

Utjecaj parametara na geometriju spoja kod AC MIG zavarivanja aluminija

Toma, Dominik

Undergraduate thesis / Završni rad

2022

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:792290>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-04-03**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Dominik Toma

Zagreb, 2022.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Izv. prof. dr. sc. Ivica Garašić, dipl. ing.

Student:

Dominik Toma

Zagreb, 2022.

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

Zahvaljujem se mentoru Izv. prof. dr. sc. Ivica Garašić i asistentu mag. ing. Mislavu Štefoku na stručnim savjetima i pomoći tijekom izrade ovog rada.

Također se zahvaljujem laborantima Katedre za zavarene konstrukcije koji su pružili stručnu pomoć prilikom izrade ovog rada te omogućili kvalitetno izvođenje eksperimentalnog dijela rada.

Dominik Toma



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



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

Sveučilište u Zagrebu	
Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 - 04 / 22 - 6 / 1	
Ur.broj: 15 - 1703 - 22 -	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Dominik Toma** JMBAG: **0035214140**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Utjecaj parametara na geometriju spoja kod AC MIG zavarivanja aluminija**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Influence of the parameters on weld profile at AC MIG welding of aluminium**

Na temelju literature proučiti utjecaj vrste i polariteta struje pri zavarivanju MIG postupkom na stabilnost luka i mogućnosti primjene. Posebno ustanoviti prikladnost za zavarivanje aluminijskih limova tanjih debljina. Analizirati mogućnosti distribucije topline promjenom balansa i frekvencije izmjenične struje. U eksperimentalnom dijelu osmisliti odgovarajući plan zavarivanja AC MIG postupkom na limovima malih debljina. Promjenom značajki izmjenične struje tj. frekvencije i balansa polariteta ustanoviti utjecaj na penetraciju i deformacija. Zaključno, odrediti optimalno područje parametara pri AC MIG zavarivanju aluminijskih limova male debljine.

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

Zadatak zadan:

30. 11. 2021.

Zadatak zadao:

Izv. prof. dr. sc. Ivica Garašić

Datum predaje rada:

1. rok: 24. 2. 2022.
2. rok (izvanredni): 6. 7. 2022.
3. rok: 22. 9. 2022.

Predvideni datumi obrane:

1. rok: 28. 2. - 4. 3. 2022.
2. rok (izvanredni): 8. 7. 2022.
3. rok: 26. 9. - 30. 9. 2022.

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Branko Bauer

SADRŽAJ

POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA.....	V
POPIS OZNAKA	VI
POPIS KRATICA	VII
SAŽETAK.....	VIII
1. UVOD.....	1
2. MIG.....	3
2.1. Utjecaj vrste struje kod MIG postupka	5
2.1.1. Istosmjerna struja	5
2.1.2. Izmjenična struja	5
2.2. Utjecaj polariteta kod MIG postupka.....	7
3. AC MIG	9
3.1. Izvor napajanja AC impuls MIG.....	9
3.1.1. Glavni strujni krug napajanja.....	9
3.1.2. Mikroprocesorska kontrolna jedinica	9
3.1.3. Sučelje.....	10
3.2. EN omjer – balans negativnog i pozitivnog polariteta.....	11
3.2.1. Utjecaj balansa na brzinu taljenja žice	12
3.3. Utjecaj frekvencije	17
4. ALUMINIJ I ALUMINIJSKE LEGURE.....	19
4.1. Označavanje aluminija	19
4.2. MIG zavarivanje aluminija	20
4.3. Dodatni materijal i zaštitni plin kod MIG zavarivanja aluminija	20
4.4. AC MIG zavarivanje aluminija.....	21
4.4.1. Premošćivanje zazora.....	21
4.4.2. Smanjenje zaostalih deformacija	23
4.4.3. Usporedba brzine zavarivanja AC i DC impulsnim zavarivanjem aluminija tanjih debljina.....	23
4.4.4. Smanjenje nečistoća kod zavarivanja aluminijskih legura	24
5. EKSPERIMENTALNI RAD.....	26
5.1. Osnovni i dodatni materijal.....	26
5.2. Oprema za navarivanje.....	27
5.2.1. Uređaj za AC/DC MIG zavarivanje.....	27
5.2.2. Uređaj za automatizirano gibanje pištolja.....	29
5.3. Navarivanje uzoraka	29
5.3.1. Vizualna analiza navara	31
5.4. Unos topline	33
5.5. Analiza deformacija	34
5.6. Izrada makroizbrusaka	37
5.7. Analiza makrostrukture.....	39

6. ZAKLJUČAK.....	44
7. LITERATURA	45

POPIS SLIKA

Slika 1. Automatizirani postupak DC impulsnog MIG zavarivanja trupa jedrilice od aluminija i problemi kod zavora [5]	2
Slika 2. Oprema za MIG zavarivanje [6]	3
Slika 3. Prikaz dijelova sapnice i zavora [6]	4
Slika 4. Promjena polariteta struje u različitim varijantama MIG zavarivanja [8] :	
a) – MIG zavarivanje istosmjernom strujom, b) – MIG impulsno zavarivanje istosmjernom strujom, c) - MIG impulsno zavarivanje izmjeničnom strujom	6
Slika 5. AC MIG zavarivanje u automobilskoj i brodskoj industriji [9]	6
Slika 6. Utjecaj polariteta na dubinu penetracije [1]	7
Slika 7. Shematski dijagram sustava za AC MIG impulsno zavarivanje [2]	11
Slika 8. Valni oblik struje za AC MIG [12]	12
Slika 9. Ovisnost EN omjera i brzine taljenja žice [4]	13
Slika 10. Sadržaj topline kapljica i procjena temperature kapljica u DC i AC impulsu [15] ...	13
Slika 11. Ponašanje luka tijekom negativnog (lijevo) i pozitivnog (desno) perioda [16]	14
Slika 12. Utjecaj EN omjera na geometriju zavora	14
Slika 13. Makroizbrusci zavora pri različitim strujama i omjeru negativnog polariteta [12] ..	15
Slika 14. Ovisnost dubine penetracije o jakosti struje za različite balanse struje [12]	16
Slika 15. Ovisnost širine o jakosti struje za različite balanse struje [12]	16
Slika 16. Ovisnost nadvišenja o jakosti struje za različite balanse struje [12]	17
Slika 17. Ispitivanje utjecaja različitih frekvencijama na makroizbruscima zavareni AC valnim impulsom [17]	17
Slika 18. Primjeri spojeva za MIG zavarivanje aluminija [3]	20
Slika 19. Usporedba tolerancija zazora u AC i DC impulsnom zavarivanju [4]	22
Slika 20. Prikaz tolerancija zazora s povećanjem EN omjera [13]	22
Slika 21. Smanjenje deformacija AC impulsnim zavarivanjem [2]	23
Slika 22. Usporedba brzine zavarivanja između AC i DC impulsnog zavarivanja [2]	24
Slika 23. Razlika u AC i DC impulsnom zavarivanju u nastanku čađe [4]	25
Slika 24. Utjecaj struje zavarivanja na generiranje plinova [15]	25
Slika 25. Welbee Inverter W400	28
Slika 26. Uređaj za automatizirano gibanje pištolja	29
Slika 27. Multimetar "Fluke 376 FC"	31
Slika 28. Uzorak A1 - istosmjerna struja, $I = 150 \text{ A}$, $U = 22,8 \text{ V}$	32
Slika 29. Uzorak B1 - izmjenična struja, $I = 120 \text{ A}$, $U = 21,8 \text{ V}$, $f = 127,2 \text{ Hz}$	32
Slika 30. Uzorak A2, B2, C3 - izmjenična struja, $I = 150 \text{ A}$, $U = 23,3 \text{ V}$, $f = 144,8 \text{ Hz}$, $EN = 0$ %	32
Slika 31. Uzorak B3 - izmjenična struja, $I = 180 \text{ A}$, $U = 24,8 \text{ V}$, $f = 136,4 \text{ Hz}$	33
Slika 32. Uzorak C1 - izmjenična struja, $I = 150 \text{ A}$, $U = 23,8 \text{ V}$, $EN = - 50 \%$	33
Slika 33. Uzorak C2 - izmjenična struja, $I = 150 \text{ A}$, $U = 22,8 \text{ V}$, $EN = 50 \%$	33
Slika 34. Ovisnost kutne deformacije o vrsti struje - uzorci A1 i A2	35
Slika 35. Histogram ovisnosti kutne deformacije o vrsti struje	35
Slika 36. Ovisnost kutne deformacije o frekvenciji - uzorci B1, B2 i B3	36
Slika 37. Histogram ovisnosti kutne deformacije o frekvenciji	36
Slika 38. Ovisnost kutne deformacije o balansu - uzorci C1, C2 i C3	37
Slika 39. Histogram ovisnosti kutne deformacije o balansu	37
Slika 40. Pila "BS 350 GH"	38
Slika 41. Mjesto rezanja uzoraka	38
Slika 42. Mikroskop Leica MZ6	39

Slika 43.Ovisnost geometrije navara o vrsti struje - uzorci A1 i A2	40
Slika 44.Histogram ovisnosti geometrije navara o vrsti struje.....	40
Slika 45.Ovisnost geometrije navara o frekvenciji - uzorci B1, B2 i B3	41
Slika 46.Histogram ovisnosti geometrije navara o frekvenciji	42
Slika 47.Ovisnost geometrije navara o balansu - uzorci C1, C2 i C3	43
Slika 48.Histogram geometrije navara ovisnosti o balansu	43

POPIS TABLICA

Tablica 1. Usporedba karakteristika pozitivnog i negativnog polariteta kod MIG zavarivanja [10]	8
Tablica 2. Mehanička svojstva osnovnog materijala [19]	26
Tablica 3. Kemijski sastav osnovnog materijala [19]	27
Tablica 4. Tehničke karakteristike uređaja "Welbee Inverter W400"	28
Tablica 5. Parametri navarivanja uzoraka	30
Tablica 6. Prikaz deformacija uzoraka	34
Tablica 7. Iznosi vrijednosti geometrije navara i unesene topline	39

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
I	A	Jakost struje
I_B	A	Jakost bazne struje
I_{EN}	A	Jakost struje negativnog polariteta
I_p	A	Jakost impulsne struje
L	mm	Dužina deformacije
P	mm	Penetracija
R	mm	Nadvišenje
T_B	s	Vrijeme bazne struje
T_{EN}	s	Vrijeme negativnog polariteta
T_p	s	Vrijeme impulsa
U	V	Napon
W	mm	Širina

POPIS KRATICA

KratICA	Značenje
AC	<i>Alternating current</i> - izmjenična struja
Al	Aluminij
Al ₂ O ₃	Aluminijev oksid
Ar	Argon
DC	<i>Direct Current</i> - istosmjerna struja
EN	<i>Electrode negative</i> - negativan polaritet
EP	<i>Electrode positive</i> - pozitivan polaritet
He	Helij
HF Trs.	Visokofrekvencijski transformator
MIG	<i>Metal Inert Gas</i> - Elektrolučno zavarivanje taljivom elektrodom u zaštiti inertnog plina
Mg	Magnezij
TIG	Elektrolučno zavarivanje netaljivom elektrodom u atmosferi inertnog plina

SAŽETAK

U ovom radu obrađen je postupak AC MIG i njegove prednosti u odnosu na konvencionalni MIG. Detaljno je objašnjena problematika izmjenične struje, njene prednosti i upotreba u MIG/MAG zavarivanju. Prikazan je i utjecaj polariteta struje na MIG postupak. Objašnjen je utjecaj balansa i frekvencije izmjenične struje na geometriju zavara. Također su objašnjeni problemi kod zavarivanja aluminijske legure 5083 koje je sve probleme moguće riješiti postupkom AC MIG u zavarivanju aluminijske legure 5083 tanjih debljina.

