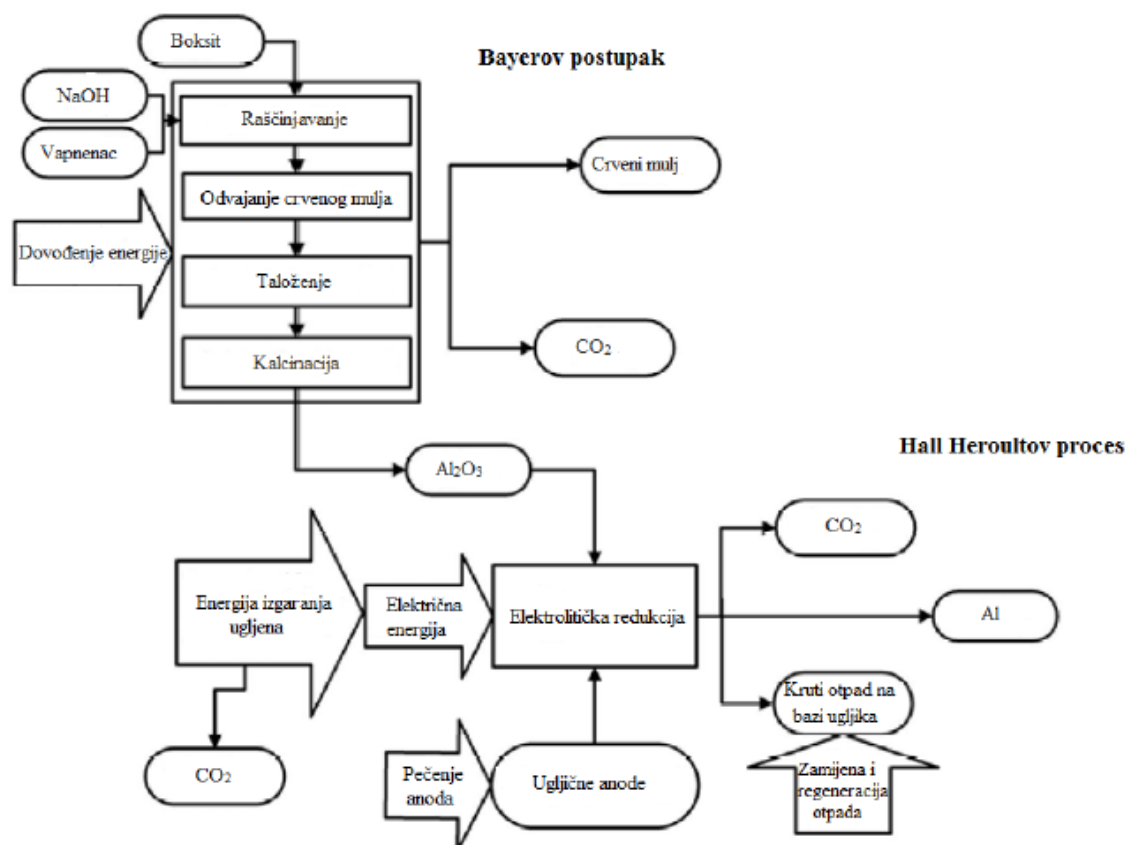
U nastavku će biti opisana najvažnija obilježja aluminija i njegovih legura, postupci zavarivanja MIG te AC MIG. U eksperimentalnom dijelu rada biti će prikazana provedena ispitivanja te analiza rezultata na uzorcima zavarenima DC te AC postupkom prema normi HRN EN ISO 15614-2.

2. ALUMINIJ

Aluminij je svoj lagani razvoj i primjenu u inženjerstvu pronašao tek sredinom 19. stoljeća. Znanstvenici Hall i Héroult bili su prvi koji su uspjeli dobiti veće količine čistog aluminija iz rude te je prema njima i nazvan postupak dobivanja aluminija koji se koristi i danas. Tako je tada „novo otkriveni“ materijal dobio sve veće značenje kako u industriji tako i u svakodnevnoj, komercijalnoj primjeni. Važnu ulogu imao je prvenstveno u automobilske industriji. Njegova uloga najviše je uznapredovala kada su se pojavili motori s unutarnjim izgaranjem. Koristio se za izradu dalekovoda gdje se od materijala zahtijevalo da bude male težine, a dobre provodljivosti. Još jedan značajan utjecaj aluminija u to doba vidljiv je u avio industriji.

Proizvodnja aluminija odvija se u dvije faze. Prvu fazu predstavlja Bayerov postupak. Pomoću njega se smjesa minerala imena boksit pretvara u glinicu. Nakon Bayerovog slijedi Hall Héroultov postupak čija je svrha pretvorba glinice u aluminij potreban za inženjersku industriju.

[2] Na slici 1 nalazi se shematski prikaz dobivanja aluminija.



Slika 1. Shematski prikaz dobivanja aluminija [3][3]

2.1. Glavne karakteristike aluminija

Aluminij se zbog svojih povoljnih svojstava često pojavljuje kao glavni materijal koji se koristi u inženjerskoj industriji. Kao i svi drugi materijali ima svoje pozitivne i negativne strane. U tablici 1 prikazana su glavna fizikalna i mehanička svojstva aluminija. [2]

Tablica 1. Fizikalna i mehanička svojstva aluminija [2]

| | | |
|-------------------------|---------------------|-----------|
| Gustoća | kg/m ³ | 2700 |
| Talište | °C | 660 |
| Modul elastičnosti | MPa | 69000 |
| Toplinska rastezljivost | 10 ⁻⁶ /K | 23,8 |
| Električna vodljivost | m/Ωmm ² | 36 - 37,8 |
| Granica razvlačenja | MPa | 20 - 120 |
| Vlačna čvrstoća | MPa | 40 - 180 |
| Istezljivost | % | 50 - 4 |

Osim prethodno navedenih svojstava, aluminij posjeduje 3 glavna svojstva koja određuju njegovu primjenu kao inženjerskog materijala [2]:

1. Povoljan omjer čvrstoće i gustoće (R_m/ρ je tzv. specifična čvrstoća), posebno kad se koristi u obliku neke od svojih legura.
Gustoća aluminija je oko jedne trećine gustoće čelika, pa se aluminij i njegove legure prvenstveno koriste u proizvodnji zrakoplova i vozila, ali i za druge namjene. Legiranjem i precipitacijskim očvrnućem mogu se proizvesti legure koje imaju specifičnu čvrstoću kao i mnogi čelici.
2. Omjer električne vodljivosti i gustoće najpovoljniji je među svim metalima. Zbog toga aluminij istiskuje bakar iz uporabe za prijenos električne energije.
3. Aluminij ima veliki afinitet prema kisiku, a korozijska postojanost mu je ipak relativno velika i na njoj se osniva široka primjena aluminija u graditeljstvu.

Pod povoljna svojstva aluminija i njegovih legura možemo svrstati i sljedeće [4]:

- 2,9 puta lakši od čelika
- dobra mehanička svojstva (uključujući žilavost) pri niskim temperaturama
- dobro reflektira svjetlost i toplinu
- neotrovan i bez negativnih utjecaja na okoliš
- dobra otpornost na koroziju uz pomoć prirodne zaštite slojem oksida
- nije magnetičan

- nema iskrenja u obradi.

Uz sva dobra svojstva koja posjeduje, uobičajeno je da postoje i ona negativna. Na prvom mjestu se nalazi relativno visoka cijena proizvodnje što u nekim situacijama može dovesti do neekonomičnosti primjene. U negativne strane aluminija možemo svrstati i karakteristiku velike deformabilnosti, koja u usporedbi s čelikom iznosi do 3 puta manje. Također, aluminij je osjetljiv na probleme stabilnosti kao i na djelovanje požara. [4]

2.2. Zavarljivost aluminija

Zavarljivost aluminija može se okarakterizirati kao relativno povoljno obilježje, no tom području potrebno je posvetiti posebnu pažnju. Glavni problem može prouzrokovati aluminijev oksidni sloj. Njegovo talište iznosi 2060 °C što predstavlja puno višu temperaturu od temperature tališta aluminija koja iznosi 660 °C. Kod zavarivanja je važno ukloniti oksidni sloj kako bi se stvorio ispravan zavar. Uklanjanjem oksidnog sloja izbjegava se stvaranje uključaka u zavaru uzrokovanih oksidima koji za rezultat imaju smanjenje čistoće zavara. Oksidni sloj se javlja zbog velikog afiniteta aluminija prema kisiku stoga uvijek kvalitetnije zavare daju postupci koji sadrže zaštitni plin čija je uloga da istjera kisik s mjesta zavarivanja. Kod postupaka zavarivanja koji koriste zaštitni plin koristi se toplinska disocijacija za uklanjanje oksidnog sloja na način da se koristi ili izmjenična struja ili se pozitivan pol spoji na elektrodu, dok negativnim polom povežemo osnovni materijal. Relativno pozitivna strana oksidnog sloja je da je antikoroziivan, a posjeduje i svojstvo samoobnovljivosti što znači da ako se oksidni sloj ukloni on će ponovno nastati u dodiru metala s kisikom. To je povoljno svojstvo jer naknadna površinska zaštita u pravilu nije niti potrebna.

Isto tako, zavarljivost aluminija i njegovih legura uvelike ovisi o kemijskom sastavu materijala. Pod time se podrazumijeva kemijski sastav i osnovnog i dodatnog materijala. Idealan slučaj zavarivanja smatra se onaj kada bi osnovni i dodatni materijal bili jednakog kemijskog sastava ili barem sličnih svojstava. [5]

Odabir dodatnog materijala ovisi o sljedećim čimbenicima [6]:

- otpornosti na koroziju
- istežljivosti
- pripremi spoja
- toplinskoj obradi nakon zavarivanja
- radnoj temperaturi

- čvrstoći zavara
- zavarljivosti
- nemogućnosti nastajanja pukotina.

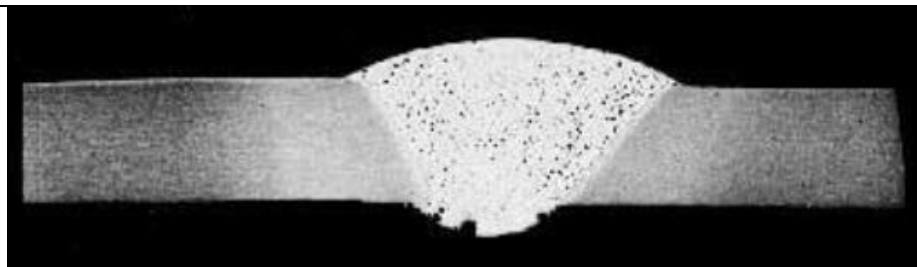
Osnovna metodologija za izbor dodatnog materijala temelji se na [7]:

- određivanju osnovnog materijala i debljine
- određivanju postupka zavarivanja i vrste spoja
- definiranju zahtjeva na zavareni spoj.

Velika električna provodljivost specifična za aluminij i njegove legure dovodi do potencijalnih problema vezanih za svojstvo zavarljivosti. Neobičnost kod aluminija je što ne mijenja boju prilikom zavarivanja, tj. unosa topline. To svojstvo može neiskusnom zavarivaču na području aluminija otežati prepoznavanje početka taljenja materijala. Još jedna od pozitivnih karakteristika aluminija i njegovih legura vezanih za zavarivanje je nemagnetičnost. Utjecaj magnetske sile u polju elektrode neće dovesti do pomicanja materijala koji se zavaruje. Svi ovi utjecaji na zavarljivost, pogotovo negativni, mogu dovesti do raznih nepravilnosti u zavaru poput poroznosti, toplih pukotina i sl. [6]

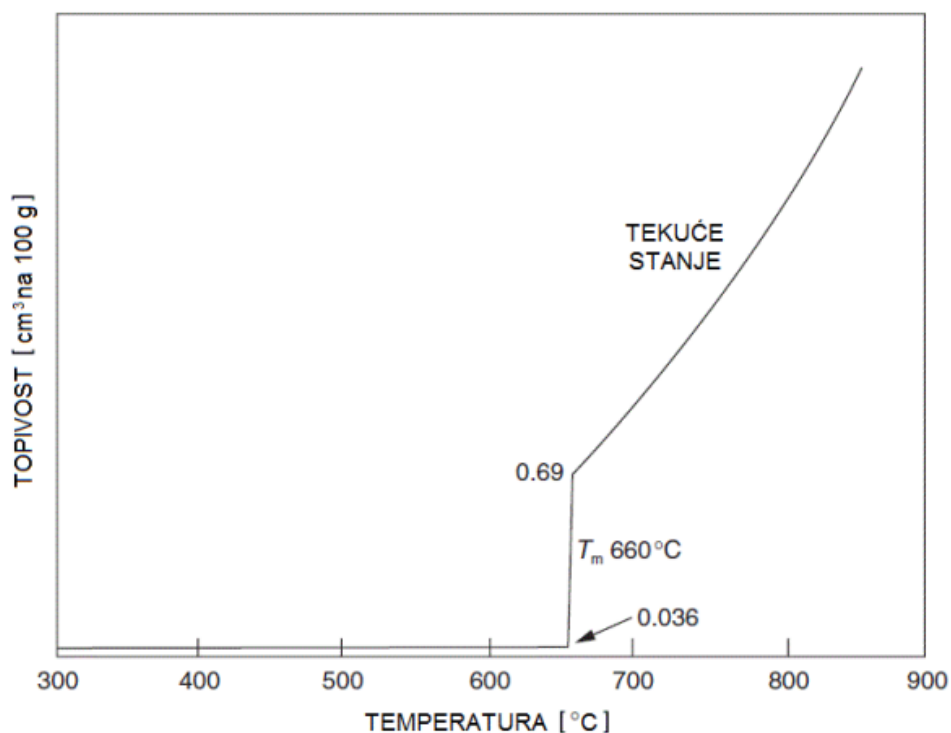
2.2.1. Poroznost

Poroznost je nepravilnost koja se javlja kod gotovo svakog zavara aluminija i njegovih legura. Predstavlja nepravilnost isključivo u samom rastaljenom metalu koji tvori zavar. Manifestira se u obliku mjehurića koji nastaju pri skrućivanju materijala, a predstavljaju zarobljeni otopljeni plin u talini metala. Pojavljivanje ove nepravilnosti je vrlo često, gotovo neizbježno. Konkretno, kod zavarivanja aluminija i njegovih legura nastanak poroznosti povezan je s vodikom. Aluminijev oksid sadrži vodik čija topljivost prilikom temperature više od temperature tališta raste. Ako se osnovni materijal na mjestu budućeg spoja dobro očisti i vodik ne uđe u zavareni spoj preko osnovnog materijala on može doprijeti do zavara preko elektrode. Poroznost se kreće u granicama od mikroporoznosti, pa sve do veličine od tri do četiri milimetara. Na slici 2 prikazan je primjer poroznosti zavara. [7]



Slika 2. Zavareni spoj u kojem je vidljiva poroznost u obliku sitnih mjehurića [1]

Važnu ulogu kod nastanka poroznosti ima temperatura. Pri većem unosu topline npr. povećanjem jačine struje zavarivanja poroznost se više javlja. Razlog tome je što je topivost vodika pri višim temperaturama veća. Omjer topivosti vodika i temperature u aluminiju i njegovim legurama prikazan je na slici 3. [1]

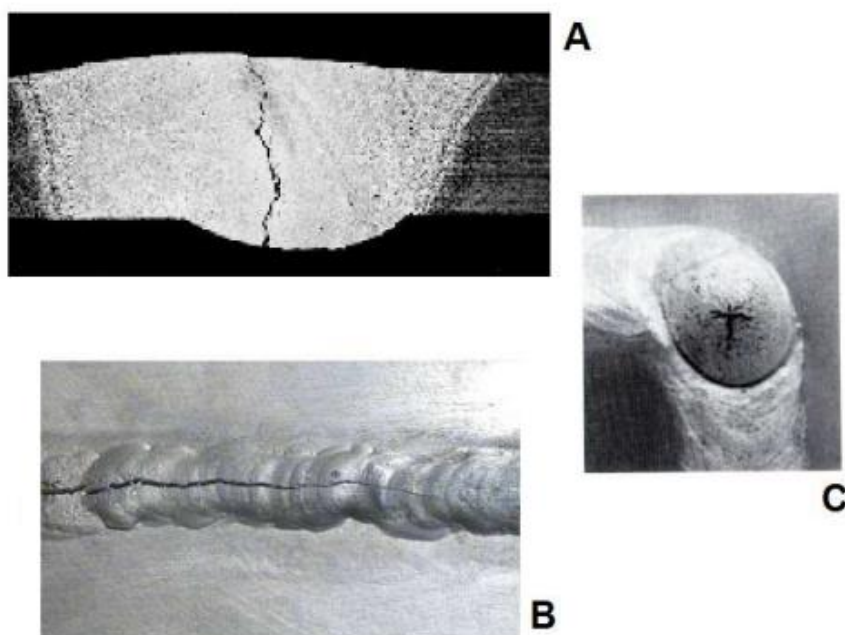


Slika 3. Omjer topivosti vodika i temperature u aluminiju i njegovim legurama [1]

2.2.2. Tople pukotine

Tople ili solidifikacijske pukotine predstavljaju još jednu čestu nepravilnost kod zavarivanja aluminija, a posebice aluminijskih legura. To su nepravilnosti koje se događaju za vrijeme zavarivanja ili neposredno nakon procesa zavarivanja uslijed prebrzog zagrijavanja ili hlađenja. Materijal je potrebno postepeno zagrijavati i hladiti kako bi se spriječila vjerojatnost pojave pukotina. Tople pukotine nisu toliko specifične za aluminij koliko za aluminijeve legure. Postoje neke metode kojima se njihova pojava može minimizirati. Korištenje odgovarajuće

tehnologije, jednako kao i pažljivo oblikovanje zavarenog spoja smanjuje vjerojatnost pojave toplih pukotina. Također, odabir dodatnog materijala isto predstavlja ključni faktor za eliminaciju nepravilnosti. Najčešće najveći uzrok toplih pukotina predstavljaju nečistoće. Specifičnost toplih pukotina je da se javljaju na sredini i krajevima zavara. Smanjenjem brzine zavarivanja i korištene struje pojava toplih pukotina se može smanjiti. Na slici 4 prikazan je izgled toplih pukotina na zavarenom spoju aluminija i njegovih legura. Vidljivo je kako se pojavljuju, kao što je prethodno i napisano, po sredini zavarenog spoja. [7]



Slika 4. Tople pukotine kod zavarivanja aluminija i aluminijevih legura
A - sučeljeni spoj (presjek), B - sučeljeni spoj, C - na završnom krateru [8]

2.3. Aluminijeve legure

Svrha legiranja svakog materijala pa tako i aluminija je poboljšanje njegovih osnovnih mehaničkih svojstava. To svakako proširuje mogućnost njegove upotrebe u inženjerskoj primjeni. Neka od potencijalno poboljšanih mehaničkih svojstava su rezljivost, krutost, vlačna čvrstoća, tvrdoća i sl. Također, legiranje je vrlo važno i prilikom korištenja aluminija u svrhe zavarivanja. Ono omogućuje njegovu širu primjenu u tom području.

