

Utjecaj zaštitnog plina i parametara AC MIG zavarivanja dvostrukim pulsom na geometriju zavora

Hnatek, Matija

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:235:627315>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-09-06**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Matija Hnatek

Zagreb, 2024.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Zoran Kožuh, dipl. ing.

Student:

Matija Hnatek

Zagreb, 2024.

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

Zahvaljujem se mentoru prof. dr. sc. Zoranu Kožuhu, asistentici dr.sc. Maji Jurici i ostalim djelatnicima Katedre za zavarene konstrukcije na pomoći prilikom izrade rada.

Zahvaljujem se roditeljima, bratu, baki i djedu, prijateljima i djevojci Anamariji na beskonačnoj podršci.

Matija Hnatek



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: **Matija Hnatek** JMBAG: 0035216535

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Utjecaj zaštitnog plina i parametara AC MIG zavarivanja dvostrukim pulsom na geometriju zavara**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Influence of shielding gas and AC Wave pulse welding parameters on weld geometry**

Opis zadatka:

U teorijskom dijelu rada potrebno je navesti najčešće korištene postupke zavarivanja aluminija i aluminijskih legura, te ih ukratko opisati. Detaljno opisati postupak MIG zavarivanja, s naglaskom na nove inačice navedenog postupka koje se temelje na različitim strujnim impulsima. Isto tako je potrebno ukratko opisati problematiku zavarivanja aluminija i aluminijskih legura, te navesti koji se zaštitni plinovi koriste.

U eksperimentalnom dijelu rada je potrebno izraditi plan pokusa prema kojem će biti moguće odrediti utjecaj parametara AC MIG zavarivanja kao i zaštitnog plina na geometriju zavara. Kao osnovni materijal izabrati aluminijsku leguru. Analizom dobivenih rezultata odrediti optimalnu kombinaciju parametara zavarivanja i zaštitnog plina koja bi rezultirala najvećom produktivnošću procesa uz zadovoljavajuću dobivenu geometriju.

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

Zadatak zadan:

18. siječnja 2024.

Datum predaje rada:

21. ožujka 2024.

Predvideni datumi obrane:

25. – 29. ožujka 2024.

Zadatak zadao:

Prof.dr.sc. Zoran Kožuh

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Ivica Garašić

SADRŽAJ

1. UVOD.....	1
2. POSTUPCI ZAVARIVANJA ALUMINIJA I ALUMINIJSKIH LEGURA.....	3
2.1. MIG postupak zavarivanja	3
2.1.1. AC MIG postupak zavarivanja.....	5
2.1.2. AC impulsni MIG postupak zavarivanja.....	6
2.1.3. AC Wave impulsni MIG postupak zavarivanja.....	9
2.1.4. CMT (Cold Metal Transfer) postupak zavarivanja.....	12
2.2. TIG postupak zavarivanja	13
2.3. Plazma zavarivanje.....	13
2.4. Lasersko zavarivanje.....	14
2.5. Zavarivanje trenjem uz miješanje	14
3. UTJECAJ PARAMETARA MIG ZAVARIVANJA NA GEOMETRIJU ZAVARA.....	16
3.1. Utjecaj EN omjera na geometriju zavara	16
3.2. Utjecaj EN omjera na sposobnost premošćivanja.....	21
3.3. Utjecaj parametara impulsa na geometriju i mikrostrukturu zavara	22
3.4. Utjecaj frekvencije na geometriju zavara.....	23
3.5. Utjecaj EN omjera na brzinu dobave žice i količinu depozita dodatnog materijala ..	24
3.6. Usporedba geometrije zavara kod AC MIG-P i AC Wave MIG-P postupka	25
4. PROBLEMATIKA ZAVARIVANJA ALUMINIJA I ALUMINIJSKIH LEGURA	28
4.1. Utjecaj topivosti vodika	28
4.2. Utjecaj električne vodljivosti na geometriju zavara.....	30
4.3. Toplinska vodljivost aluminijske legure.....	30
4.4. Pukotine.....	31
4.4.1. Pukotine u krateru.....	31
4.4.2. Uzdužne pukotine.....	32
4.5. Nepotpuna penetracija.....	33
4.6. Naljepljivanje	33
4.7. Toplinske deformacije.....	33
5. ZAŠTITNI PLINOVI ZA ZAVARIVANJE ALUMINIJA I ALUMINIJSKIH LEGURA	35
6. EKSPERIMENTALNI DIO	39
6.1. Osnovni materijal.....	39
6.2. Dodatni materijal.....	40
6.3. Oprema za zavarivanje.....	41
6.4. Zaštitni plinovi	43
6.5. Pripremljeni spoj.....	44
6.6. Parametri zavarivanja.....	44
6.7. Vizualna kontrola zavara i izrada makroizbrusaka	46
6.8. Utjecaj zaštitnog plina na geometriju zavara	53
6.9. Utjecaj promjene Wave frekvencije na površinu zavara i penetracije.....	56
6.10. Grafički prikaz izmjerenih rezultata geometrije zavara	57
6.11. Analiza nepravilnosti zavara.....	60
7. ZAKLJUČAK.....	62
LITERATURA.....	63

POPIS SLIKA

Slika 1. Shema MIG postupka zavarivanja [7].....	3
Slika 2. Izgled profila zavara pri AC MIG zavarivanju korištenjem različitog omjera negativnog polariteta od 0% do 90% [7].....	5
Slika 3. Oblik strujnog vala kod AC-MIG zavarivanja, Lincoln Electric [8]	5
Slika 4. Valni oblik struje kod AC impulsnog MIG zavarivanja na OTC Daihen DW-300 za EN omjer manji ili jednak 30% (a) te omjer veći od 30% (b) [9].....	6
Slika 5. Valni oblik struje kod impulsnog AC MIG zavarivanja [10]	7
Slika 6. Utjecaj EN omjera na oblik zavara [11].....	8
Slika 7. Usporedba količine proizvedenog dima prilikom zavarivanja DC i AC impulsnim MIG zavarivanjem [12]	8
Slika 8. Utjecaj promjene Wave frekvencije na izgled zavara kod AC Wave impulsnog MIG zavarivanja aluminija [13].....	9
Slika 9. Valni oblik superponiranog niskofrekventnog vala [14]	9
Slika 10. Oblik vala kod AC Wave impulsnog zavarivanja [15]	10
Slika 11. Primjer valnog oblika jakosti struje kod AC Wave impulsnog zavarivanja OTC Daihen [13].....	11
Slika 12. Dinamička karakteristika AC Wave impulsnog MIG postupka i pripadajući prijenos dodatnog materijala [16].....	12
Slika 13. Ciklus prijenosa metala kod CMT postupka [17]	13
Slika 14. Shema zavarivanja trenjem uz miješanje [6]	15
Slika 15. Utjecaj EN omjera na oblik navara napravljenih AC MIG postupkom uz konstantnu struju zavarivanja [19].....	17
Slika 16. Presjeci zavarenih spojeva napravljenih AC MIG postupkom uz različite parametre jakosti struje i EN omjere [20]	18
Slika 17. Usporedba dubine penetracije (P) pri različitim EN omjerima i jakosti struje Ia [20]	19
Slika 18. Usporedba visine nadvišenja (R) pri različitim EN omjerima i jakosti struje Ia [20]	19
Slika 19. Usporedba širine zavara pri različitim EN omjerima i jakosti struje Ia [20]	20
Slika 20. Profili zavarenih spojeva izvedenih AC MIG-P postupkom uz različite omjere negativne komponente [21]	21
Slika 21. Usporedba sposobnosti premošćivanja kod AC MIG-P postupka uz varijabilne udaljenosti i EN omjere [10]	21
Slika 22. Utjecaj promjena načina zavarivanja iz DC u AC na kontinuiranom zavarenom spoju uz konstantnu brzinu zavarivanja [3].....	22
Slika 23. Izgled zavara izrađenog AC Wave impulsnim MIG postupkom pri različitim frekvencijama [24].....	23
Slika 24. Makrostruktura zavarenog spoja AC Wave impulsnim MIG postupkom uz različite impulsne frekvencije i 50% EN [21]	24
Slika 25. Povezanost brzine dobave žice i jakosti struje zavarivanja uz različite EN omjere AC impulsnog MIG zavarivanja [10].....	24
Slika 26. Ovisnost veličine rastaljene kapljice dodatnog materijala o EN omjeru uz različite jakosti struje [10].....	25
Slika 27. Usporedba količine rastaljenog dodatnog materijala kod impulsnog MIG zavarivanja uz različite EN omjere [12]	25
Slika 28. (a) Poprečni presjek zavara kod AC impulsnog MIG postupka, (b) Najveći poprečni presjek zavara kod AC Wave impulsnog MIG postupka, (c) Najmanji poprečni presjek zavara kod AC Wave impulsnog MIG postupka [23]	26

Slika 29. Topivost vodika u aluminiju i željezu [25]	29
Slika 30. Utjecaj električne vodljivosti na geometriju zavara kod MIG zavarivanja aluminija [25]	30
Slika 31. Radiografska snimka kraterske pukotine [8].....	32
Slika 32. Radiografska snimka uzdužne pukotine zavara aluminija [8]	32
Slika 33. Presjek dvostranog zavara s nepotpunim provarom [8].....	33
Slika 34. Makroizbrusak zavara s vidljivim naljepljivanjem [8]	33
Slika 35. Utjecaj EN omjera na deformaciju otklona kod zavarivanja ploče aluminija debljine 3 mm [3]	34
Slika 36. Utjecaj sastava zaštitnog plina na geometriju metala zavara i napon zavarivanja [25]	36
Slika 37. Specifikacija dodatnog materijala EZ – MIG Al-Mg [28].....	40
Slika 38. Izvor struje za zavarivanje Daihen Varstroj Welbee W400.....	41
Slika 39. Automat za zavarivanje BUG 5300 Speed Weaver II	43
Slika 40. Korišteni zaštitni plinovi za zavarivanje Argon 4,8 lijevo i Aluline He50 desno.....	43
Slika 41. Pripojni zavari	44
Slika 42. Pripremljeni kutni spoj.....	44
Slika 43. Naličje kutnog zavara A1 izvedenog u zaštiti 100% argona uz $f=8$ Hz	46
Slika 44. Naličje kutnog zavara B1 izvedenog u zaštiti argona s 50% helija uz $f=8$ Hz	46
Slika 45. Naličje kutnog zavara A2 izvedenog u zaštiti 100% argona uz $f=20$ Hz	46
Slika 46. Naličje kutnog zavara B2 izvedenog u zaštiti argona s 50% helija uz $f=20$ Hz	47
Slika 47. Naličje kutnog zavara A3 izvedenog u zaštiti 100% argona uz $f=32$ Hz	47
Slika 48. Naličje kutnog zavara B3 izvedenog u zaštiti argona s 50% helija uz $f=32$ Hz	47
Slika 49. Tračna pila imet BS 350 GH.....	48
Slika 50. Uređaj za poliranje uzoraka Presi Mecatech 250 SPI	49
Slika 51. Nagrizanje uzoraka.....	49
Slika 52. Digitalni mikroskop s auto fokusom Insize	50
Slika 53. Makroizbrusak kutnog zavara A1	50
Slika 54. Makroizbrusak kutnog zavara B1	51
Slika 55. Makroizbrusak kutnog zavara A2	51
Slika 56. Makroizbrusak kutnog zavara B2	52
Slika 57. Makroizbrusak kutnog zavara A3	52
Slika 58. Makroizbrusak kutnog zavara B3	53
Slika 59. Grafički prikaz promjene visine zavara	58
Slika 60. Grafički prikaz promjene širine zavara	58
Slika 61. Grafički prikaz promjene nadvišenja zavara.....	59
Slika 62. Grafički prikaz promjene penetracije.....	59
Slika 63. Grafički prikaz promjene površine zavara	60
Slika 64. Grafički prikaz promjene površine penetracije.....	60
Slika 65. Nepravilnost korijenskog razmaka uzorka A1	61
Slika 66. Plinska pora uzorka A1	61

POPIS TABLICA

Tablica 1. Zaštitni plinovi za zavarivanje aluminija [26].....	37
Tablica 2. Kemijski sastav aluminijske legure 5083 [27]	39
Tablica 3. Mehanička svojstva aluminijske legure 5083 [27].....	40
Tablica 4. Fizikalna svojstva aluminijske legure 5083 [27].....	40
Tablica 5. Tehničke karakteristike izvora struje za zavarivanje [29].....	42
Tablica 6. Parametri zavarivanja kutnih spojeva.....	45
Tablica 7. Geometrija zavora makroizbrusaka A1 i B1	53
Tablica 8. Usporedba dimenzija zavora uzoraka A1 i B1	54
Tablica 9. Geometrija zavora makroizbrusaka A2 i B2	54
Tablica 10. Usporedba dimenzija zavora uzoraka A2 i B2	55
Tablica 11. Geometrija zavora makroizbrusaka A3 i B3	55
Tablica 12. Usporedba dimenzija zavora uzoraka A3 i B3	56

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
A ₅	%	Istezljivost
D	mm	Duljina
d	mm	Promjer pore
EN omjer	%	Udio negativne struje kod AC zavarivanja
f	Hz	Frekvencija
h	mm	Visina/širina nepravilnosti
I _B	A	Jakost osnovne struje
I _{EN}	A	Jakost struje na području negativnog polariteta EN
I _{EP}	A	Jakost struje na području pozitivnog polariteta EP
P	mm	Penetracija metala zavara
R	mm	Nadvišenje metala zavara
R _m	N/mm ²	Vlačna čvrstoća
R _{p0,2}	N/mm ²	Konvencionalna granica razvlačenja
S	mm ²	Površina
Š	mm	Širina
T _{EN}	s	Vrijeme u EN području struje
T _{EP}	s	Vrijeme u EP području struje
V	mm	Visina
v _z	cm/min	Brzina zavarivanja
W	mm	Širina metala zavara
η	-	Stupanj iskoristivosti

POPIS KRATICA

AC	Alternating Current
Al	Aluminij
Ar	Argon
ASME	American Society of Mechanical Engineers
AWS	The American Welding Society
CMT	Cold Metal Transfer
Cu	Bakar
Cr	Krom
DCEN	Direct current electrode negative
DCEP	Direct current electrode positive
EN	Electrode negative
EP	Electrode positive
EZ	Elektroda Zagreb
FSW	Friction Stir Welding
Fe	Željezo
HCl	Klorovodična kiselina
He	Helij
HF	Fluorovodična kiselina
ISO	International Organisation for Standardization
Mg	Magnezij
MIG	Metal Inert Gas
MIG-P	Pulsed Metal Inert Gas
Mn	Mangan
MPAW	Micro Plasma Arc Welding
ODPP	One Droplet Per Pulse
OTC	Osaka Transformer Company
PA	Ravna pozicija
REL	Ručno elektrolučno zavarivanje obloženim elektrodama

RMD	Regulated Metal Deposition
Sn	Kositar
STT	Surface Tension Transfer
Ti	Titan
TIG	Tungsten Inert Gas
VPPAW	Variable Polarity Plasma Arc Welding
Zn	Cink
ZUT	Zona utjecaja topline

SAŽETAK

U teorijskom dijelu rada navedeni su postupci zavarivanja aluminija i aluminijskih legura gdje su detaljnije opisani MIG postupak zavarivanja, AC impulsni MIG i AC Wave impulsni MIG postupak. Detaljno je opisan utjecaj parametara zavarivanja na geometriju zavara a posebice utjecaj EN omjera, frekvencije i jakosti struje zavarivanja. Objasnjeni su problemi koji se javljaju prilikom zavarivanja aluminija i aluminijskih legura, te su navedeni zaštitni plinovi koji se koriste prilikom zavarivanja.

U eksperimentalnom dijelu rada zavareno je šest kutnih spojeva aluminijske legure 5083 AC Wave impulsnim MIG postupkom uz varijacije Wave frekvencije i zaštitnog plina. Usporedbom postignute geometrije zavara utvrđeno je da se zavarivanjem u zaštiti 100% argona postiže veće nadvišenje metala zavara te veća dubina penetracije, dok se zavarivanjem u zaštiti argona s 50% helija postiže općenito veća površina metala zavara kao i veća površina penetracije. Također je utvrđeno da se povećanjem Wave frekvencije povećava nadvišenje, visina, širina, penetracija, površina zavara i površina penetracije metala zavara.

Ključne riječi: Aluminij, MIG, AC Wave impulsni MIG postupak, geometrija zavara, problematika zavarivanja, zaštitni plin

SUMMARY

In the theoretical part of the thesis, the welding procedures of aluminum and aluminum alloys are listed, where the MIG welding procedure, AC pulse MIG and AC Wave pulse MIG processes are described in more detail. The influence of the welding parameters on the welding geometry are described in detail with emphasis on the EN ratio, frequency and welding current. The problems that arise when welding aluminum and aluminum alloys are explained, and the shielding gases used during welding are listed.

In the experimental part of the work, six fillet welds of aluminum alloy 5083 were welded by AC Wave pulsed MIG process with variations of Wave frequency and shielding gas. By comparing the achieved weld geometry, it was determined that welding with 100% argon as a shielding gas achieves a greater reinforcement height of the weld and greater penetration depth, while welding with argon/helium shielding gas mixture generally results in greater weld area and greater penetration area. It was also found that increasing the Wave frequency increases the reinforcement height, weld width, height, penetration, weld area and area of weld penetration.

Key words: Aluminum, MIG, AC Wave pulse MIG process, weld geometry, welding issues, shielding gas

1. UVOD

Aluminij i njegove legure su iznimno lagane i čvrste što je dovelo do brzog širenja u primjenama gdje je potrebna mala masa različitih struktura i dijelova, otpornost na koroziju i mogućnost recikliranja. Aluminij i njegove legure imaju široku primjenu na području izrade brzih željeznica, podzemnih željeznica, spremnika za plin na plovilima, te automobilske industriji kojoj je cilj smanjiti težinu razvojem aluminijskih motora i karoserija [1].

Zavarivanje aluminija uključuje spajanje metala upotrebom topline za taljenje metala koji se spaja. Uglavnom svi konvencionalni postupci zavarivanja stvaraju veliku količinu topline, što zauzvrat dovodi do brojnih problema poput progaranja i rastaljivanja, deformacija radnih komada, poroznosti, izvijanja, savijanja i uvijanja zavarenih ploča, pogrubljenja zrna, isparavanja korisnih elemenata prisutnih u premazu ploče, varijacija u širini zavarenog spoja itd. Korištenje ispravnog procesa zavarivanja, procedure i tehnike je jedan od načina rješavanja ovog problema [2].

Klasičan MIG postupak se uglavnom koristi za zavarivanje srednje debelih ploča aluminija, debljine veće od 5 mm zbog duboke penetracije uzrokovane zavarivanjem DCEP polaritetom. Do progaranja dolazi zbog duboke penetracije u slučaju zavarivanja limova aluminija debljine 1 do 2 mm. Kod primjene male jakosti struje i napona zavarivanja kod MIG postupka zavarivanja radi sprječavanja progaranja javlja se nestabilan električni luk, te su česti kratki spojevi.

Zavarivanje tankih limova je drugačije od zavarivanja debelih radnih komada jer pritom nastaje mnogo različitih problema koji su uglavnom povezani sa unosom topline. TIG je dobar postupak za spajanje tankih limova ali ima problem male brzine zavarivanja i visoke cijene. MIG postupak pruža veću brzinu i mogućnost izrade visokokvalitetnih zavara. Modificirani MIG postupak je dobra alternativa za zavarivanje tankih limova velikim brzinama. Radi smanjenja protaljivanja prilikom zavarivanja tankih ploča aluminija debljine 1 do 2 mm te kontrole penetracije uvodi se DCEN polaritet u varijabilnim omjerima. AC impulsni MIG izvori struje za zavarivanje omogućavaju prilagođivanje oblika strujnog vala za potpunu kontrolu parametara zavarivanja. Kod impulsnog načina zavarivanja ne unosi se puno topline u metal zavara, što omogućava zavarivanje tankih materijala, posebice aluminija. Ovi izvori struje za zavarivanje pružaju brojne prednosti poput velikog depozita materijala, plitke penetracije i povećanog nadvišenja zavara koji se postižu pri velikim omjerima negativnog polariteta

elektrode. Primjenom impulsnog MIG postupka koristeći metodu jedan impuls po kapljici postiže se mala razina rasprskavanja i velika brzina zavarivanja, te je osigurana dovoljna penetracija [1].

AC Wave impulsnim MIG postupkom se postiže izgled zavara sličan zavaru kao kod TIG postupka. Pritom se koristi izvor struje za zavarivanje koji ima mogućnost brzog prebacivanja između vršne struje za taljenje metala i osnovne struje kod koje se metal hladi i skrućuje [4]. Ova metoda je prvi put predstavljena kako bi poboljšala kontrolu nad prijenosom metala prilikom zavarivanja niskom prosječnom jakosti struje zavarivanja. Osim toga smanjeno je rasprskavanje, poroznost metala zavara, opasnost od deformacija zavarivanog proizvoda, te opasnost od protaljivanja [5].

2. POSTUPCI ZAVARIVANJA ALUMINIJA I ALUMINIJSKIH LEGURA

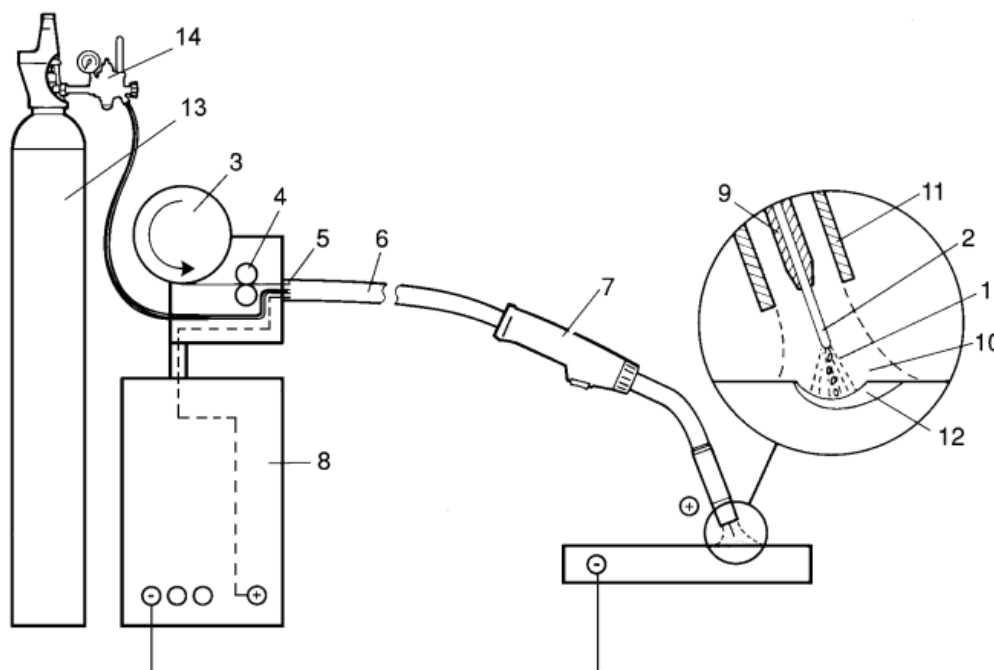
Jedinstveni spoj male mase i relativno velike čvrstoće čini aluminij drugim najpopularnijim metalom koji se zavaruje. Prije početka procesa zavarivanja važno je da je aluminij očišćen od oksida. Zavarivanje aluminija je moguće sljedećim postupcima: MIG, TIG, plazma zavarivanje, zavarivanje laserom, te zavarivanje trenjem uz miješanje (FSW). Rezultat procesa i odabir metode ovisi o specifičnosti primjene i zahtjevima kupca [6].

2.1. MIG postupak zavarivanja

MIG postupak zavarivanja ili elektrolučno zavarivanje taljivom žicom u zaštiti inertnog plina se koristi za zavarivanje širokog spektra debljina materijala. Postupkom se postiže relativno visoka produktivnost zahvaljujući jednostavnom uspostavljanju električnog luka.

MIG postupak zavarivanja funkcionira na način da se žica dobavlja putem pištolja za zavarivanje i tali se u električnom luku. Dodatni materijal u obliku žice se ponaša kao elektroda koja prenosi električnu energiju. Električnu energiju opskrbljuje izvor struje za zavarivanje. Električni luk i rastaljeni metal zavara su zaštićeni inertnim zaštitnim plinom koji ne reagira s rastaljenim materijalom, primjerice argonom i/ili helijem.

Kako bi se postigle optimalne performanse zavarivanja važno je ispravno podesiti parametre zavarivanja poput napona električnog luka, brzine dobave žice i brzine protoka zaštitnog plina [7]. Na slici 1. je prikazana shema opreme za MIG postupak zavarivanja.



Slika 1. Shema MIG postupka zavarivanja [7]

Brojevima je označeno:

- 1 - Električni luk
- 2 - Žica
- 3 - Kalem sa žicom
- 4 - Pogonski kotači
- 5 - Fleksibilna cijev
- 6 - Izolirani polikabel
- 7 - Pištolj za zavarivanje
- 8 . Izvor struje za zavarivanje
- 9 - Kontaktna vodilica
- 10 - Zaštitni plin
- 11 - Sapnica zaštitnog plina
- 12 – Talina metala zavara

Električni luk se uspostavlja između radnog komada i žice koja se kontinuirano dobavlja. Žica se sa koluta dobavlja do pištolja za zavarivanje pogonskim kotačićima, koji guraju žicu kroz fleksibilnu cijev izoliranog polikabela. Električna energija se dobavlja putem izvora struje za zavarivanje. Struja za zavarivanje se prenosi na elektrodu putem kontaktne vodilice u pištolju za zavarivanje. Kontaktna vodilica je uobičajeno spojena na pozitivan pol izvora struje za zavarivanje, dok je radni komad spojen na negativan pol.

Žica čiji je promjer mali, uobičajeno oko jednog milimetra se dobavlja pomoću dodavača žice. Duljina električnog luka se prilagođuje ovisno o postavkama napona izvora struje za zavarivanje. Zaštitni plin koji ima ulogu zaštite elektrode, električnog luka i taline od okolnog zraka, teče kroz plinsku sapnicu koja okružuje kontaktnu vodilicu.