U eksperimentalnom dijelu rada provedeno je automatizirano AC i DC impulsno MIG navarivanje 6 uzoraka aluminijske legure 5083. Nakon navarivanja provedena je analiza deformacija u ovisnosti o vrsti struje i značajkama izmjenične struje tj. frekvencije i balansa polariteta. Izrađeni su makroizbrusci na kojima je ispitivana ovisnost geometrije zavara o značajkama izmjenične struje. Na temelju rezultata provedena je analiza te je pokazana ovisnost geometrije i deformacija zavara o značajkama izmjenične struje, te je uspoređen AC i DC MIG postupak te je pokazano da AC daje bolje rezultate, bolju kontrolu procesa i manje deformacije kod zavarivanja aluminijske legure 5083.

Ključne riječi: AC MIG, aluminij, frekvencija, balans

SUMMARY

The subject of this paper is the AC MIG process and its advantages over conventional MIG. The problem of alternating current, its advantages and use in MIG/MAG welding are explained in detail. The influence of current polarity on the MIG procedure is also presented. It also explains the influence of balance and frequency of alternating current on weld geometry. Problems in aluminium welding are also described and what problems can AC MIG solve in welding thinner aluminium.

In the experimental part of the work, automated AC and DC pulse MIG welding of 6 samples of aluminum alloy 5083 was performed. After welding, deformation analysis was carried out to determine the dependence of deformations on current type and characteristics of alternating current, EN ratio and frequency. Macrographs were made to determine the dependence of the weld geometry on the characteristics of alternating current. Based on the results, the analysis was performed and the dependence of the geometry and deformation of welds on the characteristics of alternating current was shown, and the AC and DC MIG procedure were compared and it was shown that AC gives better results, better process control and less deformation in aluminium welding.

Key words: AC MIG, aluminium, frequency, EN ratio

1. UVOD

AC MIG (Alternating Current MIG) razvijen je u Japanu, ali je u Europi dostupan tek od kraja 1990.-ih godina. Tehnologija AC MIG se počela razvijati zbog sve veće upotrebe aluminijskih legura, većeg standarda izgleda zavara te povećavanja produktivnosti u proizvodnji. Aluminij zbog svojih specifičnih svojstava se teško zavaruje konvencionalnim MIG postupkom, stoga je razvijen AC MIG kako bi se olakšao postupak zavarivanja aluminijskih [1].

Neke od prednosti AC MIG-a od konvencionalnog MIG-a [2] :

- manja potrebna struja za zagrijavanje žice
- tanji materijali se lakše zavaruju
- manji unos topline u materijal
- manje deformacije
- visoka kvaliteta i estetski izgled zavara
- veća brzina zavarivanja
- premošćivanje većih zazora kod tanjih materijala
- bolja kontrola procesa
- za tanje i deblje materijale.

Prednosti AC mig zavarivanja nad konvencionalnim MIG zavarivanjem se postižu s promjenjivim polaritetom. Negativan polaritet nam daje manji unos topline i veći depozit materijala uz manju penetraciju, ali je električni luk nestabilan i ima dosta rasprskavanja. Balansom pozitivnog i negativnog polariteta na elektrodi i radnom komadu postiže se precizna kontrola distribucije topline u električnom luku [3].

AC MIG svoju upotrebu dobiva u industrijama gdje se zahtijevaju materijali s velikom produktivnošću i malim proizvodnim troškovima. Također, veliku primjenu ima na području zavarivanja aluminijskih zbog svojstava koje pruža s malim unosom topline. Neke od primjera su automobilska i brodska industrija gdje se upotrebljava sve više lakših materijala [4].

Jedan sektor u kojem aluminij nalazi sve veću primjenu je brodogradnja zbog aluminijske visoke otpornosti na koroziju i visokog omjera mehaničkih svojstava i gustoće. Slika 1. prikazuje zavarivanje trupa jedrilice (debljina lima 8 mm) i taljenje osnovnog metala kad se koristi DC MIG. Brodogradnja je iz tog razloga usmjerena na razvoj uređaja za automatizaciju zavarivanja, tehnike i postupke zavarivanja poput AC MIG [5].

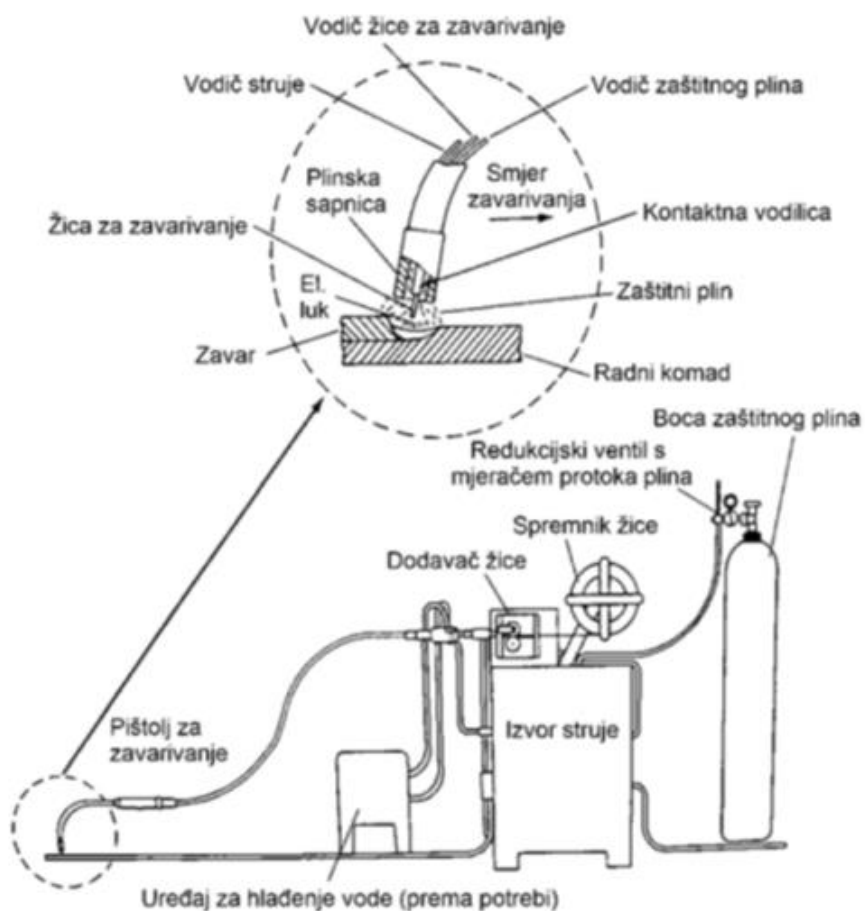


Slika 1. Automatizirani postupak DC impulsnog MIG zavarivanja trupa jedrilice od aluminija i problemi kod zavara [5]

2. MIG

MIG (engl. naziv - Metal Inert Gas) je postupak zavarivanja gdje se električni luk održava između taljive, kontinuirane elektrode u obliku žice, većinom spojen na pozitivni pol istosmjernog izvora struje i osnovnog materijala. Postupak se odvija u zaštitnoj atmosferi inertnih plinova Argona (Ar) ili Helija (He). Osnovna oprema se sastoji od pištolja za zavarivanje, dodavača žice, izvora struje i zaštitnog plina prikazana na slici 2. [1].

Glavne prednosti MIG-a su visoke brzine zavarivanja, odlično čišćenje oksidnog sloja, mogućnost zavarivanja u svim položajima, pogodnost za automatizaciju, velika mogućnost izbora parametara i načina prijenosa materijala. Zbog navedenih prednosti se izrazito mnogo koristi u zavarivanju složenih konstrukcija poput cijevi, tlačnih posuda, automobila, teških strojeva itd. Djelomično je fleksibilno i ima širok raspon primjene [1].

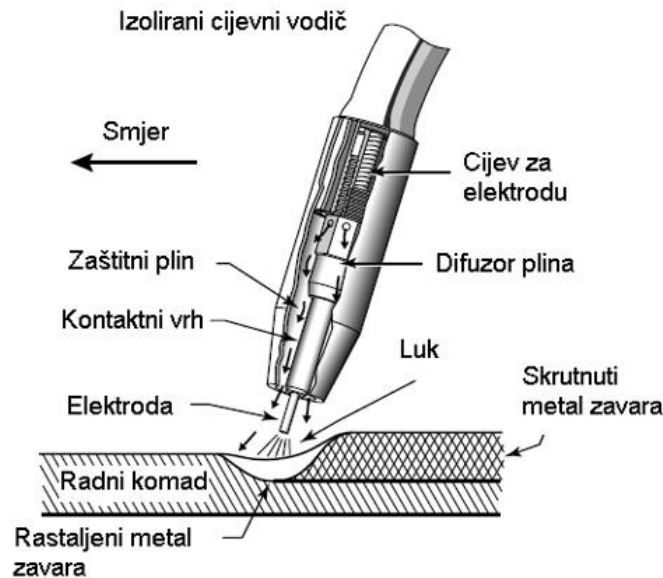


Slika 2. Oprema za MIG zavarivanje [6]

Limit MIG postupka za razliku od TIG postupka je složenija oprema (dovođenje žice, automatska regulacija), dakle skuplja i manje prijenosna oprema, veći broj grešaka uslijed

neodgovarajuće tehnike rada i parametara zavarivanja (naljepljivanje, poroznost). Postupak je ograničen i za vanjsku upotrebu jer zaštitni plin mora biti zaštićen od vjetra [1].