Glavni legirni elementi koji se koriste za legiranje aluminija su [2]:

- Cu – bakar
- Mg – magnezij
- Si – silicij

- Zn – cink
- Mn – mangan.

Utjecaji glavnih legirnih elemenata na svojstva aluminija prikazani su u tablici 2.

Tablica 2. Utjecaj i popis glavnih legirnih elemenata kod aluminija [2]

| | |
|-------|---|
| Al-Cu | srednje visoka čvrstoća, srednja ili slaba udarna otpornost, dobra otpornost na više temperature, dobra rezljivost, slaba livljivost, vrlo slaba korozijska postojanost |
| Al-Mg | mala mehanička otpornost, otpornost na udarce, povoljna kombinacija čvrstoće i žilavosti, dobra rezljivost, srednja livljivost, vrlo dobra korozijska postojanost |
| Al-Si | mala mehanička otpornost, vrlo dobra livljivost, slaba rezljivost, dobra otpornost na koroziju |
| Al-Zn | dobra čvrstoća |
| Al-Mn | dobra čvrstoća i duktilnost, dobra korozijska postojanost |

Uz osnovne legirne elemente koriste se i drugi elementi koji predstavljaju tzv. dodatke, a to su [2][1]:

- Fe – željezo
- Cr – krom
- Ti – titan.

Uloga nabrojanih legirnih elemenata dodataka je poboljšanje čvrstoće i tvrdoće, omogućavanje toplinskog očvrnuća, pospješivanje usitnjenja zrna, poboljšanje rezljivosti i sl. [2]

Uz osnovne i dodatne elemente kod legiranja aluminija dodaju se i drugi elementi čija je glavna svrha da poboljšavaju osnovna svojstva legura. Još se nazivaju i dodaci za posebne svrhe, a to su:

- Ni – nikal
- Co – kobalt
- Li – litij
- Ag – srebro
- V – vanadij
- Zr – cirkonij

- Sn – kositar
- Pb – olovo
- Cd – kadmij
- Bi – bizmut.

Aluminijeve legure općenito možemo podijeliti u dvije osnovne grupe, a to su lijevane i gnječene. [2]

2.3.1. Precipitacijsko očvršnuće aluminijevih legura

Precipitacijsko očvršnuće zajednička je pojava mnogim legurama u kojima dolazi do promjene topivosti nekih konstituenata u osnovnom metalu promjenom temperature, ali se najviše koristi u odgovarajućim aluminijevim legurama. Topivost legiranih elemenata u aluminiju, kao i udio, veličina, oblik i raspodjela intermetalnih spojeva, određuju fizikalna, kemijska i proizvodna svojstva legura. [2]

Postupak očvršnuća nakon gašenja držanjem legure na temperaturi okoline, nazvan prirodno „dozrijevanje“, može se ubrzati i tako postići veće čvrstoće ako se gašena legura zagrijava do temperature od oko 180 °C. Takva obrada bila je prvobitno prozvana očvršćenje umjetnim dozrijevanjem, ali su oba ova opisa zamijenjena u novijem nazivlju pojmom „precipitacijsko očvršćivanje“ ili „precipitacijsko otvrdnjavanje“. [2]

Elementi koji se dodaju aluminiju su u ovom slučaju najviše bakar, magnezij, cink i silicij. Precipitacijski očvršnute legure imaju povoljan omjer čvrstoće i gustoće, te očvršnuće veće od hladno deformiranih legura. [2]

2.3.2. Ljevane legure

Ljevane legure nastaju na način da se otopljeni materijal lijeva na tri načina, a to je u pijesku, kokili ili pak tlačno. Spomenuti legirani elementi se mogu dodavati zasebno, ali mogu se i međusobno kombinirati. Za poboljšanje osnovnih svojstava legura nastalih lijevanjem koristi se postupak precipitacijskog očvršnuća, ali moguće ih je i naknadno gnječiti.

Aluminij se obično pri proizvodnji lijevanjem legira sa silicijem, magnezijem ili bakrom, stoga se lijevane legure mogu podijeliti u tri osnovne skupine, a to su Al-Si, Al-Mg te Al-Cu. [2] Njihova osnovna svojstva prikazana su u tablici 3.

Tablica 3. Osnovna svojstva lijevanih aluminijevih legura [2]

| Mehanička otpornost | Livljivost | Rezljivost | Otpornost na koroziju | Tip legure | Predstavnik | |
|---------------------|------------|------------|-----------------------|------------|----------------------|---|
| mala | srednja | dobra | vrlo dobra | Al-Mg | AlMg3, AlMg5 | |
| | | | | Al-Si-Mg | AlSi10Mg AlSi7Mg1 | Mg omogućuje toplinsko očvršnuće |
| mala | vrlo dobra | slaba | dobra | Al-Si | AlSi12 | |
| | | | | Al-Si-Cu | AlSi5Cu1 AlSi6Cu2 | Si negativno utječe na rezljivost, Cu omogućuje smanjenje Si, ali pogoršava otpornost na koroziju |
| osrednja* | slaba | dobra | vrlo slaba | Al-Cu | AlCu4MgTi | Ti i Mg usitnjuju zrna |

* uz toplinsku obradu

2.3.3. Gnječene legure

Gnječene aluminijeve legure proizvode se postupkom lijevanja u ingote i šipke koje kasnije prolaze kroz postupak deformacije. Ove su legure pogodne za oblikovanje izvlačenjem i prešanjem. Glavni legirni elementi koji se koriste kod proizvodnje gnječenih aluminijevih legura su [2]:

- Cu – bakar
- Mg – magnezij
- Mn – mangan
- Ni – nikal
- Zn – cink.

Podjela gnječenih legura prikazana je u tablici 4, a dijele se prema sljedeća dva kriterija [2][1]:

- kemijskom sastavu
- mogućnost precipitacijskog očvršnuća.

Tablica 4. Podjela i osnovne značajke gnječanih aluminijevih legura [2]

| Vrsta legure | Način očvrnuća | R_m , MPa |
|----------------|--------------------------------|-------------|
| 1. Al-Mn | deformiranjem u hladnom stanju | 200 - 350 |
| 2. Al-Mg | | |
| 3. Al-Mg-Mn | | |
| 4. Al-Mg-Si | precipitacijom | ~ 330 |
| 5. Al-Cu-Mg | | ~ 450 |
| 6. Al-Zn-Mg | | ~ 400 |
| 7. Al-Zn-Mg-Cu | | ~ 550 |
| 8. Al-Li-Cu-Mg | | ~ 500 |

2.4. Legura AlMg3

AlMg3 predstavlja leguru aluminija s magnezijem, ali i drugim elementima. Glavna uloga magnezija kao legirnog elementa je povećanje čvrstoće, jednako kao i zavarljivosti te korozijske otpornosti. Magnezij kao legirni element kod aluminija poboljšava karakteristike za hladno oblikovanje. Legure s magnezijem otporne su na udarce. Općeniti kemijski sastav legure AlMg3 s mogućim masenim udjelima primjesa prikazan je u tablici 5.

Tablica 5. Kemijski sastav legure AlMg3 [9]

| | % |
|----|------------|
| Mg | 4,7 - 5,5 |
| Si | 0 - 0,25 |
| Cr | 0,05 - 0,2 |
| Mn | 0,5 - 1 |
| Cu | 0 - 0,1 |
| Ti | 0 - 0,2 |
| Fe | 0 - 0,4 |
| Zn | 0 - 0,25 |

U tablici 6. nabrojana su fizikalna svojstva legure AlMg3.

Tablica 6. Fizikalna svojstva materijala AlMg3 [10]

| | | |
|----------------------|-------------------|------|
| Gustoća | g/cm ³ | 2,66 |
| Temperatura taljenja | °C | 568 |
| Modul elastičnosti | GPa | 69 |
| Toplinska vodljivost | W/mK | 120 |

2.5. Primjena aluminija i aluminijevih legura

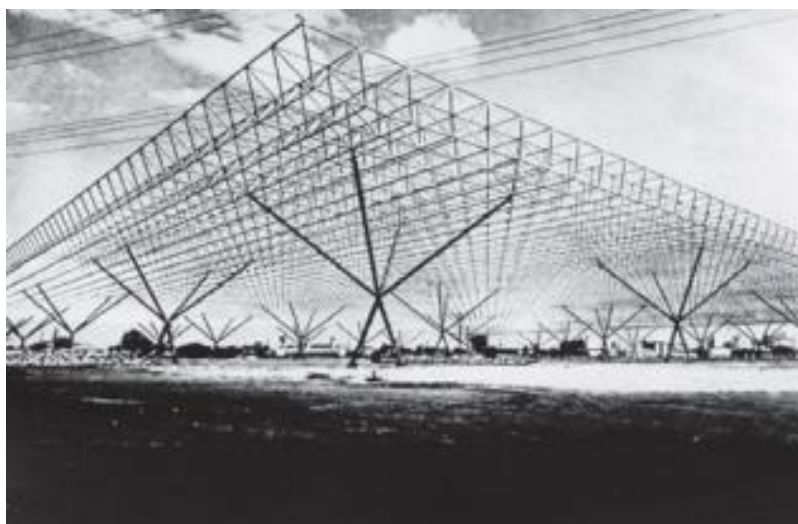
Aluminij i njegove legure pronašli su primjenu u raznim područjima inženjerske industrije. Koriste se kao proizvodi, ali i kao poluproizvodi u raznim industrijama od građevinske, preko farmaceutске i prehrambene, do automobilske industrije, brodogradnje, izrade svakodnevno korištenih predmeta itd. [2]

U građevinskoj industriji povoljna svojstva aluminija i aluminijevih legura poput male težine, otpornosti na koroziju te funkcionalnosti omogućuju mu veliku konkurentnost na tržištu ispred nekih drugih materijala poput čelika. Koriste se za izradu raznih zgrada, konstrukcija, mostova i sl. osobito u suvremeno doba. Na slikama 5, 6 i 7 prikazani su neki od primjera korištenja aluminija i njegovih legura u građevini. [4]

**Slika 5. Aluminijaska kupola za skladištenje ugljena [4]**



Slika 6. Platforme za helikoptere [4]



Slika 7. Krovna konstrukcija Inter-American Exhibition Centre, San Paolo, Brazil - u izgradnji [4]

Neki od proizvoda iz svakodnevne upotrebe prikazani su na slikama 8, 9 i 10.



Slika 8. Aluminijska folija [11]



Slika 9. Aluminijske felge za automobile [12]



Slika 10. Limenke [13]

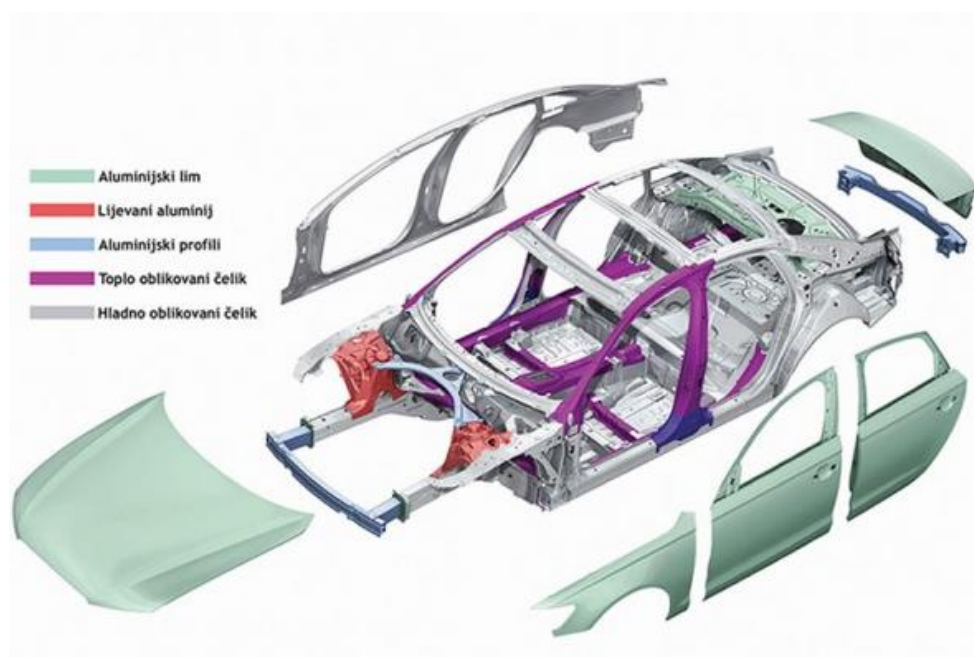
Legura AlMg3 zbog svoje iznimno dobre zavarljivosti koristi se tamo gdje je potrebno izraditi zavarene konstrukcije. Uz to svojstvo, legura AlMg3 otporna je u morskoj vodi i prihvatljiva je za korištenje u nekoj agresivnoj atmosferi gdje je u doticaju s morskom vodom, zato se često primjenjuje u brodogradnji. [2]

AlMg3 koristi se i [2]:

- za izradu tlačnih posuda, cjevovoda, izmjenjivača topline
- u graditeljstvu za nosive konstrukcije, krovne pokrove i fasadne obloge, vrata i prozore, rolete te rudarstvo
- u elektrotehnici

- za izradu vozila i u brodogradnji
- u strojogradnji tj. izradi kalupa
- za izradu građevinskog okova, posuđa te reflektora
- za izradu namještaja i opreme za kampiranje
- u prehrambenoj industriji
- za izradu spojnih elemenata poput vijaka i zakovica.

Na slici 11 prikazan je odnos upotrebe aluminijskih legura u odnosu na druge materijale u konstrukciji karoserije automobila. Unutrašnja prostorna struktura vozila i dalje je od čelika, dok je aluminij pretežno korišten za karoserijske panele. [14]



Slika 11. Pregled aluminijskih legura i ostalih materijala korištenih u konstrukciji karoserije Audija A6 [14]

Druge legure aluminija osim AlMg3 pogodne su također i za izradu putokaza i prometnih znakova te za optiku i dr. [2]

3. POSTUPCI POGODNI ZA ZAVARIVANJE TANKIH LIMOVA ALUMINIJA I ALUMINIJSKIH LEGURA

Kada se spomene zavarivanje aluminija, to uglavnom podrazumijeva zavarivanje aluminijevih legura. To je oblik u kojem je aluminij na tržištu najrasprostranjeniji zbog povoljnih svojstava, ovisno o primjeni. Zavarivanje aluminija moguće je izvesti gotovo bilo kojim postupkom zavarivanja, no ovisno o debljini materijala i ozbiljnosti primjene potrebno je odabrati najbolji mogući postupak. Poznavajući problematiku kao i postupke zavarivanja koje je moguće koristiti u određenom slučaju, kvalitetno zavarivanje postaje predmet dobrog planiranja i odabrane procedure od skladištenja sirovine, pripreme, do samog zavarivanja i odlaganja gotovog zavarenog sklopa. U kontekstu zavarivanja tankih limova od aluminija i aluminijevih legura najčešće se koriste MIG i TIG postupci. [15]

TIG postupak zavarivanja ili drugim riječima zavarivanje volframovom elektrodom u zaštiti inertnog plina uobičajeno se koristi za zavarivanje manjih debljina materijala, pretežno od jednog do pet milimetara. Kod TIG postupka zavarivanje izmjeničnom strujom rješava problematiku uklanjanja površinskog oksidnog sloja. Posebnost postupka je što daje odličnu kvalitetu zavara koji je uz to čist i izgleda estetski lijepo. Najveći problem koji se javlja kod zavarivanja TIG postupkom su male brzine zavarivanja koje iznose od 150 do 250 mm/min što za rezultat daje relativno slabu produktivnost pogotovo ako proces nije automatiziran. Uz to, ovim se postupkom unosi velika količina energije što nije najbolje rješenje za tanke limove. [15] Na slici 12 prikazan je TIG postupak zavarivanja s dodavanjem taljive žice.