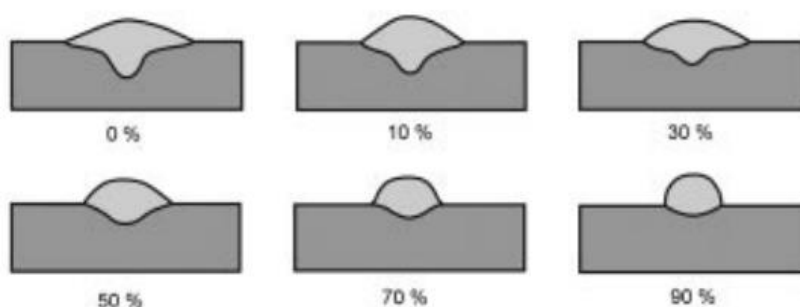
MIG postupak zavarivanja se smatra poluautomatskim postupkom zavarivanja jer se žica dodatnog materijala dobavlja automatski, prilikom čega se pištolj za zavarivanje pomiče ručno preko radnog komada. Proces je vrlo lako automatizirati mehanizacijom pokreta pištolja za zavarivanje.

Robotizirano zavarivanje je česta metoda automatizacije zavarivanja budući da se robot vrlo lako može programirati kako bi se prilagodio novim objektima. Robot ostvaruje kretnje u kombinaciji s manipulatorom radnog komada. Sustav upravljanja robotom uključuje postavke

svih podataka o zavarivanju, početnu točku, praćenje zavara i mogućnost ostvarivanja uzorka njihanja prilikom procesa zavarivanja. [7]

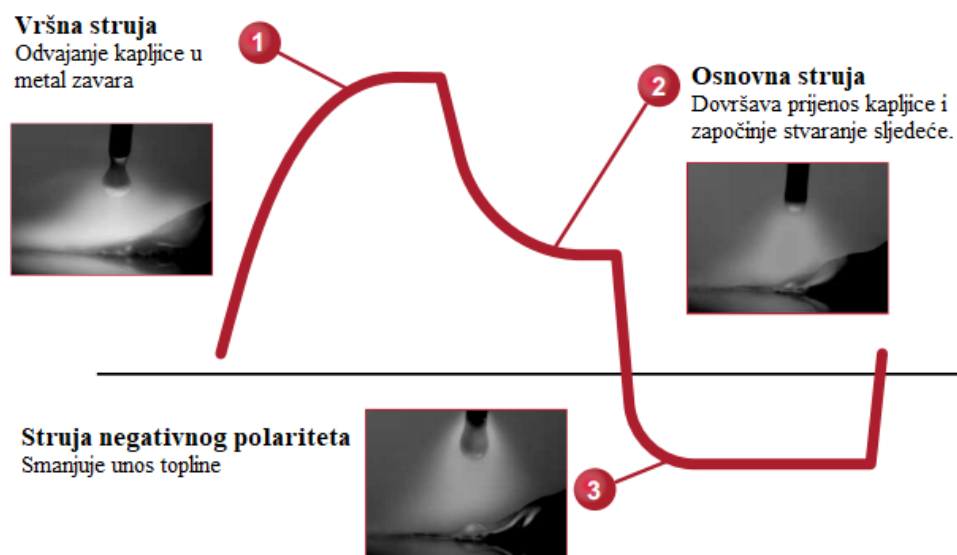
2.1.1. AC MIG postupak zavarivanja

Kod AC MIG postupka zavarivanja koriste se posebni izvori struje koji imaju pravokutnu valnu karakteristiku struje. Brz prijelaz iz negativnog u pozitivni polaritet je potreban kako bi se osiguralo ponovno uspostavljanje električnog luka. Negativan polaritet na elektrodi pomaže osigurati niži unos topline i veći depozit dodatnog materijala. Kontrola balansa znači upravljanje omjerom unosa topline i depozita materijala, slika 2. Pri 50% negativnog polariteta, potrebno je cca. 40% struje za taljenje žice u usporedbi sa zavarivanjem pri normalnom pozitivnom polaritetu. Prednost toga je mogućnost zavarivanja tankih materijala i različitih varijacija udaljenosti između dvaju radnih komada uz smanjeni unos topline i deformacije [1].



Slika 2. Izgled profila zavara pri AC MIG zavarivanju korištenjem različitog omjera negativnog polariteta od 0% do 90% [7]

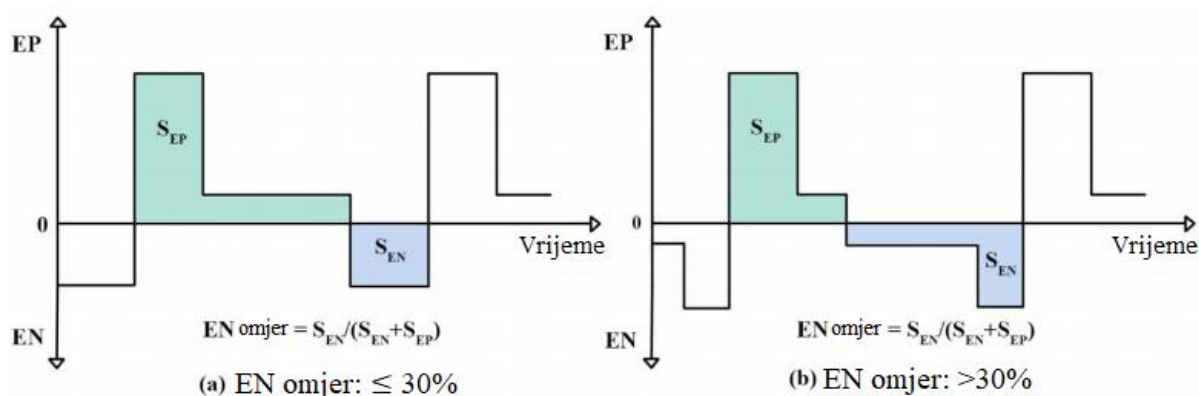
Na slici 3. je prikazan valni oblik struje kod AC-MIG postupka zavarivanja proizvođača izvora struje za zavarivanje Lincoln Electric.



Slika 3. Oblik strujnog vala kod AC-MIG zavarivanja, Lincoln Electric [8]

Izvori struje za AC MIG zavarivanje kombiniraju stabilnost električnog luka u DCEP području i prednosti veće količine depozita dodatnog materijala u DCEN području. DCEN polaritet osigurava nizak unos topline u radni komad čime se sprječava progaranje. Osim toga penetracija je plića, te je povećana sposobnost premošćivanja između dvaju radnih komada. AC MIG postupak također pruža bolju kontrolu nad deformacijom radnih komada depozitom više materijala uz manji unos topline. Povećanjem EN omjera povećava se i veličina kapljice rastaljenog materijala. Osnovna struja pozitivnog polariteta održava električni luk dok vršna jakost struje osigurava odvajanje rastaljene kapljice [9].

Područje pulsirajuće struje negativnog polariteta podijeljeno je u bazno područje za održavanje električnog luka i vršno područje gdje se postiže povećan depozit dodatnog materijala, slika 4. (b). Prilikom zavarivanja aluminija za stabilan električni luk idealan je EN omjer do 30%, slika 4. (a) [9].



Slika 4. Valni oblik struje kod AC impulsnog MIG zavarivanja na OTC Daihen DW-300 za EN omjer manji ili jednak 30% (a) te omjer veći od 30% (b) [9]

2.1.2. AC impulsnog MIG postupak zavarivanja

Izum impulsnih izvora za zavarivanje bio je ključan za zavarivanje tankih ploča aluminija. Kod impulsnog MIG postupka struja zavarivanja oscilira između vršne struje te mnogo niže osnovne struje. AC MIG-P je preferirana metoda zavarivanja za materijale debljine 3,2 mm i tanje, jer je prosječna struja zavarivanja niža nego kod štrcajućeg luka kod klasičnog MIG postupka. AC MIG-P postupkom je moguće zavariti tanke i debele komade aluminija. Prednosti AC MIG-P postupka u usporedbi s klasičnim MIG postupkom su sljedeće:

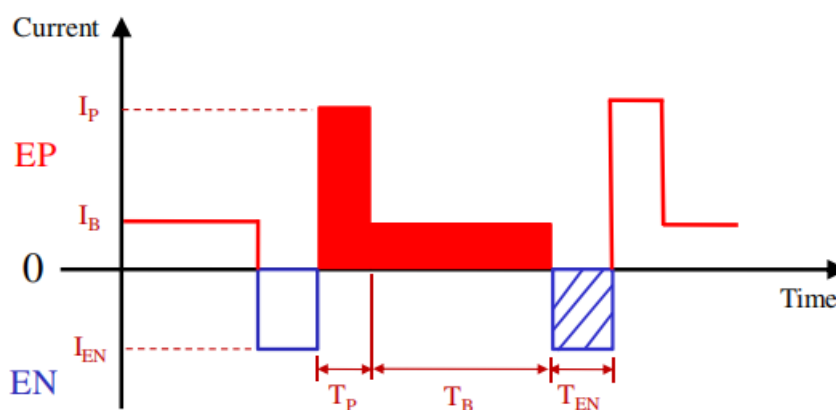
- Manji unos topline i manja deformacija materijala
- Sposobnost zavarivanja i loše pripremljenih/namještenih radnih komada
- Sposobnost zavarivanja tankih materijala

Pozitivan pol (DCEP - Direct current electrode positive) povećava unos topline i penetraciju, te osigurava stabilnost električnog luka dok negativan pol (DCEN - Direct current electrode negative) smanjuje unos topline i penetraciju, a povećava količinu depozita materijala [7].

Osim toga pozitivan polaritet žice ima efekat čišćenja koji uklanja aluminijski oksid prilikom zavarivanja aluminija. AC impulsni MIG postupak obuhvaća prednosti pozitivnog (DCEP) i negativnog (DCEN) polariteta istovremeno. EN omjer je definiran omjerom između strujnog područja EN polariteta i područja ukupne struje jednog ciklusa [7]. Jednadžba EN omjera prikazana je jednadžbom 1.

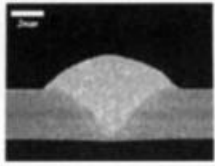
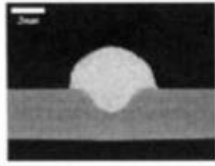
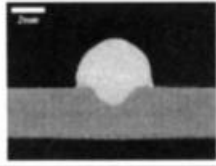
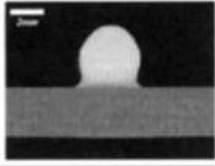
$$EN \text{ omjer} = \frac{I_{EN} \cdot T_{EN}}{I_{EP} \cdot T_{EP} + I_{EN} \cdot T_{EN}} = \frac{(I_{EN} \cdot T_{EN})}{(I_P \cdot T_P) + (I_B \cdot T_B) + (I_{EN} \cdot T_{EN})} \cdot 100\% \quad (1)$$

Slika 5. prikazuje oblik strujnog vala kod AC impulsnog MIG postupka koji je izražen kroz EN omjer. I_P označava impulsnu struju na području pozitivnog polariteta (EP), I_B osnovnu struju u EP području, I_{EN} struju u području negativnog polariteta EN u amperima, T_P označava vrijeme impulsa vršne struje u području EP, T_B vrijeme osnovne struje u EP području i T_{EN} vrijeme u EN području u sekundama [8].



Slika 5. Valni oblik struje kod impulsnog AC MIG zavarivanja [10]

Slika 6. prikazuje utjecaj EN omjera na penetraciju navara kod AC impulsnog MIG zavarivanja, gdje je osnovni materijal Al-Mg legura A5052 debljine 2 mm, dodatni materijal žica Al-Mg legure A5356 promjera 1,2 mm, dok su brzina dobave dodatnog materijala i brzina zavarivanja držane konstantom. Moguće je zaključiti da kako se EN omjer povećava dubina penetracije i širina zavara se smanjuju dok se visina nadvišenja povećava. AC impulsnim MIG postupkom je moguće vrlo jednostavno zavarivati preklapne zavare sa razmakom većim i od 1 mm.

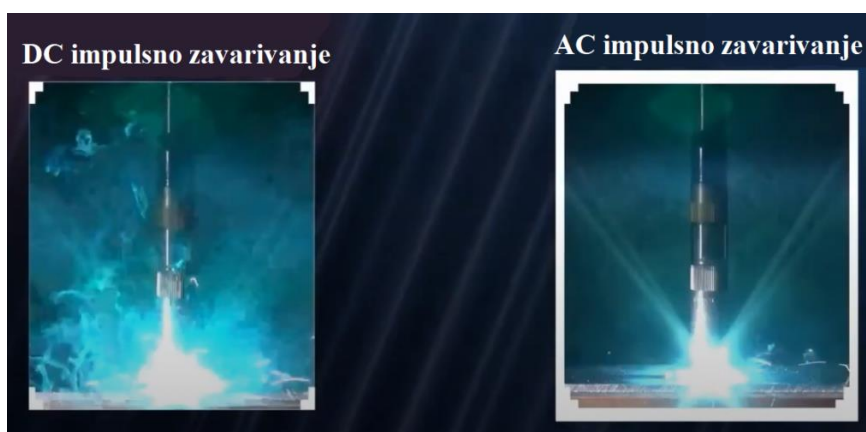
EN omjer 0%	EN omjer 10%	EN omjer 20%	EN omjer 40%
$I_a = 98A / V_a = 17.6V$	$I_a = 88A / V_a = 16.2V$	$I_a = 83A / V_a = 15.6V$	$I_a = 65A / V_a = 15.6V$
			
Brzina dodavanja žice: 600 cm/min; brzina zavarivanja: 60 cm/min			

Slika 6. Utjecaj EN omjera na oblik zavara [11]

Glavni problem kod zavarivanja impulsnom strujom je pojava poroznosti u metalu zavara zbog isprekidanog ponašanja električnog luka te otežanog pronalaska optimalne kombinacije parametara za široku primjenu kod zavarivanja. Radi stabilnosti električnog luka kod sinergijske kontrole, srednja jakost struje zavarivanja je direktno povezana sa brzinom dobave žice.

Stabilnost procesa zavarivanja ovisi o načinu prijenosa metala i obliku električnog luka. Stabilan proces zavarivanja mora imati uniforman prijenos materijala bez rasprskavanja. Stabilnost električnog luka kod impulsnog MIG postupka je najbolja kod prijenosa jedne kapljice po jednom impulsu (ODPP - one droplet per pulse), gdje je promjer kapljice približno jednak promjeru elektrode. Ovo se može postići odabirom odgovarajuće amplitude [22].

Prednost AC impulsnog MIG zavarivanja nad konvencionalnim MIG i DC impulsnim MIG postupkom je smanjena količina proizvedenog dima i čađe prilikom zavarivanja aluminija, te samim time zdravije radno okruženje, slika 7.


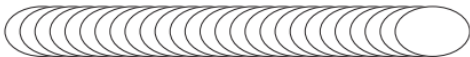


Slika 7. Usporedba količine proizvedenog dima prilikom zavarivanja DC i AC impulsnim MIG zavarivanjem [12]

2.1.3. AC Wave impulsnim MIG postupak zavarivanja

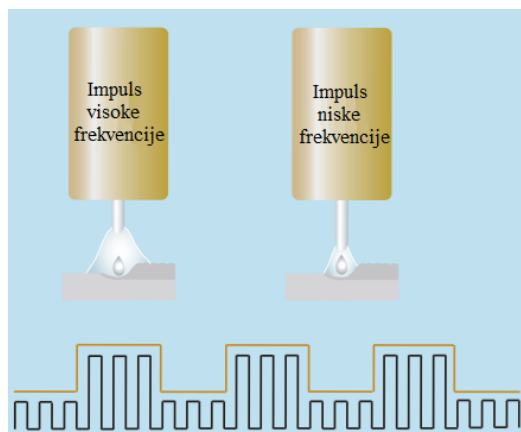
AC Wave impulsni MIG postupak je postao popularan u zavarivanju aluminijskih legura zbog svoje jednostavnosti, velikog raspona namještanja struje, niske poroznosti i malog zrna u zoni metala zavora. Kod Wave impulsnog zavarivanja, dva ciklički akumulirana impulsa pri niskoj frekvenciji omogućavaju postizanje kontinuiranog zavora koji ima izgled "riblje kosti", izgledom sličnom zavoru kod TIG postupa zavarivanja. Metoda zavarivanja dvostrukim pulsom olakšava zavarivanje, čak i kada postoji veliki razmak između dvaju radnih komada [13].

Opcija Wave impulsnog zavarivanja kod OTC Daihen zavarivačkih sustava mijenja brzinu dobave žice i postavke impulsa aparata za zavarivanje. Kada je vrijednost brzine dobave žice blizu granične vrijednosti karakteristike odziva motora za dobavu žice, amplituda dobave se automatski smanjuje. Kod frekvencije od 3 Hz i više, amplituda brzine dobave žice se smanjuje. Pri 5 Hz ili više brzina dobave žice postaje stabilna, a mijenjaju se samo postavke impulsa izvora struje za zavarivanje [13]. Valna frekvencija je podesiva od 0,5 do 32 Hz [14]. Na slici 8. je prikazan izgled naličja zavora pri niskoj i visokoj Wave frekvenciji.

Wave frekvencija	Slika izgleda šava zavora
Niska	
Visoka	

Slika 8. Utjecaj promjene Wave frekvencije na izgled zavora kod AC Wave impulsnog MIG zavarivanja aluminijskih legura [13]

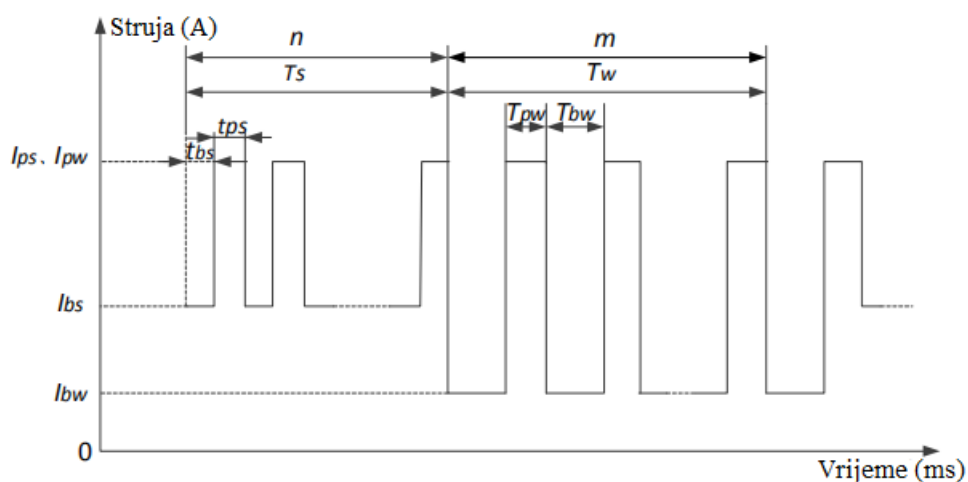
Tijekom AC Wave impulsnog zavarivanja kontinuirano nastaju dva nezavisna impulsa koji potiču izlazak formiranih plinova tijekom zavarivanja van zavora. Na taj se način smanjuje količina pora unutar zavora, osjetljivost spoja na pukotine, te se poboljšavaju mehanička svojstva i završni izgled zavora. AC Wave impulsni MIG koristi superponirani impuls niske frekvencije za zavarivanje legura aluminijskih legura, slika 9. [14].



Slika 9. Valni oblik superponiranog niskofrekventnog vala [14]

AC Wave impulsni MIG postupak zavarivanja se bazira na impulsnome MIG postupku, a uključuje modulaciju visokofrekventnih impulsa niskofrekventnim valnim oblikom. Prednosti ovog postupka su niži operativni troškovi i bolja prikladnost za rad na terenu. Jedan pristup AC Wave impulsnom zavarivanju je niskofrekventna promjena brzine žice i struje zavarivanja (npr. Kemppi Pro Evolution izvori struje za zavarivanje), dok je drugi pristup niskofrekventna promjena količine depozita materijala pri konstantnoj brzini dobave žice (npr. OTC izvori struje za zavarivanje). Niskofrekventna modulacija struje zavarivanja pruža bolju razinu kvalitete zavarivanja, gdje se niske frekvencije koriste za modulaciju dva visokofrekventna impulsna niza velike amplitude. Struja visoke frekvencije potiče prijenos kapljice, dok nisko frekventna modulacija oscilira rastaljenu talinu zavara koristeći niz jakih i slabih impulsa. Na ovaj način se pospješuje izlazak vodika iz rastaljenog metala zavara, te se stoga smanjuje stvaranje pora u zavaru [15].

Kao što je prikazano na slici 10. impuls male energije i velike energije naizmjenično nastaju u nizu kod Wave impulsnog zavarivanja. I_{bw} (I_{pw}) i T_{bw} (T_{pw}) označavaju osnovnu (vršnu) struju i osnovno (vršno) vrijeme pulseva u nizu niskoenergetskih pulseva. I_{bs} (I_{ps}) i t_{bs} (t_{ps}) prikazuju osnovnu (vršnu) struju i osnovno (vršno) vrijeme niza visokoenergetskih pulseva. T_w označava period niza niskoenergetskih impulsa, n i m označuju broj visokoenergetskih i niskoenergetskih impulsa po ciklusu zavarivanja [15].

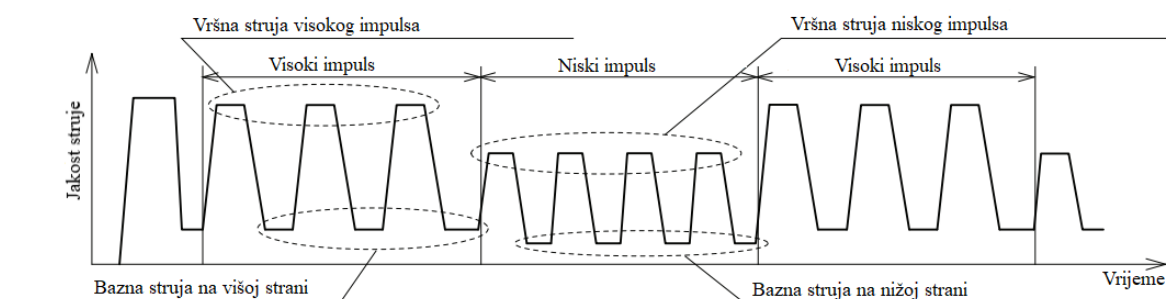


Slika 10. Oblik vala kod AC Wave impulsnog zavarivanja [15]

Izmjena visokoenergetskih i niskoenergetskih nizova impulsa tijekom vremena T (tj. vrijeme zahtijevano za izvršenje procesa AC Wave impulsnog MIG zavarivanja) uzrokuje izmjenu toplih i hladnih stanja. Kako aluminij i njegove legure imaju nisku točku taljenja i dobru toplinsku vodljivost, zbog osjetljivosti na temperaturu, dolazi do toplih pukotina i oštećenja

zavara. Radi očuvanja čvrstoće osnovnog materijala i mogućnosti loma uslijed unosa velike razine energije, potrebno je strogo kontrolirati unos topline kod zavarivanja [15].

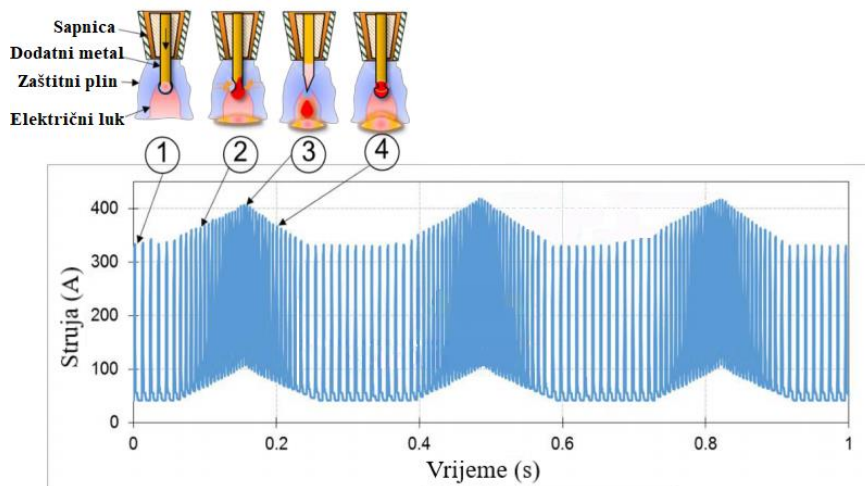
Na Daihen OTC aparatu za zavarivanje Welbee P400 2 je moguće namjestiti vršnu struju kod Wave zavarivanja u rasponu -150 do 150 A, vršno vrijeme impulsa u rasponu -1,5 do 1,5 ms, te baznu struju u rasponu -60 do 60 A. Na slici 11. je prikazana shema valnog oblika struje kod AC Wave impulsnog MIG zavarivanja proizvođača izvora struje za zavarivanje OTC Daihen [13].



Slika 11. Primjer valnog oblika jakosti struje kod AC Wave impulsnog zavarivanja OTC Daihen [13]

Koristeći AC Wave impulsni MIG postupak moguće je mehanizirano zavarivati sučeljene spojeve, T spojeve kao i preklopne spojeve limova debljine 1, 2 i 3 mm. Primjena većeg omjera pozitivne komponente povećava unos topline u metal zavara, a time i dubinu penetracije što zauzvrat omogućava zavarivanje T spojeva s kutnim zavarima. Primjena AC Wave impulsnog MIG postupka zavarivanja omogućava postizanje vrlo visoke razine estetike zavara. Dobivena naličja zavara karakterizira vrlo pravilan raspored "ljuskica" [16].

Slika 12. prikazuje dinamičku karakteristiku kod AC Wave impulsnog MIG zavarivanja. U točki 3 se postiže vršna struja gdje se odvaja rastaljena kapljica. Vrijeme ciklusa impulsa se računa kao $T=T_S+T_W$, frekvencija dvostrukog impulsa $F=1/T$, dok je prosječna struja $I=(I_P T_P+I_B T_B)/(T_P+T_B)$.