Na slici 3 prikazani su dijelovi sapnice i zavara kod MIG zavarivanja.



Slika 3. Prikaz dijelova sapnice i zavara [6]

Razlikujemo 4 načina prijenosa kod MIG zavarivanja [6]:

- kratkim spojevima – niska unesena energija, koristi se za zavarivanje tanjih limova, zavarivanje u prisilnim položajima i ovisi o puno faktora za stabilan luk
- prijelaznim lukom – struje niže od štrcajućeg prijenosa, a napon veći od prijenosa kratkim spojevima, rastopljena kap raste sve dok se ne odvoji kratkim spojem ili silom gravitacije
- štrcajućim lukom – prijenos taljenog materijala u obliku malih kapljica daje stabilan luk bez rasprskavanja uz veću učinkovitost i koristi se za deblje materijale, ali problemi velikog unosa topline
- impulsno zavarivanje – kontrolirani prijenos štrcajućim lukom “kapljica metala po impulsu“ i koristi se za zavarivanje aluminija i nehrđajućeg čelika, ali može se koristiti i za ugljični čelik.

2.1. Utjecaj vrste struje kod MIG postupka

Izmjenična i istosmjerna struja imaju svoje prednosti i nedostatke u zavarivanju i omogućuju nam raznovrsnu upotrebu MIG postupka. Većinom se koristi istosmjerna struja, ali se izmjenična struja ističe prilikom zavarivanja aluminijskih materijala jer pruža određene prednosti koje su navedene u sljedećim cjelinama.

2.1.1. Istosmjerna struja

Istosmjerna struja (DC) ima elektrone koji ne mijenjaju smjer polariteta i putuju u jednom smjeru. Mogu imati pozitivni ili negativni polaritet. Pozitivan polaritet daje stabilan luk, dok negativni polaritet daje manji unos topline. Još neke od prednosti istosmjerne struje su [7]:

- dobra kontrola zavarivanja
- manje rasprskavanja
- velika čvrstoća zavara
- pozitivan pol (DCEP - direct current electron positive) daje veću dubinu penetracije
- negativan pol (DCEN - direct current electron negative) daje veći depozit materijala.

Neki od nedostataka istosmjerne struje kod zavarivanja su viša cijena i nije prikladan za zavarivanje aluminijskih materijala [7].

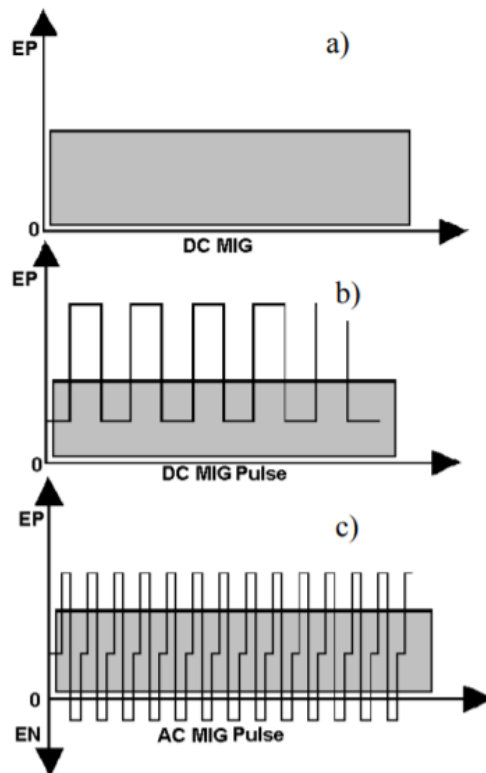
2.1.2. Izmjenična struja

Izmjenična struja ima elektrone koji periodički mijenjaju smjer gibanja. Promjenom smjera elektrona mijenja se polaritet i u jednom trenutku emitiraju naboj jednak nuli. Prednosti zavarivanja s izmjeničnom strujom [7]:

- prikladno za zavarivanje aluminijskih materijala
- za zavarivanje magnetičnih materijala
- dobro za deblje materijale i tanje materijale
- veća prenosivost i manja cijena.

Nedostaci izmjenične struje je rasprskavanje, manja stabilnost luka i manja kontrola zavarivanja. Izmjeničnu struju kod MIG postupka koristimo u određenim slučajevima. Koristimo je za zavarivanje magnetičnih materijala i aluminijskih materijala, za visokotemperaturno zavarivanje, za dublje zavare i deblje materijale [7].

Slika 4. prikazuje promjene polariteta struje u različitim postupcima MIG zavarivanja.



Slika 4. Promjena polariteta struje u različitim varijantama MIG zavarivanja [8] :
 a) – MIG zavarivanje istosmjernom strujom, b) – MIG impulsno zavarivanje istosmjernom strujom, c) - MIG impulsno zavarivanje izmjeničnom strujom

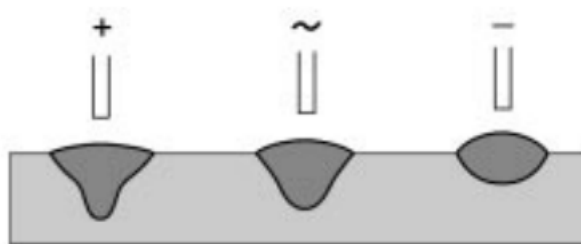
Primjena je sve veća zbog konstantnog napredovanja produktivnosti u industriji i smanjenja utjecaja na okoliš. Još jedan razlog razvoja AC MIG postupka je češće korištenje aluminija u automobilskoj industriji, kao i u drugim područjima prikazani na slici 5. [7].



Slika 5. AC MIG zavarivanje u automobilskoj i brodskoj industriji [9]

2.2. Utjecaj polariteta kod MIG postupka

Električni polaritet elektrode ima veliki utjecaj u procesu zavarivanja. U MIG zavarivanju razvoj topline na anodi i katodi se prenosi u osnovni metal. Mehanizmi razvoja topline na anodi i katodi različiti su za različite procese zavarivanja. Polaritet mijenja formiranje zavora, ponašanje el. luka, prijenos metala i taljenje žice. Zavarivanje pozitivnom elektrodom daje nam stabilan luk i dovoljno zadovoljavajuće rezultate pa je to i polaritet koji se koristi uobičajeno za MIG zavarivanje [1]. Slika 6. prikazuje utjecaj polariteta u zavarivanju MIG postupkom.



Slika 6. Utjecaj polariteta na dubinu penetracije [1]

U pozitivnom polaritetu MIG postupka katoda je na osnovnom metalu. Katoda se lako formira na oksidnom sloju osnovnog metala gdje je temperatura povišena. Zbog površinske napetosti taljeni materijal se lako širi po zavarenom bazenu. Nasuprot tome, kada je anoda na osnovnom metalu oksidni film je stabilan i rastaljeni materijal se ne širi jednoliko [10].

Negativni polaritet u MIG-u se ne koristi jer temperatura taljenja elektrode ne može postići termoelektronsku emisiju. Negativni polaritet stvara nestabilan luk težak za kontrolirati. Kod pozitivnog polariteta najveća količina topline ide u dio gdje se elektroni mogu stabilnije emitirati. To je prvenstveno zbog oksida na radnoj površini koje olakšavaju proces emisije elektrona. Krajnji rezultat daje stabilniji luk i zato se pozitivni polaritet češće koristi u MIG postupku zavarivanja [3].

Budući da je žica negativnog polariteta, luk je znatno viši nego na pozitivnom polaritetu jer se oksidni sloj razbija brže nego se formira. Zbog toga katoda ne može biti zadržana u jednoj točki jer elektroni traže mjesto s minimalnim opterećenjem. U normalnim uvjetima kapljica u negativnom polaritetu je veća od one s pozitivnog polariteta. Ovaj fenomen je uzrokovan različitom silom koja djeluje na vrh žice. Sila koja djeluje na katodu je veća od one na anodi, što onemogućuje padanje kapljica i čini promjer kapljice većim [10]. Usporedba pozitivnog i negativnog polariteta je navedena u tablici 1.

Tablica 1. Usporedba karakteristika pozitivnog i negativnog polariteta kod MIG zavarivanja [10]

	Pozitivan polaritet MIG	Negativan polaritet MIG
Penetracija	Duboka	Plitka
Nadvišenje zavara	Malo	Veliko
Brzina taljenja žice	Mala	Visoka
Atomizacija anode	DA	NE

3. AC MIG

AC MIG razvijen je zbog svoje visoke produktivnosti i primjena za zavarivanje u industrijama poput automobilske gdje je sve veća potreba za tanjim i lakšim materijalima zbog veće efikasnosti vozila. Za razliku od TIG zavarivanja pruža puno veću produktivnost za zavarivanje tanjih materijala. AC MIG se postiže posebnim izvorima struje pravokutnog vala gdje je prelazak nule dovoljno brz da osigura ponovno paljenje luka [11].

Povećanje depozita materijala s manjim unosom topline u osnovni metal, kao i smanjenje rasprskavanja kod zavarivanja su glavne prednosti AC MIG-a. Postupak se sastoji od izmjene između pozitivnog i negativnog polariteta. Pozitivan polaritet (engl. naziv EP) pruža veću stabilnost luka, a negativan polaritet (engl. naziv EN) smanjuje deformacije zbog manjeg unosa topline i omogućuje premošćivanje većih zazora. AC MIG omogućuje bolje kontrolu luka i preciznu kontrolu distribucije topline [12].

3.1. Izvor napajanja AC impuls MIG

Zahtjevi za izvor napajanja su [10]:

- izlazna jakost struje mora biti dovoljna za konstantno održavanje štrcajućeg prijenosa u svim uvjetima
- strujni valni oblik treba biti kvadrata oblika i vrijeme za faznu promjenu struje i napona na nuli mora biti vrlo kratko
- potrebne su razumne izlazne karakteristike i dobra sposobnost upravljanja.

Na slici 7. prikazan je shematski dijagram sustava AC impulsnog MIG zavarivanja.