Slika 12. TIG zavarivanje aluminija dodavanjem taljive žice [16]

MIG postupak zavarivanja ili drugi riječima elektrolučno zavarivanje taljivom elektrodom u zaštitnoj atmosferi inertnog plina široko je primjenjiv u slučaju zavarivanja tankih limova aluminija i aluminijevih legura. Predstavlja danas najkorišteniji postupak za ovaj tip problematike. Izvodi se na principu da se električni luk uspostavlja i održava između taljive žice i radnog komada. Modificirani AC MIG postupak s izmjeničnom strujom u glavnini je bolji od konvencionalnog istosmjernog postupka, no zbog relativno skupe opreme još uvijek nije rasprostranjen u tolikoj količini. Kako bi se postigao kvalitetan zavareni spoj potrebno je slijediti i poštovati osnovna pravila. Prednosti MIG postupka su relativno velika produktivnost i učinkovitost, postizanje kvalitetnog zavarenog spoja, raznolikost modifikacija postupka te mogućnost odlične automatizacije. Sve nabrojane prednosti u konačnici dovode do ekonomičnosti proizvodnje. [15]

4. MIG POSTUPAK ZAVARIVANJA

MIG (Metal Inert Gas) predstavlja postupak zavarivanja u zaštitnoj atmosferi inertnih plinova argona ili helija koji kroz sapnicu dolaze do mjesta zavarivanja i tako ga štite od utjecaja okolne atmosfere. MIG postupak se koristi u širokoj primjeni i pogodan je za zavarivanje aluminija i aluminijevih legura. Glavna karakteristika procesa je visoka učinkovitost i velika produktivnost što je dobro za industriju, osobito masovnu proizvodnju. [17] Na slici 13 prikazan je postupak MIG zavarivanja.



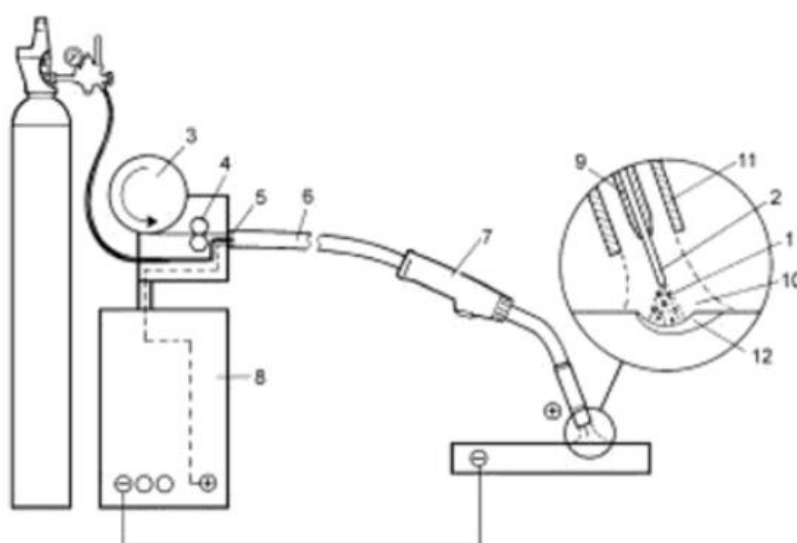
Slika 13. MIG postupak zavarivanja [18]

Inertni plin kod MIG postupka zavarivanja omogućuje čist zavar uz minimalnu pojavu oksida na njemu. Žica koja se automatski dovodi u pištolj ima ulogu dodatnog materijala te elektrode. Manja zona utjecaja topline još je jedna od prednosti MIG postupka u odnosu na neke druge poput TIG-a. Ovaj postupak spajanja materijala moguće je izvoditi uglavnom u svim pozicijama. [1] [1] Uz mogućnost kvalitetnog zavarivanja, velik broj specijaliziranih varijanti jednako kao i vrhunska mogućnost automatizacije ovaj postupak čine među najzastupljenijim postupkom zavarivanja u suvremenoj proizvodnji. [15]

Na slici 14 prikazan je princip MIG postupka zavarivanja. Brojevi redom označavaju sljedeće [17]:

1. rastaljeni dodatni materijal u obliku kapljica
2. dodatni materijal
3. žica za zavarivanje

4. pogonski kotačići
5. crijevo zaštitnog plina
6. crijevo
7. pištolj za zavarivanje
8. izvor napajanja
9. kontaktna vodilica
10. zaštitni plin
11. sapnica pištolja za zavarivanje
12. zavar.



Slika 14. Princip MIG postupka zavarivanja [17]

4.1. Parametri zavarivanja

Parametri zavarivanja kod svakog postupka, pa tako i kod MIG-a ovise o drugim zahtjevima i veličinama. Neki od primjera su iskustvo zavarivača, debljina materijala, tehnološki zahtjevi, stupanj automatizacije i sl. Uz prethodno nabrojane zahtjeve, vrlo su važni i uvjeti u kojima je određeni komad potrebno zavarivati. Pod pojam parametri zavarivanja kod MIG postupka ubrajaju se sljedeće veličine [17]:

- napon električnog luka – parametar koji u konačnici određuje izgled zavara i njegovu širinu
- jakost struje zavarivanja
- induktivitet
- brzina zavarivanja

- duljina slobodnog kraja žice
- izbor zaštitnog plina te količina njegovog protoka.

Većina nabrojanih parametara ovise jedni o drugima, stoga kako bi zavar bio kvalitetan potrebno ih je međusobno uskladiti. Optimizacija parametara jednostavnija je kod poluautomatiziranog postupka gdje veliku ulogu igra iskustvo zavarivača, nego kod automatiziranog postupka kod kojeg je potrebno neko vrijeme kako bi se parametri posložili onako kako proces zahtjeva. [15]

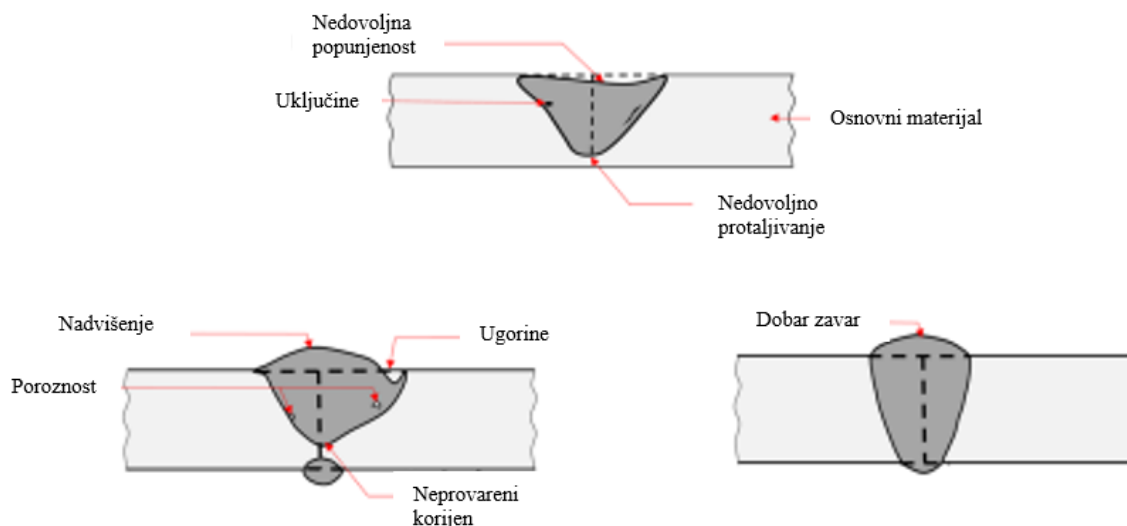
4.1.1. Promjer žice i jakost struje zavarivanja

Debljina žice koja se koristi kao dodatni materijal ovisi o struji zavarivanja. Veća debljina žice ujedno zahtjeva i veću struju zavarivanja te rezultira širim zavarom. Potrebno je na temelju konačne zahtijevane kvalitete zavara, uzimajući u obzir debljinu materijala te brzinu zavarivanja, odabrati potrebnu struju zavarivanja. Prevelika struja uzrokuje rasprskavanje i time onečišćuje zavar. Što je veća struja to je veća penetracija, a ujedno i učinak taljenja.

Kod izbora dodatnog materijala potrebno je posvetiti pažnju kako na debljinu žice tako i na vrstu iste. MIG postupak zavarivanja pogodan je za zavarivanje nehrđajućeg čelika, aluminija i njegovih legura, bakra i njegovih legura, nikla i njegovih legura i sl. Spektar materijala pogodnih za MIG postupak spajanja materijala je poprilično širok stoga je dodatni materijal potrebno pomno birati te prilagoditi osnovnom. Oni možda neće uvijek moći biti jednaki, ali pažnju treba obratiti na njihovu kompatibilnost. Od dodatnog materijala se zahtjeva da mu je kemijski sastav što sličniji osnovnom materijalu. [1]

4.1.2. Napon električnog luka

Napon kod MIG postupka zavarivanja određuje ponajprije izgled zavara i njegovu širinu. Veći napon za posljedicu ima povećanje visine električnog luka što u konačnici daje širi zavar. Preveliki napon prepoznaje se prema pojavi ugorina. To je greška zavara koja se opisuje pojavom vidljivih žlijebova s jedne ili obje strane zavara. [17] Primjeri ugorina, ali i drugih pogrešaka u zavarenom spoju prikazani su na slici 15.



Slika 15. Primjeri pogrešaka u zavarenim spojevima [19]

Kod prekratkog električnog luka, preveliki napon smanjuje frekvenciju kratkog spoja što uzrokuje rasprskavanje i time onečišćuje zavar. Jednako kao što nije dobar preveliki napon, tako nije dobar niti premali. Kod tankih komada materijala kratki električni luk može se kombinirati s velikom brzinom zavarivanja što daje poprilično dobru produktivnost kvalitetnog zavara. [17]

4.1.3. Brzina zavarivanja

Maksimalna brzina zavarivanja s ekonomske strane se na prvi pogled čini najpovoljnijom, no gledajući s inženjerske strane dolazi se do zaključka da situacija baš i nije takva. Prevelika brzina za posljedicu ima pojavu naljepljivanja. Pri pretjerano velikoj brzini zavarivanja dolazi do poprilično velikog smanjenja tolerancije za sve varijacije parametara. [17]

4.1.4. Zaštitni plin

Svrha zaštitnog plina je zaštita zavara od štetnih utjecaja atmosfere. Za zavarivanje aluminijskih legura najpovoljniji su ili čisti argon ili kombinacija argona i helija. Helij ima mogućnost da povećava unos topline koja se odvodi zbog velike toplinske provodljivosti aluminijskih legura. Količina zaštitnog plina ovisna je kao i većina o drugim parametrima zavarivanja. Neki od njih su brzina zavarivanja, jakost struje i sl.

Argon predstavlja inertni plin s velikom vrijednosti gustoće. Omogućuje stabilan luk s minimalnim rasprskavanjem. Koristi se i za ručno i za automatsko zavarivanje. Argon je plin

male toplinske vodljivosti i cjenovno jeftiniji od helija. Neke druge karakteristike koje korištenje argona kao zaštitnog plina omogućuje su [20]:

- miran i stabilan električni luk
- uži i kvalitetniji zavar
- male brzine zavarivanja.

Specifičnost kod zavarivanja pod zaštitom argonom je nastanak crne čađe na površini zavara. Nju je lako ukloniti ribanjem površine četkom.

Napon električnog luka promjenjiv je obzirom na korišteni zaštitni plin. Karakteristike koje korištenje helija kao zaštitnog plina omogućuje su [20]:

- povećava napon električnog luka do 20%
- širi zavar
- dublja penetracija
- veći unos topline
- veće brzine zavarivanja
- mehanizirani i automatski postupci zavarivanja

Problematika zavarivanja aluminijske legirane čelika vezana za vodik može se djelomično riješiti upotrebom helija kao zaštitnog plina. Toplija talina sporije se hladi te omogućuje vodiku da difundira iz rastaljenog metala zavara, što čini ovu metodu pogodnom za smanjenje poroznosti.

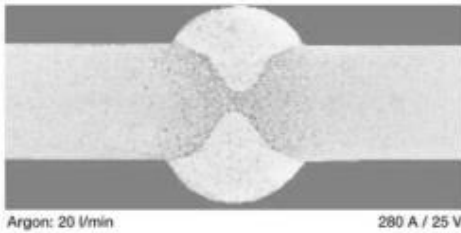
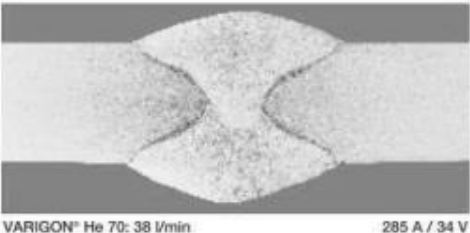
Nedostaci zavarivanja s helijem kao zaštitnim plinom su [20]:

- manja stabilnost električnog luka nego kod argona
- visoka cijena

Brzina protoka zaštitnog plina mora biti prilagođena električnom luku. Kao primjer, pri manjim jačinama struje 10 l/min će biti dovoljno, no pri većim brzinama biti će potrebna brzina protoka sve do 20 l/min. [17]

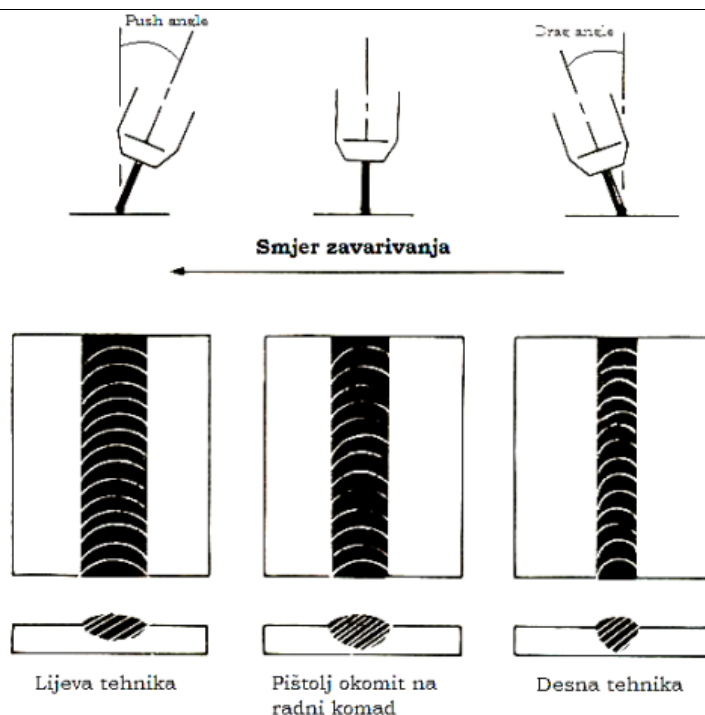
U tablici 7 prikazane su razlike u utjecajima na profil zavara u dva slučaja, a to je kada se koristi čisti argon i kada se koristi mješavina helija i argona u omjeru 70:30.

Tablica 7. Utjecaj argona i mješavine helija i argona na profil zavora [21]

| | Argon | Helij i Argon 70:30 |
|--------------------|---|--|
| |  |  |
| Penetracija | uži zavar, slabija penetracija | širi zavar, dublja penetracija |
| Mehanička svojstva | slab utjecaj | utječe |
| Brzina zavarivanja | sporije | brže (i do tri puta) |
| Izgled zavora | svjetliji, čišći, naboran (mogućnost pojave crne čađe) | više čađe, gladak |
| Stabilnost luka | stabilan i tih | manje stabilan |
| Poroznost | da (deblji komadi!) | niža (bolje difundiranje vodika) |

4.1.5. Položaj elektrode i dodatnog materijala u odnosu na radni komad

Ovisno o poziciji u kojoj zavarujemo željeni komad, takvu kvalitetu zavora dobivamo. Zavarivanjem lijevom tehnikom penetracija zavora će biti plića, ali širina zavora veća što već samo po sebi govori da je tehnika pogodna za zavarivanje materijala manjih debljina. Lijevom se tehnikom kod tankih limova postiže i manje protaljivanje te dobiva ljepši zavar. [22] Zavarivanjem materijala desnom tehnikom dobiva se dublji zavar uglavnom prilično male širine. On je pogodan za zavarivanje materijala veće debljine. Naziv za tehniku kada je pištolj okomit na radni komad je neutralna tehnika. Upotrebom neutralne tehnike dobiva se srednja dubina penetracije, ali širi zavar. Na slici 16 nalazi se prikaz utjecaja nagiba pištolja na oblik zavora. [17]



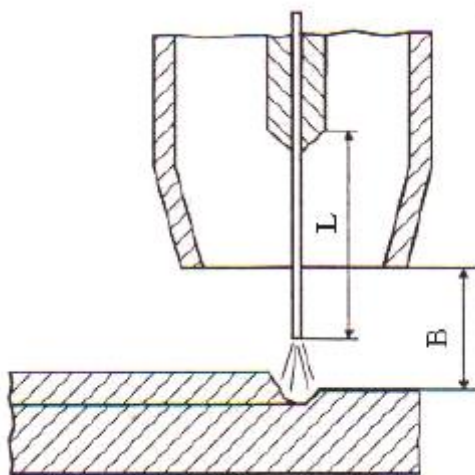
Slika 16. Utjecaj nagiba pištolja na oblik zavara [23]

Krivi nagib postolja može dovesti do grešaka zavara poput poroznosti. Ako postoji preveliki nagib, tada se može očekivati i prevelika udaljenost sapnice od radnog komada. Električni luk je tada uglavnom predaleko što znači da unos topline nije dovoljan, a zaštitni plin ne štiti na način na koji bi trebao. Kod zavarivanja aluminija koristi se lijeva tehnika rada. Pištolj mora biti pod nagibom $75 - 80^\circ$ suprotno od smjera zavarivanja sa svrhom boljeg čišćenja oksida. [15] Na slici 17 s lijeve strane je prikazan je zavareni spoj napravljen pogrešnom tehnikom zavarivanja koji daje nečist zavar, dok je s desne strane prikazan je zavareni s spoj s ispravno korištenom tehnikom zavarivanja.