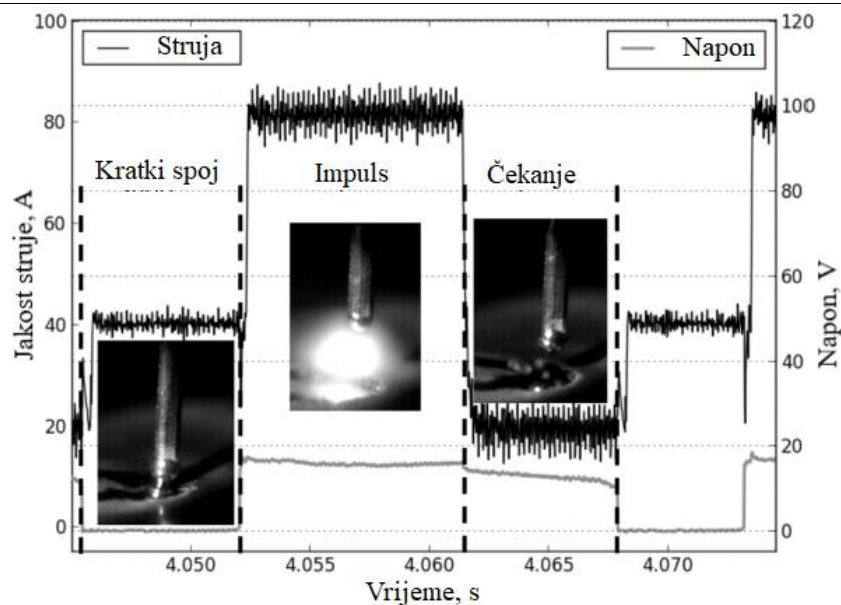


Slika 12. Dinamička karakteristika AC Wave impulsnog MIG postupka i pripadajući prijenos dodatnog materijala [16]

2.1.4. CMT (Cold Metal Transfer) postupak zavarivanja

CMT je MIG proces zavarivanja kratkim spojevima gdje je odvajanje kapljice digitalno kontrolirano. CMT postupak koristi visokofrekventni impuls za prijenos rastaljene kapljice metala. Nakon prijenosa metala električni luk se odmah gasi i na taj način smanjuje unos topline, sprječava protaljivanje i deformacije osnovnog materijala. Kako bi se kod CMT postupka stvorio stabilan električni luk pri niskoj jakosti struje, žica se mehanički udaljava od radnog komada na način da pištolj za zavarivanje ima dodatan servomotor. Kao zaštitni plin se koristi mješavina s malim dodatkom helija koji ima ulogu stabilizacije električnog luka i smanjenja rasprskavanja. Ciklus zavarivanja se sastoji od tri faze, faze vršne jakosti struje, faze osnovne jakosti struje i faze kratkog spoja, slika 13. Nakon faze kratkog spoja, mikroprocesor povlači žicu unatrag, prekidajući električni luk i smanjujući unos topline [17].

CMT je tehnologija tvrtke Fronius, dok su drugi slični procesi RMD (Regulated Metal Deposition) tvrtke Miller Electric i STT (Surface Tension Transfer) tvrtke Lincoln Electric [6].



Slika 13. Ciklus prijenosa metala kod CMT postupka [17]

2.2. TIG postupak zavarivanja

TIG je elektrolučni proces zavarivanja koji rastaljuje metal električnim lukom između netaljive volframove elektrode i radnog komada. TIG procesom zavarivanja moguće je zavarivati tanke ploče aluminija u svim položajima no najbolji rezultati se postižu u PA položaju. TIG postupak proizvodi visoko kvalitetne zavarene spojeve tankih ploča aluminija debljine od 0,5 mm do 5 mm. Stabilnost procesa sprječava protaljivanje tankih zavarenih spojeva. Električni luk je vrlo uzak, te se uspostavlja odmah s početkom zavarivanja [6].

Sprječavanje protaljivanja i deformacija zavarenog spoja postiže se kontrolom frekvencije. Povećanje frekvencije stvara uzak električni luk, pojačavajući na taj način njegovu snagu [6].

Sloj aluminijskog oksida je potrebno ukloniti prije ili tijekom procesa zavarivanja.

2.3. Plazma zavarivanje

Plazma zavarivanje je postupak koji stvara zavareni spoj zagrijavanjem metala suženim električnim lukom između elektrode i radnog komada, odnosno elektrode i sapnice. Postoje i varijacije postupka poput mikro plazma zavarivanja (MPAW), plazma zavarivanja varijabilnim polaritetom (VPPAW). Glavni koncept VPPAW zavarivanja aluminija je plazma zavarivanje izmjeničnom strujom gdje struja ima „pravokutni“ valni oblik. Izvori struje za zavarivanje dopuštaju varijacije amplitude i trajanja negativnog i pozitivnog ciklusa. VPPAW ima vrlo važnu ulogu u auto industriji. MPAW postupak se uglavnom koristi za zavarivanje tankih ploča aluminija, mreža te žica i do 0,1 mm debljine. Kruti električni luk u obliku igle sprječava

deformacije radnog komada i osigurava preciznost zavarivanja. Proces funkcionira pri vrlo malim jakostima struje zavarivanja od 0,1 A do 20 A [6].

2.4. Lasersko zavarivanje

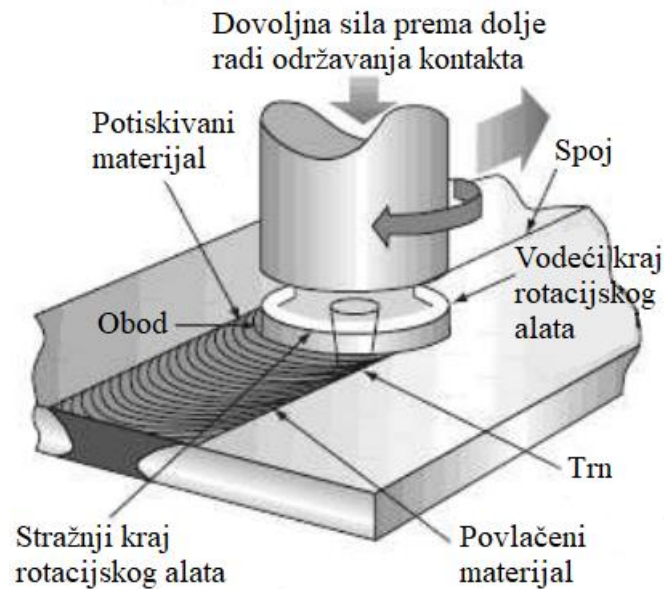
Zavarivanje laserom je postupak koji koristi toplinu generiranu koherentnom zrakom monokromatskog svjetla velike snage fokusirane na malu točku i koja proizvodi vrlo veliku gustoću energije. Gustoća snage laserskog zavarivanja je značajno viša u usporedbi s ostalim procesima zavarivanja [6].

Postoje dvije osnovne vrste lasera koje se najčešće koriste kod zavarivanja aluminijskih legura. Laseri s čvrstom jezgrom koji koriste čvrsto stanje kao aktivni medij, te plinski laseri koji kao aktivni materijal koriste različite mješavine plinova. Glavni parametri laserskog zavarivanja su snaga lasera, promjer zrake, apsorpcija zrake i brzina kretanja. Drugi parametri poput oblika i razmaka spoja, vrste zaštitnog plina, položaja fokusa i ostalih također igraju važnu ulogu kod laserskog zavarivanja aluminijskih legura [6].

Dubina penetracije kod laserskog zavarivanja je direktno povezana s gustoćom snage laserske zrake i funkcija je snage upadne zrake i njezinog promjera. Promjer laserske zrake je najvažniji parametar koji je potrebno uzeti u obzir kod zavarivanja tankih radnih komada jer on određuje gustoću snage, no ovaj parametar je teško izmjeriti kod laserskih snopova velikih snaga. Učinkovitost apsorpcije laserskog snopa ovisi o apsorpciji energije svjetlosti radnog komada [6].

2.5. Zavarivanje trenjem uz miješanje

Zavarivanje trenjem uz miješanje je postupak koji ne koristi dodatni materijal već rotacijski nepotrošni alat koji spaja materijal zagrijavanjem u plastificirano stanje. Rotacijski alat stvara toplinu putem trenja s osnovnim materijalom. Oslobođanjem topline na dodirnim površinama materijal se dovodi u obradivo stanje te se uslijed djelovanja osne sile stvara zavareni spoj [6]. Shema zavarivanja trenjem uz miješanje je prikazana na slici 14.



Slika 14. Shema zavarivanja trenjem uz miješanje [6]

Zavarivanje trenjem uz miješanje je prikladno za zavarivanje aluminija debljine 0,30 do 35 mm, te se ovim postupkom ne stvara završni proizvod. Zavarivanje trenjem se uglavnom koristi za spajanje materijala koji se ne mogu jednostavno spojiti elektrolučnim postupcima poput MIG i TIG postupaka. Prednost zavarivanja trenjem uz miješanje nad elektrolučnim postupcima je ta što minimizira nastajanje pukotina i probleme s poroznosti, te smanjuje troškove zavarivanja. Postupak ne koristi dodatni materijal, nije potreban zaštitni plin kao ni certifikacija zavarivača [6].

Kod zavarivanja tankih ploča aluminija trenjem uz miješanje, važno je uzeti u obzir geometriju alata. Najvažniji zadatak oboda alata je primjena pritiska na materijal. Parametri procesa poput dubine uranjanja, kuta nagiba, brzine vrtnje, brzine kretanja i unosa topline ovise o kontaktu površine između alata i ploče, toku materijala ispod alata, te pritisku alata na radni komad. Veći unos topline uzrokuje veću vršnu temperaturu ciklusa koja stvara veća zaostala naprezanja [6].

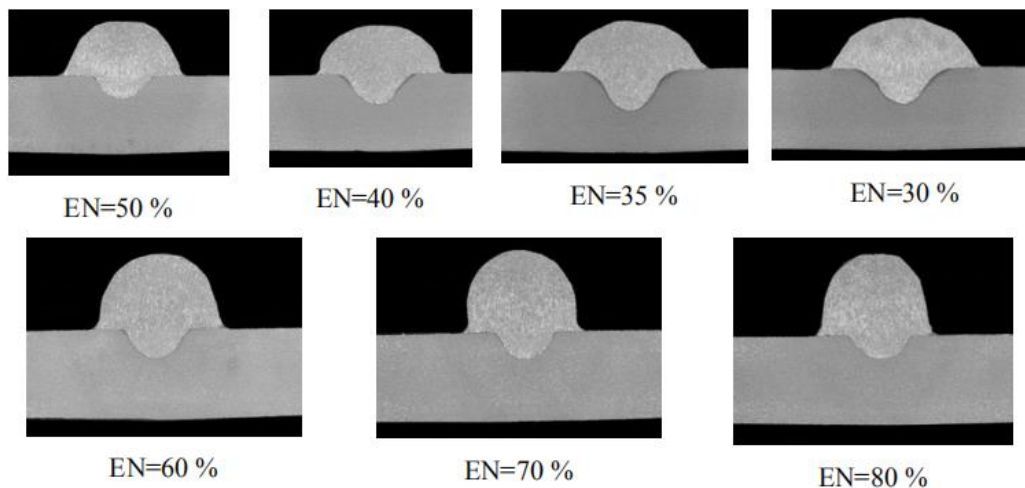
3. UTJECAJ PARAMETARA MIG ZAVARIVANJA NA GEOMETRIJU ZAVARA

Uspješnost MIG postupka zavarivanja ovisi o parametrima napona, promjeru žice, brzini dodavanja žice, jakosti struje, slobodnom kraju žice, brzini zavarivanja, induktivnosti, odabiru zaštitnog plina, protoku zaštitnog plina, parametrima impulsa, poziciji pištolja za zavarivanje i vrsti spoja koji se zavaruje. Kvaliteta zavara ovisi o geometriji i mikrostrukтури zavara, koje utječu na mehanička svojstva zavara. Gruba mikrostruktura metala zavara, velika zona utjecaja topline, nedovoljna penetracija i veliko nadvišenje metala zavara smanjuju životni vijek zavara. Osim toga kod zavarivanja tankih radnih komada aluminija česti su problemi s protaljivanjem zbog prevelikog unosa topline zbog čega je sve češća upotreba AC impulsnog i AC Wave impulsnog MIG postupka zavarivanja. Parametri impulsa kod impulsnog MIG zavarivanja su ključni za postizanje željene kvalitete zavara. Mogućnost brze promjene polariteta iz EP u EN i obrnuto sprječava problem poroznosti, protaljivanja, toplih pukotina i deformacija. Korištenje niske frekvencije impulsa i mogućnost prilagodbe EN omjera omogućava kontrolu dubine penetracije metala zavara. Kvalitetan zavar se dobiva odabirom pravilne konfiguracije spoja, parametara zavarivanja i dodatnog materijala [18].

3.1. Utjecaj EN omjera na geometriju zavara

Ukoliko EN omjer iznosi 50%, električni luk je pogonjen izmjeničnom strujom s jednakim omjerom oba polariteta u jednom periodu. Ukoliko su postavke ovog parametra veće od 50% tada prevladava negativan polaritet tijekom jednog ciklusa. Ukoliko je vrijednost EN omjera ispod 50%, prevladava trajanje pozitivnog polariteta, te je vrijednost intenziteta vršne struje u pulsevima mnogo više u pozitivnom dijelu [19].

Povećanje EN omjera znatno smanjuje dubinu penetracije i širinu zavara. Pritom se povećava visina naličja zavara. Daljnje povećanje EN omjera ne rezultira smanjenjem dubine penetracije već dodatno smanjuje širinu navara i povećava visinu naličja zavara što dovodi do formiranja vrlo visokog i uskog navara. Tako visok omjer EN polariteta stvara estetski neprihvatljiv zavar. Smanjenje EN omjera dovodi do povećanja dubine i širine penetracije, te smanjenja naličja zavara što uvelike poboljšava estetiku zavara, slika 15.

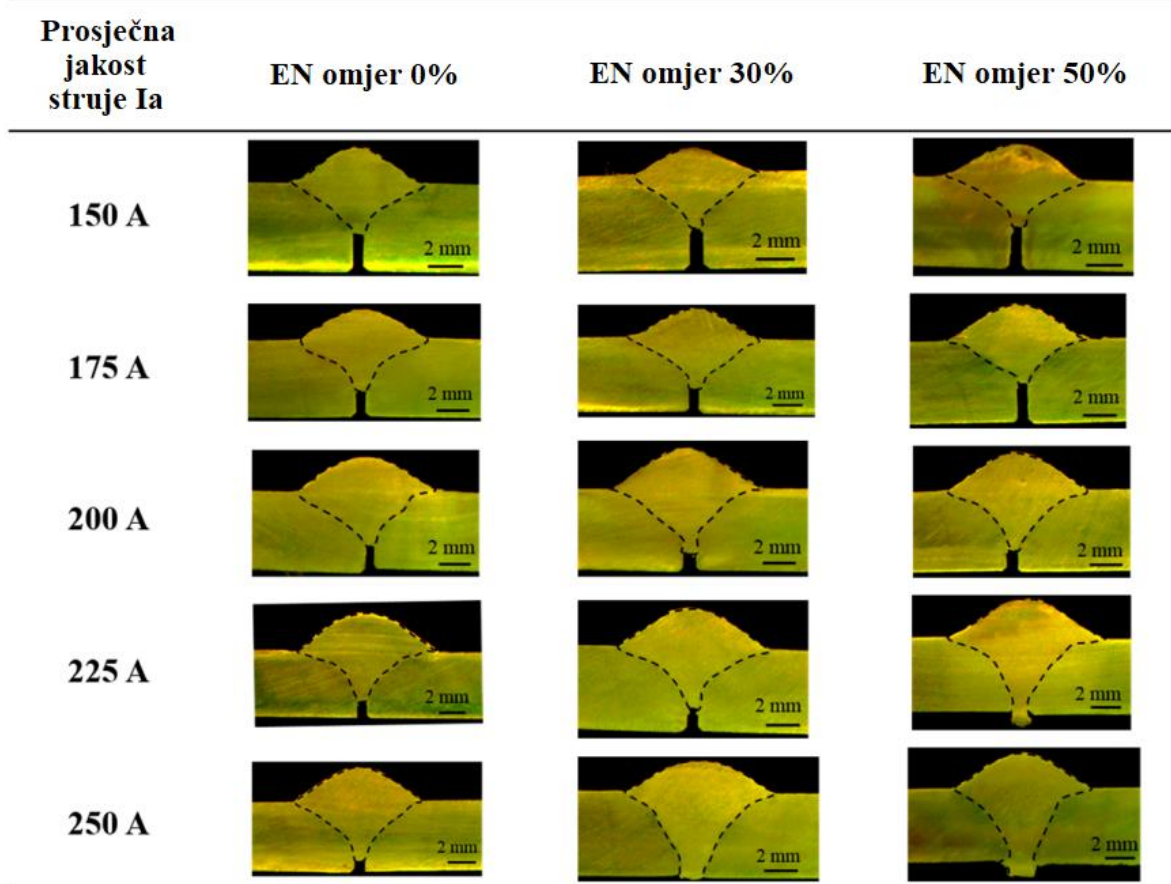


Slika 15. Utjecaj EN omjera na oblik navara napravljenih AC MIG postupkom uz konstantnu struju zavarivanja [19]

EN omjer je stoga temeljni parametar koji utječe na tijek procesa, kvalitetu navara i dubinu penetracije. EN omjer veći od 50% rezultira s pretjeranim nadvišenjem zavara i malom penetracijom. EN omjer manji od 50% rezultira s većim unosom topline, te većom dubinom i širinom zavara. Pravilnom upotrebom EN omjera moguće je smanjiti širinu ZUT-a, te nastajanje nepotpunog provara [19].

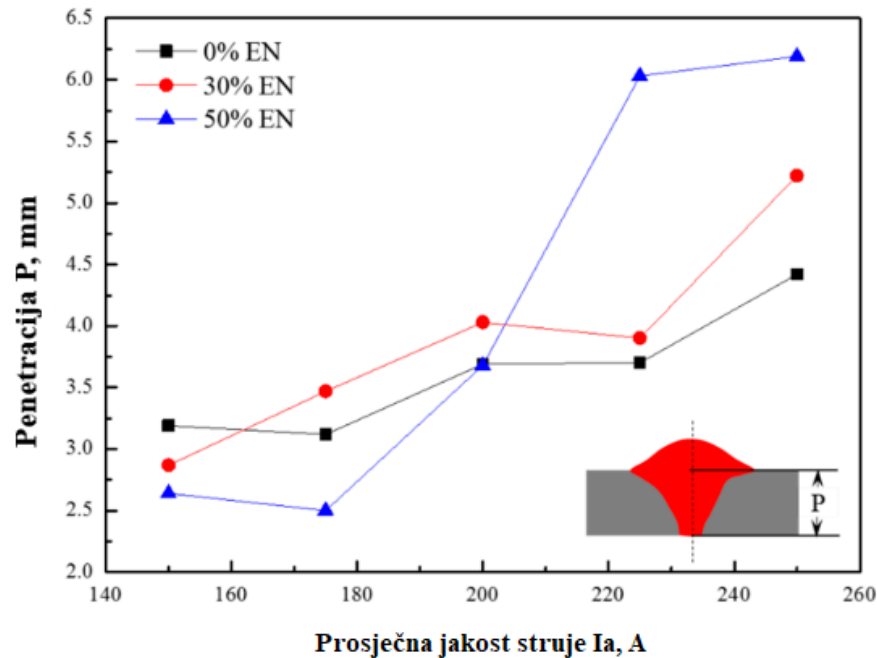
Smanjena penetracija može biti korisna kod zavarivanja tankih limova. Što je veće nadvišenje zavara odnosno EN omjer, veća je mogućnost premošćivanja kod zavarivanja. Ovo je vrlo važna značajka kod zavarivanja tankih limova jer se zbog topline tijekom procesa zavarivanja otvor korijena još više povećava od početka zavara prema kraju [2].

Fenomen kod AC MIG zavarivanja aluminija je da se povećanjem EN omjera dubina penetracije smanjuje, no rastom jakosti struje iznad 200 A s povećanjem EN omjera raste i dubina penetracije sve do EN omjera 50%. Pri prosječnoj jakosti struje zavarivanja od 225 i 250 A povećanje EN omjera rezultiralo je povećanjem dubine penetracije, slika 16. Povećanje dubine penetracije pri većim vrijednostima struje zavarivanja i EN omjera rezultat je intenzivnog mlaza plazme duž pravca zavarivanja. Intenzivan mlaz plazme duž metala zavara stvara visoku temperaturu u središtu, što rezultira s penetracijom u obliku prsta. Povećanje EN omjera pri velikim jakostima struje zavarivanja kao rezultat daje duboku penetraciju koja je vrlo korisna kod zavarivanja debelih ploča [20].



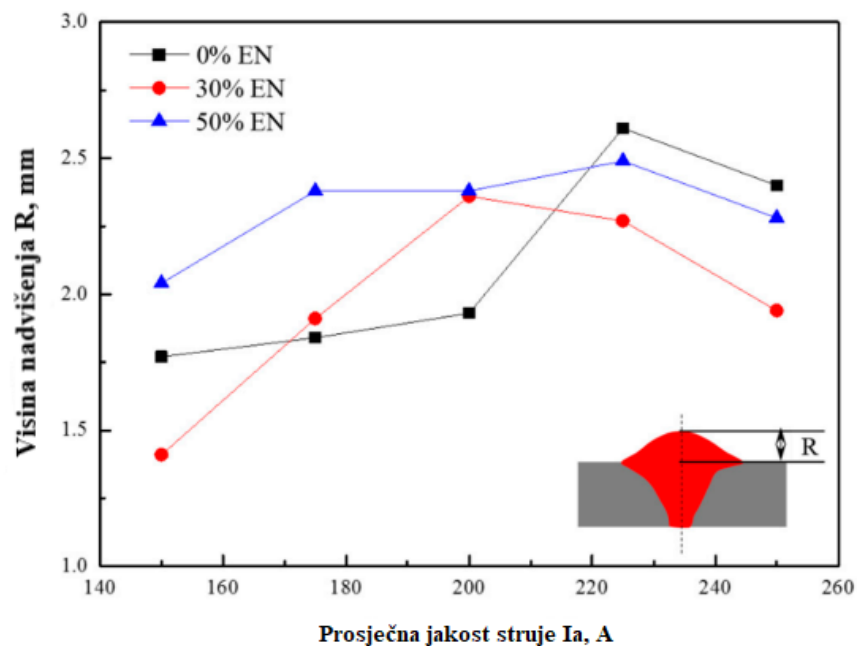
Slika 16. Presjeci zavarenih spojeva napravljenih AC MIG postupkom uz različite parametre jakosti struje i EN omjere [20]

Na uzorcima sa slike 16. izmjereni su različiti parametri geometrije presjeka zavara poput dubine penetracije zavara (P), visine nadvišenja zavara (R) i širine zavara (W), te su rezultati prikazani na slikama 17.-19. Pri nižim jakostima struje dubina penetracije se smanjuje sa povećanjem EN omjera. Dubina penetracije je manja pri 50% EN omjera u usporedbi s 0% i 30% pri nižim jakostima struje (170 A). Moguće je primijetiti da pri višim jakostima struje (>180A) povećanje EN omjera rezultira povećanjem dubine penetracije. Pri jakostima struje od 225 A i 250 A povećanje EN omjera rezultira povećanjem dubine penetracije što je najviše vidljivo pri 50% EN omjera, gdje je postignuta maksimalna penetracija, slika 17. [20].



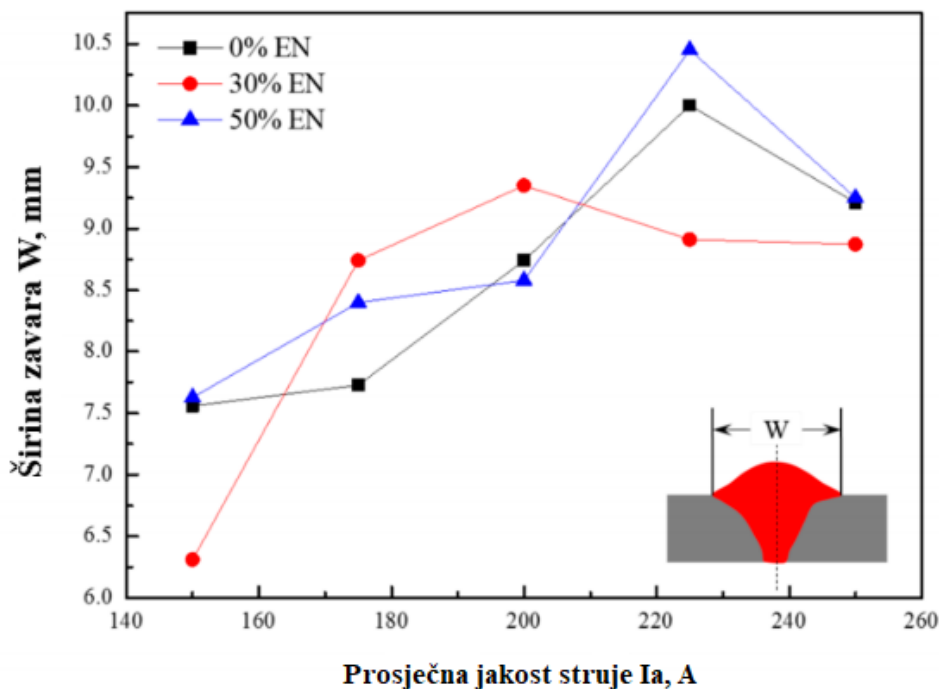
Slika 17. Usporedba dubine penetracije (P) pri različitim EN omjerima i jakosti struje Ia [20]

Slika 18. prikazuje usporedbu visine nadvišenja metala zavara za različite iznose EN omjera i jakosti struje Ia. Moguće je primijetiti rast visine nadvišenja metala zavara s povećanjem Ia sa 150 A na 225 A, te smanjenje pri Ia 250 A. Najveće nadvišenje metala zavara se postiže pri 225 A i 0% EN omjera.