3.1.1. Glavni strujni krug napajanja

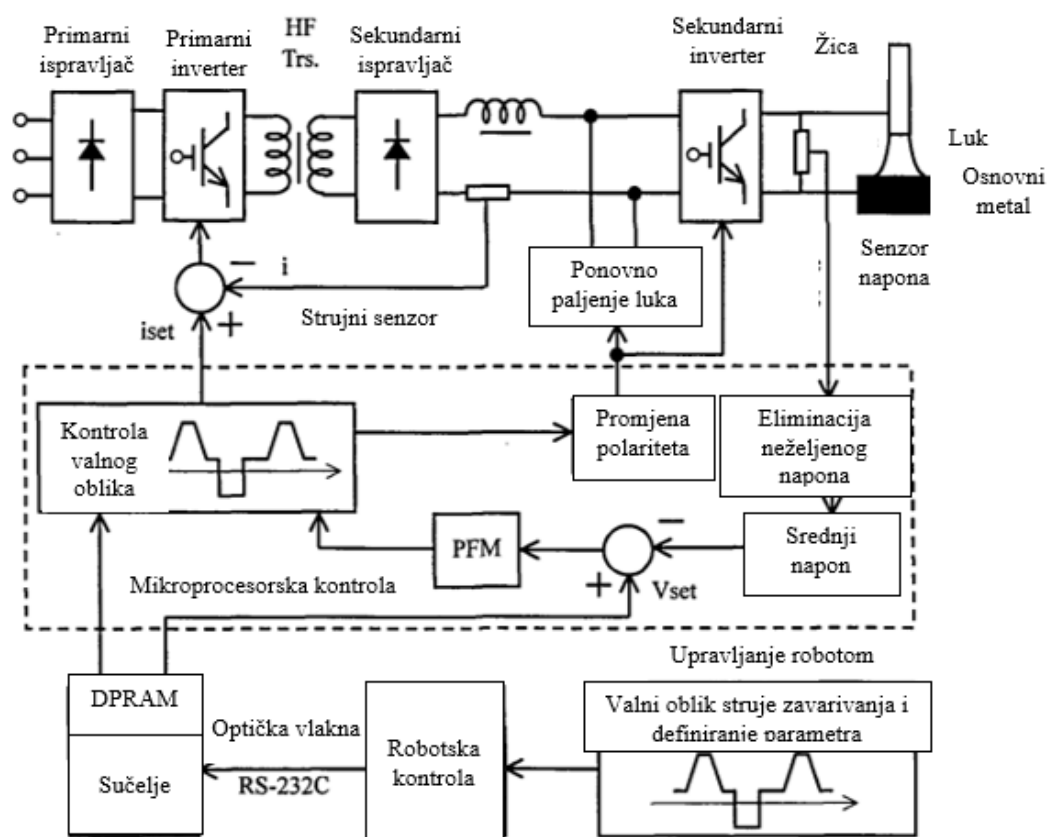
Izvor napajanja za zavarivanje se sastoji od glavnog kruga s dvostrukim inverterom, upravljačkog kruga upravljano preko mikroprocesorske kontrolne jedinice i digitaliziranog sučelja za zavarivanje. Primarni inverter je strujna povratna kontrola s dobrim odazivom za brzu i točnu kontrolu apsolutne vrijednosti izlazne struje. Sekundarni inverter služi za kontrolu polariteta izlazne struje i za izmjenu polariteta prema naredbama primljenih od mikroprocesora. Krug ponovnog paljenja osigurava ponovno paljenje pražnjenjem visokog napona preko 320 V u trenutku promjene polariteta s negativnog na pozitivni. U trenutku prebacivanja polariteta struje iz EN u EP ponovno paljenje je uzrokovano udarnim naponom koji nastaje kroz strujno uključivanje sekundarnog invertera [2].

3.1.2. Mikroprocesorska kontrolna jedinica

Mikroprocesorska kontrolna jedinica obavlja sve funkcije kontrole kao što su modulacija slijeda zavarivanja, valni oblici i duljinu luka za izmjenično impulsno zavarivanje. Kontrolna jedinica za struju daje apsolutnu vrijednost struje naredbom i_{set} na primarni inverter učitavanjem AC parametra iz sučelja RAM memorije i također daje vremenske signale za promjenu polariteta. AC impulsna strujna modulacija frekvencije se automatski izvodi prema pogrešci između vrijednosti naredbe napona i povratnog napona luka u svakom puls, a duljina luka se održava konstantnom s dobrim odzivom putem modulacije impulsne frekvencije (engl. „naziv- PFM“). Greška između napona luka i vrijednosti naredbe napona u svakom puls se koristi samo za frekvencijsku kontrolu u tom periodu i ne utječe na kontrolu frekvencije u slijedećem periodu impulsa. Vanjske karakteristike impulsa se sastoje od srednje struje zavarivanja i srednjeg napona luka u svakom impulsu i također su kontrolirane da imaju padanja vrijednosti kako bi osigurali stabilnost luka. Eliminacija neželjenog napona isto poboljšava stabilnost el. luka [2].

3.1.3. Sučelje

Načini zavarivanja, valni oblici izmjenične struje i uvjeti zavarivanja definirani su i pohranjeni u robotskoj kontroli. Uneseni su iz visećeg upravljača te su transportirani putem optičkih vlakana do sučelja zavarivanja uzastopno kako napreduju operacije zavarivanja. Standardni valni oblik i parametri pohranjeni su u bazi podataka kao referentna vrijednost tijekom zavarivanja. Dvosmjerna komunikacija je omogućena pomoću optičkih vlakana i zbog toga struja, napon i balans tijekom zavarivanja mogu biti prikazani u stvarnom vremenu [2].



Slika 7. Shematski dijagram sustava za AC MIG impulsno zavarivanje [2]

3.2. EN omjer – balans negativnog i pozitivnog polariteta

EN omjer je definiran kao omjer struja pozitivnog i negativnog polariteta u jednom AC ciklusu, a prikazan je u postocima izrazom (1). Balans je važan parametar kod zavarivanja te o njemu ovise stabilnost postupka i količina topline unesene u osnovni materijal u procesu zavarivanja [13].

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

gdje je:

I_p – jakost impulsne struja

I_B - jakost bazne struja

I_{EN} - jakost struje negativnog polariteta

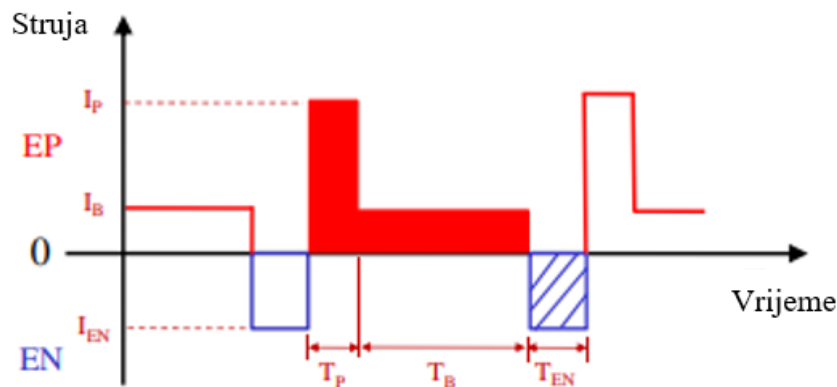
T_p - vrijeme impulsa

T_p - vrijeme bazne struje

T_p - vrijeme negativnog polariteta.

Povećanjem EN omjera povećava se brzina taljenja žice i tolerancija zazora. EN je period u kojem je osnovni metal pozitivan (+), a žica negativna (-), dok je EP period u kojem osnovni metal negativan (-), a žica pozitivna (+) [14].

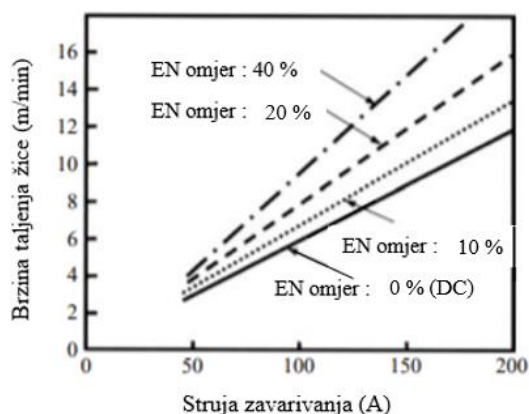
Ako je EN omjer 50 % jednak je omjer pozitivnog i negativnog pola u jednom periodu. Manje od 50 % znači da je pozitivan polaritet prevladava i suprotno. Na slici 8. je prikazan valni oblik struje za AC MIG [13].



Slika 8. Valni oblik struje za AC MIG [12]

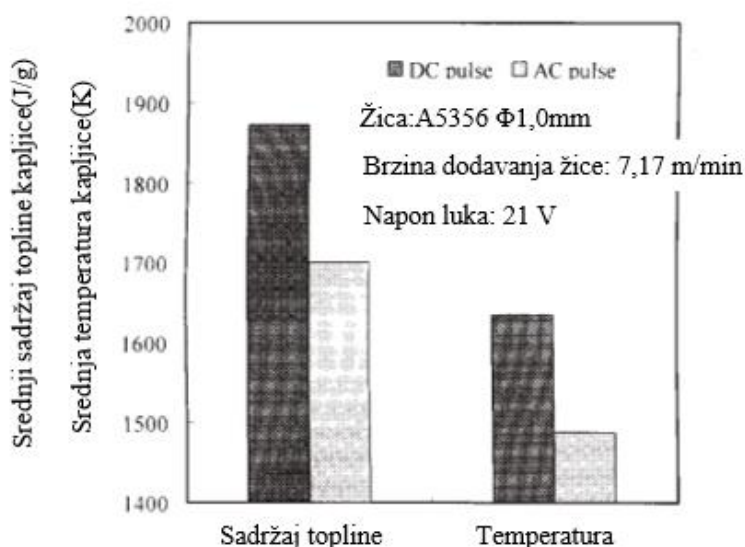
3.2.1. Utjecaj balansa na brzinu taljenja žice

Sa slike 9. se može uočiti povezanost između brzine taljenja žice i balansa u AC MIG zavarivanju. Kad je srednja struja zavarivanja jednaka, povećanjem balansa (EN omjera) povećava se i brzina taljenja žice. Na struji od 150 A brzina taljenja žice s 40 % EN omjera je za 60 % veća nego na balansu od 0 % EN (na istosmjernoj struji) [2].