Slika 17. Pogrešna i ispravna tehnika zavarivanja aluminija [15]

Osim tehnike zavarivanja i kuta nagiba pištolja, važan parametar je i duljina slobodnog kraja žice. Preporučuje se da se zavarivanje započne kraćom duljinom žice od one koja će se koristiti pri normalnom radu. Kada se luk uspostavi, zauzme se potrebna udaljenost i kut zavarivanja. Preporučena duljina slobodnog kraja žice je 13 promjera žice, dok je najveća moguća preporučena duljina 20 mm. [15] Na slici 18 shematski je prikazana duljina slobodnog kraja žice te udaljenost sapnice od radnog komada.



Slika 18. Slobodni kraj žice (L) i udaljenost sapnice od radnog komada (B) [24]

4.2. Prednosti i primjena MIG zavarivanja

Kao što je već prije spomenuto, MIG postupak zavarivanja ima kao glavnu prednost svoju visoku učinkovitost i veliku produktivnost. U drugom redu kao prednost stoji široka mogućnost primjene MIG postupka. Također, relativno mali unos topline čini ga pogodnim za zavarivanje aluminija i tankih limova. Automatizacija postupka je vrlo jednostavna i zbog toga se često koristi.

MIG postupak ima široku primjenu, a u nastavku su nabrojane neke od njih [17]:

- Zavarivanje ploča debljine od 0,5 mm i više. Mali unos topline pogoduje zavarivanju malih debljina materijala. Zbog toga rijetko dolazi do pojave deformacije i distorzije. Prilikom zavarivanja većih debljina koristi se veći unos topline koji daje kvalitetan zavar i veliku produktivnost.
- Pogodan je za zavarivanje svih uobičajenih konstrukcijskih materijala poput niskolegiranog i nehrđajućeg čelika, aluminija i njegovih legura te nekih od obojenih metala.

- Kod metala s prevlakama, poput pocinčanog čelika.
- Također, postupak je pogodan za sve položaje zavarivanja što je vrlo važna karakteristika za raznoliku industriju u kojoj se potencijalno može primjenjivati.

Sve navedene prednosti omogućuju MIG postupku široku primjenu u industriji. Neki od primjera gdje se koristi su automobilska industrija, u brodogradnji, građevini i sl.

Sami postupak zavarivanja smatra se istovremeno i jednostavnim i teškim za izvođenje. Postupak kao takav je više manje trivijalan zbog gotovo nikakve potrebe za održavanjem prilikom izvođenja zavarivanja. Ukoliko je prilikom ovog postupka spajanja materijala potrebno postići male tolerancije, veliku kvalitetu zavora, zadovoljiti određene specijalne zahtjeve i ostalo, tada MIG postupak definitivno zahtijeva vještinu i iskustvo zavarivača. [17]

4.3. AC MIG postupak zavarivanja

Osim istosmjernom strujom, MIG postupak zavarivanja može se izvoditi i uz pomoć izmjenične struje. Taj postupak naziva se AC (*Alternating Current*) MIG. Karakteristika izmjenične struje je u tome što ima elektrone koji povremeno mijenjaju smjer strujanja. Kada elektroni mijenjaju smjer, mijenja se i njihov polaritet. Promjenjivi polaritet primjenjuje se na žicu dodatnog materijala. [25]

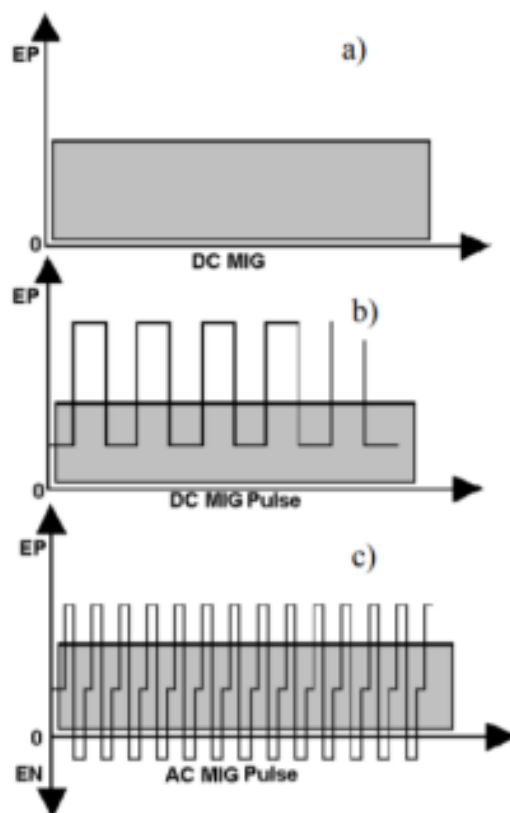
Razvoj AC MIG-a predvođen je sve rasprostranjenijom primjenom aluminija i aluminijevih legura, osobito u automobilske industriji, isto kao i u brodogradnji i sl. Primjena AC MIG-a daleko je rjeđa nego primjena konvencionalnog DC postupka. Unatoč tome što se ne primjenjuje u istoj mjeri kao i postupak s istosmjernom strujom, AC MIG je puno isplativiji.

AC MIG kod zavarivanja aluminija omogućuje povećanja depozita dodatnog materijala u osnovni. Pritom se pojavljuje manji unos topline u osnovni materijal nego što je slučaj kod DC MIG-a. Izvor napajanja predstavlja glavnu razliku između izmjeničnog i istosmjernog postupka zavarivanja. Kod AC MIG-a razlikujemo pozitivan polaritet (EP) čija je uloga da daje veću stabilnost luka te negativni polaritet (EN) čija je uloga da smanjuje deformacije. Razlog tome je manji unos topline. Promjena polariteta na žici osnovnog materijala omogućuje premošćenje većih zazora kod tanjih materijala. [26]

4.3.1. Izvor struje AC MIG postupka zavarivanja

Izvor struje predstavlja glavnu razliku između AC MIG te konvencionalnog istosmjernog MIG postupka zavarivanja. Na slici 19 prikazana je promjena polariteta struje u različitim varijantama MIG zavarivanja [28]:

- a) MIG zavarivanje istosmjernom strujom
- b) MIG impulsno zavarivanje istosmjernom strujom
- c) MIG impulsno zavarivanje izmjeničnom strujom



Slika 19. Promjena polariteta struje u različitim varijantama MIG zavarivanja [28]

Izvor napajanja za AC MIG postupak mora odgovarati na zahtjeve u nastavku. Ono je regulirano izlaznom jakosti struje koja mora to osigurati. Kao što je prikazano na slici iznad, valni oblik struje kod izmjeničnog MIG postupka mora biti kvadratnog oblika. Fazna promjena struje i napona mora biti vrlo kratko na nuli. Zahtjev za dobru sposobnost upravljanja mora biti zadovoljavajući jednako kao i prihvatljive izlazne karakteristike izvora napajanja. [28]

4.3.2. EN omjer

EN omjer predstavlja balans negativnog i pozitivnog polariteta struje kod izmjeničnog MIG postupka zavarivanja. Definira se za jedan ciklus izmjenične struje kao omjer EN (pozitivnog polariteta) te EP (negativnog polariteta). Omjer predstavlja vrlo bitan parametar kod ovog postupka jer je njime definirana stabilnost postupka te količina unesene topline u osnovni materijal. [26]

Na slici 20 prikazan je primjer valnog oblika struje za AC MIG. Ako je omjer EN manji od 50 %, tada pozitivan polaritet prevladava, također vrijedi i suprotno. To je vidljivo i iz formule [26]:

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

Gdje je:

I_{EN} – jakost struje negativnog polariteta, A

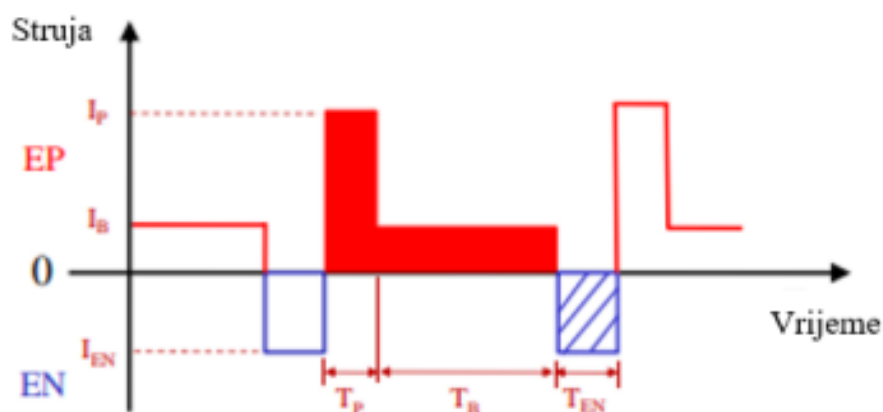
T_{EN} – vrijeme negativnog polariteta, s

I_p – jakost impulsne struje, A

T_p – vrijeme impulsne struje, s

I_B – jakost bazne struje, A

T_B – vrijeme bazne struje, s



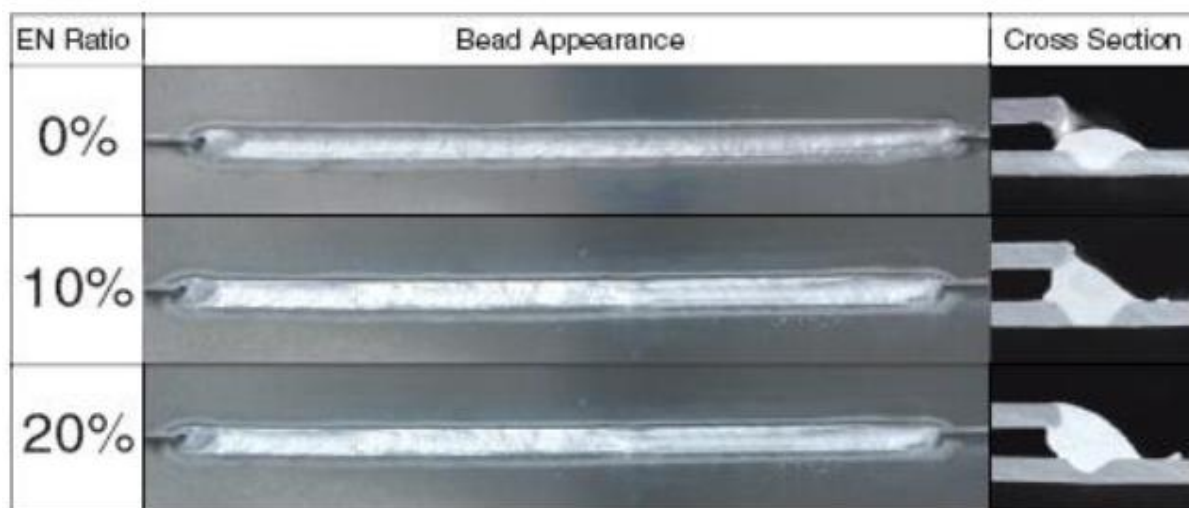
Slika 20. Valni oblik struje za AC MIG [27]

4.3.3. Karakteristike AC MIG postupka zavarivanja

Jedan od glavnih problema koji se javljaju kod zavarivanja aluminija je ispunjavanje žlijeba. Kod MIG postupka koji koristi istosmjernu struju zbog izbjegavanja taljenja osnovnog materijala koristi se niža struja zavarivanja, ali posljedica toga je nedovoljni unos topline koji bi doveo do taljenja dodatnog materijala. Ono uzrokuje premalu količinu dodatnog materijala kojim bi se ispunio žlijeb. Korištenjem AC MIG postupka taj je problem poprilično jednostavno riješiti. Povoljan EN omjer povećava brzinu taljenja žice, dok istovremeno zbog jednake vrijednosti struje kao kod konvencionalnog postupka unosi manje topline u osnovni materijal.

Relativno mali unos topline također smanjuje vjerojatnost pojave grešaka u procesu zavarivanja. AC MIG zbog malog unosa topline smanjuje zaostala naprezanja, a u isto vrijeme daje veliku produktivnost koja je više nego poželjna za gotovo svaku industriju.

Ovisno o primjeni negativnog polariteta na žici (EN omjer) mijenja se oblik penetracije kao i mogućnost premošćivanja pri zavarivanju tankih limova. Na slici 21 prikazan je utjecaj negativnog polariteta pri spajanju aluminijske legure AlMg4,5Mn debljine 1,5 mm. [29]



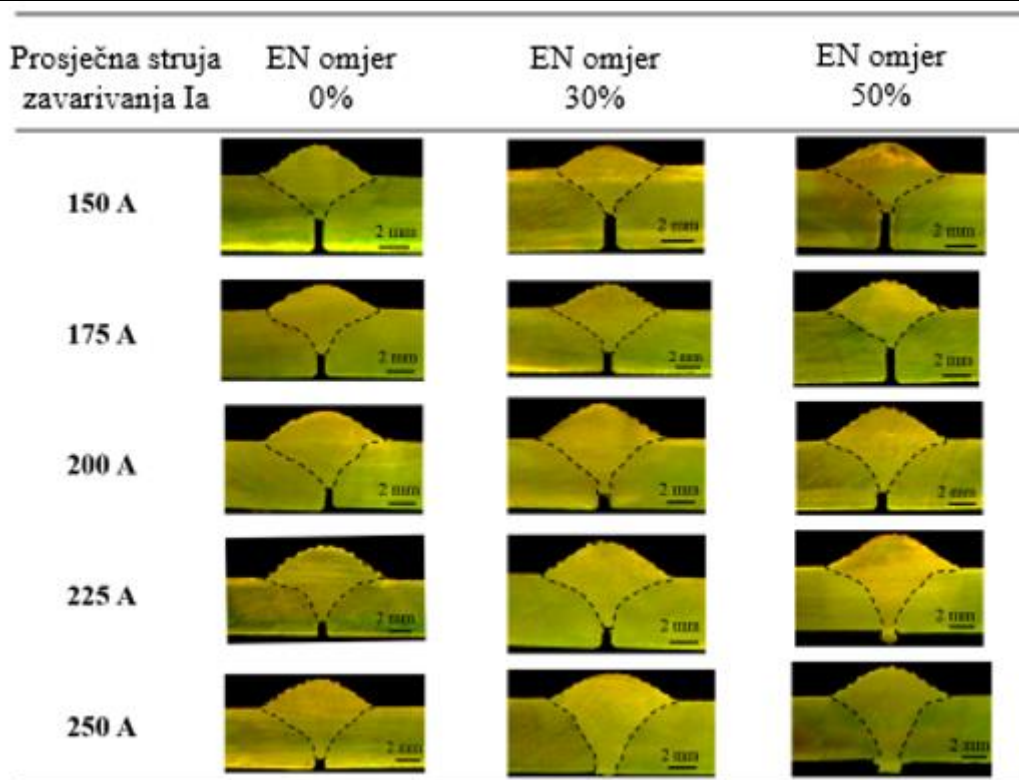
Slika 21. Utjecaj balansa negativnog polariteta na oblik zavora i geometriju spoja [29]

4.3.4. Upravljanje distribucijom topline i penetracijom

Kao što je ranije spomenuto, uloga pozitivnog polariteta je da daje bolju stabilnost električnog luka u odnosu na konvencionalni MIG postupak. Negativni polaritet zaslužan je za reduciranje problema vezanih za premošćivanje zazora, preveliki unos topline u osnovni materijal te deformacije. Povećanjem trajanja negativnog polariteta toplina se više distribuira na dodatni, a ne osnovni materijal. [27]

Istraživanje je pokazalo da je penetracija manja na manjim vrijednostima struje zavarivanja s povećanjem EN omjera. Na primjer, manja je kada je EN omjer 50% nego 0% ili 30%. S druge strane, koristeći veće vrijednosti jakosti struje zavarivanja, povećanjem EN omjer penetracija raste. Na primjer, za struje od 225-250 A i EN omjer 50% u promatranom istraživanju je penetracija bila najveća. [27] **Error! Reference source not found.**

Na slici 22 prikazani su makro presjeci sučeljeno zavarenih spojeva obzirom na prosječnu jačinu struje zavarivanja te EN omjer.