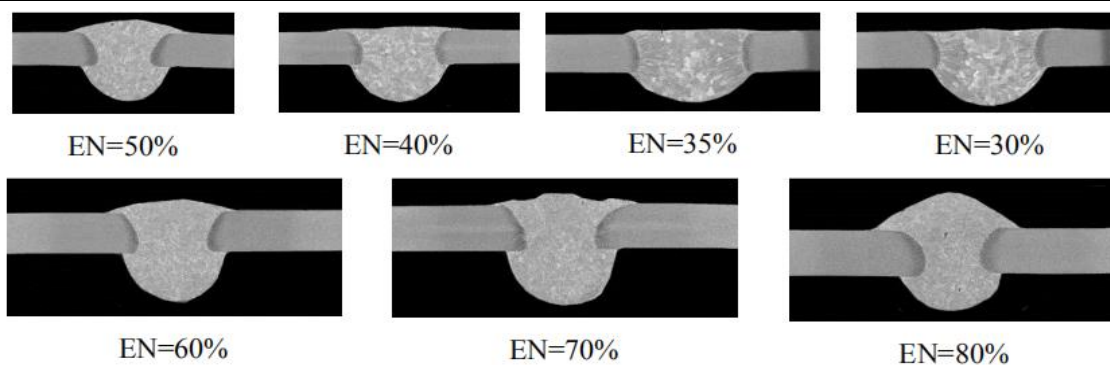
Slika 18. Usporedba visine nadvišenja (R) pri različitim EN omjerima i jakosti struje Ia [20]

Prema slici 19., pri EN omjeru od 30% i 50% širina zavora se povećala kod povećanja struje s 150 A na 225 A, dok se pri jakosti struje od 250 A širina zavora smanjila. Razlog smanjenju širine zavora pri jakosti struje I_a od 250 A je duboka penetracija rastaljenog metala zavora u smjeru osi zavarenog spoja. Maksimalna širina zavora se postiže pri I_a od 225 A i 50% EN omjera. Pri 0% EN omjera širina zavora se povećala s povećanjem jakosti struje I_a sve do 200 A, nakon čega se smanjila s povećanjem I_a .



Slika 19. Usporedba širine zavora pri različitim EN omjerima i jakosti struje I_a [20]

Slika 20. prikazuje utjecaj EN omjera na zavarivanje aluminija debljine 2 mm AC impulsnim MIG postupkom. Jakost struje zavarivanja i brzina dodavanja žice su pritom bili konstantni te su iznosili 70 A i 50 cm/min [20]. Iz slike je moguće zaključiti da uz konstantne parametre zavarivanja, smanjujući udio negativne komponente od EN = 50% sve do 30 % dolazi do povećanja širine lica zavora, smanjenja nadvišenja zavora te povećanja penetracije s korijenske strane zavora. U suprotnome, povećanje omjera negativne komponente struje zavarivanja dovodi do značajnog poboljšanja kvalitete zavora, naličje zavora postaje više a prekomjerna penetracija s korijenske strane zavora se smanjuje. No ukoliko se negativna komponenta poveća previše, to će rezultirati formiranjem zavora s previsokim nadvišenjem te nepoželjnim profilom. Najbolja kvaliteta zavora se postiže sa blagim utjecajem negativne komponente.



Slika 20. Profili zavarenih spojeva izvedenih AC MIG-P postupkom uz različite omjere negativne komponente [21]

3.2. Utjecaj EN omjera na sposobnost premošćivanja

Slika 21. prikazuje sposobnost premošćivanja razmaka između dva radna komada zavarena AC impulsnim MIG postupkom uz varijabilne udaljenosti i EN omjere. Brzina dodavanja žice je pritom iznosila 1 m/min, jakost struje zavarivanja 60 A, a napon zavarivanja 20,5 V. Iz slike je vidljivo da je maksimalna premošćena udaljenost DC impulsnim MIG postupkom pri 0% EN omjera 0,5 mm. Pri EN omjeru od 5% maksimalna premošćena udaljenost je iznosila 1,5 mm, dok je uz 10%, 15% i 20% EN omjera bilo moguće zavariti udaljenost od 2 mm. Osim toga povećanjem EN omjera je primijećeno povećanje površine presjeka zvara. Moguće je zaključiti da povećanjem EN omjera raste sposobnost premošćivanja udaljenosti između dva radna komada, veći je depozit dodatnog materijala uz jednaku jakost struje zavarivanja. Također povećanjem EN omjera se smanjuje unos topline u osnovni materijal prilikom zavarivanja [10].

Razmak \ EN omjer	0 mm	0.5 mm	1.0 mm	1.5 mm	2.0 mm
0 %					
5 %					
10 %					
15 %					
20 %					

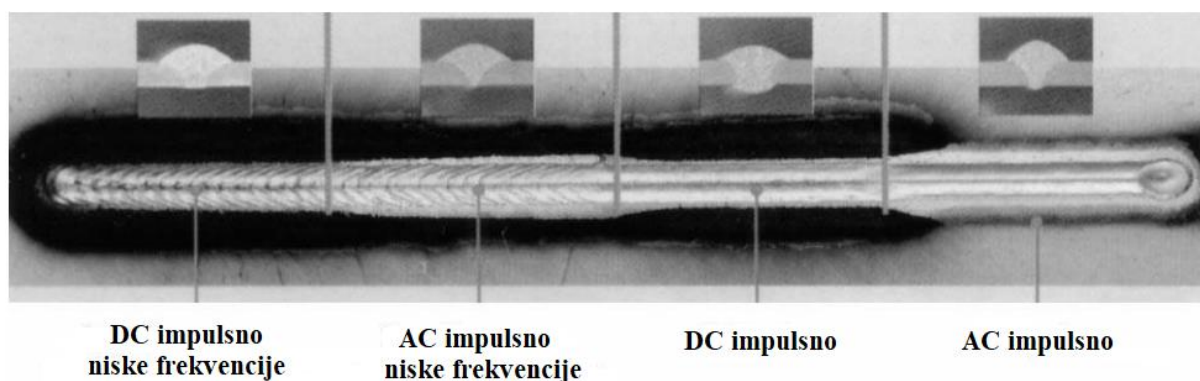
Slika 21. Usporedba sposobnosti premošćivanja kod AC MIG-P postupka uz varijabilne udaljenosti i EN omjere [10]

3.3. Utjecaj parametara impulsa na geometriju i mikrostrukturu zavara

AC impulsni MIG koristi veću vršnu struju kako bi se stvorila jedna rastaljena kapljica po impulsu, dok niža osnovna struja održava stabilnost električnog luka. Pulsiranje struje poboljšava strukturu zrna u metalu zavara, te povećava penetraciju zbog oscilacije električnog luka. Geometrija zavara i njegova mikrostruktura utječu na mehanička svojstva zavara. Grubozrnata mikrostruktura zavara, veća zona utjecaja topline, manja penetracija i veliko nadvišenje metala zavara smanjuju životni vijek zavara. Optimalne karakteristike zavarenog spoja mogu se postići kontrolom parametara impulsa [22].

Pulsiranje struje smanjuje ukupni unos topline kao i rasprskavanje prilikom zavarivanja. Potrebno je točno definirati jakost struje kako bi se rastaljena kapljica odvojila u rastaljeni metal zavara. Vrijeme odvajanja kapljice je obrnuto proporcionalno veličini vršne struje. Razina vršne struje se odabire kako bi se postigla odgovarajuća penetracija i oblik nadvišenja zavara, dok se razina osnovne struje postavlja na razinu dovoljnu za održavanje električnog luka. U usporedbi sa zavarivanjem konstantnom strujom, toplinska energija potrebna za taljenje osnovnog materijala se opskrbljuje samo tijekom impulsa vršne struje određeni interval vremena, čime se toplina raspoređuje u osnovni materijal te se na taj način postiže uža zona utjecaja topline. Između impulsa traje period hlađenja, čime se smanjuje deformacija ploča [22].

Slika 22. prikazuje kontinuirani zavar s konstantnom brzinom zavarivanja gdje se izmjenjuju AC i DC impulsno zavarivanje i razina frekvencije. Moguće je zaključiti da je DC impulsno zavarivanje prikladnije za deblje spojeve, dok je AC impulsni MIG postupak zavarivanja prikladniji za tanke spojeve. Ako se uspoređi količina čađe na površini s obje strane spoja moguće je vidjeti da AC impulsni MIG postupak stvara manje čađe u usporedbi s DC impulsnim MIG postupkom, te u nekim slučajevima čišćenje čađe kod AC impulsnog MIG postupka nije ni potrebno [3].

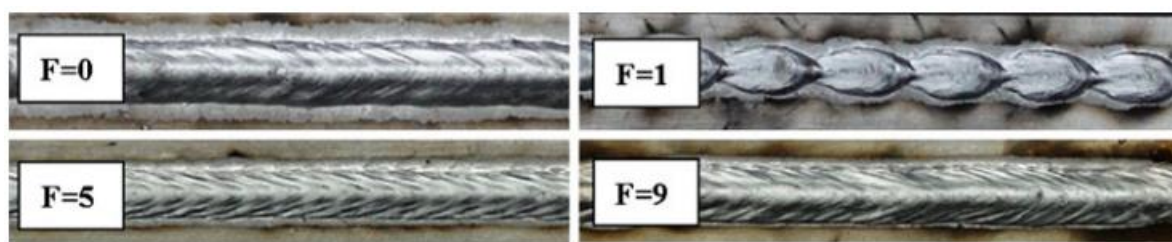


Slika 22. Utjecaj promjena načina zavarivanja iz DC u AC na kontinuiranom zavarenom spoju uz konstantnu brzinu zavarivanja [3]

3.4. Utjecaj frekvencije na geometriju zavara

Geometrija rastaljenog metala zavara varira sa frekvencijom impulsa, te gustoća valovitosti zavarenog spoja ima blisku povezanost sa brojem visokofrekventnih impulsa. Količina rastaljenog metala zavara je veća pri visokofrekventnom impulsu nego pri niskofrekventnom jer se rastaljeni metal zavara širi i skuplja pri periodima visoke i niske frekvencije. Rastom frekvencije impulsa se smanjuje varijacija veličine rastaljenog metala zavara. Visokofrekventni impuls kontrolira način prijenosa kapljice te održava penetraciju zavara dok niskofrekventni impuls miješa metal zavara [24].

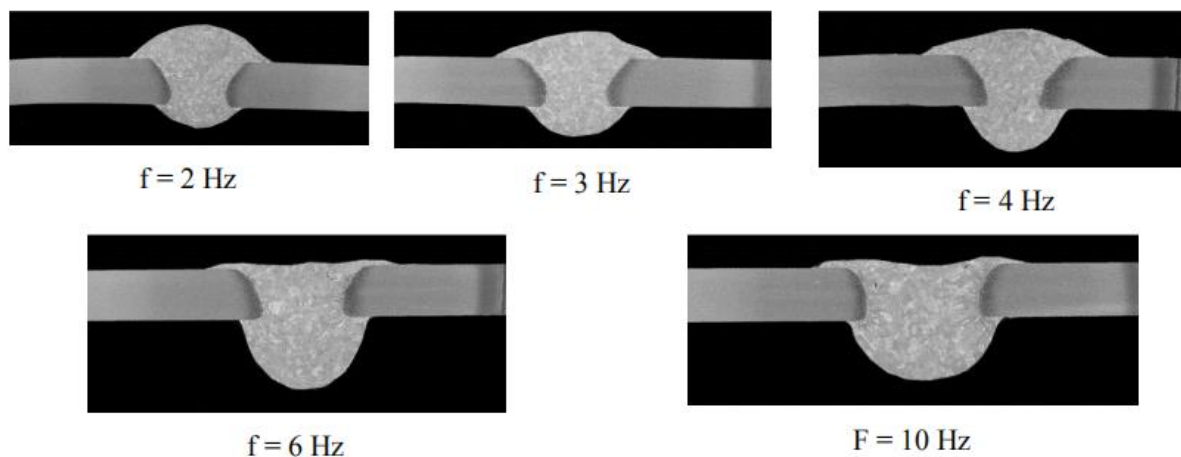
Na slici 23. su prikazani zavari izrađeni AC Wave impulsnim MIG postupkom gdje su brzina zavarivanja i brzina dobave žice držani konstantni, a frekvencija impulsa se mijenja od 0 do 9 Hz [24].



Slika 23. Izgled zavara izrađenog AC Wave impulsnim MIG postupkom pri različitim frekvencijama [24]

Srednja jakost struje zavarivanja i napon su također držani konstantnim, no broj prenesenih kapljica između perioda visoke frekvencije i perioda niske frekvencije se značajno razlikuje. U slučaju kada je frekvencija $F=0$ tada je obično impulsno MIG zavarivanje. Površina zavara je glatka i bez nadvišenja. Kod zavarivanja impulsnim MIG postupkom nema toplinske fluktuacije, već samo impulsa visoke frekvencije. Oblik vala visoke frekvencije impulsa je pravilan i ujednačen, srednja jakost struje i napona su konstantni što znači da nema oscilacije unosa topline i energije. Prijenos metala se pojavljuje samo prilikom vršne jakosti struje [24].

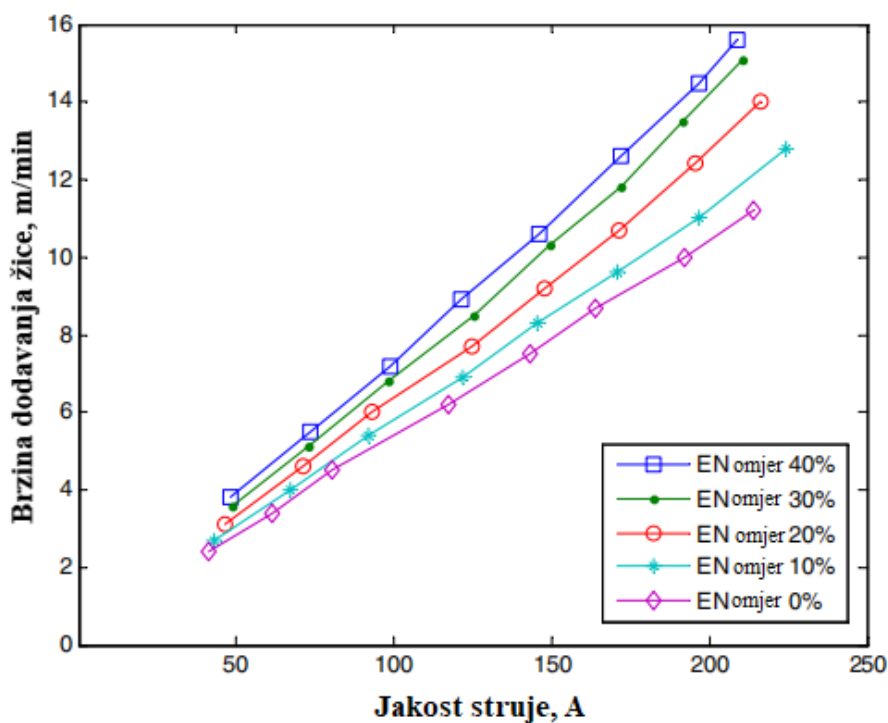
Slika 24. prikazuje profile zavarenog spoja lima aluminijske debljine 2 mm zavarenog AC Wave impulsnim MIG postupkom uz različite frekvencije impulsa struje i napona uz 50% negativne komponente. Pregledom profila zavarenih spojeva moguće je utvrditi da frekvencija impulsa ima utjecaj na dubinu penetracije. Povećanje frekvencije je povezano s prekomjernim povećanjem penetracije s korijenske strane zavara i smanjenjem visine naličja zavara. Najpovoljnija geometrija sučeljenog spoja za slučaj aluminijskog lima debljine 2 mm se postiže u rasponu od 2 do 4 Hz. Unutar ovog raspona frekvencije se postiže estetski prihvatljiv izgled naličja zavara [21].



Slika 24. Makrostruktura zavarenog spoja AC Wave impulsnim MIG postupkom uz različite impulsne frekvencije i 50% EN [21]

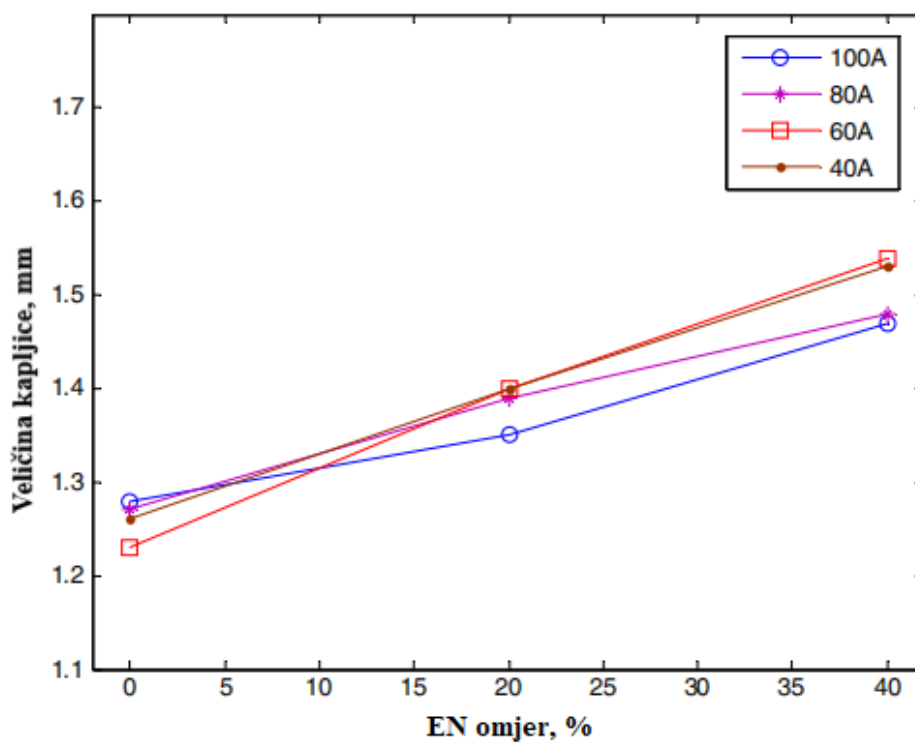
3.5. Utjecaj EN omjera na brzinu dobave žice i količinu depozita dodatnog materijala

Slika 25. prikazuje vezu između brzine dobave žice i EN omjera. Za nepromjenjivu struju zavarivanja brzina dobave žice se povećava značajno kako se povećava EN omjer. Na primjer, brzina dobave žice se poveća za 60% kada se EN omjer promjeni s 0% na 40% pri prosječnoj jakosti struje od 150 A [3]. Pri konstantnom EN omjeru porastom jakosti struje raste i brzina dodavanja žice.



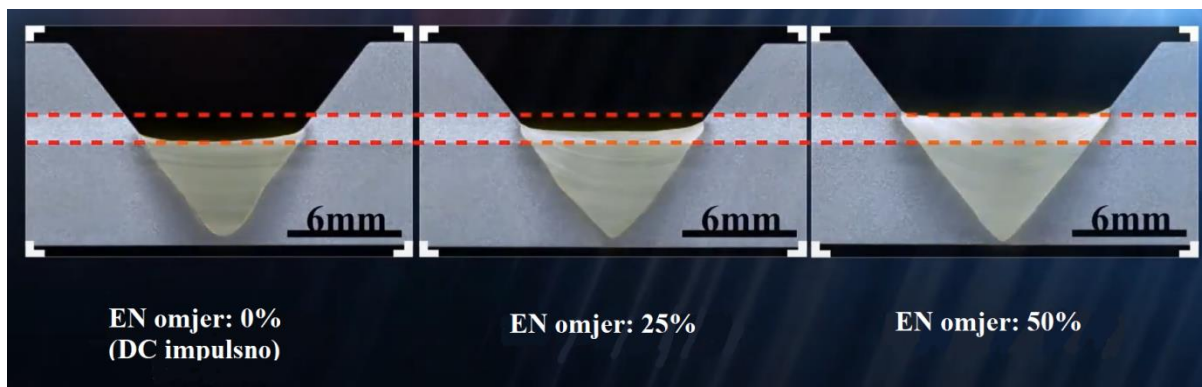
Slika 25. Povezanost brzine dobave žice i jakosti struje zavarivanja uz različite EN omjere AC impulsnog MIG zavarivanja [10]

Slika 26. pokazuje ovisnost veličine rastaljene kapljice dodatnog materijala o EN omjeru za različite jakosti struje zavarivanja. Moguće je zaključiti da veličina rastaljene kapljice raste s porastom EN omjera uz stalnu jakost struje zavarivanja.



Slika 26. Ovisnost veličine rastaljene kapljice dodatnog materijala o EN omjeru uz različite jakosti struje [10]

Slika 27. uspoređuje količine rastaljenog dodatnog materijala uz različite EN omjere kod AC MIG zavarivanja. Vidljivo je da s povećanjem negativnog omjera količina depozita dodatnog materijala raste što pruža visoku učinkovitost i sposobnost zavarivanja debelih ploča.

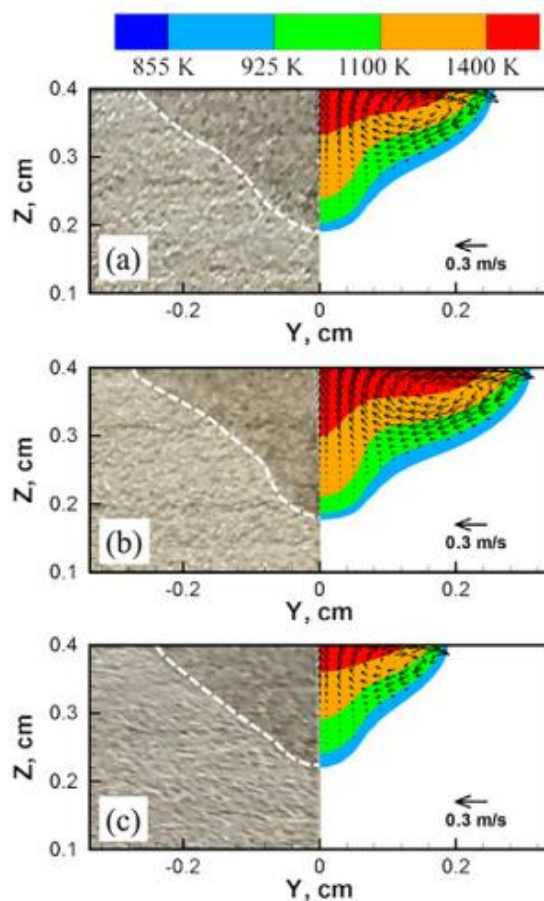


Slika 27. Usporedba količine rastaljenog dodatnog materijala kod impulsnog MIG zavarivanja uz različite EN omjere [12]

3.6. Usporedba geometrije zavara kod AC MIG-P i AC Wave MIG-P postupka

Slika 28. prikazuje proračunatu temperaturu i polje brzine rastaljenog metala zavara u poprečnom presjeku zavarenog spoja kod AC MIG-P postupka i AC Wave MIG-P postupka. Rastaljeni metal teče iz sredine zavara prema periferiji metala zavara blizu vrha površine. U rastaljenom metalu zavara rastaljeni metal cirkulira brzinom od 300 mm/s. Pri ovoliko velikoj brzini toplina se uglavnom prenosi konvekcijom unutar rastaljenog metala zavara. Veličina metala zavara kod impulsnog AC MIG postupka je u granicama najvećeg i najmanjeg presjeka zavara izvedenog AC Wave impulsnim MIG postupkom za istu prosječnu struju zavarivanja od 100 A [23].

Žica dodatnog materijala se brzo tali te kapljica nastaje svakim impulsom primjenom vršne struje. Zagrijane kapljice se akceleriraju elektromagnetskim silama u rastaljeni metal zavara velikom brzinom. Dubina penetracije kod AC Wave impulsnog MIG postupka varira periodično s vremenom, odnosno kako varira unos topline u metal zavara [23]. Ovakav presjek zavara se razlikuje u usporedbi s presjekom konstantne dubine penetracije kod impulsnog AC MIG postupka.



Slika 28. (a) Poprečni presjek zavara kod AC impulsnog MIG postupka, (b) Najveći poprečni presjek zavara kod AC Wave impulsnog MIG postupka, (c) Najmanji poprečni presjek zavara kod AC Wave impulsnog MIG postupka [23]

Važna značajka AC Wave impulsnog MIG postupka je i ta da se vršna temperatura u rastaljenom metalu zavara mijenja periodično, dok je kod impulsnog MIG postupka temperatura konstantna. To znači da se rastaljeni metal zavara kod AC Wave impulsnog MIG postupka periodično skuplja i širi ovisno o unosu topline. Ovakva varijacija dovodi do ponovnog taljenja i skrućivanja metala zavara [23].

Razlika u brzini hlađenja između ova dva procesa utječe na mikrostrukturu zavara. Brzina hlađenja i skrućivanja je značajno veća kod AC Wave impulsnog MIG postupka čime se postiže sitnija mikrostruktura [23].