Slika 9. Ovisnost EN omjera i brzine taljenja žice [4]

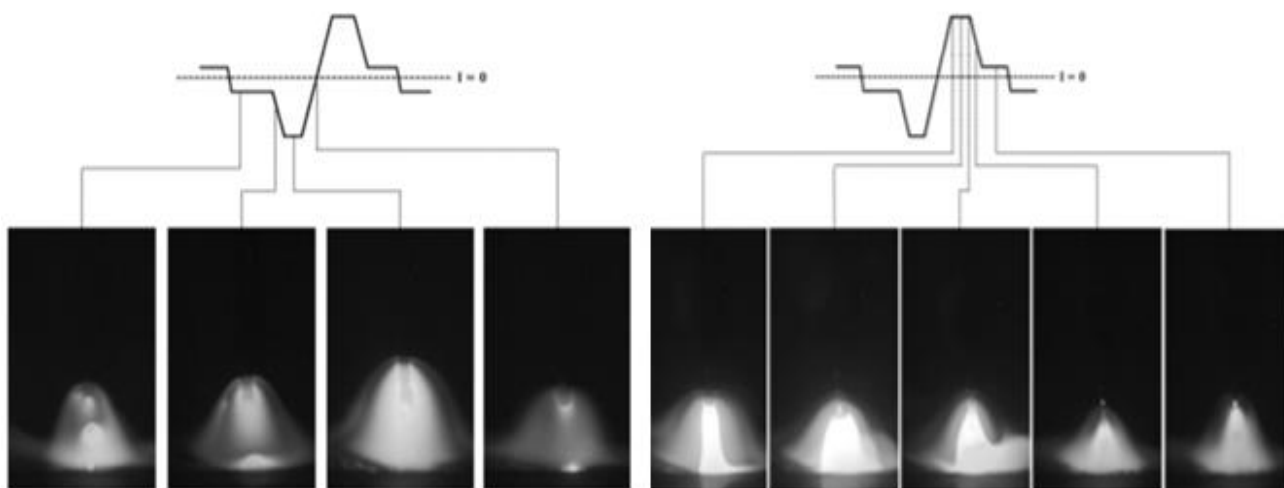
Slika 10. prikazuje sadržaj topline kapljice i prosječnu temperaturu kapljice uspoređene u DC i AC impulsnom MIG-u. Kapljice imaju mnogo veći sadržaj topline kod DC od AC impulsnog MIG zavarivanja [15].



Slika 10. Sadržaj topline kapljica i procjena temperature kapljica u DC i AC impulsu [15]

Sa slike 11. se može uočiti ponašanje luka na negativnom i pozitivnom polaritetu. Na negativnom periodu polariteta katoda se uzdiže do površine još neotopljene kapljice žice, uzrokujući da korijen luka ravnomjerno pokrije površinu. Dakle, lokalizirano pregrijavanje kapljica se smanjuje, a time se cijeli vrh žice zagrijava direktno. Rezultat toga je da se toplina luka koristi učinkovito i dovodi do povećanja koeficijenta taljenja žice. U pozitivnom polaritetu, korijen luka je koncentriran na donjoj površini kapljice zbog toga se kapljica pregrije

s donje strane. Smanjenje omjera iskorištenja topline luka u odnosu na taljenje žice je jedan od razloga smanjenja koeficijenta taljenja žice. U AC MIG zavarivanju većim balansom učinkovitije se toplina luka koristi za taljenje žice i povećava se koeficijent taljenja žice [2].



Slika 11. Ponašanje luka tijekom negativnog (lijevo) i pozitivnog (desno) perioda [16]

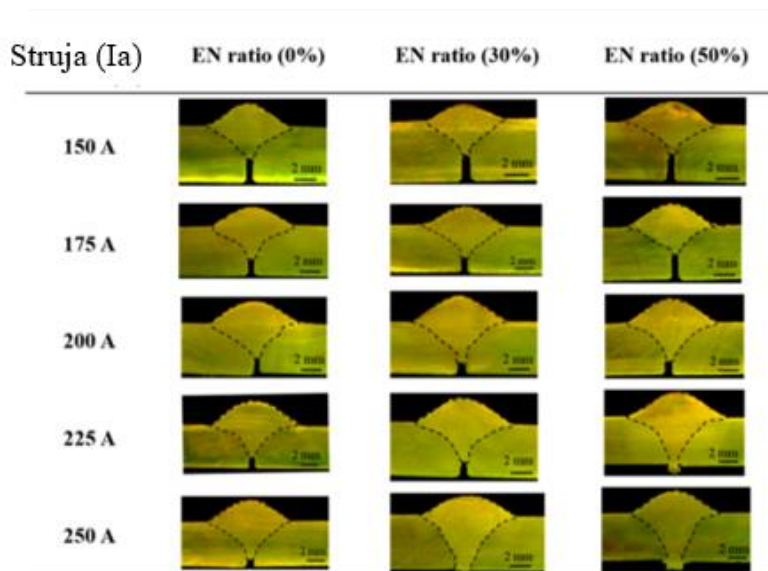
3.2.2. Utjecaj balansa na geometriju zavora

Penetraciju je moguće kontrolirati balansom struje. Povećanjem EN omjera smanjuje se unos topline u osnovni metal. Slika 12. prikazuje promjene dubine penetracije u AC MIG zavarivanju promjenom balansa dok je brzina dodavanja žice konstantna. Povećanjem EN omjera srednja struja i napon se smanjuju te se posljedično i dubina penetracija brzo smanjuje. Razlika u penetraciji se događa zbog smanjenja srednje struje zavarivanja što povećava koeficijent taljenja žice. Ako je struja konstantna, povećanjem EN omjera se dubina penetracije ne mijenja značajno, ali se zato mijenja nadvišenje i širina zavora [2].

EN omjer 0 % Ia=98A Va=17,6V	EN omjer 10 % Ia=88A Va=16,2V	EN omjer 20 % Ia=83A Va=15,6V	EN omjer 40 % Ia=65A Va=15,6V
Brzina taljenja žice: 600 cm/min ; brzina zavarivanja 60 cm/min			

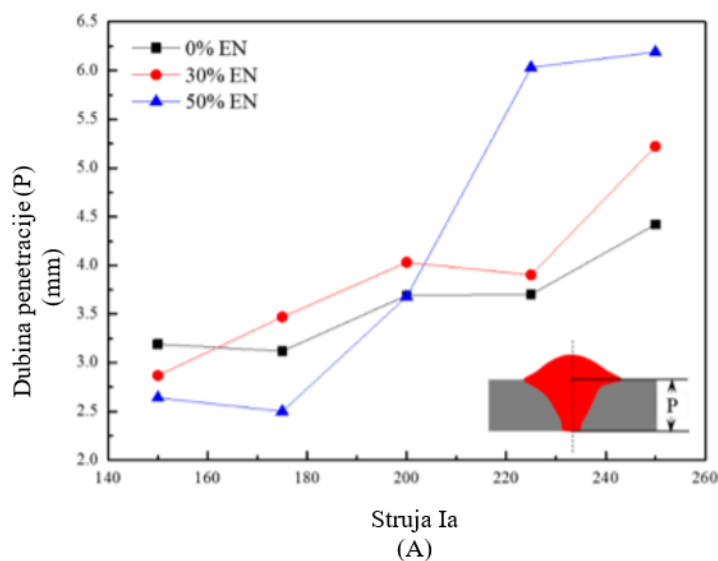
Slika 12. Utjecaj EN omjera na geometriju zavora [8]

Parametri oblika zavara poput dubine penetracije (P), širine zavara (W), visine zavara (R) u ovisnosti o struji i EN omjeru prikazani su na slici 13.



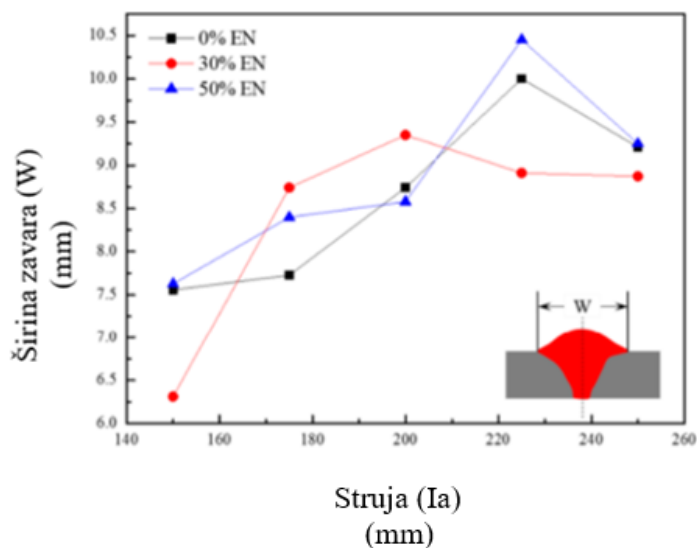
Slika 13. Makroizbrusci zavara pri različitim strujama i omjeru negativnog polariteta [12]

Kod manjih struja dubina penetracije se smanjuje s povećanjem EN ratio. Pri vrijednosti EN od 50 % dubina penetracije je manja u usporedbi s 0 % i 30 % na manjim vrijednostima struje. Pri većim vrijednostima struje povećanjem EN se povećava i dubina penetracije zbog intenzivnih mlazova plazme generiranih duž osi zavara. Na jakostima struje 225 A i 250 A povećanjem EN isto se povećava dubina penetracije, ali je uočljivije na 50 % EN omjera. Maksimalna penetracija je dosegnuta na 50 % EN. Povećanjem jakosti struje i EN omjera rezultira dubljom penetracijom što je vrlo korisno za zavarivanje debljih materijala [12]. Na slici 14. je prikazana ovisnost dubine penetracije o jakosti struji za različite EN omjere.