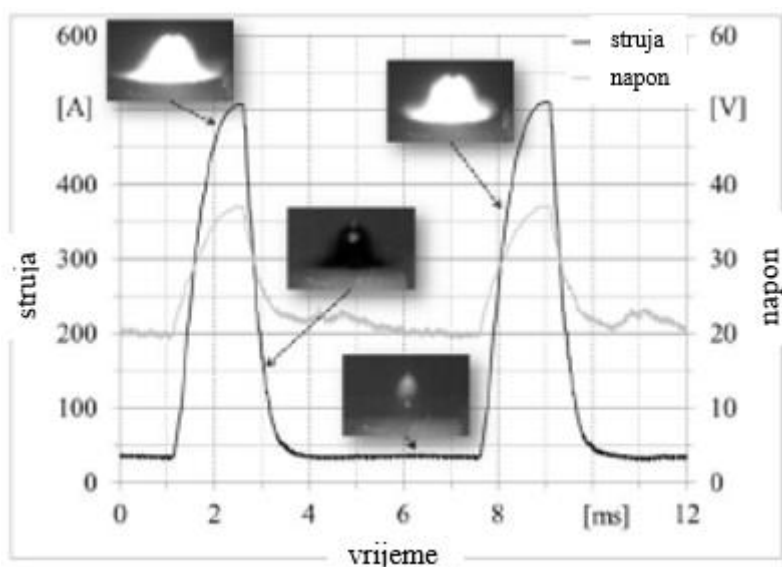
Slika 22. Makro presjeci sučeljeno zavarenih spojeva obzirom na prosječnu jačinu struje zavarivanja te EN omjer [27]

4.3.5. Usporedba DC i AC MIG postupaka

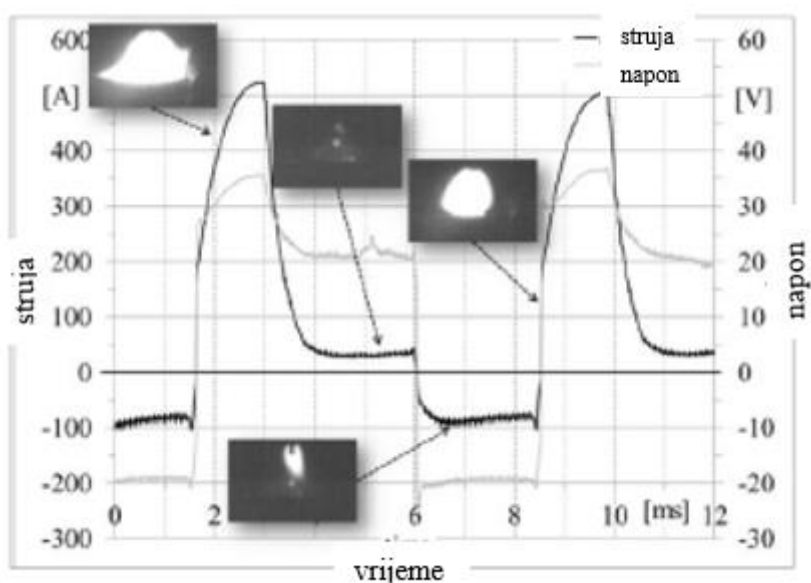
Kao i svaki drugi postupak zavarivanja i AC MIG posjeduje svoje pozitivne i negativne strane. Glavna prednost AC MIG zavarivanja u odnosu na konvencionalni postupak je veća produktivnost koja je pogotovo u današnje vrijeme vrlo važan faktor gotovo svake industrije. Glavna razlika između konvencionalnog DC i modificiranog AC postupka MIG zavarivanja je u polaritetu struje. Napon koji se koristi kod konvencionalnog postupka je puno manji od onog kod AC postupka, no unesena energija tj. toplina u radni komad puno je veća u tom slučaju. Kod zavarivanja tankih limova u prednosti je onaj postupak koji unosi manje topline u osnovni materijal te na taj način previše ne mijenja njegova svojstva. Mogućnost promjene polariteta koju posjeduje AC postupak daje mu prednost na način da može preraspodijeliti udio energije za taljenje osnovnog i dodatnog materijala. [30]

Na slici 23 prikazane su karakteristike struje i napona s popratnim slikama električnog luka u zadanim trenucima kod konvencionalnog DC MIG-a, a na slici 24 modificiranog AC MIG-a. Kod AC postupka može se primijetiti da se polaritet mijenja unutar faze bazne struje. Uslijed negativnog polariteta unos topline u osnovni materijal se smanjuje. Za to vrijeme se povećava

brzina taljenja žice, a istovremeno se penetracija blago smanjuje. To omogućuje da se AC postupkom zavaruju ploče aluminija i aluminijevih legure manje i od jednog milimetra. [30]



Slika 23. Prikaz karakteristike struje i napona kod DC MIG-a [30]



Slika 24. Prikaz karakteristike struje i napona kod AC MIG-a [30]

Kada se istosmjernom strujom zavaruju aluminij i aluminijeve legure, s vanjske strane nastaje sloj oksida. Taj sloj bi bio u interakciji s istosmjernom strujom, uzrokujući nejednako zagrijavanje različitih slojeva i sprječavajući pravilan zavar. Izmjenična struja pomaže u razbijanju oksidnog sloja te prodiranju luka direktno do materijala. [24]

AC postupak u prednosti je pred konvencionalnim zbog smanjenog unosa topline u radni komad. To znači minimiziranje deformacija te povećanje taloženja dodatnog materijala pri konstantnom unosu topline. Ostale prednosti AC postupka su [30]:

- vrlo slična unutarnja i vanjska geometrija zavara
- smanjeni rizik za nastanak toplih pukotina
- pogodan je za zavarivanje materijala svih debljina, čak i tanjih od jednog milimetra
- povoljan je za zavarivanje aluminija i njegovih legura
- ovim postupkom mogu se zavarivati i magnetični materijali
- posjeduje veću slobodu prenosivosti
- rasprskavanje materijala je manje nego kod konvencionalnog postupka.

Neke od negativnih strana AC MIG postupka zavarivanja su sljedeće [30]:

- stabilnost električnog luka manja je nego kod DC MIG-a
- kontrola zavarivanja manja nego kod konvencionalnog postupka.

5. EKSPERIMENTALNI RAD

U eksperimentalnom dijelu rada uz odgovarajuću pripremu sučeljenog spoja zavarene su dvije ploče aluminijeve legure 5086 debljine 3 mm. Napravljena su dva uzorka zavara, jedan par ploča zavaren je konvencionalnim DC MIG postupkom zavarivanja dok je drugi par ploča zavaren AC MIG postupkom. Zavarivanje je provedeno poluautomatskim načinom.

Nakon zavarivanja, zavari su ispitani prema zahtjevima norme HRN EN ISO 15614-2:2007, a u nastavku su analizirani rezultati testiranja.

5.1. Oprema za zavarivanje

Kod izrade oba zavarena uzorka korišten je AC MIG stroj za zavarivanje naziva Welbee W400. Uređaj za zavarivanje prikazan je na slici 25, a tehničke karakteristike uređaja prikazane su u tablici 8.



Slika 25. Uređaj za zavarivanje Welbee W400

Tablica 8. Karakteristike Welbee W400 uređaja za zavarivanje [31]

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

Welbee W400 idealan je uređaj za primjenu koja zahtijeva preciznu kontrolu unosa topline u osnovni materijal u ravnoteži s unosom topline u dodatni materijal, tj. žicu za zavarivanje. [31]

5.2. Osnovni i dodatni materijal

Zadani korišteni osnovni materijal je aluminijska legura 5086. Glavne karakteristike te sastav ovog materijala prikazani su u tablici 9.

Tablica 9. Kemijski sastav korištenog 5086 osnovnog materijala

| | % |
|----|-------------------|
| Al | 94,43 \pm 0,27 |
| Mg | 4,36 \pm 0,32 |
| Si | 0,54 \pm 0,03 |
| Mn | 0,21 \pm 0,02 |
| Cu | 0,05 \pm 0,02 |
| Ti | 0,00 - 0,20 |
| Fe | 0,36 \pm 0,02 |
| Zn | 0,04 \pm 0,002 |
| Pb | 0,011 \pm 0,002 |

Korišteni dodatni materijal je AlMg5. On predstavlja aluminijevu žicu za MIG zavarivanje s 5% magnezija. Namijenjena je za zavarivanje Al-Mg i Al-Mg-Si legure. Debljina korištene žice je 1,2 mm. Sastav dodatnog materijala vrlo je sličan sastavu osnovnog materijala. Ta karakteristika je vrlo važna kod gotovo svakog postupka zavarivanja. Razlog tome je što kvalitetnije sljubljivanje dvaju materijala koje na kraju krajeva daje i kvalitetniji zavar. [32] Kemijski sastav žice prikazan je u tablici 10, a mehanička svojstva dodatnog materijala u tablici 11.

Tablica 10. Orijentacijski kemijski sastav žice [32]

| | % |
|----|------|
| Al | bal. |
| Mg | 5,0 |
| Mn | 0,15 |
| Cr | 0,10 |
| Si | 0,05 |
| Fe | 0,15 |

Tablica 11. Mehanička svojstva dodatnog materijala [32]

| AlMg5 | |
|------------|-----------------------|
| $R_{p0,2}$ | 120 N/mm ² |
| R_m | 260 N/mm ² |
| A_s | > 25 % |

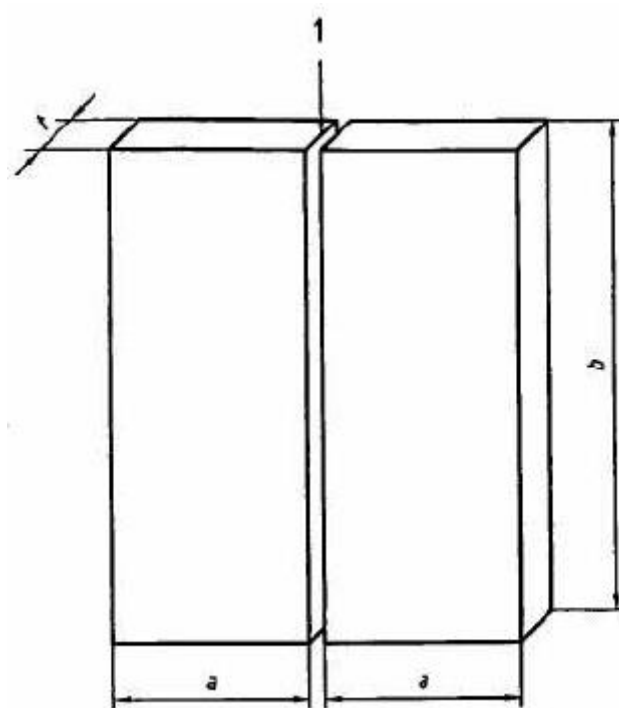
Zavarivanje je prevedeno pod zaštitom plina argona. Trgovački naziv zaštitnog plina je Argon 5.0. u kojem je volumni udio argona 99,999%. Prema normi EN ISO 14175:2008 naziva se EN 439-II. Korišteni protok plina kod oba uzorka iznosio je 20 l/min. Na slici 26 prikazan je manometar s protokom zaštitnog plina.



Slika 26. Manometar s protokom zaštitnog plina

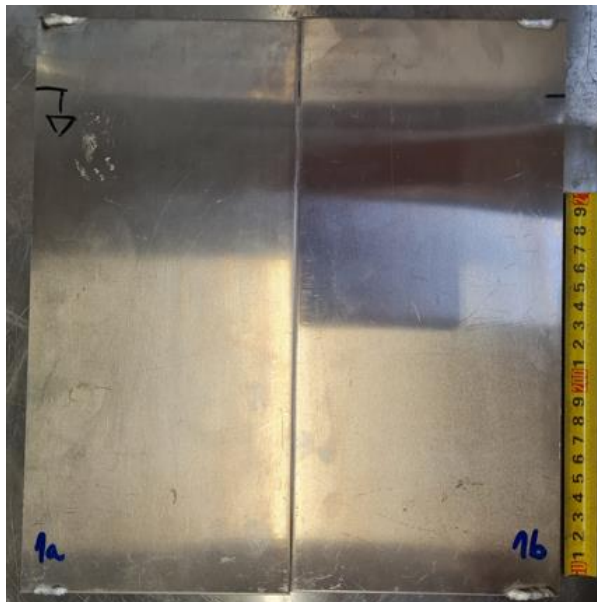
5.3. Priprema ploča

Prema normi HRN EN ISO 15614-2 dimenzije ploča za sučeljeni zavareni spoj moraju biti 150 x 300. [33] Na slici 27 prikazan je primjer ispitnog komada za sučeljeni spoj ploča s potpunom penetracijom.



Slika 27. Primjer ispitnog komada za sučeljeni spoj ploča s potpunom penetracijom [33]

Ploče je prije zavarivanja bilo potrebno pripremiti. Rubovi su izbrušeni, a cijela površina očišćena je alkoholom. Pripremljeno je četiri komada jednakih ploča za dva različita zavora. Prvi par ploča zavaren je konvencionalnim DC MIG postupkom, a drugi par ploča AC MIG-om. Pripremljene ploče prikazane su na slici 28 i 29.



Slika 28. Pripremljene ploče za sučeljeno zavarivanje DC MIG postupkom

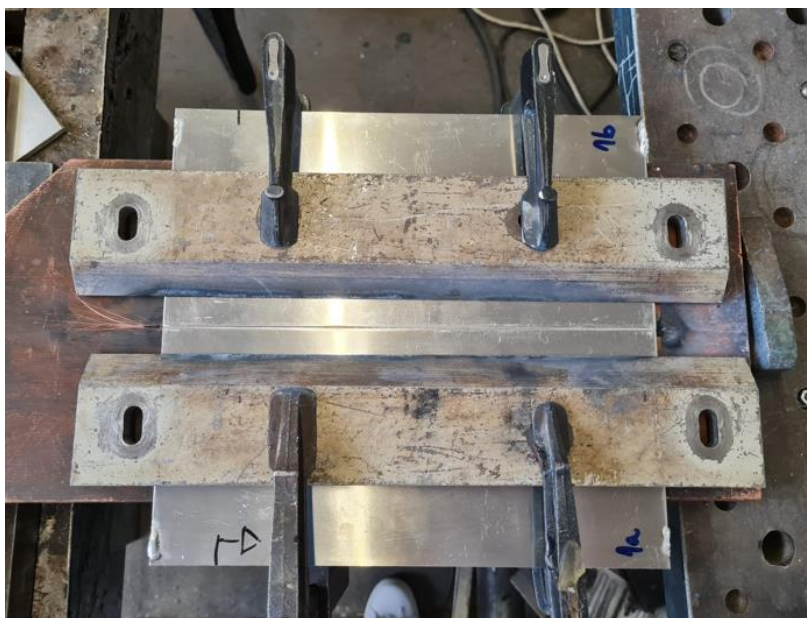
5.4. Zavarivanje uzoraka

Prije zavarivanja ploče je potrebno dovesti u ispravan položaj. Česti problem kod sučeljenog zavarivanja tankih materijala je protaljivanje zato se ispod ploča na mjestu zavora postavlja bakrena podloga. Izgled bakrene podloge prikazan je na slici 29.



Slika 29. Bakrena podloga korištena kod DC i AC zavarivanja uzoraka

Na bakrenu podlogu stavlja se ploče koje je potrebno učvrstiti stegama kako bi se osigurao ispravan položaj. Na slici 30 prikazana je priprema ploča netom prije konvencionalnog poluautomatskog DC MIG zavarivanja. Na isti način je napravljena priprema ploča i za AC MIG postupak.



Slika 30. Stegnete ploče pripremljene za DC MIG postupak zavarivanja

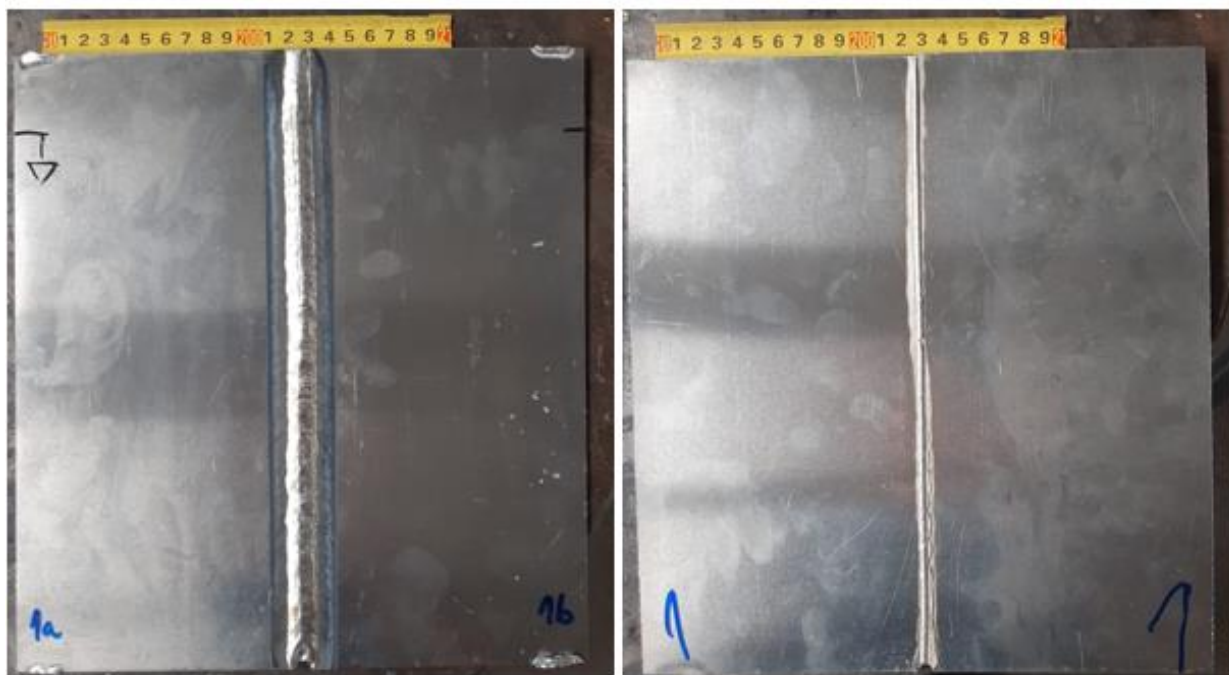
Nakon pripreme ploča i postavljanja istih u ispravan položaj slijedi poluautomatsko zavarivanje.