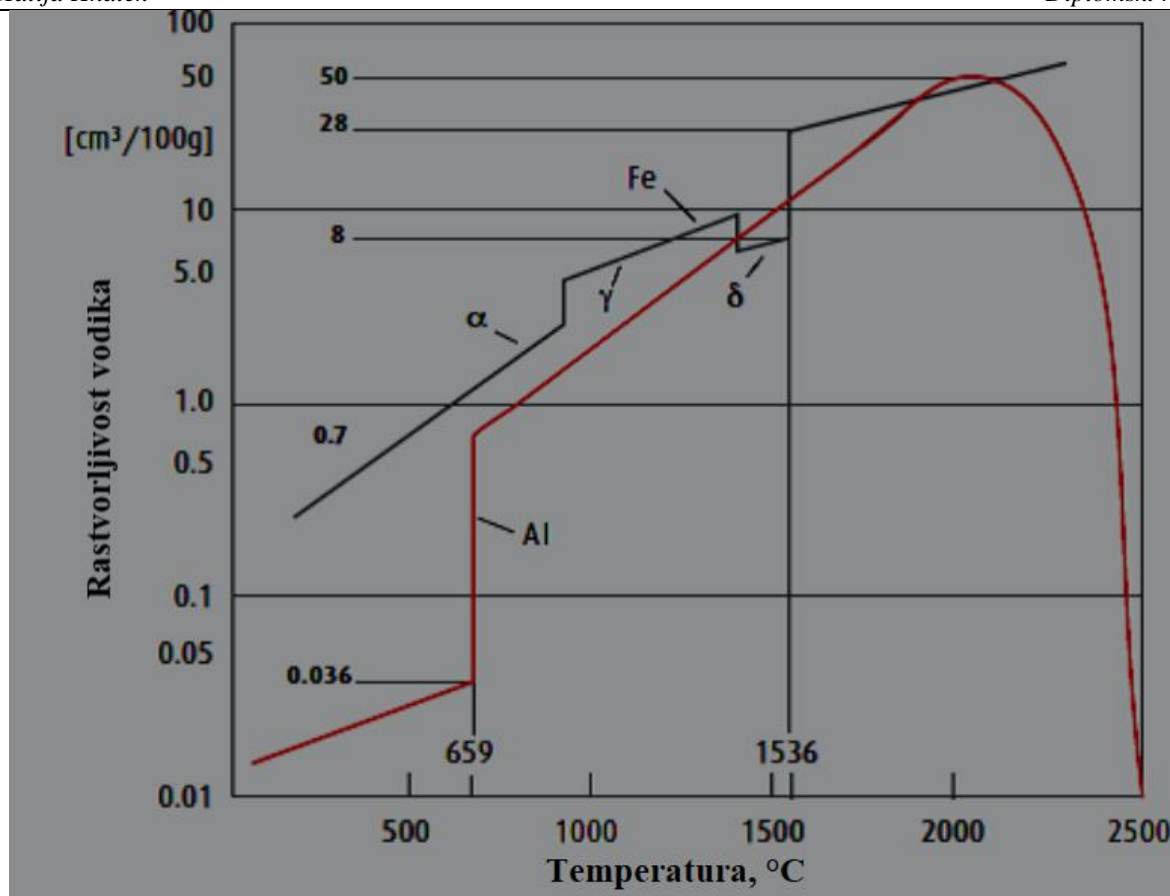
4. PROBLEMATIKA ZAVARIVANJA ALUMINIJA I ALUMINIJSKIH LEGURA

Neki od problema prilikom zavarivanja aluminijskih legura jesu pojava poroznosti, otežano dodavanje žice za zavarivanje, moguće protaljivanje spoja, mogući nedostatak penetracije, moguća pojava toplih pukotina, moguća pojava pukotina uslijed zaostalih naprežanja, nečistoće te otežano zavarivanje većih debljina osnovnog materijala. Najčešće korišteni procesi zavarivanja aluminijskih legura su MIG, TIG i plazma zavarivanje. TIG i MIG koriste inertni zaštitni plin poput argona, helija i njihovih mješavina. Vrlo je važno da zaštitni plin ne sadrži vodik ili kisik. Zavar je potrebno držati čist od vodika i kisika jer se otapaju u metalu zavara i uzrokuju pore. Oksidna membrana također može sadržavati vlagu koja se pretvara u vodik i kisik prilikom zagrijavanja, stoga ju je potrebno ukloniti prije početka procesa zavarivanja. Oksidna membrana se ne može rastaliti tijekom zavarivanja budući da je njena točka taljenja značajno viša od točke taljenja aluminijskih legura [25]. Razumijevanje ovih izazova pomaže osigurati kvalitetu zavara prilikom zavarivanja aluminijskih legura.

4.1. Utjecaj topivosti vodika

Vodik je glavni uzrok poroznosti u zavarenim spojevima aluminijskih legura zbog svoje velike topivosti. Na slici 29. je prikazana vodikova topivost u aluminijskoj i u željeznoj leguri. Značajan porast topivosti se događa prilikom skrućivanja (na otprilike 660°C), te niska razina topivosti u krutom stanju pokazuje da vodik vrlo lako može ostati zarobljen u metalu zavara u obliku pora (ukoliko je brzina hlađenja prebrza). Granica skrućivanja se može smatrati mjerom za određivanje stvaranja pora. Ukoliko je hlađenje metala zavara prebrzo, otplinjavanje nije provedeno do kraja te se stvara poroznost. Postoji pet glavnih razloga stvaranja pora i nedostatka protaljivanja prilikom zavarivanja aluminijskih legura [25]:

- Velika toplinska vodljivost
- Dobra topivost vodika u rastaljenom stanju
- Značajan skok topivosti pri temperaturi ~660°C
- Niska topivost vodika u čvrstom stanju
- Teška uočljivost granice skrućivanja



Slika 29. Topivost vodika u aluminiju i željezu [25]

Veličina, oblik, raspodjela i količina pora uslijed prisustva vodika u metalu zavara uglavnom ovisi o brzini hlađenja, obliku zavara, vrsti zaštitnog plina i njegovom tlaku. Kontrolirani prijenos metala kod MIG-P postupka dovodi do manje poroznosti nego kod konvencionalnog MIG postupka, dok se najgori rezultati postižu zavarivanjem kratkim spojevima.

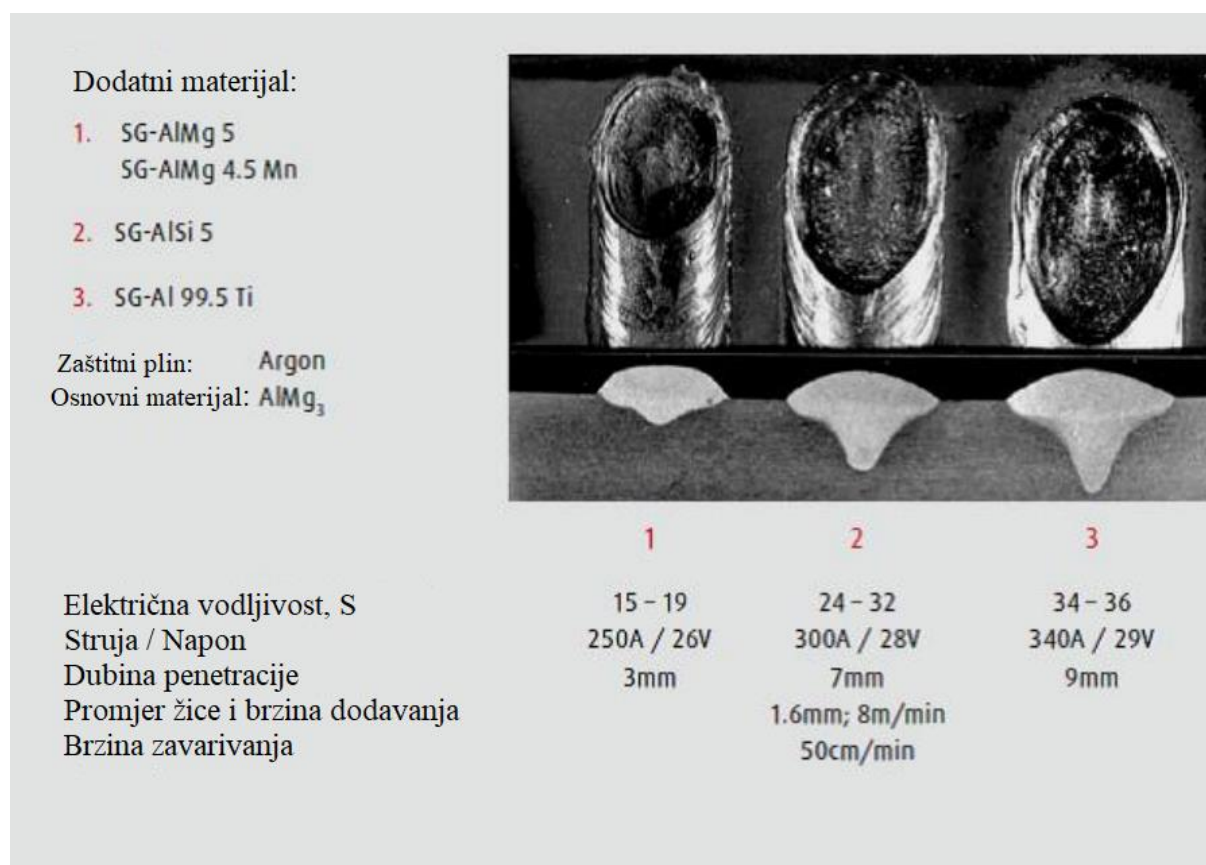
Poroznost zavara kod AC MIG-P postupka se smanjuje zbog jednostavnog izlaska apsorbiranih plinova iz metala zavara. Razlog tome je miješanje rastaljenog metala zavara promjenom polariteta svakim ciklusom i pulsacijom struje. AC Wave MIG-P smanjuje razinu poroznosti u metalu zavara svojom dvostrukom pulsacijom koja stvara turbulentan tok metala zavara i na taj način pospješuje izlazak plinova. Kao rezultat kod AC MIG-P postupka pore pronalazimo uglavnom u središtu metala zavara dok su kod zavara AC Wave MIG-P postupkom pore rasute širom zavara. Smanjenjem razine poroznosti povećava se vlačna čvrstoća zavarenog spoja (više od 200 MPa) kao i istezljivost (više od 2%) [22].

U usporedbi s AC impulsnim MIG postupkom, AC Wave impulsni MIG postupak dodatno smanjuje pojavu poroznosti u metalu zavara, ima bolju mogućnost premošćivanja udaljenosti između dvaju radnih komada u sučeljenom spoju, te bolju mogućnost kontrole načina prijenosa metala, što sve utječe na strukturu i svojstva zavara [22].

4.2. Utjecaj električne vodljivosti na geometriju zavora

Na električnu vodljivost žice uglavnom utječe njen kemijski sastav i priroda legirnih elemenata. Što je manji udio legirnog elementa to je bolja električna vodljivost slobodnog kraja žice, te su viši napon i jakost struje zavarivanja uz konstantnu brzinu žice. Promjena vrste žice ovisno o vrsti osnovnog materijala zahtijeva prilagođene vrijednosti brzine dodavanja žice, jakosti struje i napona zavarivanja [25].

Slika 30. prikazuje utjecaj električne vodljivosti dodatnog materijala na geometriju zavora $AlMg_3$ u zaštiti 100% argona. Najmanja penetracija od 3 mm se postiže SG- $AlMg_5$ žicom jer ima najmanju električnu vodljivost od triju žica (15-19 S), dok se najveća penetracija od 9 mm postiže žicom SG-Al 99,5 Ti koja ima najveću električnu vodljivost (34-36 S).



Slika 30. Utjecaj električne vodljivosti na geometriju zavora kod MIG zavarivanja aluminija [25]

4.3. Toplinska vodljivost aluminija

Toplinska vodljivost aluminija je značajno bolja nego kod konstrukcijskog čelika i iznosi 0,5 W/cmK, što otežava brzo zavarivanje. Zbog toga je dubina penetracije smanjena, a rastaljenom metalu zavora ostaje manje vremena za skrućivanje, što utječe na otplinjavanje koje može

dovesti do nedostatka fuzije i stvaranje pora. Kako bi se to spriječilo potrebno je provesti sljedeće [25]:

- Predgrijavanje prije zavarivanja
- Povećati izlazne vrijednosti električnog luka (jakost struje, napon zavarivanja)
- U određenim uvjetima uvesti dodatno predgrijavanje tijekom zavarivanja debelih radnih komada

Povećanje brzine zavarivanja dovodi do proporcionalnog smanjenja unosa topline ukoliko efektivna snaga ostaje nepromijenjena. Kao rezultat zona utjecaja topline u osnovnom materijalu postaje uža. To znači da je brzina zavarivanja obrnuto proporcionalna s unosom topline. Zona utjecaja topline značajno utječe na mehanička svojstva zavarenog spoja, zbog čega može doći do stvaranja pukotina ili loma zavarenog spoja. Unos energije odnosno topline je također moguće smanjiti prilagodbom broja impulsa u nizu pulseva niske energije ili prilagodbom osnovnog vremena impulsa [22].

4.4. Pukotine

Pukotine se pojavljuju zbog kombinacije faktora, osjetljive mikrostrukture, kemijskog sastava i visokih naprezanja uslijed skrućivanja. Nastajanje pukotina je moguće eliminirati smanjenjem naprezanja ili promjenom mikrostrukture. Pukotine koje nastaju u zavaru kod aluminija jesu uglavnom tople pukotine, a nastaju tijekom skrućivanja zavara [8].

4.4.1. Pukotine u krateru

Ukoliko je električni luk naglo ugašen onda neće postojati dovoljno dodatnog materijala kako bi se izbjeglo nastajanje kratera. Geometrija kratera pojačava naprezanja uslijed skrućivanja na području oko kratera. Ukoliko su naprezanja dovoljno velika nastati će pukotine unutar i oko kratera, slika 31. Kako bi se eliminiralo nastajanje pukotina unutar kratera, potrebno je minimizirati geometrijski diskontinuitet kratera, odnosno potrebno ga je što više ispuniti. Nastajanje kratera i pukotina je moguće spriječiti korištenjem izvora struje za zavarivanje s opcijom ispunjavanja kratera, brzim uspostavljanjem i prekidom električnog luka nekoliko puta držeći vrh elektrode unutar kratera ili ispunjavanjem zavara do kraja radnog komada i zatim ponovnim prolazom u suprotnom smjeru s većom brzinom [8].



Slika 31. Radiografska snimka kraterske pukotine [8]

4.4.2. Uzdužne pukotine

Uzdužne pukotine su vrlo česte kod zavarivanja aluminija te je njihov oblik prikazan na slici 32. Pukotine uzduž zavara kod aluminija je moguće spriječiti poduzimanjem slijedećih koraka [8]:

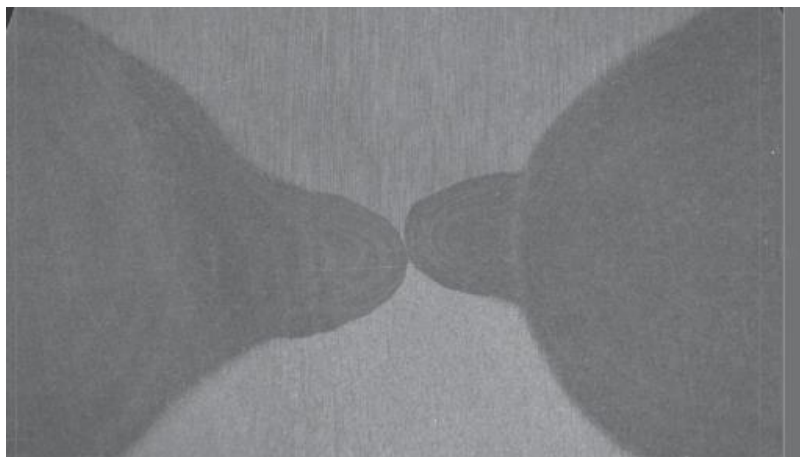
- Potreban je depozit dovoljne količine dodatnog materijala, te izbjegavanje stvaranja tankih, konkavnih sučeljenih i kutnih zavara jer su oni osjetljivi na pukotine. Zavari sučeljenih i kutnih spojeva moraju biti konveksni.
- Kada je to moguće, koristiti V pripremu umjesto I pripreme jer dopušta dodavanje više dodatnog materijala.
- Smanjiti pritisak stezaljki jer se na taj način materijalu dopušta blagi pomak tijekom skrućivanja. Veliko naprezanje je ponekad uzrokovano geometrijom spoja koju je potrebno promijeniti.



Slika 32. Radiografska snimka uzdužne pukotine zavara aluminija [8]

4.5. Nepotpuna penetracija

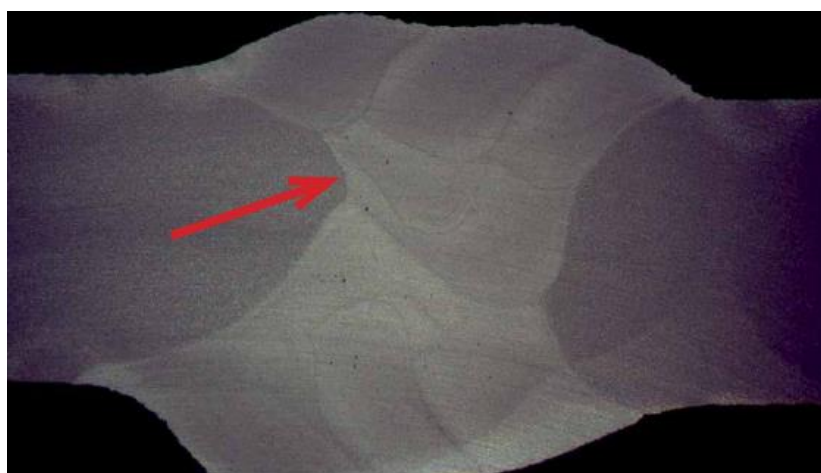
Slika 33. prikazuje nepotpunu penetraciju zavarenog spoja aluminija. Česti uzrok nepotpune penetracije je nedovoljna jakost struje i prevelika brzina zavarivanja. No preveliki napon zavarivanja može rezultirati premošćivanjem korijena zavora, te nedovoljno penetracijom. Kod dvostranog zavarivanja je potrebno pripaziti kako bi se postigla potpuna penetracija [8].



Slika 33. Presjek dvostranog zavora s nepotpunim provarom [8]

4.6. Naljepljivanje

Greška naljepljivanja je prikazana na slici 34., te je obično uzrokovana zavarivanjem preko oksida, zbog nedovoljnog čišćenja između prolaza ili lošim namještanjem spoja. Okside i čađu je potrebno očistiti prije početka zavarivanja i prije sljedećeg prolaza [8].

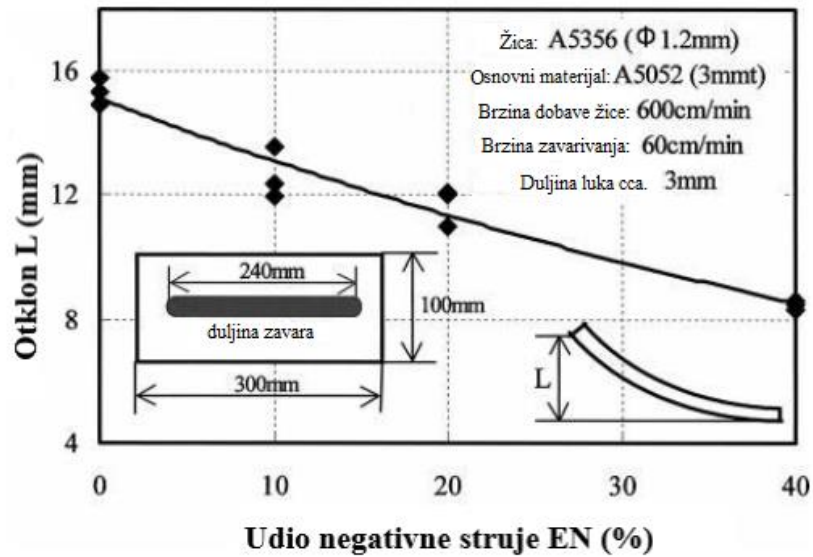


Slika 34. Makroizbrusak zavora s vidljivim naljepljivanjem [8]

4.7. Toplinske deformacije

Deformacije kod zavarivanja tankih limova su relativno velike te stvaraju značajan problem za kvalitetu. Slika 35. prikazuje utjecaj EN omjera na deformaciju otklona kod navara na pločama aluminija A5052 debljine 3 mm. Dvije stezaljke su korištene kako bi se ploče pričvrstile na

početku i na kraju zavora. Stezaljke su uklonjene odmah nakon zavarivanja kako bi se dopustilo slobodno deformiranje ploče. Dokazano je da se deformacije smanjuju kako se EN omjer povećava. Deformacija otklona kod 40% EN omjera je manja za 45% u usporedbi s onom kod DC impulsnog zavarivanja pri 0% EN omjera [3].



Slika 35. Utjecaj EN omjera na deformaciju otklona kod zavarivanja ploče aluminija debljine 3 mm [3]

5. ZAŠTITNI PLINOV I ZA ZAVARIVANJE ALUMINIJA I ALUMINIJSKIH LEGURA

Zaštitni plinovi imaju utjecaj na stabilnost električnog luka i način prijenosa metala, oblik zavara i brzinu taljenja, zbog čega je vrlo važno pravilno odabrati zaštitni plin ovisno o postupku zavarivanja i osnovnom materijalu. Helij se ne koristi često kod zavarivanja tankih radnih komada aluminijskih legura zbog svojeg visokog ionizacijskog potencijala, te većeg napona zavarivanja u usporedbi sa plinskom zaštitom pod čistim argonom za isti iznos struje zavarivanja. Povećani unos topline utječe na dubinu penetracije i njenu širinu. Argon se najčešće koristi za zavarivanje aluminijskih legura zbog jednostavnog uspostavljanja električnog luka i efekta čišćenja.

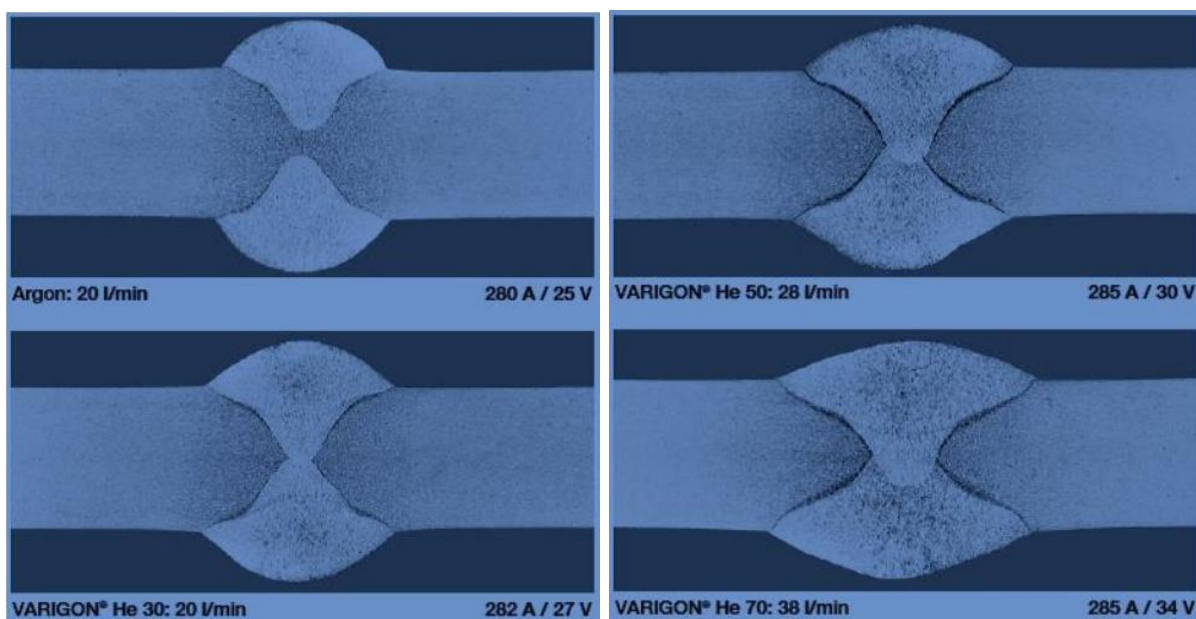
Kako bi se spriječila oksidacija aluminijskih legura prilikom elektro-lučnog zavarivanja potrebno je koristiti inertan plin. Zaštitni plin štiti zavar od utjecaja atmosferskog kisika i dušika. Iako su svojstva metala zavara uglavnom kontrolirana sastavom dodatnog materijala, zaštitni plin može imati utjecaja na čvrstoću zavara, žilavost, istezljivost i korozivnu otpornost. Preveliki oksidacijski potencijal zaštitnog plina može dovesti do smanjenja čvrstoće i žilavosti zavara. Razlog tomu je što kisik i ugljikov dioksid u zaštitnom plinu povećavaju broj uključaka oksida, te smanjuju udio materijala poput mangana i silicija u metalu zavara. Prilikom zavarivanja debljih radnih komada aluminijskih legura čistim argonom, može se pojaviti poroznost, nedostatak penetracije i problem naljepljivanja. Dodatak helija argonu može znatno smanjiti ove nedostatke. Razlog tomu je velika toplinska provodljivost helija što rezultira većim unosom energije u metal zavara. Kao rezultat nastaje topliji metal zavara, bolje protaljevanje i sporije hlađenje čime se stvara više vremena za izlazak zaostalih plinova [25].

Za zavarivanje aluminijskih legura se uglavnom koriste dva plina, argon i helij. Oni se mogu koristiti kao čisti argon, čisti helij ili različite mješavine argona i helija. Čisti argon je najpopularniji zaštitni plin za zavarivanje aluminijskih legura te se koristi kod MIG i TIG postupka zavarivanja [25]. Argon nema kemijske reakcije s drugim materijalima zbog čega je prikladan za zavarivanje aluminijskih legura.

Kod MIG zavarivanja helij se dodaje argonu u rasponu od 25% pa do 75%. Prilagodбом sastava zaštitnog plina, moguće je utjecati na raspodjelu topline unutar zavara, što djeluje na oblik presjeka metala zavara i brzinu zavarivanja. Povećanje brzine zavarivanja je značajan faktor s obzirom da troškovi rada čine znatan udio troškova proizvodnje. Ovisno o duljini električnog luka dodatak helija čistom argonu će povećati napon električnog luka za 2 do 3 volta. Kod MIG postupka najšira penetracija se postiže zaštitnim plinom s 75% helija i 25% argona [25].

Topliji električni luk koji stvara mješavina zaštitnog plina s helijem je posebice prikladan za materijale s dobrom toplinskom provodljivošću poput aluminija ili bakra. Povećana količina helija dopušta veće brzine zavarivanja kao i bolju penetraciju. Mali dodatak oksidirajućih plinova, obično manji od 0,05% se pokazao kao ključan dodatak argonu te mješavinama argona i helija za zavarivanje aluminija i aluminijskih legura [26].

Slika 36. prikazuje utjecaj sastava zaštitnog plina na geometriju zavara i napon zavarivanja. Zavari su napravljeni u zaštiti 100% argona, te argona s 30, 50 i 70% helija. Mješavinom 70% helija i 30% argona se postiže najveća penetracija i širina zavara, dok se zavarivanjem u zaštiti 100% argona postiže najmanja penetracija i širina zavara. Dodatkom helija argonu također raste napon zavarivanja.



Slika 36. Utjecaj sastava zaštitnog plina na geometriju metala zavara i napon zavarivanja [25]

U tablici 1. su prikazani zaštitni plinovi za zavarivanje neželjeznih materijala prema ISO 14175 te njihove karakteristike. Što je veći broj plusseva to plin ima bolje karakteristike.