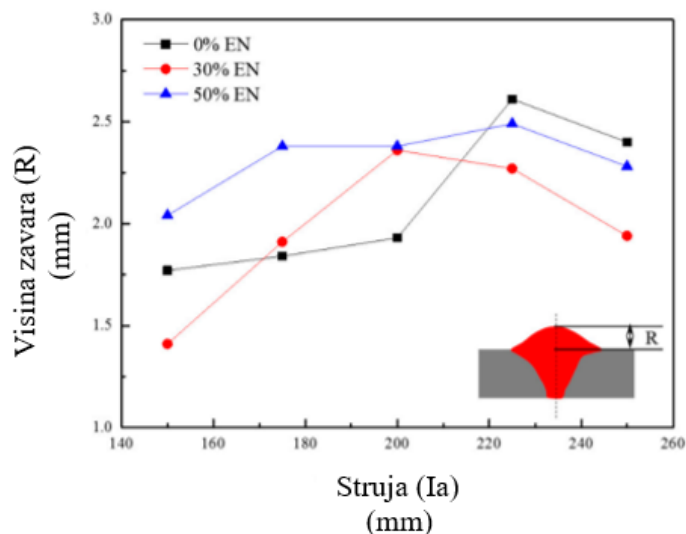
Slika 14. Ovisnost dubine penetracije o jakosti struje za različite balanse struje [12]

Širina zavora na EN omjeru 30 % i 50 % se povećala s povećanjem jakosti struje, ali se pri najvećoj jakosti struje smanjila. Smanjenje širine zavora na najvišoj struji se dogodilo zbog dubokog prodiranja rastaljenog metala u zavareni spoj. Na 0 % EN omjeru širina zavora se povećavala s povećanjem jakosti struje do 200 A, daljnjim povećanjem jakosti struje se širina smanjivala. Maksimalna širina je postignuta na 50 % omjeru EN i struji 225 A [12]. Na slici 15. je prikazana ovisnost širine zavora o jakosti struji i EN omjeru.



Slika 15. Ovisnost širine o jakosti struje za različite balanse struje [12]

Visina zavora se povećava na većim jakostima struje i EN omjerima, ali se smanjuje na najvećoj jakosti struji [12]. Na slici 16. je prikazana ovisnost nadvišenja zavora o struji i EN omjeru.

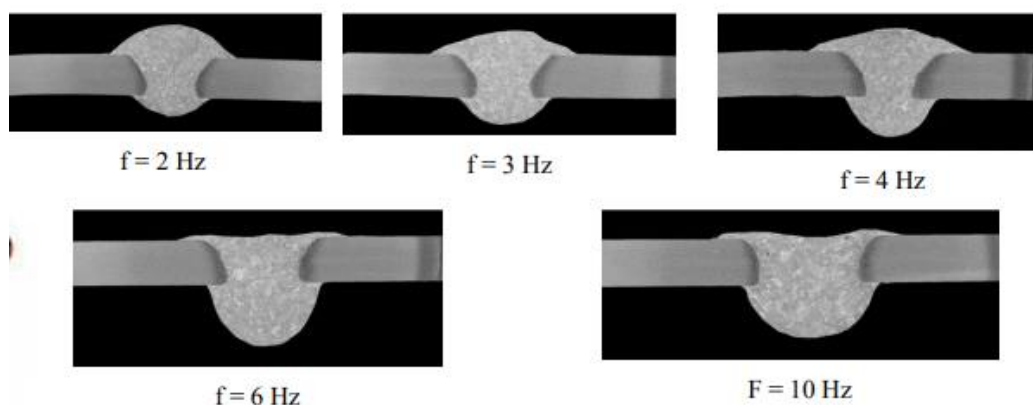


Slika 16. Ovisnost nadvišenja o jakosti struje za različite balanse struje [12]

Povećanjem EN omjera se smanjuje širina zavara, a povećava se nadvišenje zavara. Također, postiže se manja penetracija kod nižih jakosti struja, što je korisno za zavarivanje tanjih materijala zbog manjeg unosa topline.

3.3. Utjecaj frekvencije

Frekvencija impulsa ima utjecaj na dubinu penetracije i unos topline u zavar. Povećanjem frekvencije povećava se penetracija i smanjuje se nadvišenje zavara prikazano na slici 17. Promjenom frekvencije u AC valnom impulsu moguće je postići jako dobar estetski izgled zavara [17].



Slika 17. Ispitivanje utjecaja različitih frekvencija na makroizbruscima zavareni AC valnim impulsom [17]

Kod valnog impulsnog zavarivanja akumuliraju se dva odvojena jedinična impulsa na niskoj frekvenciji i omogućuju dobivanje kontinuiranog zavara izgleda kao redovi ribljih ljuski. Također može olakšati zavarivanje s većim zazorom jer izvodi kristalnu minijaturizaciju vibriranjem rastaljenog bazena, a zavareni dio postaje otporniji na pukotine. Valno impulsno zavarivanje mijenja brzinu dodavanja žice i stanje impulsa [14].

4. ALUMINIJ I ALUMINIJSKE LEGURE

Aluminijske legure su inženjerski materijal koji se obično koristi za konstrukcije koje zahtijevaju kombinaciju niske gustoće i otpornosti na koroziju. Otpornost na koroziju rezultat je brzog stvaranja sloja aluminijevog oksida (Al_2O_3) na površini koji je stabilan na sobnoj temperaturi. Zbog ovog povoljnog svojstva oksida, većina primjena aluminijske legure ne zahtijeva korištenje zaštitnih boja ili premaza [11].

Upotreba aluminijske legure značajno se povećala od ranih 1990 - ih. Većina legura je jednostavna za valjanje, ekstrudiranje i izvlačenje, a mogu se proizvoditi u različitim oblicima. Mogućnost široke primjene aluminijskih legura u automobilskom sektoru izazvala je povećan interes za njihovo zavarivanje, zahvaljujući poticanju prema smanjenju mase vozila s učinkovitijom potrošnjom goriva [11].

Svojstva koja otežavaju zavarivanje aluminijske legure i njihovih legura su [1]:

- lako se formira oksidni sloj koji može uzrokovati defekte zavara, ako se pravilno ne ukloni
- oksidni sloj ima temperaturu taljenja oko $2060\text{ }^\circ\text{C}$, što je mnogo više od temperature taljenja čistog aluminijske legure pri $660\text{ }^\circ\text{C}$. Oksidni sloj ima veću gustoću od aluminijske legure zato može ostati u rastaljenom aluminijske legure i formirati uključke troske u materijalu
- aluminijske legure ima visoku topljivost vodika u rastaljenom stanju, ali ne i u krutom stanju što vrlo lako dovodi do poroznosti aluminijske legure jer vodik nema dovoljno vremena za ispariti tijekom skrućivanja
- izvor toplote za zavarivanje mora biti vrlo snažan i koncentriran ovisno o toplinskoj vodljivosti aluminijske legure, stoga je pogodno MIG zavarivanje
- aluminijske legure ima nisku točku taljenja i teško je vidjeti kada se tali jer nema promjene boje
- aluminijske legure nije magnetičan znači da je smanjen problem puhanja električnog luka.

4.1. Označavanje aluminijske legure

Osam kategorija je definirano za legure aluminijske legure, te ih označujemo različitim numeričkim oznakama. Oznaka se sastoji od AW (A - aluminijske legure i W - poluproizvod) i četveroznamenkastog broja koja označavaju kemijski sastav pojedinih legiranih skupina. Prva znamenka određuje glavni legirani element [1]:

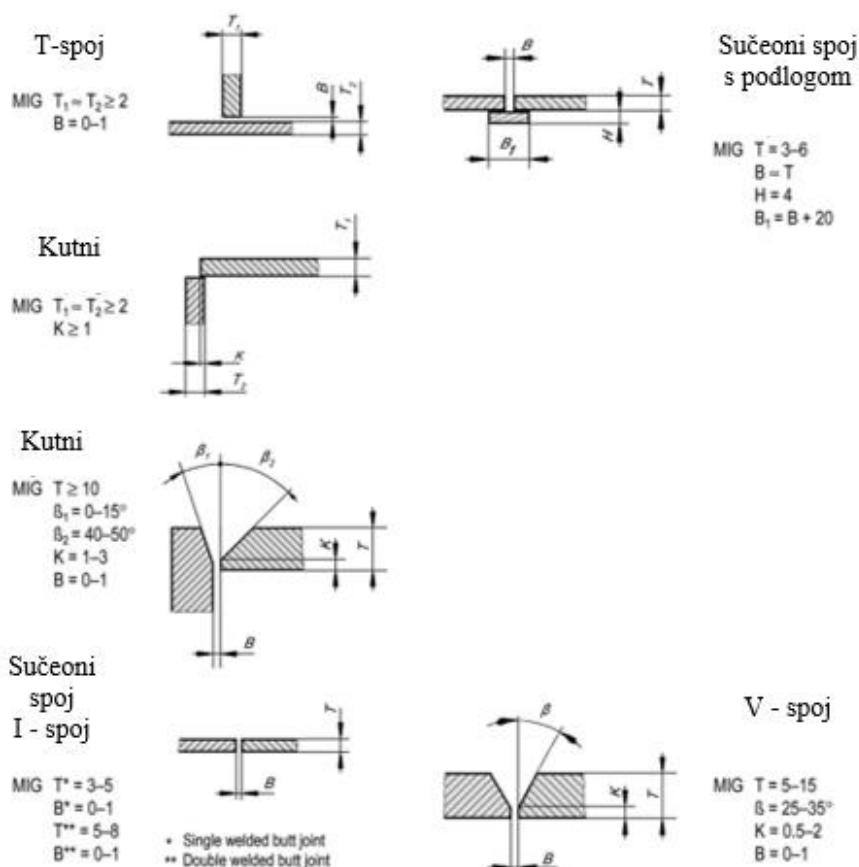
- 1xxx - čisti aluminijske legure
- 2xxx - bakar

- 3xxx - mangan
- 4xxx - silicij
- 5xxx - magnezij
- 6xxx - silicij + magnezij
- 7xxx - cink + magnezij
- 8xxx - ostali.

4.2. MIG zavarivanje aluminija

Legure u skupinama 1, 3, 5, 6 i 7 se smatraju dobro zavarljivim. Odabirom odgovarajućih parametara, metoda priprema spoja i dodatnih materijala dobiva se zavar visoke kvalitete. Glavno pravilo je korištenje iste legure u dodatnom materijalu kao i u osnovnom [1].

Slični spojevi za zavarivanje koji se koriste za čelik se koriste i za aluminij. Neki od spojevi su prikazani na slici 18.



Slika 18. Primjeri spojeva za MIG zavarivanje aluminija [3]

4.3. Dodatni materijal i zaštitni plin kod MIG zavarivanja aluminija

Dodatni materijal treba osigurati dovoljno materijala za zavareni spoj i dodati legirne elemente koji su potrebni za izbjegavanje pukotina. Dodatni materijal mora biti čist i skladišten u čistom i suhom prostoru u neotvorenom pakiranju. Žice se mogu pogoršati s vremenom i uzrokovati nestabilan električni luk, te poroznost ako nisu dovoljno čiste. Žice također moraju biti bez vlage [11].