5.5. DC zavarivanje ploča

Prve dvije ploče zavarene su sučeljeno konvencionalnim DC MIG postupkom. Zavarivanje je provedeno lijevom tehnikom rada. U tablici 12 prikazani su parametri zavarivanja, a na slici 31 prikazan je zavareni spoj.

Tablica 12. Parametri zavarivanja kod DC MIG postupka

| | |
|------------------------|-----------|
| Jakost struje | 128 A |
| Napon električnog luka | 21,2 V |
| Slobodni kraj žice | 15 mm |
| Brzina zavarivanja | 66 cm/min |
| Protok plina | 20 l/min |
| Tehnika rada | lijeva |



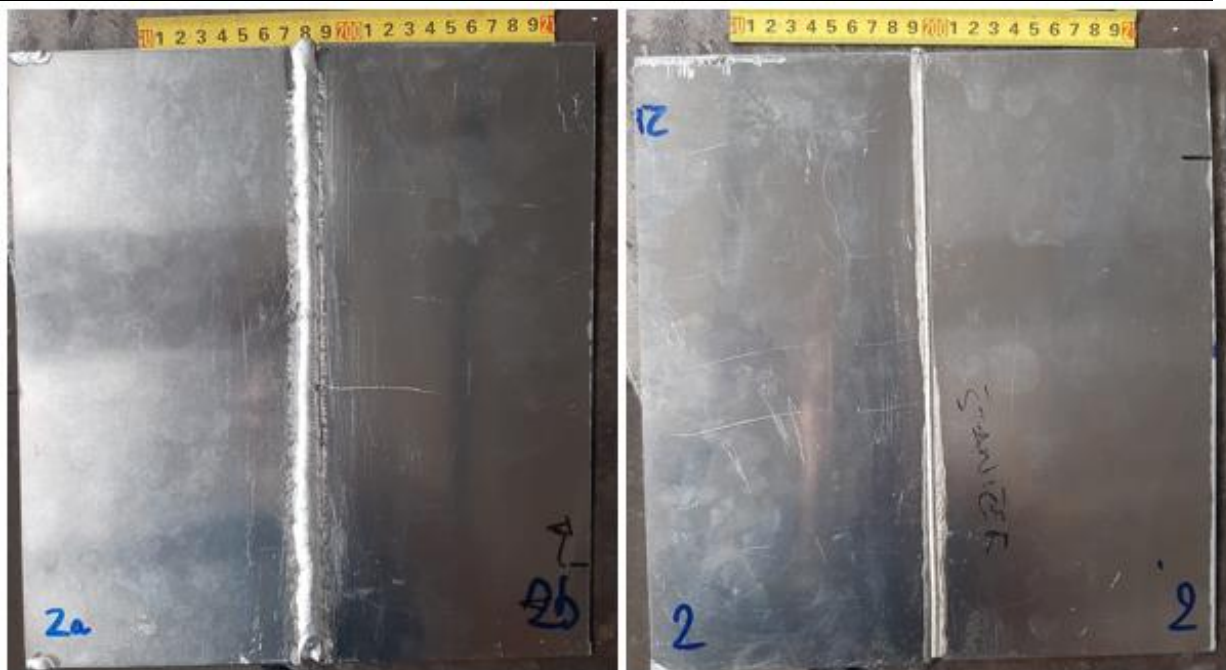
Slika 31. Lice i korijen zavarenog uzorka DC MIG postupkom

5.6. AC zavarivanje ploča

Druge dvije ploče zavarene su sučeljeno AC MIG postupkom. Zavarivanje je provedeno lijevom tehnikom rada. U tablici 13 prikazani su parametri zavarivanja, a na slici 32 prikazan je zavareni spoj.

Tablica 13. Parametri zavarivanja kod AC MIG postupka

| | |
|------------------------|-------------|
| Jakost struje | 131 A |
| Napon električnog luka | 21,9 V |
| Slobodni kraj žice | 15 mm |
| Brzina zavarivanja | 36,8 cm/min |
| Protok plina | 20 l/min |
| Tehnika rada | lijeva |



Slika 32. Lice i korijen zavarenog uzorka AC MIG postupkom

5.7. Ispitivanje zavora

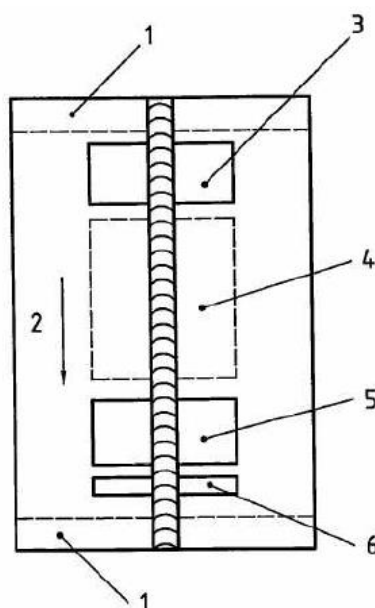
Ispitivanje zavora odvija se prema normi HRN EN ISO 15614-2. Za sučeljeni spoj s potpunom penetracijom potrebno je izvesti sljedeća ispitivanja [33]:

- vizualni pregled na cijelom zavaru
- ispitivanje penetrantima na cijelom zavaru
- statičko vlačno ispitivanje – potrebno napraviti na dva uzorka uzetih s mjesta zavora kao što je prikazano na slici 33
- ispitivanje savijanjem - potrebno napraviti na dva lica i dva korijena uzetih s mjesta zavora kao što je prikazano na slici 33
- analiza makrostrukture – potrebno napraviti na jednom uzorku uzetom s mjesta zavora kao što je prikazano na slici 33.

Slika 33 prikazuje pozicije ispitnih uzoraka na ploči koja je sučeljeno zavarena. [33]

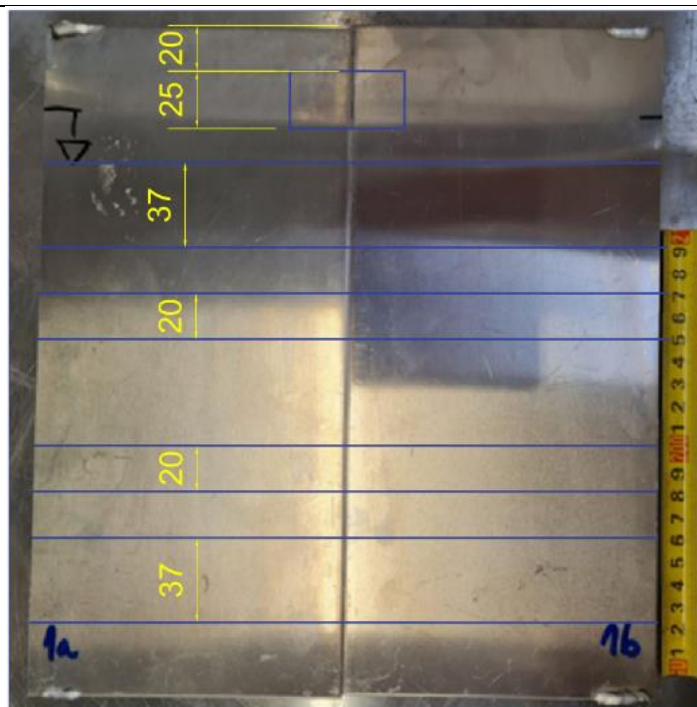
1. Sa svake strane je potrebno odbaciti 25 mm zbog potencijalnih nepravilnosti koje se javljaju na početku i završetku procesa zavarivanja uslijed nestabilnosti električnog luka.
2. Prikaz smjera zavarivanja.
3. Područje za:
 - Jedan uzorak za vlačno ispitivanje

- Uzorke za savijanje
4. Područje za dodatne uzorke ako će biti potrebni.
 5. Područje za:
 - Jedan uzorak za vlačno ispitivanje
 - Uzorke za savijanje
 6. Područje za:
 - Jedan uzorak za makro ispitivanje
 - Jedan uzorak za mikro ispitivanje



Slika 33. Pozicije ispitnih uzoraka na ploči koja je sučeljeno zavarena [33]

Na slici 34 prikazan je DC zavareni uzorak s označenim pozicijama za izradu ispitnih uzoraka.



Slika 34. DC zavareni uzorak s označenim pozicijama za izradu ispitnih uzoraka

5.7.1. Vizualni pregled

Nakon zavarivanja oba su uzorka ostavljena da se ohlade na sobnoj temperaturi. Zavari na oba uzorka su ručno četkom očišćeni te je napravljen vizualni pregled korijena i lica oba zavara. Vizualnim pregledom nisu utvrđene nikakve nepravilnosti na korijenima i licima zavara na oba uzorka. Širina oba zavara na izgled je vrlo slična. Penetracija je potpuna i korijeni zavara su vidljivi i približno sličnih dimenzija. Čađa je vidljiva sa svake strane na licu zavara izvedenog AC MIG-om.

5.7.2. Ispitivanje penetrantima

Ispitivanje penetrantima napravljeno je prema normi HRN EN 571-1:1997. Ispitivanje penetrantima se radi na cijelom zavaru. Odvija se uz pomoć sljedećih sredstava [34]:

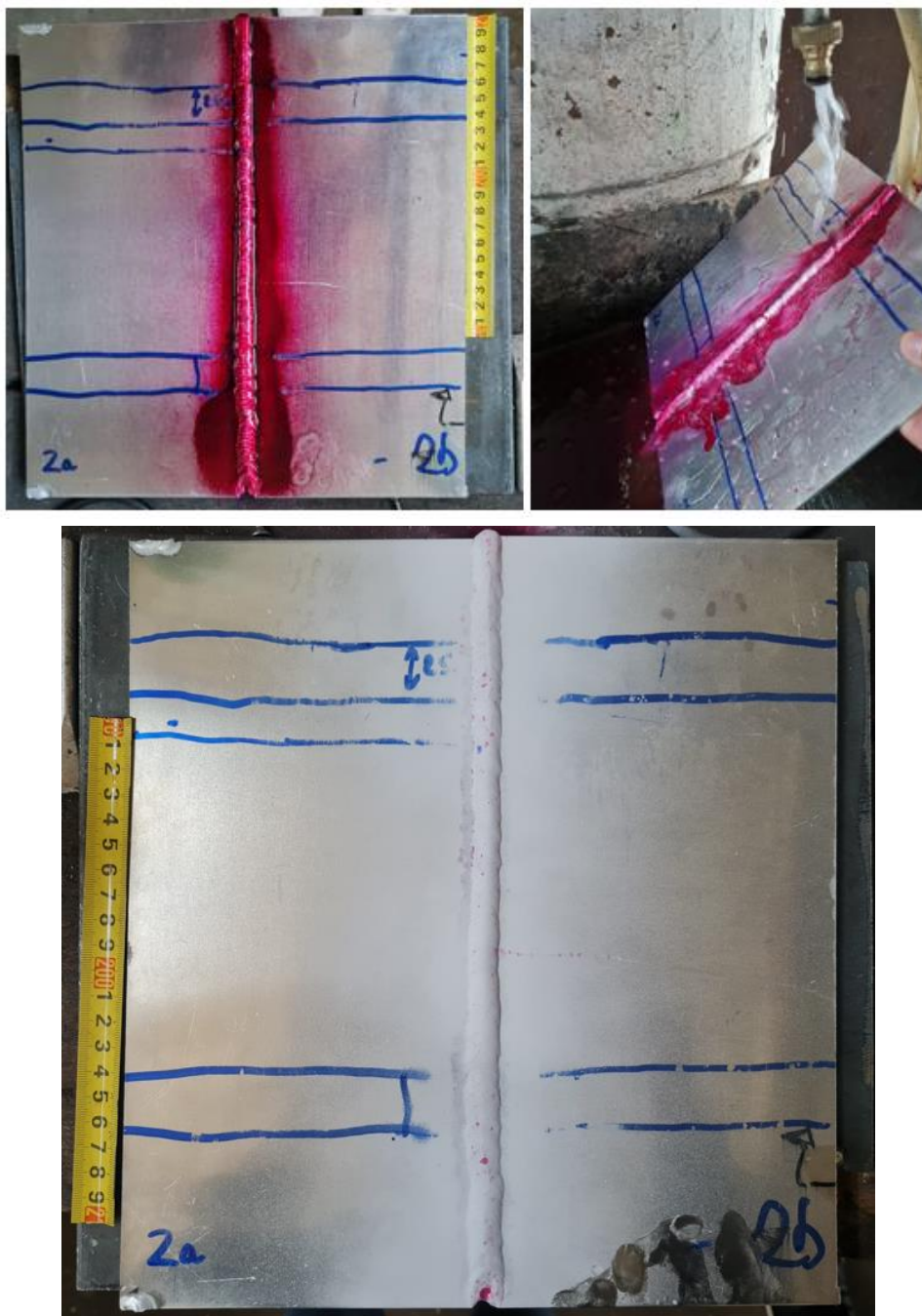
- odstranjivač
- crveni penetrant
- razvijač

Nabrojana sredstva potrebna za ispitivanje penetrantima prikazana su na slici 35.



Slika 35. Sredstva koja se koriste kod ispitivanja penetrantima

Postupak ispitivanja penetrantima započinje čišćenjem lica i korijena zavora uzoraka uz pomoć odstranjivača. Nakon toga se crveni penetrant nanosi na zavar, ostavi se 10 minuta na zavaru te se nakon toga indirektno ispere pod mlazom vode. Njegova je uloga da uđe u potencijalne pogreške zavora. Zavareni uzorak je potrebno dobro osušiti. Nakon što se zavar na uzorku osuši po zavaru se nanese razvijatelj koji djeluje 15 minuta. Njegova je uloga da prikaže penetrant u obliku kontrasta na površini zavora. Ukoliko se pojave crvene mrlje po zavaru to nam ukazuje na indikacije koje je potrebno razmotriti. Ovaj identičan postupak je odrađen na zavarima DC i AC zavarenih uzoraka. Postupak je na primjeru lica AC zavora prikazan na slici 36.



Slika 36. Postupak ispitivanja penetrantima na licu AC zavara

Na slici 37 prikazani su rezultati ispitivanja penetrantima na korijenu AC zavara.



Slika 39. Rezultati ispitivanja penetrantima na korijenu DC zavora

Na oba uzorka su vidljive indikacije na površini. Nepravilnosti utvrđene ispitivanjem penetrantima na licima zavora izvedenim DC i AC postupkom su prihvatljive.

5.7.3. Statičko vlačno ispitivanje

Uzorci za statičko vlačno ispitivanje rade se prema normi EN ISO 4136:2012. Uzorci se uzimaju s prethodno objašnjenog mjesta zavora. Uzorke je nakon rezanja potrebno izbrusiti tako da se nadvišenja na licu i korijenu zavora poravnaju s ostatkom materijala. Za ispitivanje su potrebna dva uzorka s DC zavarenog spoja označena s 1a i 1b te dva uzorka s AC zavarenog spoja označena s 2a i 2b. Dimenzije epruveta uzete su iz norme EN ISO 4136:2012. Pripremljene epruvete za statičko vlačno ispitivanje prikazane su na slici 40.



Slika 40. Epruvete uzete od DC i AC uzoraka spremne za statičko vlačno ispitivanje

Statičko vlačno ispitivanje odrađeno je na uređaju za ispitivanje naziva univerzalna kidalica. Proizvođač kidalice je WPM Njemačka, model EU 40 MOD, a kapacitet 400 kN. Ispitivanje se provodilo za svaku epruvetu zasebno prema normi EN ISO 10002 na način da je stroj primjenjivao kontinuirano vlačno opterećenje do loma epruveta. Izgled korištene kidalice nalazi se na slici 41.