Tablica 1. Zaštitni plinovi za zavarivanje aluminija [26]

Vrsta plina prema ISO 14175	Brzina zavarivanja	Kontrola rasprskavanja	Kontrola poroznosti	Taljenje	Penetracija	Jednostavnost upotrebe	Raspon zavarivih debljina za MIG (mm)
I1-Ar	+	+	+	+	+	++	1 do 4
I3-ArHe-30	++	++	++	++	+++	+++	1 do 6
I3-ArHe-50	+++	+++	+++	+++	+++	++	3 do 10
I3-ArHe-70	+++	+++	+++	+++	+++	+	6 do 12+

Argon je prikladan samo za zavarivanje tankih radnih komada budući da ne stvara veoma viskoznan metal zavara. Uporaba argona može rezultirati zavarima s velikim nadvišenjem kao rezultatom loše penetracije te se može pojaviti poroznost kod zavarivanja debljih radnih komada. Ukoliko je nadvišenje metala zavara previsoko, ono može uzrokovati velika naprezanja u zavaru, stoga je potrebno smanjiti nadvišenje dodatnom obradom što stvara dodatni proizvodni trošak. Loša penetracija može povećati razinu grešaka, posebice kod debljih radnih komada. Poroznost također može biti problem kod korištenja argona i prebrzog hlađenja metala zavara. Svi ovi problemi povisuju troškove uslijed popravka zavara ili škartiranja komponente [26].

Dodatak 30% helija argonu poboljšava viskoznost metala zavara. Argon s 30% helija je najprikladniji za zavarivanje tankih do srednjih debljina radnih komada ručno ili automatski. Penetracija je poboljšana u usporedbi sa zavarivanjem pod zaštitom 100% argona, kao i mogućnost premošćivanja. Dodatak helija također smanjuje razinu poroznosti i broj grešaka, što zauzvrat smanjuje proizvodne troškove i škart [26].

Dodatak 50% helija argonu stvara viskozniji metal zavara nego kod zavara pod zaštitom argona s 30% helija. Argon s 50% helija se koristi za ručno ili automatsko zavarivanje, MIG ili TIG zavarivanje debljih radnih komada. Penetracija je znatno poboljšana u usporedbi sa zavarom izvedenim pod zaštitom 100% argona, te se stvara znatno manje grešaka. Nadvišenje metala zavara je znatno manje zbog bolje viskoznosti metala zavara čime se stvara ravniji profil metala zavara. Brzina zavarivanja se može povećati uz zadržavanje kvalitete zavarivanja, čime se poboljšava produktivnost a smanjuju proizvodni troškovi. Visok unos energije znači da nije potrebno predgrijavanje debljih radnih komada, te je u nekim slučajevima potrebna jednostavnija priprema zavara što smanjuje proizvodne troškove [26].

Mješavina 70% helija i 30% argona se najčešće koristi za automatizirano MIG i TIG zavarivanje. Metal zavara je veoma viskozan sa odličnim svojstvima penetracije, te je idealan za zavarivanje veoma debelih radnih komada. Viskoznost kupke metala zavara dopušta značajno povećanje brzine zavarivanja u usporedbi sa zavarivanjem pod zaštitom 100% argona. Karakteristike penetracije su poboljšane, zbog čega je smanjena razina grešaka i proizvodni troškovi, dok su produktivnost i učinkovitost povećani. ArHe-70 u usporedbi sa ArHe-50 mješavinom omogućava zavarivanje uz jednostavniju pripremu zavara, čime se stvara dodatna ekonomska prednost [26].

6. EKSPERIMENTALNI DIO

U eksperimentalnom dijelu rada provedeno je zavarivanje šest kutnih spojeva pomoću kojih je ispitan utjecaj parametara AC MIG zavarivanja dvostrukim impulsom i primjenjenog zaštitnog plina na geometriju zavara. Eksperiment je proveden u Laboratoriju za zavarivanje Katedre za zavarene konstrukcije. Kao osnovni materijal korištene su ploče aluminijske legure serije 5083 debljine 7 mm a kao dodatni materijal žica EZ -MIG AlMg5 promjera 1 mm. Kao zaštitni plinovi za zavarivanje korišteni su Argon 4.8 (I1-Ar) i Messer Aluline He50 (I3-ArHe-50). Uzorci su zavarivani uz različite Wave frekvencije od 8, 20 i 32 Hz. Jakost struje zavarivanja i napon su pritom bili konstantni i iznosili su 220 A i 25,2 V. Protok zaštitnog plina je iznosio 24 l/min kod svih uzoraka, a balans pozitivnog i negativnog polariteta struje je iznosio 0 što znači da su se izmjenjivali pozitivni i negativni udjeli u jednakom omjeru odnosno 50:50%. Svi uzorci su predgrijani na 40°C.

6.1. Osnovni materijal

Aluminijska legura 5083 je poznata po svojim izuzetnim svojstvima u najekstremnijim okruženjima. Legura pokazuje veliku otpornost prema koroziji u morskom okruženju kao i industrijsko kemijskom okruženju. Ova legura pruža najveću čvrstoću od svih toplinski neobradivih legura no ne preporuča ju se koristiti pri temperaturama većim od 65°C. Legura 5083 ima dobru zavarljivost i zadržava čvrstoću nakon provedenog zavarivanja. Ovaj materijal kombinira odličnu duktilnost sa dobrom oblikovljivošću te dobro funkcionira pri niskim temperaturama.

Legura 5083 se najčešće koristi za izradu posuda pod tlakom, karoserija vozila, brodogradnju, željezničke vagone, karoserije kamiona, rudarska okna i kaveze [27]. Kemijski sastav legure 5083 je prikazan u tablici 2.

Tablica 2. Kemijski sastav aluminijske legure 5083 [27]

Maseni udio (%)	Mn	Fe	Cu	Mg	Si	Zn	Cr	Ti	Al
Min.	0,40	-	-	4,00	-	-	0,05	0,15	ostatak
Max.	1,00	0,40	0,10	4,90	0,40	0,25	0,25	0,15	ostatak

U tablici 3. su prikazana mehanička svojstva aluminijske legure 5083, a u tablici 4. njena fizikalna svojstva.

Tablica 3. Mehanička svojstva aluminijske legure 5083 [27]

Vlačna čvrstoća	300 MPa
Elongacija A50 mm	23%
Smična čvrstoća	175 MPa
Tvrdoća po Vickersu	75 HV
Granica razvlačenja	145 MPa

Tablica 4. Fizikalna svojstva aluminijske legure 5083 [27]

Gustoća	2,65 g/cm ³
Talište	570°C
Toplinska ekspanzija	25 x 10 ⁻⁶ /K
Modul elastičnosti	72 GPa
Toplinska vodljivost	121 W/mK

6.2. Dodatni materijal

EZ -MIG AlMg5 je aluminijska žica za zavarivanje s dodatkom 5% magnezija. Koristi se za zavarivanje Al-Mg-Si i Al-Mg legura. Dobiveni metal zavara ima relativno visoku čvrstoću, te je otporan na koroziju u morskoj atmosferi. Specifikacija navedene žice prikazana je na slici 37.

NORME					
HRN EN ISO 18723	AWS / ASME SFA-5.10	W. Nr.			
S Al 5356 / Al Mg5Cr(A)	ER5356	3.3556			
SVOJSTVA I PODRUČJE PRIMJENE					
Aluminijska žica za MIG zavarivanje legirana s 5% magnezija. Namijenjena za zavarivanje Al-Mg i Al-Mg-Si legura. Metal zavara relativno visoke čvrstoće, korozijski postojan u morskoj atmosferi. Pogodna za zavarivanje dijelova namijenjenih eloksiranju.					
MEHANIČKA SVOJSTVA ČISTOG METALA ZAVARA					
R _{p0.2} N/mm ²	R _m N/mm ²	A ₅ %			
120	260	> 25			
ORIJENTACIJSKI KEMIJSKI SASTAV ŽICE					
Al	Mg	Mn	Cr	Si	Fe
% bal.	5,0	0,15	0,10	0,05	0,15
ZAŠITNI PLIN					
I1 (Ar)					
PAKIRANJE					
Promjer žice mm	Namotaj				
0,8; 1,0; 1,2; 1,6; 2,0	Žica do žice (S-S)				
7 kg - žičani kolut					

Slika 37. Specifikacija dodatnog materijala EZ – MIG Al-Mg [28]

6.3. Oprema za zavarivanje

Korišten je izvor struje za zavarivanje Daihen Varstroj Welbee W400 AC-MIG (prikazan na slici 38.) koji ima poboljšanu podršku za zavarivanje tankih ploča aluminija i aluminijskih legura izmjeničnom strujom. Osim standardnih načina zavarivanja aluminija, aluminijskih legura i nehrđajućeg čelika navedeni izvor struje također ima opcije impulsnog i Wave impulsnog načina rada. Dostupne opcije zavarivanja su:

- AC impulsni MIG i MAG
- DC impulsni MIG i MAG
- AC Wave impulsni MIG i MAG
- DC Wave impulsni MIG i MAG
- DC MIG i MAG
- DC TIG
- REL DC



Slika 38. Izvor struje za zavarivanje Daihen Varstroj Welbee W400

U tablici 5. prikazane su tehničke karakteristike izvora struje za zavarivanje OTC Daihen Welbee W400.

Tablica 5. Tehničke karakteristike izvora struje za zavarivanje [29]

Specifikacija/Model	Welbee Inverter W400
Broj faza	Tri faze
Nazivna frekvencija	50/60 Hz
Nazivni ulazni napon	400 V
Raspon ulaznog napona	400 V \pm 15%
Nazivna ulazna vrijednost	21,4 kVA, 17,0 kW
Nazivna ulazna struja	31 A
Nazivna izlazna struja	400 A/ 350 A
Nazivni napon opterećenja	34 V/31,5 V
Nazivni raspon izlazne struje	30 do 400 A
Nazivni raspon izlaznog napona	12 do 35 V
Max. napon praznog hoda	92 V
Nazivni radni ciklus	40 %/100 %
Broj načina zavarivanja	100
Raspon radne temperature	-10 do 40°C
Raspon vlage	Do 50% pri 40°C, do 90% pri 20°C
Raspon temperature skladištenja	-20 do 55°C
Raspon vlage skladištenja	Do 50% pri 40°C, do 90% pri 20°C
Vanjske dimenzije (ŠxDxV)	395x710x762 mm
Masa	86 kg
Statička karakteristika	Konstantni napon (CV)

Korišteni automat za zavarivanje Bug-O Systems Speed Weaver II prikazan je na slici 39. Bug-O Systems Speed Weaver II je automat za brzo, precizno, jednostavno i ekonomično zavarivanje. Na ovaj uređaj se pričvršćuje pištolj za zavarivanje ili rezanje, te omogućava linearno kretanje konstantnom brzinom do 84 cm/min uz mogućnost njihanja s preciznom kontrolom amplitude.



Slika 39. Automat za zavarivanje BUG 5300 Speed Weaver II

6.4. Zaštitni plinovi

Kao zaštitni plinovi za zavarivanje korišteni su Messer Argon 4,8 i Aluline He50, odnosno I1-Ar i I3-ArHe-50 prema ISO 14175, slika 40. Uzorci A1, A2 i A3 su zavareni u zaštiti Argona 4,8 dok su uzorci B1, B2 i B3 zavareni u zaštiti mješavine argona i helija, Aluline He50. Protok plina je bio konstantan i iznosio je 24 l/min.



Slika 40. Korišteni zaštitni plinovi za zavarivanje Argon 4,8 lijevo i Aluline He50 desno

6.5. Pripremljeni spoj

Prije procesa zavarivanja napravljene su pripojni zavari, te je provedeno čišćenje svih spojeva za zavarivanje, slika 41. Pripojni zavari su točkasti zavari koji imaju ulogu pozicioniranja dvaju ploča.



Slika 41. Pripojni zavari

Spojevi su bili stegnuti stegama, slika 42.



Slika 42. Pripremljeni kutni spoj

6.6. Parametri zavarivanja

Uzorci su zavareni AC Wave impulsnim MIG postupkom zavarivanja uz parametre prikazane u tablici 6. Postavke jakosti struje i napona zavarivanja kod svih uzoraka su iznosile 220 A i 25,2 V dok su u tablici 6. prikazane njihove očitane vrijednosti. Ostali parametri su bili konstantni.

Tablica 6. Parametri zavarivanja kutnih spojeva

Uzorak	A1	A2	A3	B1	B2	B3
Jakost struje zavarivanja (očitana), A	245	247	245	237	236	236
Napon zavarivanja (očitani), V	22	22,2	22	23,2	23,3	23,6
Wave frekvencija, Hz	8	20	32	8	20	32
Zaštitni plin	Argon 4,8	Argon 4,8	Argon 4,8	Aluline He50	Aluline He50	Aluline He50
Protok plina, l/min	24	24	24	24	24	24
Brzina dobave žice, m/min	15,6	15,6	15,6	15,6	15,6	15,6
Brzina zavarivanja cm/min	76	76	76	76	76	76
Slobodni kraj žice, mm	17	17	17	17	17	17
EN omjer, %	50	50	50	50	50	50
Unos topline, kJ/cm	3,40	3,46	3,40	3,47	3,47	3,52

Unos topline je izračunat prema sljedećoj formuli:

$$Q = \frac{U \cdot I \cdot 60}{v_z \cdot 1000} \cdot \eta$$

gdje je:

U – napon zavarivanja, V

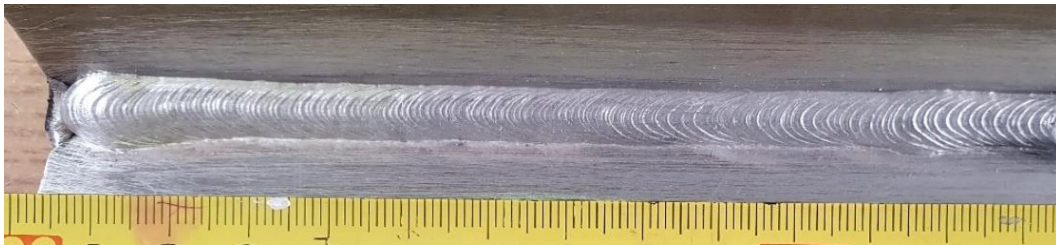
I – jakost struje zavarivanja, A

η – stupanj iskoristivosti procesa zavarivanja (kod MIG postupka je 0,8 prema DIN EN 1011-1)

v_z – brzina zavarivanja, cm/min

6.7. Vizualna kontrola zavora i izrada makroizbrusaka

Nakon zavarivanja uslijedilo je hlađenje radnih komada, četkanje žičanom četkom i čišćenje alkoholom kako bi se uklonila čađa i ostale nečistoće. Zavareni spojevi su prikazani na slikama 43.-48. Kod zavarivanja AC Wave impulsnim postupkom zavar je poprimio izgled kontinuiranog niza „ribljih ljuskica“. Što je Wave frekvencija veća zavar sadrži veći broj „ljuskica“ u nizu. Vizualnom kontrolom zavora nije uočena poroznost niti prskotine od zavarivanja.



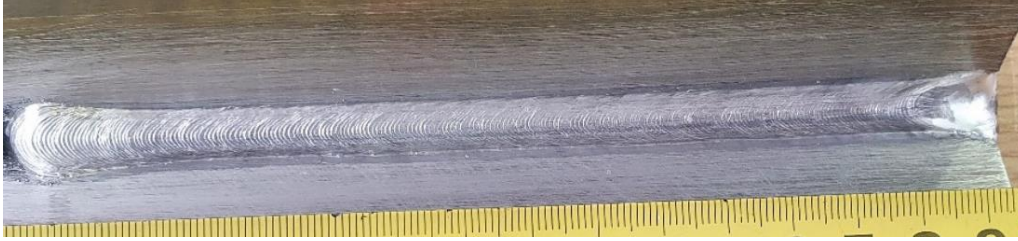
Slika 43. Naličje kutnog zavora A1 izvedenog u zaštiti 100% argona uz $f=8$ Hz



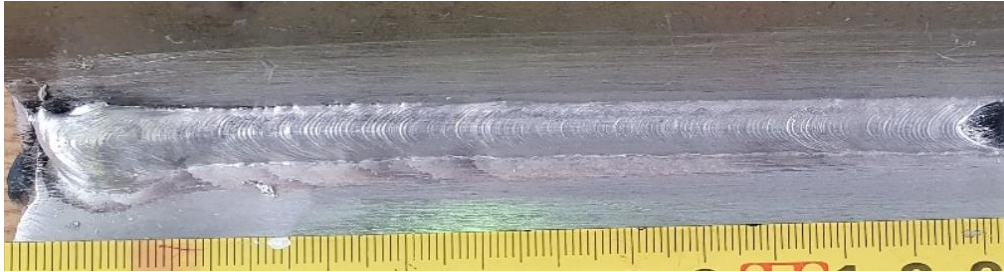
Slika 44. Naličje kutnog zavora B1 izvedenog u zaštiti argona s 50% helija uz $f=8$ Hz



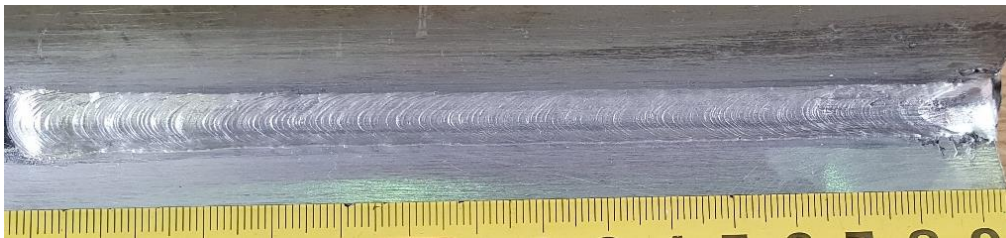
Slika 45. Naličje kutnog zavora A2 izvedenog u zaštiti 100% argona uz $f=20$ Hz



Slika 46. Naličje kutnog zavora B2 izvedenog u zaštiti argona s 50% helija uz $f=20$ Hz



Slika 47. Naličje kutnog zavora A3 izvedenog u zaštiti 100% argona uz $f=32$ Hz



Slika 48. Naličje kutnog zavora B3 izvedenog u zaštiti argona s 50% helija uz $f=32$ Hz

Makroizbrusci širine 25 mm su izrezani na tračnoj pili Imet BS 350 GH, slika 49. Ovaj stroj je namijenjen za malu i srednju proizvodnju, s autonomnim spuštanjem oštice koja omogućava kutne rezove do 45° u desno i do 60° u lijevo. Brzina oštice je 37 do 74 m/min. Nakon rezanja uzorci su isprani, skinuti su oštri rubovi, nakon čega je slijedilo brušenje, poliranje i nagrivanje uzoraka.



Slika 49. Tračna pila imet BS 350 GH

Nakon brušenja makroizbrusaka gradacijama brusnih papira 180, 240, te 400 slijedilo je poliranje uzoraka. Uzorci su polirani na stroju za poliranje Presi Mecatech 250 SPI, slika 50. Ovaj uređaj koristi ploču za poliranje promjera 200 mm, te ima mogućnost ručnog ili automatskog korištenja. Za poliranje su korišteni brusni papiri gradacije 600, 1200 i na kraju 2400. Uzorci su polirani uz ručnu silu brzinom vrtnje od 300 min^{-1} .



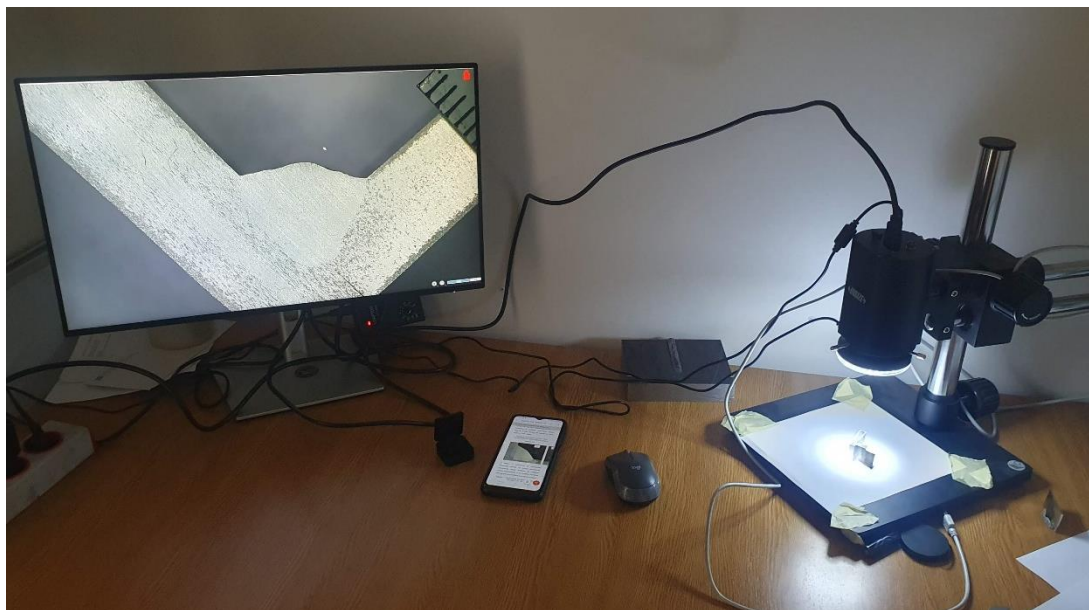
Slika 50. Uređaj za poliranje uzoraka Presi Mecatech 250 SPI

Nakon poliranja uslijedilo je nagrivanje uzoraka u trajanju od 5 minuta u otopini koja je sadržavala 15 mL HCl, 10 mL HF i 85 mL vode, nakon čega su uzorci isprani toplom vodom i osušeni, slika 51.



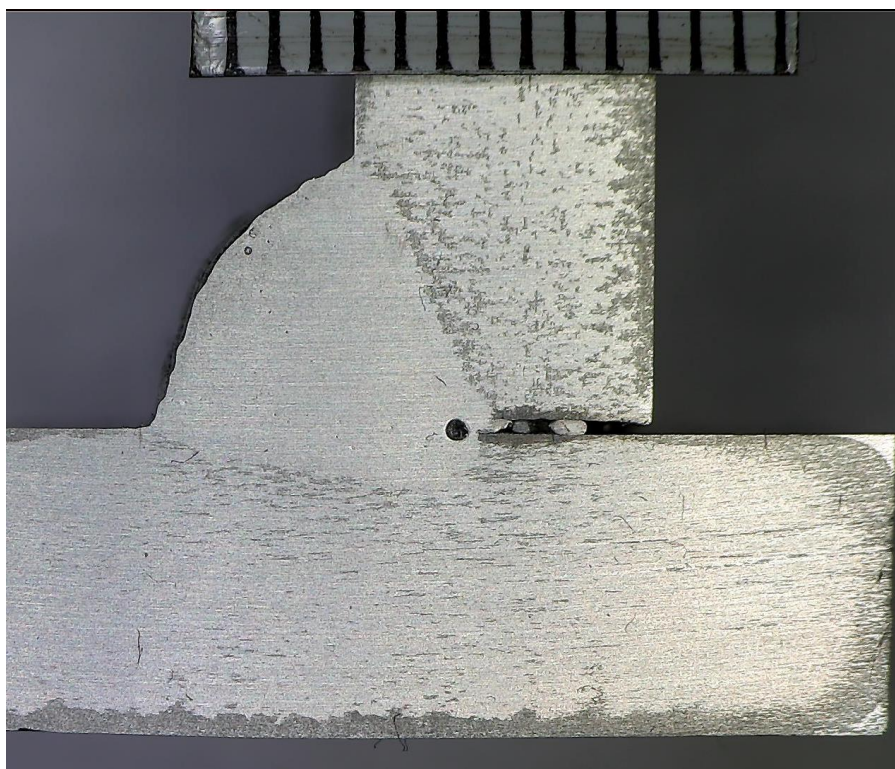
Slika 51. Nagrivanje uzoraka

Mjerenje geometrije zavora provedeno je na digitalnom mikroskopu s auto fokusom marke Insize, slika 52. Ovisno o udaljenosti predmeta u fokusu, ovaj mikroskop ima mogućnost povećanja od 25,8X.

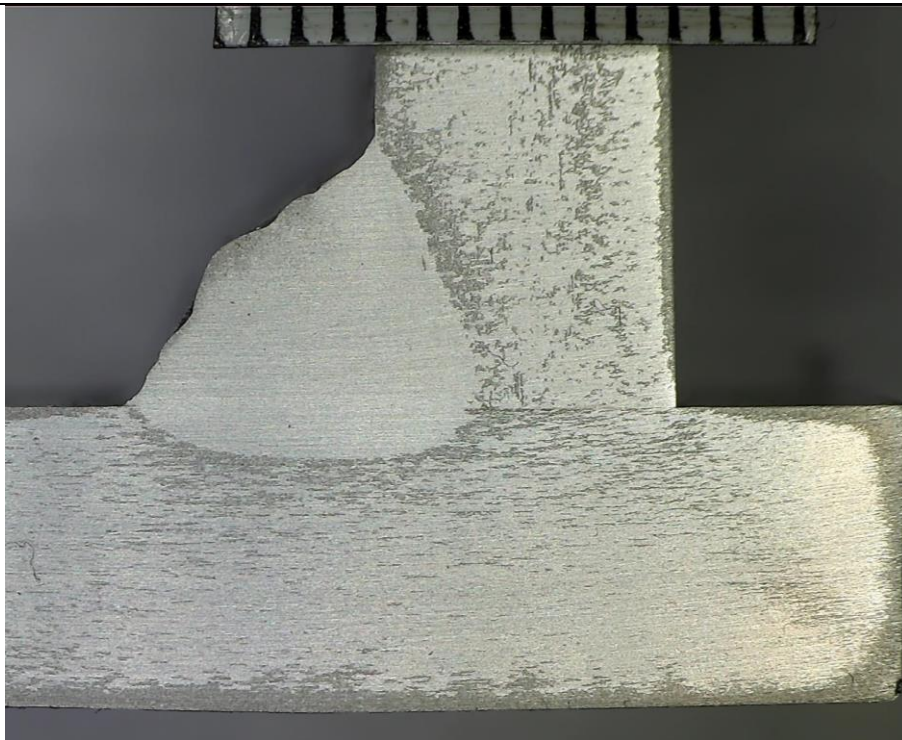


Slika 52. Digitalni mikroskop s auto fokusom Insize

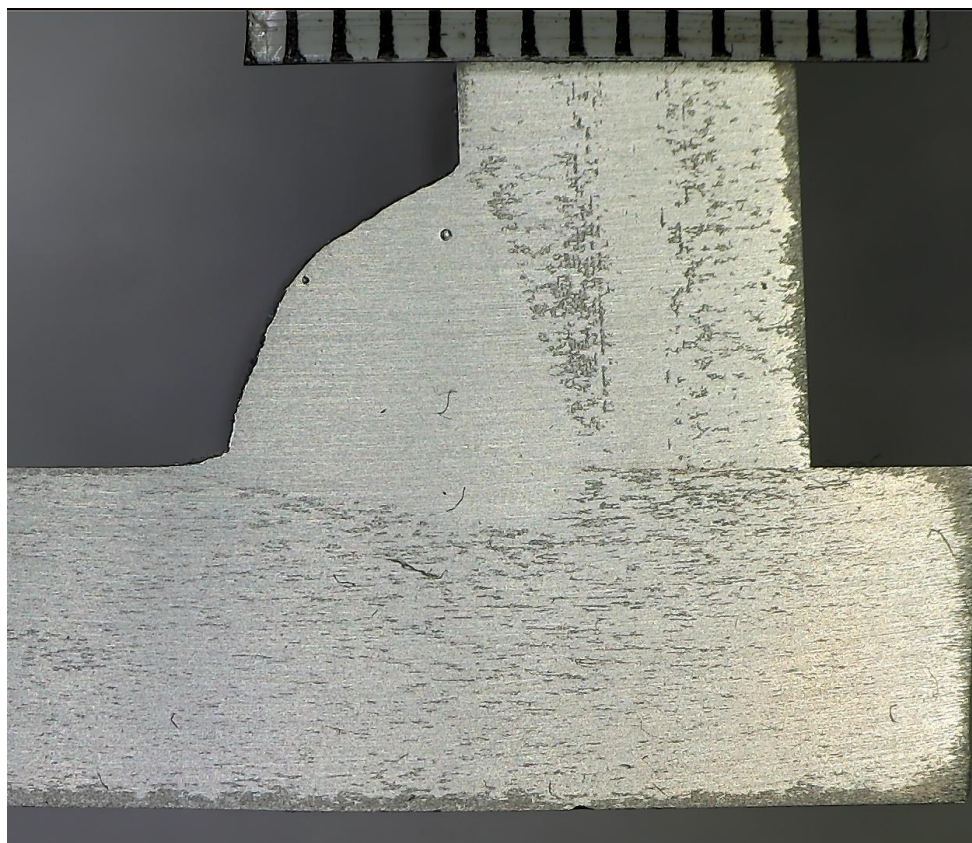
Na slikama 53.-58. prikazani su makroizbrusci zavora A1, B1, A2, B2, A3 i B3.