Zaštitni plinovi za zavarivanje aluminija su Argon, Helij i njihove kombinacije. Češći je Argon koji je jeftiniji od Helija te se koristi za automatsko i ručno zavarivanje. Argon proizvodi tihi i stabilan električni luk koji daje zavar visoke kvalitete, ali ima i najmanji unos topline rezultirajući najmanjim brzinama zavarivanja. Helij povećava napon luka, a time i energiju koja se prenosi u osnovni materijal. Kod Helija električni luk je širi i koristi se za veće debljine aluminija uz manje poroznosti [11].

4.4. AC MIG zavarivanje aluminija

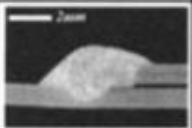
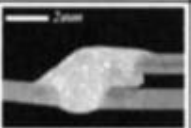
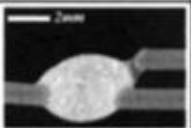
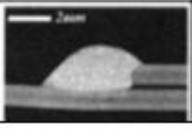
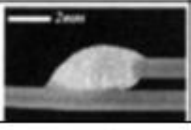
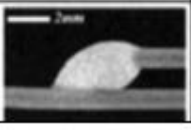
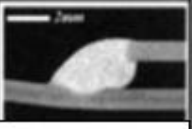
Potrebni uvjeti za zavarivanje aluminijskih limova tanjih debljina [18]:

- štrcajući prijenos za prevenciju rasprskavanja
- smanjenje unosa topline da ne dođe do penetriranja aluminija
- uklanjanje oksidnog sloja sa površine aluminija tijekom zavarivanja

Zbog navedenih uvjeta razvijen je impulsni AC MIG postupak zavarivanja za kontrolu balansa s stabilnim lukom i reduciranjem rasprskavanja za omogućavanje zavarivanja veće tolerancije zazora i kontrole unosa topline kod zavarivanja aluminijskih limova tanjih debljina.

4.4.1. Premošćivanje zazora


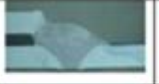






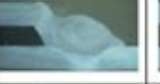





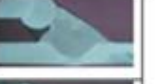



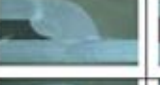





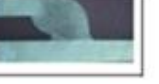
Problem koji se javlja kod zavarivanja aluminija u nekim slučajevima je ispunjavanje zazora s dovoljnom količinom dodatnog materijala. Kod takvih spojeva je teško ispuniti zazor dodatnim materijalom jer je potrebna niža struja da se izbjegne taljenje osnovnog materijala, ali niža struja ne proizvodi dovoljnu količinu dodatnog materijala da se ispuni zazor. Razlog se javlja pri konvencionalnom DC MIG zavarivanju zbog povezanosti između brzine taljenja dodatnog materijala i struje. AC MIG je jedan od procesa koji rješava navedeni problem. Povećanjem EN omjera povećava se i brzina taljenja žice dok nam struja ostaje ista te se ispunjava zazor a ne dolazi do taljenja osnovnog materijala. Zbog malog unosa toplina kod AC MIG zavarivanja greške poput nepravilnog luka i taljenja osnovnog materijala se ne pojavljuju [4]. Razliku u AC MIG i DC MIG impulsnom zavarivanju preklopnoga spoja su prikazana na slici 19.

Zazor	0 mm	0,5 mm	1,0 mm	1,5 mm
DC impulsno zavarivanje				Nije moguće
AC impulsno zavarivanje EN=20%				

Žica: A5356, 1,2 mm; osnovni metal: A5052, 1,0 mm
Brzina taljenja žice: 380 cm/min; brzina zavarivanja: 100 cm/min

Slika 19. Usporedba tolerancija zazora u AC i DC impulsnom zavarivanju [4]

Sa jednakim brzinama dodavanja žice, u AC impulsnom zavarivanju manja je srednja struja od DC impulsnog zavarivanja, što rezultira manjim unosom topline. Zbog manjeg unosa topline gornja površina osnovnog materijala manje se zagrijava i zavar ostaje visoko što olakšava da dodatni materijal lakše ispuni zazor. Taljeni materijal učinkovito se koristi za popunjavanje zazora i omogućava veće tolerancije razmaka kod preklopnih spojeva. Povećanjem EN omjera se smanjuje unos topline, povećava koeficijent taljenja žice i povećava tolerancija razmaka preklopnog zavara. Zbog navedenih razloga aluminijski limovi imaju veliku primjenjivost u AC impulsnom zavarivanju [2]. Na slici 20. prikazuju se aluminijski preklopni zavari s povećavanjem zazora i povećanjem EN omjera.

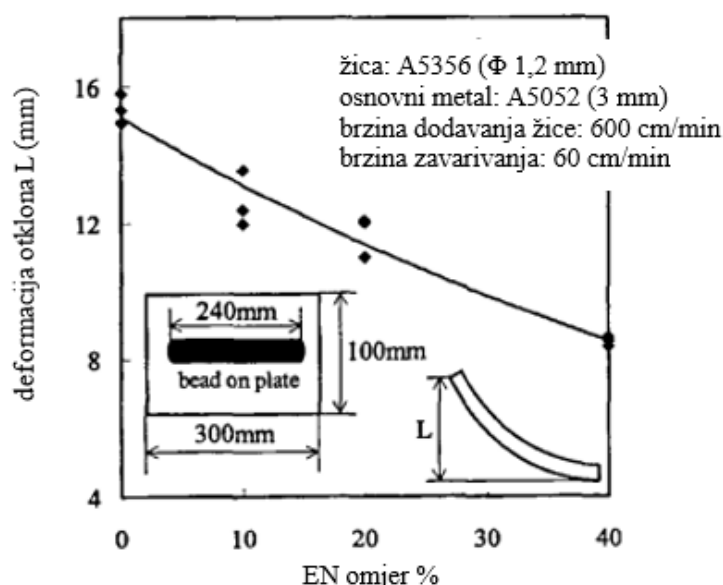
Zazor	0 mm	0.5 mm	1.0 mm	1.5 mm	2.0 mm
EN omjer					
0 %					
5 %					
10 %					
15 %					
20 %					

Slika 20. Prikaz tolerancija zazora s povećanjem EN omjera [13]

4.4.2. Smanjenje zaostalih deformacija

Metode koje se koriste za kontrolu zaostalih deformacija su stezanje materijala, racionalizacija postupaka zavarivanja i upravljanje unosom topline, ali sve one imaju svoja ograničenja. AC impulsno MIG zavarivanje je prikladno za kontrolu zaostalih deformacija jer smanjuje unos topline dok produktivnost ostaje visoka [2].

Slika 21. prikazuje povezanost EN omjera i longitudinalnu deformaciju savijanja u AC impulsnom MIG zavarivanju. Povećanjem EN omjera deformacija se smanjuje te ju je moguće čak upola smanjiti od DC impulsnog MIG zavarivanja [2]. Slika 16. prikazuje da pri većem EN omjeru su temperature puno manje nego kod DC impulsnog MIG zavarivanja. Zbog toga se zaostale deformacije mogu učinkovitije kontrolirati AC impulsnim MIG zavarivanjem.



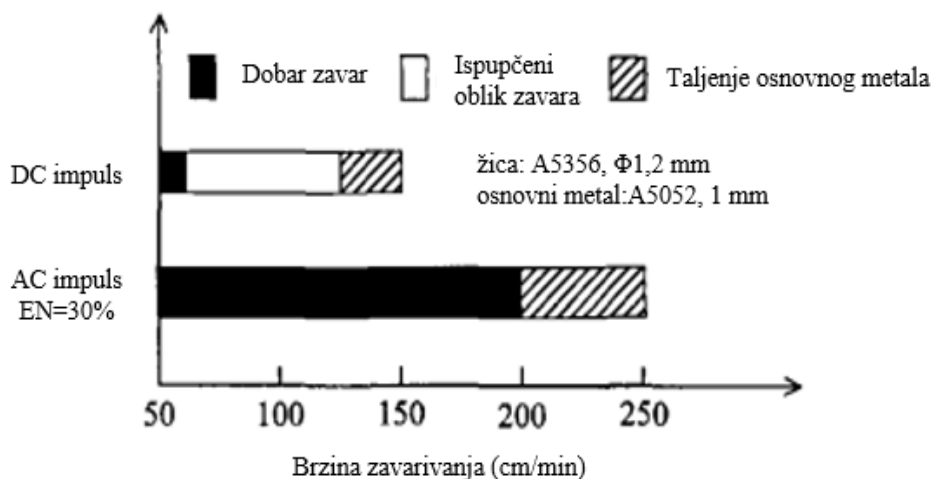
Slika 21. Smanjenje deformacija AC impulsnim zavarivanjem [2]

4.4.3. Usporedba brzine zavarivanja AC i DC impulsnim zavarivanjem aluminija tanjih debljina

U DC impulsnom MIG zavarivanju povećanjem jakosti struje zavarivanja se povećava i brzina zavarivanja, ali s zavarivanjem materijala tanjih debljina postoji opasnost od taljenja osnovnog metala s povećanjem struje. AC impulsno MIG zavarivanje tanjih debljina je prikladno jer ima manji unos topline i time omogućava veliku brzinu zavarivanja bez pojave taljenja osnovnog metala. Povećanjem brzine zavarivanja penetracija u DC impulsnom MIG zavarivanju značajno se povećava, dok se u AC impulsnom MIG zavarivanju penetracija povećava znatno manje, s

jednakim omjerom brzine taljenja žice i brzine zavarivanja. Tim se rješava problem taljenja osnovnog metala prilikom velikih brzina zavarivanja limova [2].

Slika 22. prikazuje da brzina zavarivanja AC impulsnog zavarivanja može biti tri puta veća od DC impulsnog zavarivanja, uz jednaki omjer brzine taljenja žice i brzine zavarivanja.