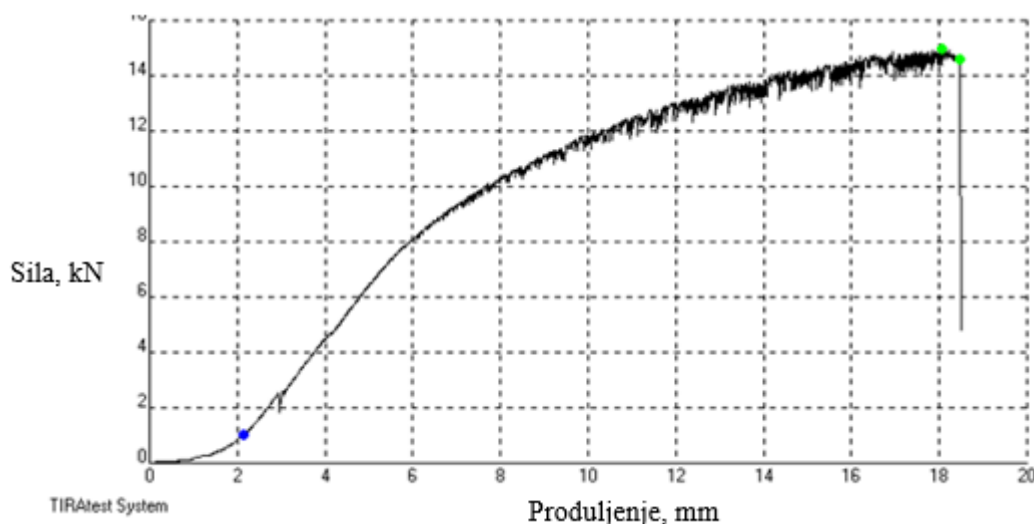
Slika 41. Univerzalna kidalica WPM Njemačka, model EU 40 MOD

Prije početka ispitivanja, preko računala su postavljeni konstantni parametri koji vrijede za sve uzorke, a to su:

- konstantna sila $F_0 = 1000 \text{ N}$
- konstantna brzina $v = 5 \text{ m/min}$.

Nakon namještanja konstantnih parametara epruvete se testiraju jedna po jedna. Stave se u čeljusti kidalice koja ih kada se proces pokrene kontinuirano vlačno opterećuje do loma. Na računalo se prati dijagram sila-produljenje iz kojeg je vidljiva vlačna čvrstoća zavarenog uzorka $R_m(w)$, MPa. Iz norme EN ISO 15614-2 proizlazi uvjet da vlačna čvrstoća uzorka mora biti veća ili jednaka vlačnoj čvrstoći osnovnog materijala $R_m(pm)$, MPa pomnoženo s faktorom efikasnosti spoja koji za AlMg iznosi $T=1$. Vlačna čvrstoća osnovnog materijala aluminijske legure 5086 iznosi 207 MPa.

Do loma epruvete 1a je došlo u zoni utjecaja topline, što nije neuobičajena pojava. Na slici 42 prikazan je dijagram sila-produljenje. Iz njega je vidljivo da je vlačna čvrstoća zavarenog uzorka 209,32 MPa, dok je vlačna čvrstoća osnovnog materijala između vrijednosti 207 MPa. Prema uvjetu iz norme EN ISO 15614-2 ovaj zavar zadovoljava.



Slika 42. Dijagram sila-produljenje za prvi DC zavareni uzorak

Prikaz uzorka 1b DC zavarenog spoja na kidalici nalazi se na slici 43. Vidljivo je da će se puknuće dogoditi na osnovnom materijalu. Puknuće u osnovnom materijalu ukazuje na to da zavar ima veću vlačnu čvrstoću od osnovnog materijala. Na slici 44 lijevo se nalazi prvi DC uzorak 1a nakon ispitivanja, a desno uzorak 1b.

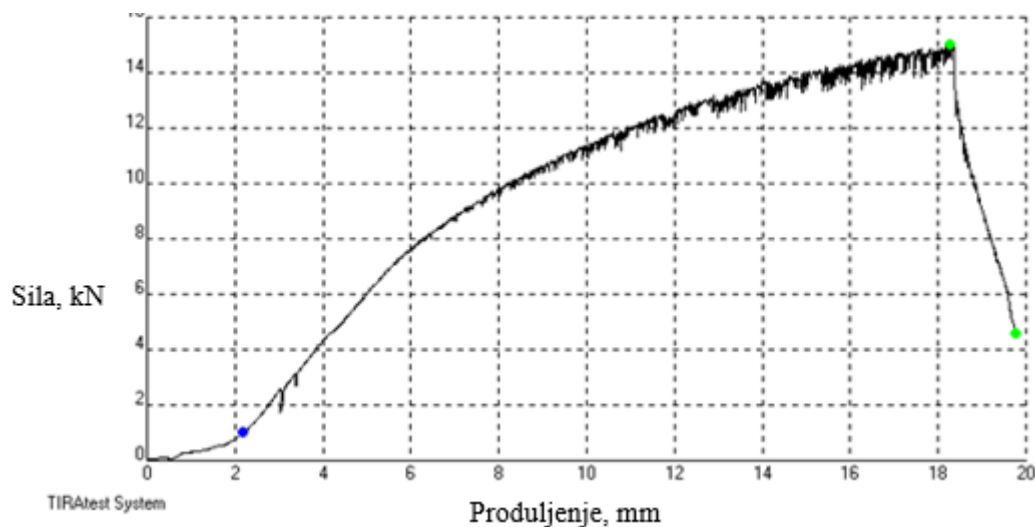


Slika 43. Prikaz uzorka 1b DC zavarenog spoja na kidalici



Slika 44. Uzorak 1a i 1b DC zavarenog spoja nakon ispitivanja na kidalici

Na slici 45 nalazi se dijagram sila-produljenje uzorak 1b DC zavarenog spoja. Ovaj zavareni spoj zadovoljava uvjete što proizlazi iz toga da je puknuo osnovni materijal, a ne zavareni spoj.

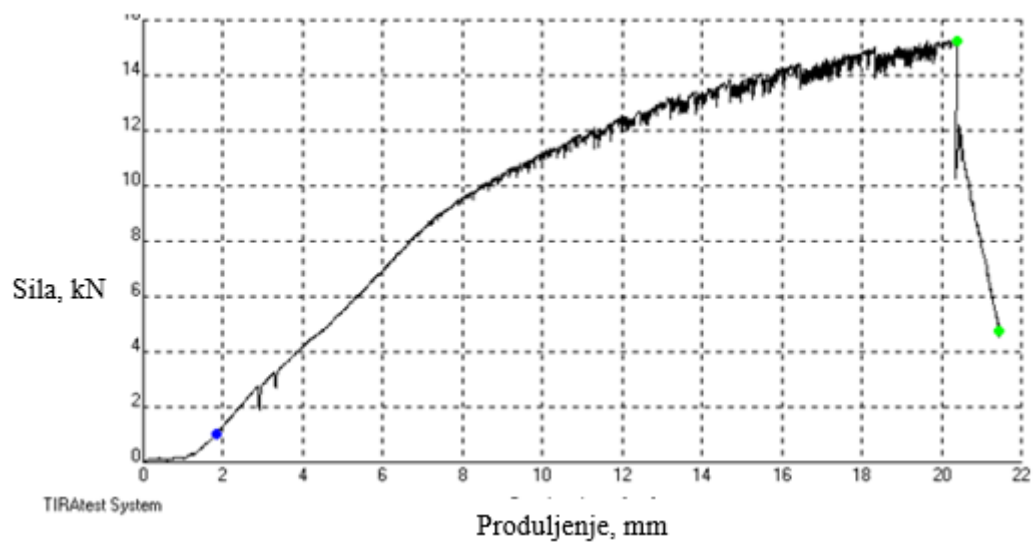


Slika 45. Dijagram sila-produljenje za uzorak 1b DC zavarenog spoja

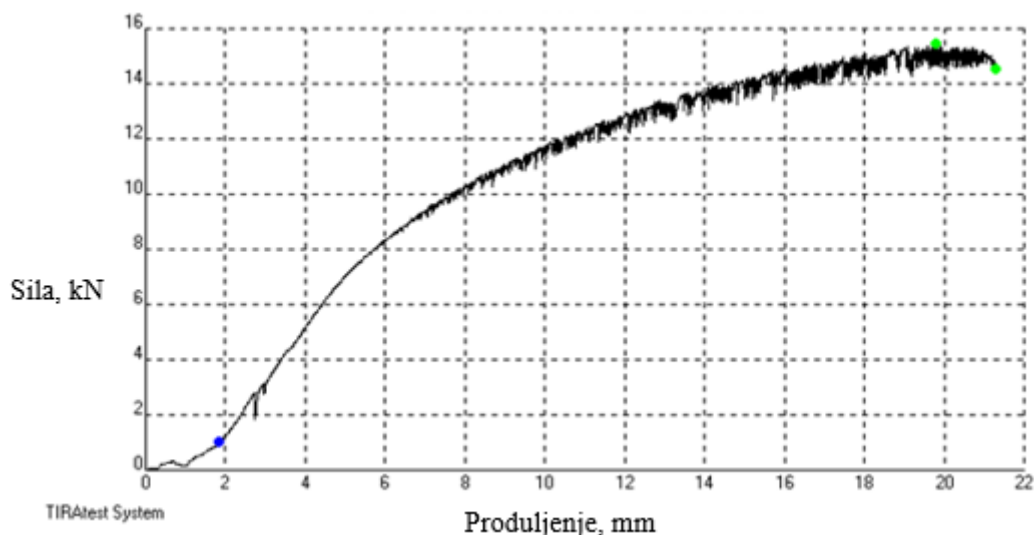
Identična se situacija dogodila i kod AC zavarenih uzoraka. Jedan od njih je puknuo u zoni utjecaja topline, a drugi u osnovnom materijalu. Na slici 46 prikaz je AC zavarenih uzoraka nakon ispitivanja na kidalici, a na slici 47 i 48 dijagrami sila-produljenje. Vlačna čvrstoća uzorka 2a AC zavarenog spoja je 205,82 MPa što znači da on prema normi ne zadovoljava, dok je vlačna čvrstoća uzorka 2b AC zavarenog spoja 214,28 MPa što prema prethodno spomenutoj normi zadovoljava.



Slika 46. Uzorci 2a i 2b AC zavarenog spoja nakon ispitivanja na kidalici



Slika 47. Dijagram sila-produljenje za uzorak 2a AC zavarenog spoja



Slika 48. Dijagram sila-produljenje za uzorak 2b AC zavarenog spoja

Iz dobivenih rezultata statičko vlačnim pokusom može se zaključiti da su oba dva postupka zavarivanja dosta dobri u izradi kvalitetnog zavara. Jedan od četiri ispitanih zavarenih spojeva ne zadovoljava.

5.7.4. Ispitivanje savijanjem

Ispitivanje savijanjem radi se prema normi EN ISO 5173. Uzorci se uzimaju s prethodno objašnjenog mjesta zavara. Uzorke je nakon rezanja potrebno izbrusiti tako da se nadvišenja na licu i korijenu zavara poravnaju s ostatkom materijala. Uzimaju se po dva uzorka lica i dva uzorka korijena za DC i AC zavarene spojeve. Sve dimenzije epruveta su jednake. Pripremljene epruvete za ispitivanje savijanjem prikazane su na slikama 49 i 50.



Slika 49. Epruvete uzete od DC uzoraka spremne za ispitivanje savijanjem



Slika 50. Epruvete uzete od AC uzoraka spremne za ispitivanje savijanjem

Nakon priprema epruveta potrebno je pripremiti stroj za savijanje. Prema normi EN ISO 15614-2 određuje se promjer trna. Formula za promjer trna je [33][33]:

$$d = \frac{100 \times t_s}{A} - t_s \quad (2)$$

Gdje je:

d – promjer trna, mm

t_s - debljina epruvete, mm

A - istezljivost osnovnog materijala, %

Prema navedenom izrazu ispada da je promjer trna $d = 12$ mm. Iz norme EN ISO 5173 proizlazi izraz za udaljenost između valjaka koji glasi [35]:

$$d + 2t_s + 3 \leq l \leq d + 3t_s \quad (3)$$

Gdje je:

l – udaljenost između valjaka, mm

d – promjer trna, mm

t_s - debljina epruvete, mm

Prema navedenom izrazu ispada da je udaljenost između valjaka $l = 21$ mm.

Na slici 51 prikazan je stroj na kojem se izvodi ispitivanje savijanjem. Epruvete se postavljaju na valjke tako da se zavareni dijelovi nalaze točno na sredini trna. Trn se spušta i savija zavar epruvete kontinuirano. Ukoliko dođe do pucanja materijala ispitivanje se zaustavlja, Ako ne dođe do pucanja materijala uzorak se savija do 180° .



Slika 51. Stroj za ispitivanje savijanjem

Na slici 52 prikazani su DC zavareni uzorci podvrgnuti savijanju. Dva korijena zavora nalaze se na slici lijevo, a dva lica zavora nalaze se na slici desno.



Slika 52. Korijeni i lica DC zavora ispitanih savijanjem

Na slici 53 prikazani su AC zavareni uzorci podvrgnuti savijanju. Dva korijena zavara nalaze se na slici lijevo, a dva lica zavara nalaze se na slici desno.



Slika 53. Korijeni i lica AC zavara ispitanih savijanjem

Oba uzorka imaju sitne pukotine nastale ispitivanjem savijanjem na korijenima zavara. Lica DC i AC zavarenih uzoraka nemaju vidljivih pukotina nakon ovom ispitivanja. Prema normi 15614-2 zavareni uzorci zadovoljavaju jer su veličine pukotina manje od 3 mm.

5.7.5. Analiza makrostrukture zavara

Uzorak za makroanalizu uzima se od dijela zavara s već prije prikazanog mjesta. Izrađuju se prema normi HRN EN ISO 17639. Uzeti su po jedan uzorak od DC zavara te jedan uzorak od AC zavarenih ploča. Rubove uzoraka potrebno pripremiti na način da se prvo ručno izbruse brusnim papirima granulacija 100 i 200, a zatim se poliraju na strojnoj brusilici. Brušenje uzoraka odvijalo se konstantnom brzinom od 300 o/min. Granulacije brusnih papira koji su se koristili su redom 320, 600, 1000, 2400 te 4000. Stroj za brušenje ima vodeno hlađenje kroz cjevčicu te je prikazan na slici 54.



Slika 54. Stroj za brušenje makro uzoraka

Kako bi se zavar dobro vidio nakon pripreme površina uzoraka brušenjem potrebno ih se podvrgnuti nagrivanju. Taj postupak provodi se u otopini pod nazivom Keller 10 s. Kemijski sastav Keller otopine prikazan je u tablici 14. Slika 55 prikazuje postupak nagrivanja uzorka u otopini.

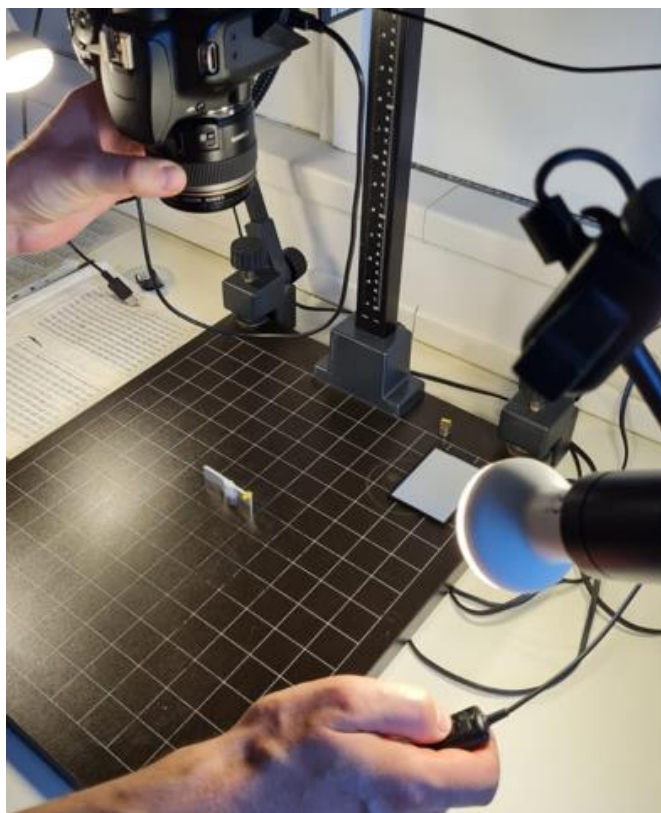
Tablica 14. Kemijski sastav Keller reagensa

| | |
|------------------|--------|
| HNO ₃ | 2.5 ml |
| HCl | 1.5 ml |
| HF | 1 ml |
| Destilirana voda | 95 ml |



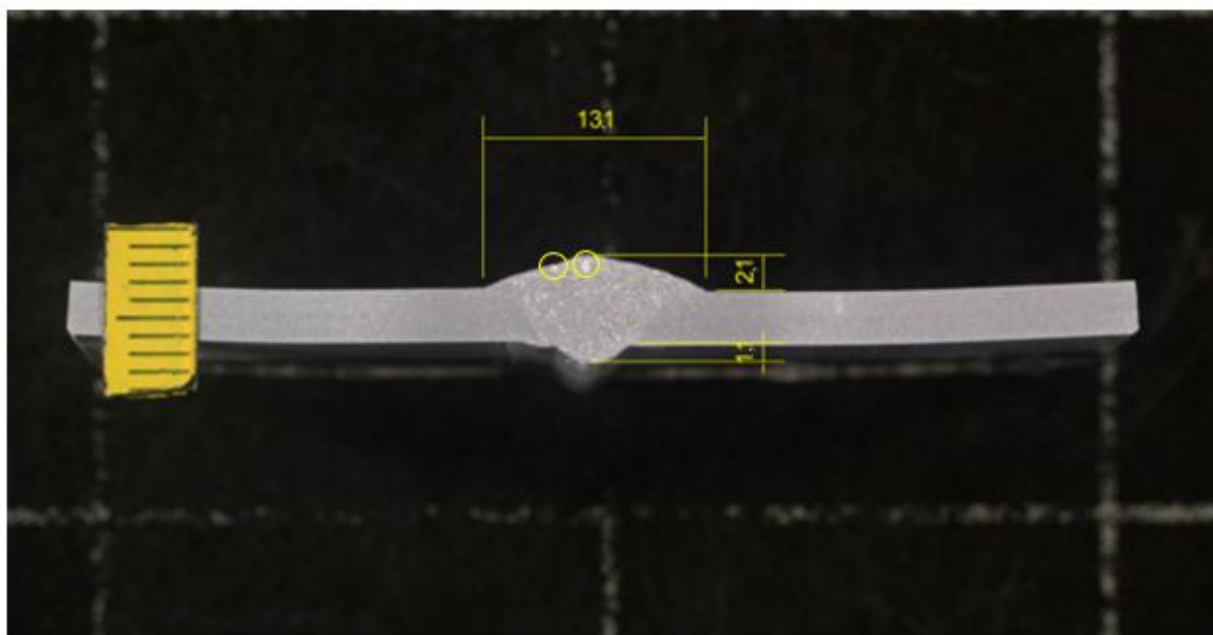
Slika 55. Nagrivanje uzorka u Keller otopini

Uzorci se nakon nagrizanja u Keller otopini ispiru vodom. Nakon ispiranja potrebno ih je osušiti. Makro-uzorci se nakon opisane pripreme slikaju na način koji je prikazan na slici 56.