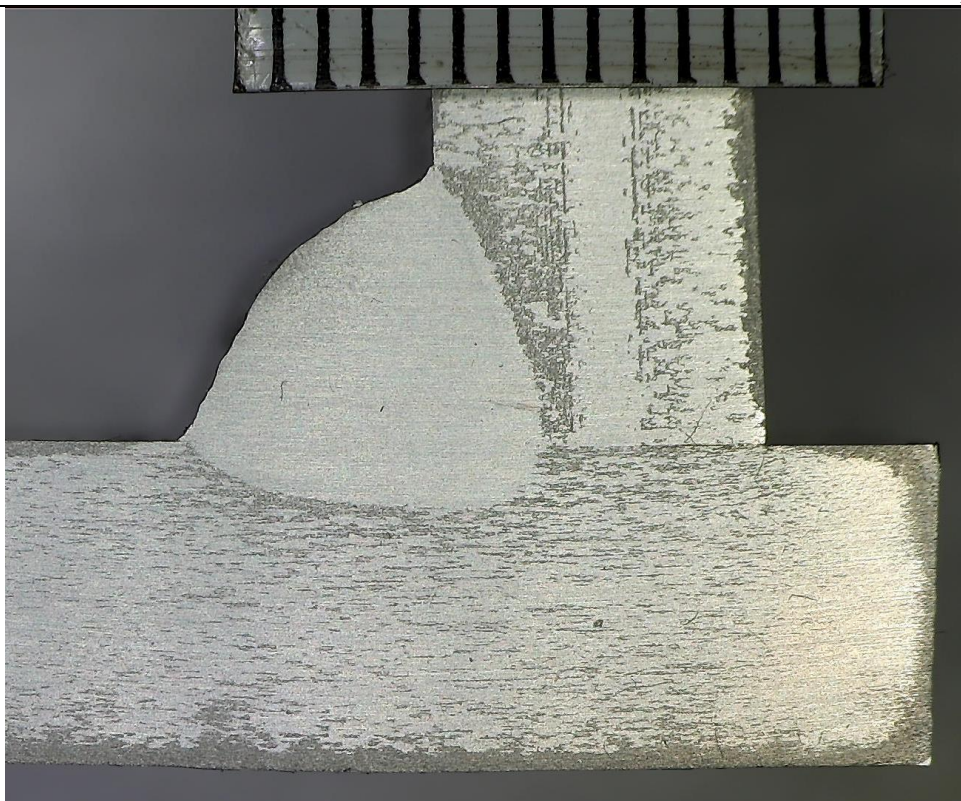
Slika 53. Makroizbrusak kutnog zavora A1



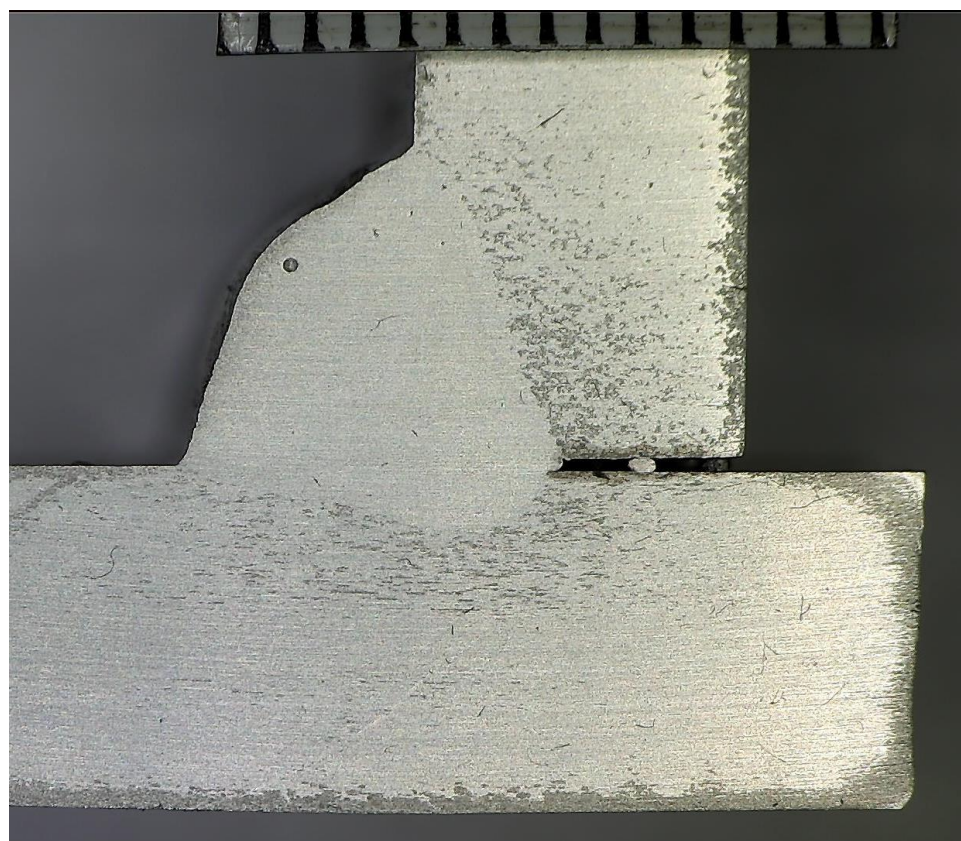
Slika 54. Makroizbrusak kutnog zavora B1



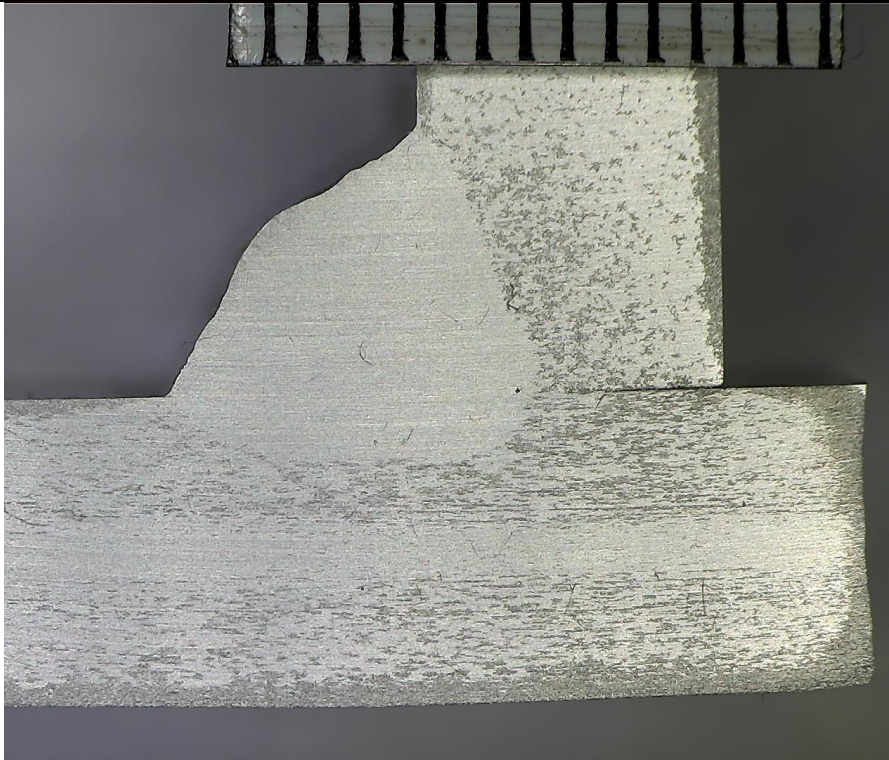
Slika 55. Makroizbrusak kutnog zavora A2



Slika 56. Makroizbrusak kutnog zavora B2



Slika 57. Makroizbrusak kutnog zavora A3



Slika 58. Makroizbrusak kutnog zavora B3

6.8. Utjecaj zaštitnog plina na geometriju zavora

U tablici 7. je usporedno prikazana geometrija zavora uzoraka A1 i B1 koji su zavarivani istim parametrima zavarivanja ($f=8$ Hz), gdje je uzorak A1 zavaren u zaštiti 100% argona (I1-Ar) dok je uzorak B1 zavaren u zaštiti argona s 50% helija (I3-ArHe-50).

Tablica 7. Geometrija zavora makroizbrusaka A1 i B1

Uzorak A1	Uzorak B1

U tablici 8. je prikazana usporedba izmjerenih vrijednosti geometrije zavora makroizbrusaka A1 i B1.

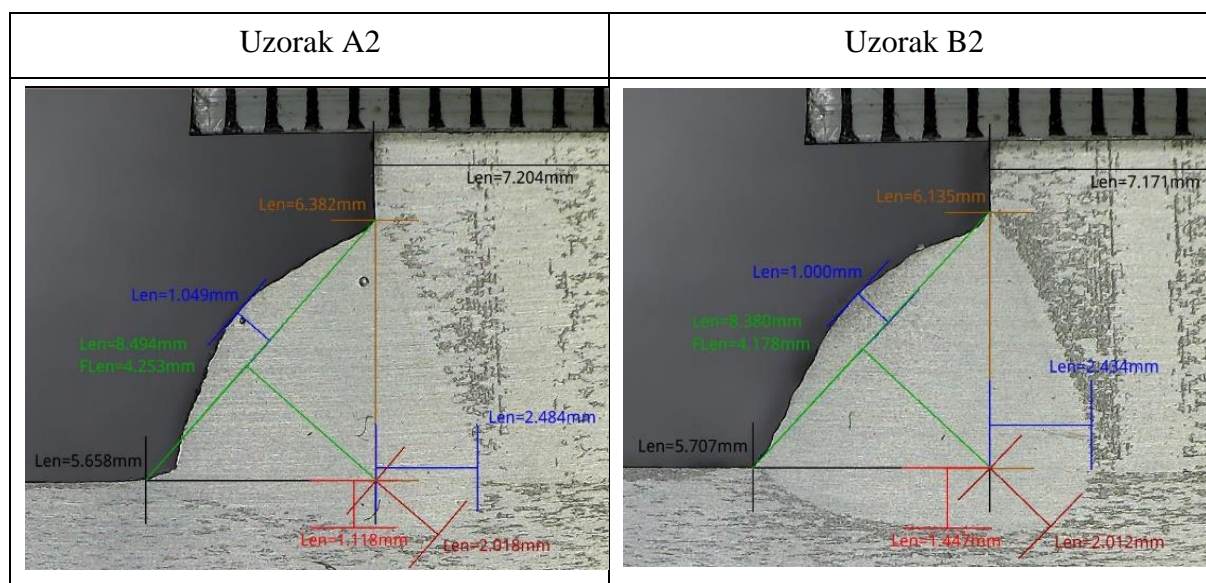
Tablica 8. Usporedba dimenzija zavora uzoraka A1 i B1

Uzorak	A1	B1
Visina zavora, mm	3,940	4,434
Širina zavora, mm	8,121	8,915
Nadvišenje zavora, mm	1,101	0,861
Penetracija zavora, mm	2,094	1,706
Površina zavora, mm ²	39,196	39,958
Površina penetracije, mm ²	18,353	18,175

Usporedbom uzoraka A1 i B1 koji su zavarivani istim parametrima zavarivanja ($f=8$ Hz) a razlikuju se jedino u primijenjenom zaštitnom plinu gdje je uzorak A1 zavaren u zaštiti Argona 4,8 dok je uzorak B1 zavaren u zaštiti plina Aluline He50 moguće je primijetiti da je visina zavora B1 13% veća od visine zavora A1, širina zavora B1 je 10% veća od širine zavora A1, dok je nadvišenje zavora A1 28% veće od nadvišenja zavora B1 a penetracija zavora A1 23% veća od penetracije zavora B1. Površina zavora B1 je za 2% veća od površine zavora A1, dok je površina penetracije zavora A1 približno jednaka površini penetracije zavora B1.

U tablici 9. je usporedno prikazana geometrija zavora uzoraka A2 i B2 koji su zavarivani istim parametrima zavarivanja ($f=20$ Hz), gdje je uzorak A2 zavaren u zaštiti 100% argona (I1-Ar) dok je uzorak B2 zavaren u zaštiti argona s 50% helija (I3-ArHe-50).

Tablica 9. Geometrija zavora makroizbrusaka A2 i B2



U tablici 10. je prikazana usporedba izmjerenih vrijednosti geometrije zavora makroizbrusaka A2 i B2.

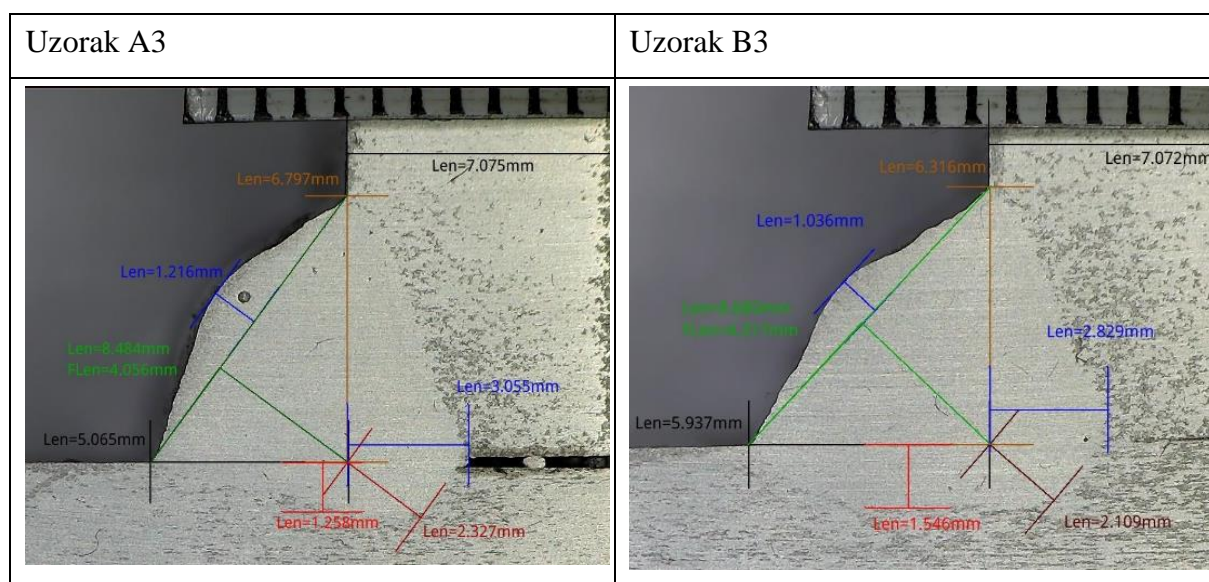
Tablica 10. Usporedba dimenzija zavora uzoraka A2 i B2

Uzorak	A2	B2
Visina zavora, mm	4,253	4,178
Širina zavora, mm	8,494	8,380
Nadvišenje zavora, mm	1,045	1,000
Penetracija zavora, mm	2,018	2,012
Površina zavora, mm ²	36,988	40,608
Površina penetracije, mm ²	15,711	18,753

Usporedbom uzoraka A2 i B2 koji su zavarivani istim parametrima zavarivanja ($f=20$ Hz) a razlikuju se jedino u primijenjenom zaštitnom plinu gdje je uzorak A2 zavaren u zaštiti Argona 4,8 dok je uzorak B2 zavaren u zaštiti plina Aluline He50 moguće je primijetiti da je visina zavora A2 2% veća od visine zavora B2 dok je nadvišenje zavora A2 za 5% veće u odnosu na nadvišenje zavora B2. Razlika u širini i penetraciji između ova dva uzorka je zanemariva. Površina zavora B2 je za 10% veća od površine zavora A2 dok je površina penetracije zavora B2 za 19% veća nego površina penetracije zavora A2.

U tablici 11. je usporedno prikazana geometrija zavora uzoraka A3 i B3 koji su zavarivani istim parametrima zavarivanja ($f=32$ Hz), gdje je uzorak A3 zavaren u zaštiti 100% argona (I1-Ar) dok je uzorak B3 zavaren u zaštiti argona s 50% helija (I3-ArHe-50).

Tablica 11. Geometrija zavora makroizbrusaka A3 i B3



U tablici 12. je prikazana usporedba izmjerenih vrijednosti geometrije zavara makroizbrusaka A3 i B3.

Tablica 12. Usporedba dimenzija zavara uzoraka A3 i B3

Uzorak	A3	B3
Visina zavara, mm	4,056	4,317
Širina zavara, mm	8,484	8,680
Nadvišenje zavara, mm	1,216	1,036
Penetracija zavara, mm	2,327	2,109
Površina zavara, mm ²	41,306	44,589
Površina penetracije, mm ²	19,034	21,732

Usporedbom uzoraka A3 i B3 koji su zavarivani istim parametrima zavarivanja ($f=32$ Hz) a razlikuju se jedino u primijenjenom zaštitnom plinu gdje je uzorak A3 zavaren u zaštiti Argona 4,8 dok je uzorak B3 zavaren u zaštiti plina Aluline He50 moguće je primijetiti da je visina zavara A3 za 6% veća u odnosu na visinu zavara B3 dok je širina zavara B3 za 2% veća od širine zavara A3. Nadvišenje zavara A3 je za 17% veće u odnosu na nadvišenje zavara B3 dok je penetracija zavara A3 za 10% veća u odnosu na penetraciju zavara B3. Površina zavara B3 je za 8% veća od površine zavara A3, dok je površina penetracije zavara B3 14% veća od površine penetracije zavara A3. Razlog tomu je veći ionizacijski potencijal zaštitnog plina s helijem kao i veći napon zavarivanja u zaštiti plina Aluline He50 (I3-ArHe-50).

Moguće je zaključiti da se u sva tri slučaja kod uzoraka (A1, A2 i A3) izvedenih u zaštiti 100% argona (Argon 4,8) postiže veće nadvišenje metala zavara u odnosu na uzorke (B1, B2 i B3) izvedene u zaštiti argona s 50% helija (Aluline He50). Također kod uzoraka A1 i A3 izvedenih u zaštiti 100% argona postignuta je veća penetracija u odnosu na uzorke B1 i B3 izvedene u zaštiti argona s 50% helija, dok je kod uzoraka A2 i B2 penetracija jednaka.

Najveća penetracija postignuta je kod uzorka A3 te iznosi 2,327 mm, dok je općenito najveća površina penetracije postignuta kod uzorka B3 te iznosi 21,732 mm².

Usporedbom površine zavara kao i površine penetracije moguće je uočiti da se kod zavara izvedenih u zaštiti argona s 50% helija (Aluline He50) postiže veća površina zavara i veća penetracijska površina u usporedbi sa zavarom izvedenim u zaštiti 100% argona (Argon 4.8).

6.9. Utjecaj promjene Wave frekvencije na površinu zavara i penetracije

Porastom Wave frekvencije s 8 Hz kod zavarivanja uzorka A1 na 20 Hz kod zavarivanja uzorka A2 površina zavara se smanjila za 6 % kod uzorka A2 u odnosu na A1. Površina uzorka A3

koji je zavarivan pri Wave frekvenciji od 32 Hz je veća za 12% u odnosu na uzorak A2 i za 5% u odnosu na uzorak A1. To znači da je najveća površina zavara izvedenih u zaštitnom plinu 100% argona postignuta s Wave frekvencijom od 32 Hz dok je najmanja postignuta pri 20 Hz. Ista pojava se događa i s penetracijom. Površina penetracije uzorka A1 zavarivanog pri Wave frekvenciji od 8 Hz i u zaštiti 100% argona je za 17% veća u odnosu na površinu penetracije uzorka A2 zavarivanog pri Wave frekvenciji od 20 Hz. Površina penetracije uzorka A3 koji je zavarivan pri Wave frekvenciji od 32 Hz i u zaštiti 100% argona je za 21% veća od površine penetracije uzorka A2 i za 4% veća u odnosu na onu kod uzorka A1. Moguće je zaključiti da je najveća površina penetracije postignuta pri najvećoj Wave frekvenciji od 32 Hz.

Kod zavara B1, B2 i B3 zavarenih u zaštiti argona s 50% helija (Aluline He50) je uočen blagi porast površine zavara i površine penetracije s porastom Wave frekvencije. Tako je površina zavara B2 zavarivanog pri Wave frekvenciji od 20 Hz za 2% veća od površine uzorka B1 zavarivanog pri Wave frekvenciji od 8 Hz. Površina zavara uzorka B3 zavarivanog pri Wave frekvenciji od 32 Hz je za 10% veća od površine zavara uzorka B2 i za 12% veća od površine zavara uzorka B1.

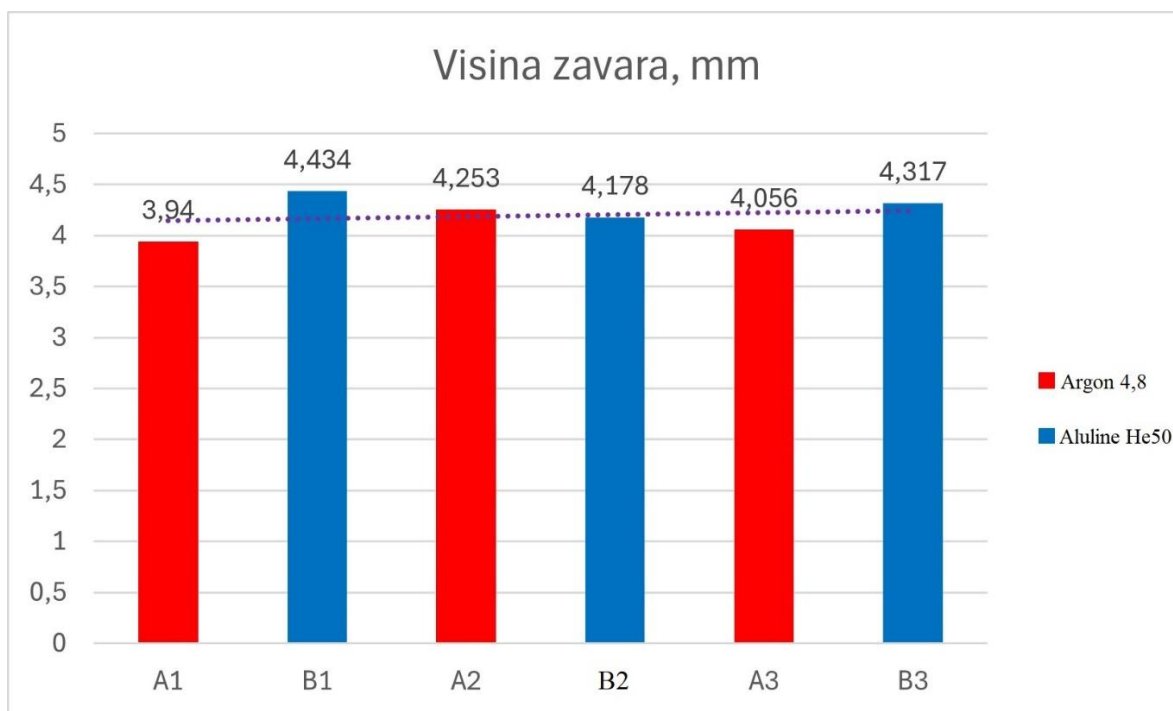
Što se tiče površine penetracije, površina penetracije uzorka B2 je za 3% veća od površine penetracije uzorka B1, dok je površina penetracije uzorka B3 za 16% veća od površine penetracije uzorka B2 i za 20% veća od površine penetracije uzorka B1. Moguće je zaključiti da zavarivanjem pod konstantnim parametrima i u zaštiti argona s 50% helija porastom Wave frekvencije s 8 Hz na 32 Hz raste i površina zavara a time i površina penetracije.

Analizom dobivenih rezultata moguće je zaključiti da je najveća produktivnost procesa uz zadovoljavajuću geometriju zavara postignuta zavarivanjem s najvećom Wave frekvencijom od 32 Hz te u zaštiti argona s 50% helija (I3-ArHe-50) gdje je izmjerena najveća površina zavara kao i najveća površina penetracije metala zavara.

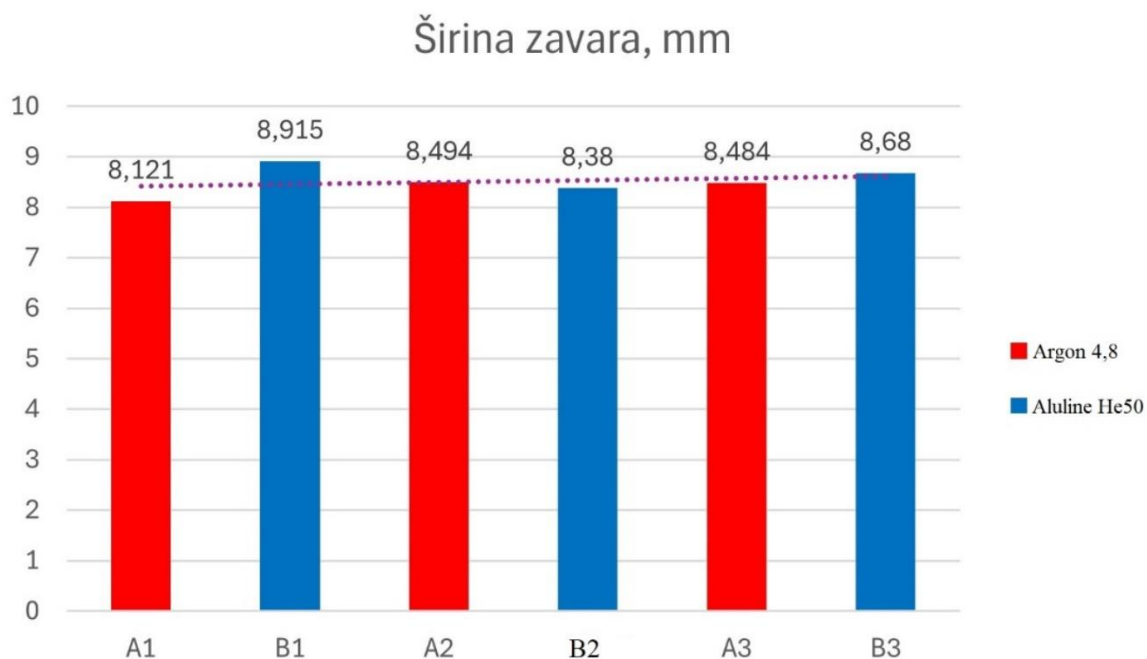
6.10. Grafički prikaz izmjerenih rezultata geometrije zavara

Na slikama 59.-64. grafički su prikazane izmjerene vrijednosti geometrije zavara pojedinih uzoraka. Crvenom bojom su označeni uzorci zavareni u zaštiti 100% argona (Argon 4,8) dok su plavom bojom označeni uzorci zavareni u zaštiti argona s 50% helija (Aluline He50). Glavna crta trenda je kod svih izmjerenih stavki geometrije rastuća što znači da porastom Wave frekvencije raste i visina zavara, širina, nadvišenje, penetracija, površina zavara te površina penetracije. Također je vidljivo da je kod uzoraka zavarenih u zaštiti 100% argona postignuto veće nadvišenje zavara i veća penetracija u usporedbi s uzorcima zavarenim u zaštiti argona s 50% helija. Visina zavara, širina zavara, površina zavara kao i površina penetracije su veći kod

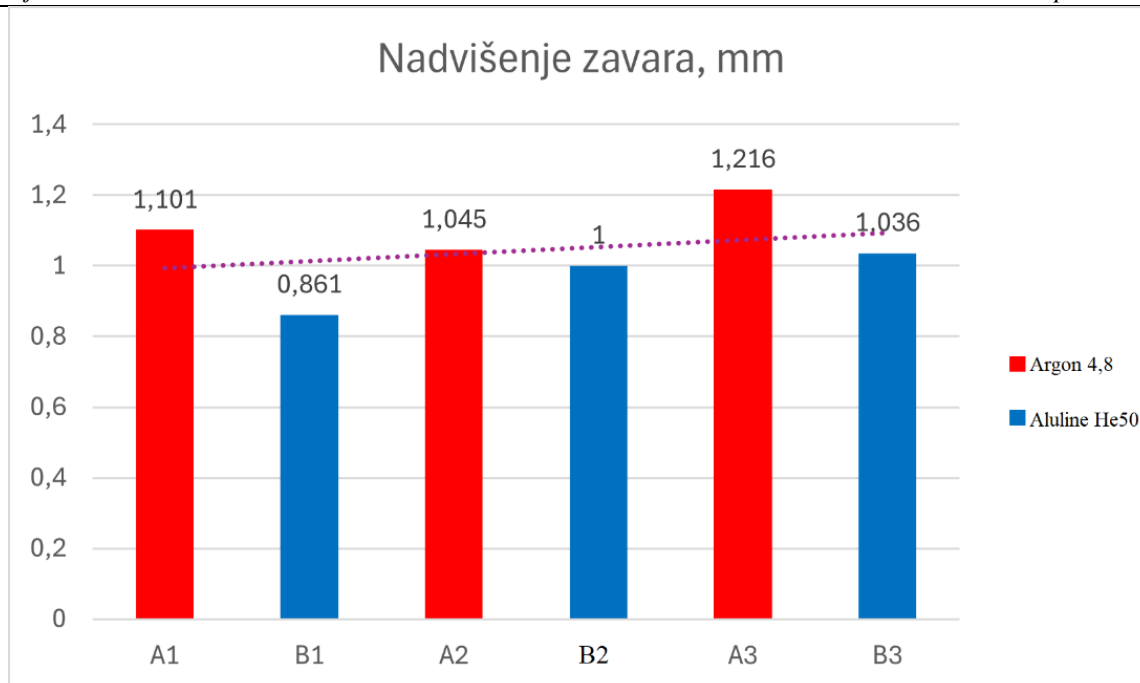
uzoraka zavarenih u zaštiti argona s 50% helija nego kod uzoraka zavarenih u zaštiti 100% argona. Razlog tome je veći napon zavarivanja pri zavarivanju u zaštiti argona s dodatkom helija kao i veća toplinska vodljivost helija nego argona za istu jakost struje.



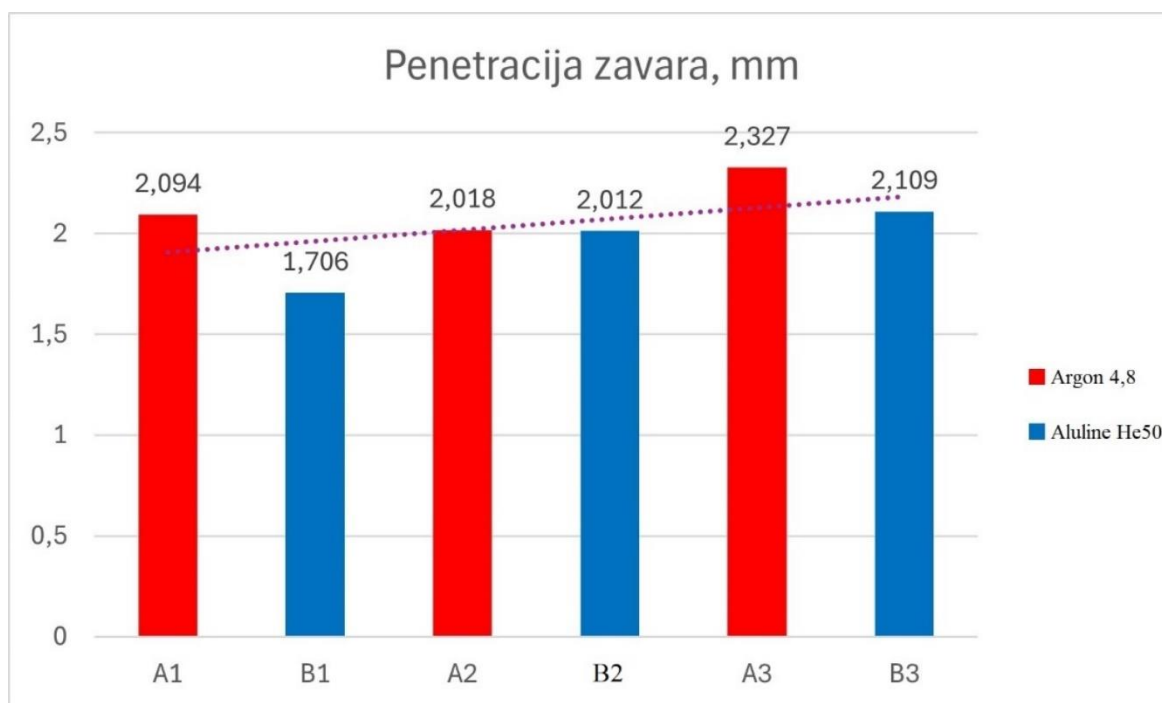
Slika 59. Grafički prikaz promjene visine zavara



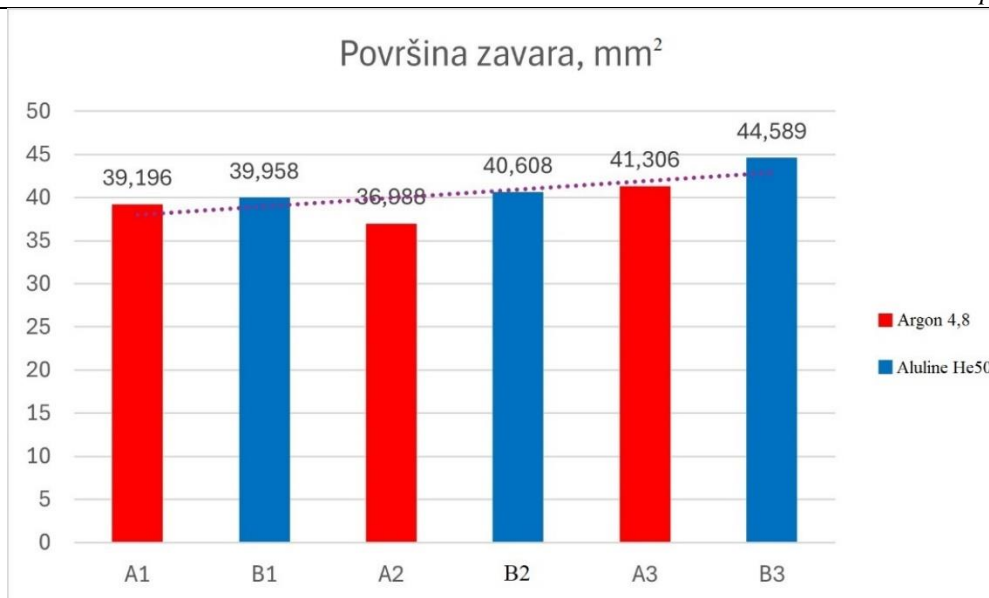
Slika 60. Grafički prikaz promjene širine zavara



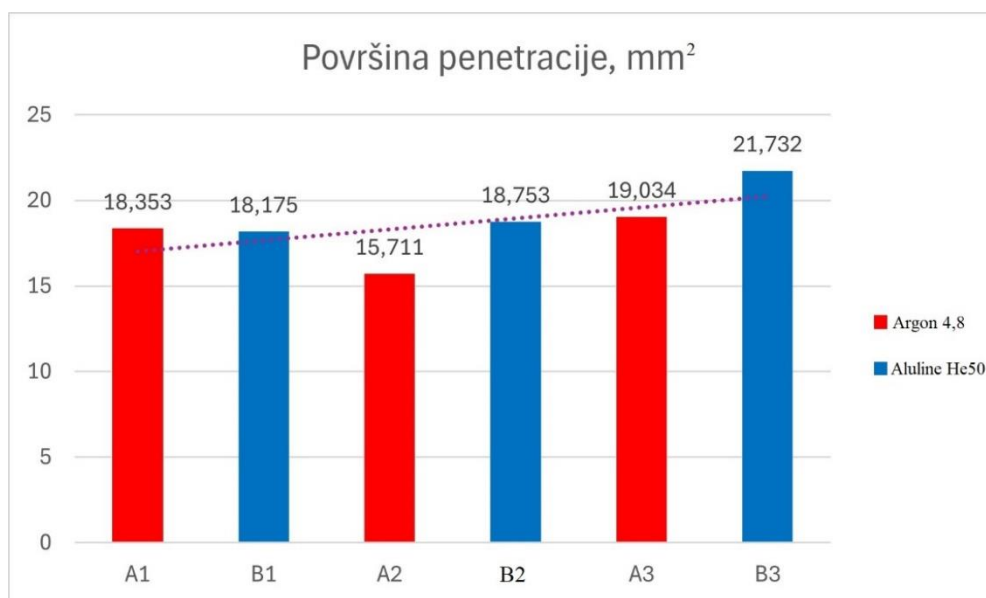
Slika 61. Grafički prikaz promjene nadvišenja zavora



Slika 62. Grafički prikaz promjene penetracije



Slika 63. Grafički prikaz promjene površine zavora



Slika 64. Grafički prikaz promjene površine penetracije

6.11. Analiza nepravilnosti zavora

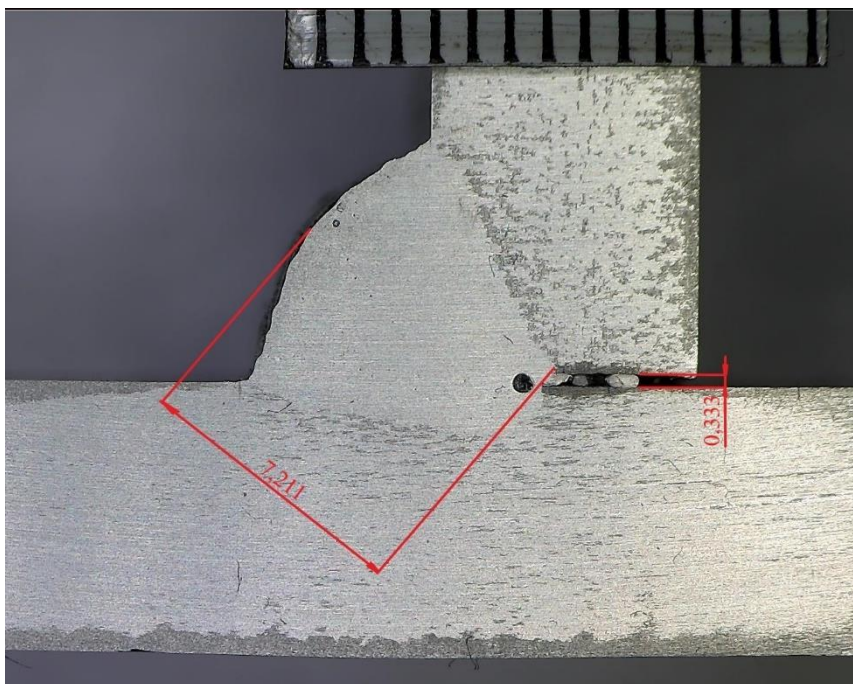
Kod uzoraka A1 i A3 je uočena blaga nepravilnost korijenskog razmaka između dviju zavarenih ploča. Nepravilnost je analizirana prema normi HRN EN ISO 10042:2018.

Budući da je veličina razmaka kod uzorka A1 $h=0,333$ bila unutar granica nepravilnosti prema formuli (2), ovaj zavar (slika 65.) i dalje spada u razinu kvalitete B što je najviša razina kvalitete prema normi HRN EN ISO 10042:2018.

$$h \leq 0,5 \text{ mm} + 0,1a, \text{ max. } 3\text{mm} \quad (2)$$

Isti slučaj vrijedi i kod zavora A3 gdje je izmjereni razmak $h=0,331$ mm unutar dopuštenih

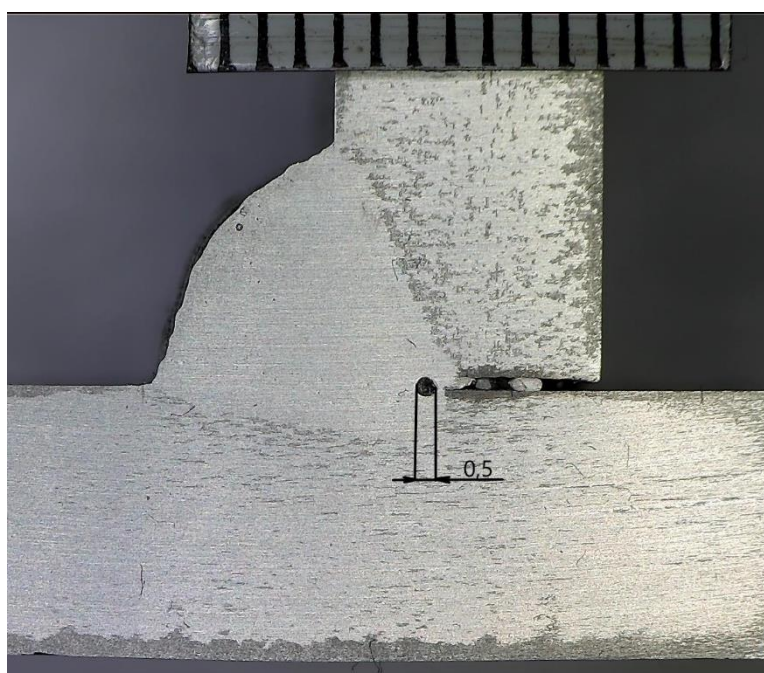
granica prema formuli (2) za razinu kvalitete B. Razlog postojanja ovih nepravilnosti je neadekvatna priprema spoja prije početka procesa zavarivanja.



Slika 65. Nepravilnost korijenskog razmaka uzorka A1

Plinska pora uzorka A1 prikazana na slici 66. je ujedno i najveća uočena pora od svih uzoraka što je prema formuli (3) norme HRN EN ISO 10042:2018 i dalje unutar granica nepravilnosti najviše razine kvalitete B.

$$d \leq 0,2a, \text{max. } 4 \text{ mm} \quad (3)$$



Slika 66. Plinska pora uzorka A1

7. ZAKLJUČAK

MIG zavarivanje i inačice poput AC impulsnog MIG zavarivanja i AC Wave impulsnog MIG zavarivanja imaju jedinstvene karakteristike i primjenu koja ih čini prikladnima za različite slučajeve zavarivanja. Impulsno zavarivanje u usporedbi s klasičnim MIG postupkom omogućava zavarivanje bez prskanja uz nižu srednju jakost struje, sniženi unos topline i veći depozit. Kontrola omjera negativne komponente kod AC zavarivanja također ima značajan utjecaj na proces zavarivanja i kvalitetu zavara te se njegovom kontrolom omogućava zavarivanje tankih materijala i zavarivanje kod promjene razmaka između dvaju radnih komada uz smanjene deformacije. AC Wave impulsni MIG postupak dodatno poboljšava učinkovitost prijenosa energije, ima bolju kontrolu električnog luka i prijenosa metala, te izgledom stvara zavar sličan zavaru kao kod TIG postupka zavarivanja. Dodatne prednosti korištenja AC Wave impulsnog MIG postupka su smanjeno nastajanje pora i plinskih mjehurića unutar metala zavara, odlična mogućnost premošćivanja između dvaju radnih komada, te kontrolirani unos topline.

U eksperimentalnom dijelu rada zavareno je šest kutnih spojeva pomoću kojih je ispitan utjecaj parametara AC Wave impulsnog postupka zavarivanja kao i zaštitnog plina na geometriju zavara. Parametri zavarivanja poput jakosti struje zavarivanja, napona zavarivanja, protoka plina, brzine zavarivanja i EN omjera su pritom bili konstantni dok su jedino mijenjani parametri Wave frekvencije te zaštitni plin. Zaključeno je da se zavarivanjem u zaštiti 100% argona (Argon 4,8) postigne veće nadvišenje metala zavara kao i dubina penetracije u odnosu na uzorke zavarene u zaštiti argona s 50% helija (Aluline He50), dok se je zavarivanjem u zaštiti argona s 50% helija postigla blago veća visina i širina zavara. Usporedbom površine zavara kao i površine penetracije moguće je uočiti povećanje površine zavara i penetracijske površine kod zavara izvedenih u zaštiti argona s 50% helija (Aluline He50) u odnosu na zavare izvedene u zaštiti 100% argona (Argon 4.8). Penetracijski profil zavara izvedenog u zaštiti argona je uži, dok je penetracijski profil zavara izvedenog u zaštiti argona s helijem širi i zaobljeniji što se može pripisati većoj energiji ionizacije helija, većoj toplinskoj vodljivosti i naponu zavarivanja u zaštiti helija. Zavarivanjem pri konstantnim parametrima i istom primijenjenom zaštitnom plinu porastom Wave frekvencije rastu i parametri geometrije zavara koji uključuju visinu, širinu, nadvišenje, penetraciju, površinu zavara i površinu penetracije metala zavara. Najveća produktivnost procesa uz zadovoljavajuću geometriju zavarenog spoja postignuta je zavarivanjem uz najveću Wave frekvenciju i u zaštiti argona s 50% helija (Aluline He50).

LITERATURA

- [1] Tae-Jin Kim, Jong-Pil Lee, Han-Woong Park, Cheul-U Kim: Development of a power supply for the pulse MIG arc welding with a wire melting rate change, Korea, 2006
- [2] Rakesh Kumar, Ulrich Diltthey, D. K. Dwivedi, P. K. Ghosh: Thin sheet welding of Al 6082 alloy by AC pulse-GMA and AC wave pulse-GMA welding, *Materials and Design* 30 (2009) 306-313
- [3] H. Tong, T. Ueyama, S. Harada, M. Ushio: Quality and productivity improvement in aluminium alloy thin sheet welding using alternating current pulsed metal inert gas welding system, *Science and Technology of Welding and Joining* 2001 Vol.6 No.4
- [4] Pulsed MIG Welding - Techniques & Tips (weldingpros.net), posjećeno 11.12.2023.
- [5] Introduction to Pulsed Welding: What It Is and When to Use the Process - Tulsa Welding School (tws.edu), posjećeno 11.12.2023.
- [6] P. Kah, A. Jibril, J. Martikainen, R. Suoranta: Process possibility of welding thin aluminium alloys, *International Journal of Mechanical and Materials Engineering (IJMME)*, Vol. 7 (2012), No. 3, 232-242.
- [7] Klas Weman, Gunnar Lindden: MIG welding guide, Woodhead publishing limited, Cambridge, England, 2006
- [8] Lincoln Electric: Gas Metal Arc Welding for Aluminum Guide, Publication C8.100, Issue Date 01/16
- [9] Nabeel Arif Hyun Chung: Alternating current-gas metal arc welding for application to thin sheets, *Journal of Materials Processing Technology*, Volume 214, Issue 9, 2014, Pages 1828-1837
- [10] Hyoung Jin Park, Dong Cheol Kim, Mun Jin Kang, Sehun Rhee: The arc phenomenon by the characteristic of EN ration in AC pulse GMAW, *Int J Adv Manuf Technol* (2013) 66:867-875
- [11] Tomoyuki Ueyama, Tetsuo Era, Toshiro Uezono, Honjun Tong: Application of digital inverter-controlled AC pulsed MIG welding system to light metal joining, *Welding International*, Vol. 25, No. 9, 2011, 676-682

[12] https://www.youtube.com/watch?v=zEnZIC8eldc&t=5s&ab_channel=OTCDAIHEN%2CInc., posjećeno 16.11.2023.

[13] OTC DAIHEN Corporation; WELBEE P400 II Owners`s manual, Manual No. : P30344-1, 2021

[14] OTC DAIHEN Corporation: Advanced welding & Robotic systems, GMAW & Pulse GMAW Machines for Manual and Automated Welding Applications

[15] Jiaxiang Xue, Min Xu, Wenjin Huang, Zhanhui Zhang, Wei Wu, Li Jin: Stability and Heat Input Controllability of Two Different Modulations for Double-Pulse MIG Welding, Applied Sciences, 2019, 9, 127

[16] Eakkachai Warinsiriuk, Jukkapun Greebmalai, Montri Sangsuriyan: Effect of Double Pulse MIG Welding on Porosity Formation on Aluminium 5083 Fillet Joint, MATEC Web of Conferences 269, 01002 (2019), IIW 2018

[17] Indra Jeet Singh, Qasim Murtaza, Paras Kumar: A comprehensive review on effect of cold metal transfer welding parameters on dissimilar and similar metal welding, Journal of Engineering Research, 2023

[18] K. Weman: Welding Processes Handbook, Elsevier Science, 2011

[19] Janusz Adamiec, Tomasz Pfeifer: Effect of Electrode Negative Ration in AC MIG Welding of Aluminium Alloy 6082 on the Microstructure and Properties of Heat Affected Zone, Silesian University of Technology, Katowice, Institute of Welding, Gliwice, Poland, 2013.

[20] 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, 2017

[21] Janusz Adamiec, Tomasz Pfeifer: Welding of Aluminium Alloy Thin Sheets Using Variable Polarity MIG Method, Solid State Phenomena Vol 211 (2014) pp 15-22

[22] Kamal Pal, Surya K. Pal; Effect of Pulse Parameters on Weld Quality in Pulsed Gas Metal Arc Welding: A Review, Journal of Materials Engineering and Performance, Volume 20(6), 2011

[23] L. L. Wang, H. L. Wei, J. X. Xue, T. DebRoy: A pathway to microstructural refinement through double pulsed gas metal arc welding, Scripta Materialia 134 (2017) 61-65

[24] Anhua Liu, Xinhua Tang, Fenggui Lu: Weld pool profile characteristics of Al alloy in double-pulsed GMAW, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 68 (9-12), 2013

[25] Jyoti Prakash, S. P. Tewari, Bipin Kumar Srivastava: Shielding Gas for Welding of Aluminium Alloys by TIG/MIG Welding-A Review, *International Journal of Modern Engineering Research (IJMER)*, Vol.1, Issue.2, pp-690-699

[26] The Linde group: Gases for welding non/ferrous materials, Product brochure

[27] <https://www.smithmetal.com/pdf/aluminium/5xxx/5083.pdf>, posjećeno 27.02.2024.

[28] <https://ezg.hr/proizvodi/zice/ez-mig-almg5/>, posjećeno 28.02.2024.

[29] OTC Daihen Corporation, AC/DC Pulsed MIG Welding Power Source, Welbee Inverter W400 Owner`s Manual, Manual No.: P30205-1, August, 2016