Slika 56. Slikanje makro uzoraka zavara

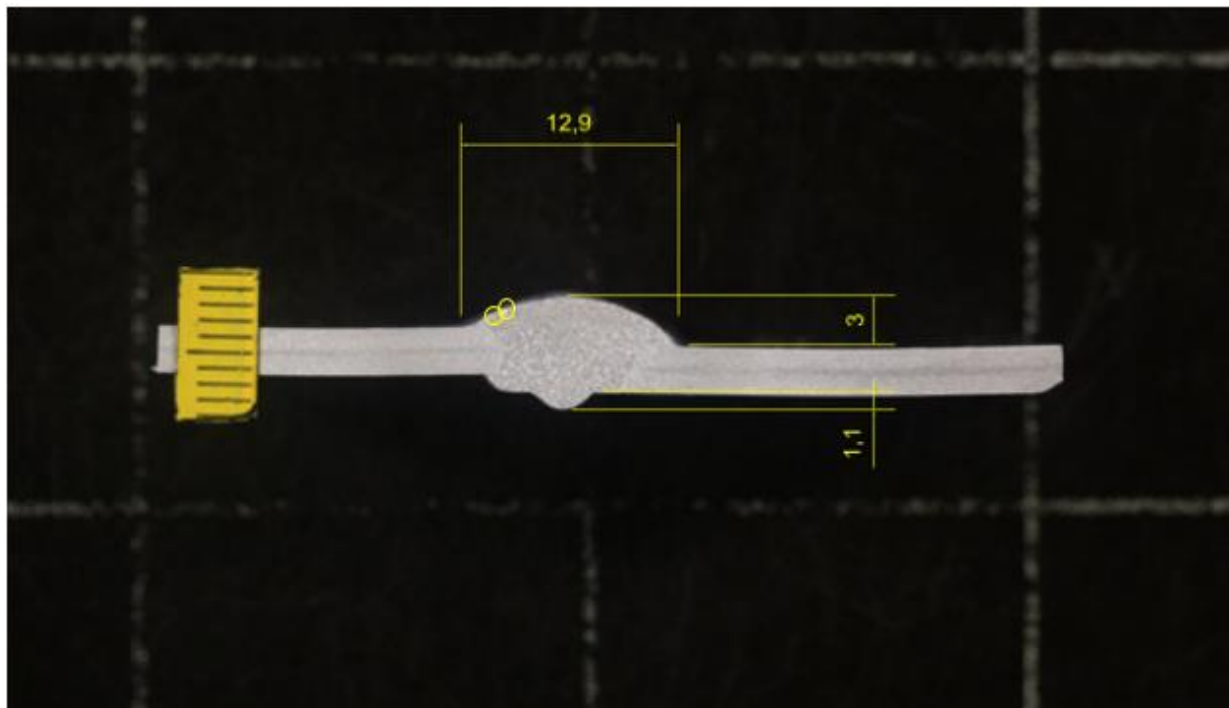
Na slici 57 prikazan je makro-uzorak DC zavarenog spoja.



Slika 57. Makro-uzorak DC zavarenog spoja

Na makro-uzorku DC zavarenog spoja vidljive su sitne pore. Dvije izraženije nalaze se na licu zavarenog spoja. Osim pora, druge greške zavara nisu uočene. Penetracija u jednom prolazu je potpuna. Lice zavara iznosi 2,1 mm, korijen 1,1 mm dok je širina zavara 13,1 mm.

Na slici 58 prikazan je makro-uzorak AC zavarenog spoja.

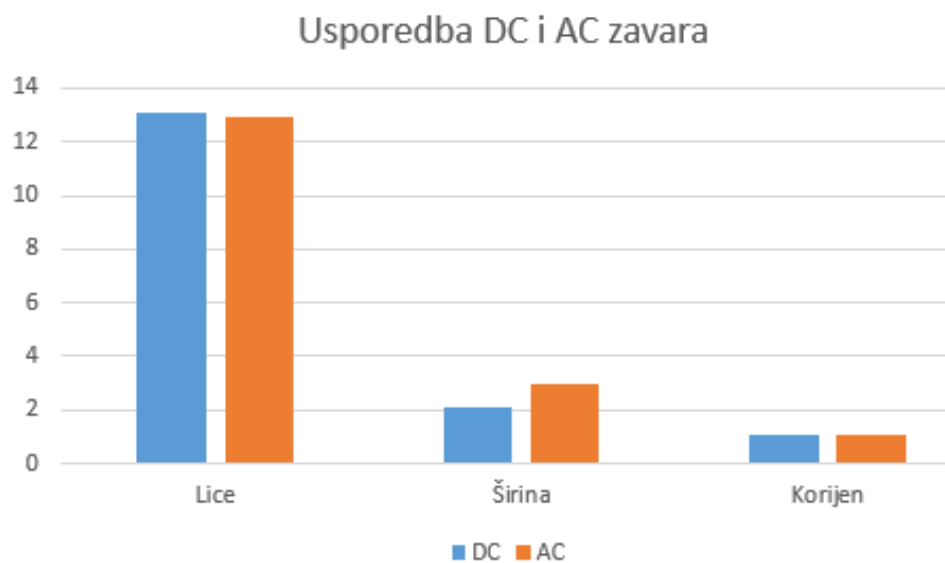


Slika 58. Makro-uzorak AC zavarenog spoja

Na makro-uzorku AC zavarenog spoja vidljive su sitne pore na licu zavara. Osim pora, druge greške zavara nisu uočene. Penetracija u jednom prolazu je potpuna. Lice zavara iznosi 3 mm, korijen 1,1 mm dok je širina zavara 12,9 mm.

Uspoređujući makro ispitivanja DC i AC kod DC postupka je zavareni spoj jednoličniji, ploče osnovnog materijala su u istoj razini, dok su kod AC postupka malo zamaknute. Potpuna penetracija izvedena je kod oba uzorka, korijen zavara sličnih je dimenzija kod oba uzroka, a razlika u širini zavara je minimalna. Najveća razlika u zavarenim spojevima je uz poprilično različiti izgled profina i u nadvišenjima koje je skoro za milimetar veće kod AC postupka, što znači da je deponit materijala veći u tom slučaju.

Na slici 59 prikazana je grafička usporedba rezultata analize makrostrukture DC i AC zavara.



Slika 59. Usporedba rezultata analize profila DC i AC zavara

6. ZAKLJUČAK

Suvremena industrija teži za sve kvalitetnijim materijalima prihvatljive cijene i vrhunskih karakteristika. Od otkrića aluminijskog legura taj se materijal neprekidno koristi u inženjerskoj industriji. Odlične karakteristike aluminijskih legura, posebice njegovih legura, stavljaju ga na vrh piramide najkorištenijih materijala u današnje doba. Koristi se u raznim granama industrije poput građevinske, prehrambene, farmaceutske, automobilske i sl. Uz malu masu, povoljan omjer gustoće i čvrstoće, vrlo dobru električnu vodljivost te dobra mehanička svojstva aluminij ima i svojstvo jako dobre zavarljivosti. Kako bi se ono iskoristilo što je bolje moguće, prije svega je potrebno napraviti dobru pripremu površine i odabrati ispravan postupak za spajanje materijala. To se uobičajeno izvodi TIG ili MIG postupcima. MIG postupak zavarivanja koristi se u širokoj primjeni zavarivanja tankih limova no pojavom novih zahtjeva za kvalitetu zavara razvio se i modificirani AC MIG postupak koji se temelji na izmjeničnoj struji. Ispravnim izborom parametara poput napona električnog luka, jakosti struje zavarivanja, brzine zavarivanja, protoka i vrste zaštitnog plina i sl. dobiva se vrlo kvalitetan zavareni spoj relativno ekonomične proizvodnje.

U eksperimentalnom dijelu rada poluautomatiziranim su postupkom zavarena dva uzorka. Jedan od njih zavaren je konvencionalnim DC MIG postupkom dok je drugi zavaren modificiranim AC MIG postupkom. Nakon zavarivanja provedena su ispitivanja prema normi EN ISO 15614-2, a to su vizualni pregled zavara, ispitivanje penetrantima, statičko vlačno ispitivanje, ispitivanje savijanje te analiza makrostrukture. Analizirani rezultati svih ispitivanja za oba postupka zavarivanja dali su zadovoljavajuće rezultate prema spomenutim normama. Vizualni pregled i ispitivanje penetrantima na oba zavara nisu ukazivali na nikakve značajne pogreške u zavarima. Statičko vlačno ispitivanjem utvrđeno je da je kvaliteta oba zavara AC i DC postupkom približno jednaka. Po jedan uzorak od svakog postupka je puknuo u ZUT-u i po jedan od svakog u osnovnom materijalu. Sva četiri uzorka zadovoljili su uvjete prema normi EN ISO 15614-2. Ispitivanje zavara na savijanje u oba je slučaja pokazalo sitne greške na korijenima zavara koje su u granicama koje propisuje norma EN ISO 15614-2, dok se na licima nije pojavila niti jedna. Analizom makrostrukture utvrđeno je da oba zavara sadrže sitne pore. Najveće razlike u postupcima izvedenim istosmjernom i izmjeničnom strujom su izgled profila zavara koji je ujednačeniji kod DC postupka nego kod AC te dimenzija lica zavara koja je skoro za milimetar veća kod AC postupka što znači da u tom slučaju deponit materijala bio očekivano veći. Povoljnim odabirom EN omjera taljenja žice dodatnog materijala je veće i premošćivanje zazora kod izmjeničnog postupka bolje nego kod istosmjernog.

Analiza sveukupnih rezultata ispitivanja pokazala je da su oba postupka zavarivanja, i konvencionalni DC i modificirani AC MIG dovoljno dobri i više manje sličnih rezultata kvalitete zavara. Automatizacija i robotizacija postupaka sigurno bi dala bolje rezultate i ona je svakako moguća za MIG postupke. Ukoliko postoji mogućnost za korištenjem postupka s izmjeničnom strujom u slučaju poput opisanog u radu na materijalu male debljine aluminijske legure poželjnije ga je koristiti od konvencionalnog prvenstveno zbog manjeg utjecaja topline na materijal te zadržavanja povoljnih svojstava materijala i nakon zavarivanja.

LITERATURA

- [1] G. Mathers: The welding of aluminium and its alloys, Woodhead Publishing Limited, Cambridge, England, 2002.
- [2] T. Filetin, F. Kovačićek, J. Indof: Svojstva i primjena materijala, FSB, Zagreb, 2013.
- [3] E. Balomenos, C. Kemper, P. Diamantopoulos, D. Panias, I. Paspaliaris, B. Friedrich, Enexal: Novel Technologies for Enhanced Energy and Exergy Efficiencies in Primary Aluminium Industry, MJOM, 15 (2009) 4, 203-217
- [4] D. Skejić, I. Boko, N. Torić: Aluminiij kao materijal za suvremene konstrukcije, GRAĐEVINAR 67, 2015
- [5] Anzulović, B.: Zavarljivost i pravilo odlučivanja u zavarivanju, Zavarivanje 21 (1978)
- [6] Z. Šanko: Odabir dodatnog materijala kod zavarivanja aluminiija, 5. seminar, Aluminiij i aluminijske legure – rukovanje, priprema, zavarivanje, Pula, 2008.
- [7] G. Vručinić: Zavarivanje i zavarljivost aluminiija i legura, 5. seminar, Aluminiij i aluminijske legure – rukovanje, priprema, zavarivanje, Pula, 2008.
- [8] I. Lučić: Hrvatsko društvo za tehniku zavarivanja (Croatian Welding Sociendy), Zagreb, 2003.
- [9] <http://www.referansmetal.com/alasimli-aluminyum/product/142/uzay-havacilik-savunma/sac/cr-1-1-0-18-almg3-5754-o-h111?lang=en> preuzeto 14.6.2022.
- [10] <http://www.referansmetal.com/alasimli-aluminyum/product/142/uzay-havacilik-savunma/sac/cr-1-1-0-18-almg3-5754-o-h111?lang=en> preuzeto 14.6.2022.
- [11] <http://www.novi-svjetski-poredak.com/2015/06/22/aluminijska-folija-ovo-svi-imamo-ukuci-i-ubijamo-se-polako/> preuzeto 1.7.2022.
- [12] <https://www.krajina-auto.com/felge.php?id=1> preuzeto 1.7.2022.
- [13] <https://radiosarajevo.ba/magazin/zivot-i-stil/svakodneвно-ga-unosimo-moze-li-nam-i-koliko-naskoditi-aluminiij/265253> preuzeto 1.7.2022.
- [14] <https://www.autonet.hr/arhiva-clanaka/slika/20561> preuzeto 1.7.2022.
- [15] M. Rudan: MIG zavarivanje tankih aluminijskih limova: Tehnologija, oprema, primjena, 5. seminar, Aluminiij i aluminijske legure – rukovanje, priprema, zavarivanje, Pula, 2008.
- [16] https://www.emajstor.hr/clanak/457/zavarivanje_aluminiija_mig_mag_i_tig_zavarivanje preuzeto 2.7.2022.
- [17] K. Weman, G. Linden: MIG Welding Guide, Woodhead Publishing Limited, England, 2006.
- [18] <https://hr.home-journal.net/7387019-mig-mag-welding-machine> preuzeto 16.4.2022.

- [19] G. Pastras, A. Fysikopoulos, G. Chryssolouris: A numerical approach to the energy efficiency of laser welding, *Int J Adv Manuf Technol*, 2017.
- [20] S. Kralj, Z. Kožuh, Š. Andrić: Zavarivački i srodni postupci, Priručnik, Zagreb, 2015.
- [21] Godec D., Šercer M.: Aditivna proizvodnja, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2015.
- [22] Kovačević B.; Živčić M.: Zavarivanje aluminjskih materijala (šesti dio): Znanstveno stručni časopis Zavarivanje br 1/2 2015.g
- [23] M. Liber: Optimizacija parametara za aditivnu proizvodnju legure Al-Mg električnim lukom i žicom, Završni rad, FSB, Zagreb, 2018.
- [24] M. Gojić: Tehnike spajanja i razdvajanja materijala, Metalurški fakultet, Sisak, 2003.
- [25] <https://weldingmastermind.com/understanding-ac-and-dc-for-mig-welding/> preuzeto 21.4.2022.
- [26] H. J. Park, D. C. Kim, S. Rhee i M. J. Kang, The arc phenomenon by the characteristic of EN ratio, *Int J Adv Manuf Technol*, pp. 867-875, 30, 2010.
- [27] A. Ikram, H. Chung: The Effect of EN Ratio and Current on Microstructural and Mechanical Properties of Weld Joined by AC-GMAW on Square Groove Butt Joints, *Applied Sciences*
- [28] J. Adamiec, T. Pfeifer: Effect of Electrode Negative Ratio in AC MIG Welding of Aluminium, *Solid State Phenomena Vol 211*, pp. 39-46, 29
- [29] S. Kralj, B. Radošević, Z. Kožuh, I. Garašić: Podloge iz kolegija „Strojevi i oprema za zavarivanje“, FSB, Zagreb, 2013.
- [30] S. Brumm, G. Bürkner: Gas metal arc pulse welding with alternating current for lightweight materials, Conference MEFORM 2015, Light Metals – Forming Technologies and Further Processing, 2019.
- [31] <https://www.daihen-usa.com/product/wb-w400/> preuzeto 26.6.2022.
- [32] <https://www.ezg.hr/proizvodi/wire/EZMIGALMG5.html> preuzeto 26.6.2022.
- [33] HRN EN ISO 15614-2:2007
- [34] EN ISO 571-1:1997
- [35] EN ISO 5173:2010+A1:2011