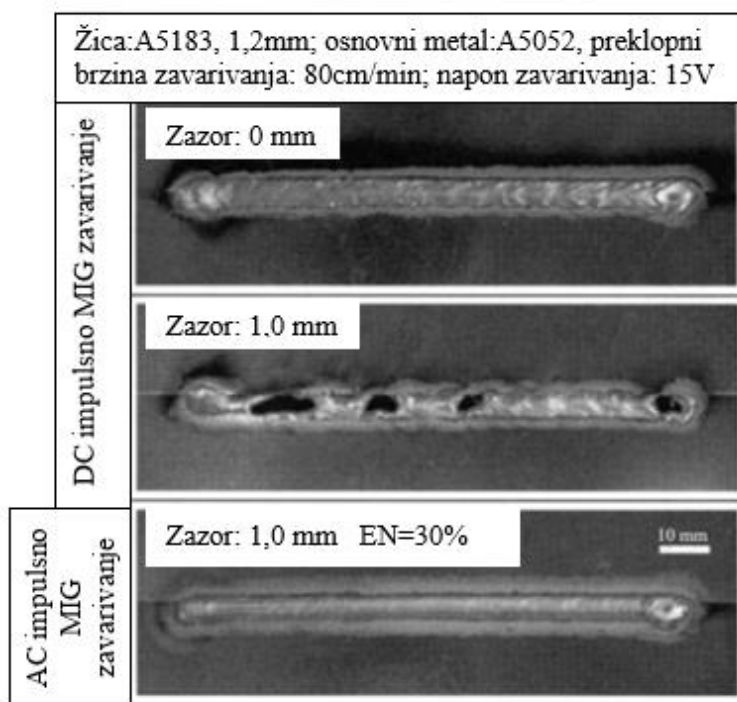


Slika 22. Usporedba brzine zavarivanja između AC i DC impulsnog zavarivanja [2]

4.4.4. Smanjenje nečistoća kod zavarivanja aluminijskih legura

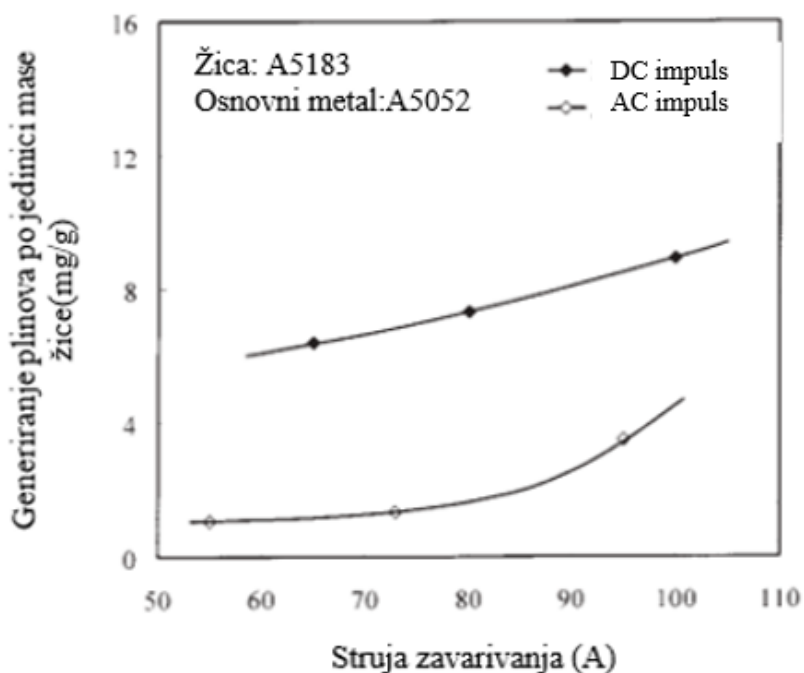
MIG zavarivanjem Al-Mg legura stvara se čađa na površini zavarenoga spoja. Čađa se u nekim slučajevima treba ukloniti jer utječe na kvalitetu sloja premaza. Za racionalizaciju proizvodnje preferira se smanjenje pojave čađe. AC impulsnim zavarivanjem srednja temperatura kapljica dodatnog materijala je manja i lokalno pregrijavanje kapljica je manje od DC impulsnog zavarivanja. Navedeni razlog smanjuje isparavanje Mg i rasprskavanje kapljica je manje. Sukladno tome, stvaranje pare i tekućih metalnih mikro čestica je manje i stoga se može očekivati smanjenje čađe [2].

Slika 23. prikazuje usporedbu nastanka čađe kod AC i DC MIG zavarivanja te je moguće uočiti veće stvaranje čađe kod DC impulsnog MIG zavarivanja.



Slika 23. Razlika u AC i DC impulsnom zavarivanju u nastanku čađe [4]

Slika 24. prikazuje utjecaj jakosti struje zavarivanja na generiranje plinova. Količina generiranja plinova kod AC i DC impulsnog MIG zavarivanja se povećava s povećanjem jakosti struje, ali AC impulsno zavarivanje generira mnogo manje plinova [15].



Slika 24. Utjecaj struje zavarivanja na generiranje plinova [15]

5. EKSPERIMENTALNI RAD

Unutar eksperimentalnog rada provedeno je AC i DC MIG impulsno navarivanje na limovima malih debljina. Eksperiment je proveden automatiziranim MIG postupkom, a varirane su istosmjerna i izmjenična struja te značajke izmjenične struje frekvencija i balans polariteta. Provedeno je navarivanje aluminija na 6 uzoraka, te je na temelju rezultata određeno optimalno područje parametara pri AC MIG zavarivanju aluminijskih limova male debljine.

5.1. Osnovni i dodatni materijal

Za osnovni materijal u eksperimentu korištena je aluminijeva legura oznake EN AW 5083. Ova legura je poznata po odličnim karakteristikama u ekstremnim okruženjima. Karakterizira ju velika otpornost na morska i industrijska okruženja. U tablici 2. prikazana su mehanička svojstva Al legure, dok tablica 3. prikazuje kemijski sastav osnovnog materijala EN AW 5083. Za dodatni materijal korištena je žica AUTROD 5183. Promjer žice korišten za eksperiment iznosio je 1,2 mm te je sličnog kemijskog sastava kao i osnovni materijal.

Tablica 2. Mehanička svojstva osnovnog materijala [19]

Gustoća, g/cm ³	2,66
Modul elastičnosti, kN/mm ²	71
Vlačna čvrstoća, MPa	300
Tvrdoća, HB	75
Toplinska provodnost, W/mK	117
Električna vodljivost, %IACS	28,5
Granica elastičnosti, MPa	190

Tablica 3. Kemijski sastav osnovnog materijala [19]

Al	92,4 - 95,6 %
Cr	0,05 - 0,25 %
Cu	< 0,10 %
Fe	< 0,40 %
Mg	4,0 – 4,9 %
Mn	0,40 – 1,0 %
Si	< 0,40 %
Zn	< 0,25 %

5.2. Oprema za navarivanje

Za postupak navarivanja korišten je uređaj “Welbee Inverter W400“ proizvođača OTC Daihen i uređaj za automatizirano gibanje pištolja.

5.2.1. Uređaj za AC/DC MIG zavarivanje

Navarivanje je provedeno uređajem “Welbee Inverter W400“ prikazan na slici 25. u Laboratoriju za zavarivanje FSB. Uređaj ima mogućnost obavljanja više postupaka zavarivanja, a u ovom eksperimentu se koristi postupak AC i DC MIG impulsno zavarivanje.



Slika 25. Welbee Inverter W400

Tablica 4. prikazuje tehničke karakteristike uređaja korištenog za eksperiment.

Tablica 4. Tehničke karakteristike uređaja "Welbee Inverter W400"

Broj faza	3
Frekvencija, Hz	50/60
Nazivni ulazni napon, V	400 ± 15%
Ulazna snaga, kW	17
Nazivna struja zavarivanja, A	400
Nazivni napon opterećenja, V	34
Raspon struje zavarivanja, A	30 - 400
Raspon napona zavarivanja, V	12 - 35
Masa, kg	86
Dimenzije	395 x 710 x 762
Statička karakteristika	CV

5.2.2. Uređaj za automatizirano gibanje pištolja

Kako bi se smanjila pogreška zavarivača te dobili precizniji rezultati eksperimenata korišteno je automatizirano MIG zavarivanje. Provedeno gibanje zavarivanja je jednoliko pravocrtno te ima i mogućnost podešavanja brzine gibanja pištolja. Uređaj je prikazan na slici 26.



Slika 26. Uređaj za automatizirano gibanje pištolja

5.3. Navarivanje uzoraka

Prije navarivanja provedeno je brušenje i čišćenje svih uzoraka alkoholom. Izvedeno je navarivanje osam uzoraka na pločicama geometrijskih karakteristika 50 x 155 mm (š x d) debljine 6 mm, postupcima AC i DC impulsni MIG. Kao zaštitni plin korišten je argon prema HRN EN ISO 14175 (Argon 4,8 Messer).

Parametri koji su držani konstantnim za sve uzorke su protok zaštitnog plina iznosa 20 l/min, slobodni kraj žice iznosa 15 mm i brzina zavarivanja 40 cm/min.

Tablica 5. prikazuje parametre navarivanja za svaki uzorak. Iz tablice se može uočiti da promjenom struje iz DC u AC, povećanjem jakosti struje i povećanjem EN omjera se povećava brzina taljenja žice. Promjenom jakosti struje i balansom mijenja se napon koji utječe na unesenu toplinu za svaki uzorak.

Tablica 5. Parametri navarivanja uzoraka

UZORAK	Vrsta struje	Jakost struje, A	Napon, V	Frekvencija, Hz	Balans, %	Brzina taljenja žice, m/min
A1	DC	150	22,8	158	/	9,4
A2	AC	150	23,3	144,8	0	11,5
B1	AC	120	21,8	127,2	0	9,2
B2	AC	150	23,3	144,8	0	11,5
B3	AC	180	24,8	136,4	0	13,3
C1	AC	150	23,8	206,5	- 50	9,6
C2	AC	150	22,8	131	50	14,8
C3	AC	150	23,3	144,8	0	11,5

Za prva dva uzorka (A1 i A2) svi parametri su držani jednakima, te se ispitivala promjena vrste struje, DC i AC.

Na uzorcima B1, B2 i B3 varirana je jakost struje koja je povezana s frekvencijom izmjenične struje, te se na taj način ispitivao utjecaj frekvencije na zavareni spoj. Frekvencija je mjerena multimetrom "Fluke 376 FC" prikazan na slici 27.

Na uzorcima C1, C2 i C3 variran je balans izmjenične struje, te se na taj način ispitivao utjecaj balansa na zavareni spoj.



Slika 27. Multimetar “Fluke 376 FC“

5.3.1. Vizualna analiza navara

Nakon navarivanja uzorci su ostavljeni da se ohlade, nakon toga su očišćeni pomoću alkohola i pripremljeni za vizualnu analizu. Slike 28. - 33. prikazuju uzorke navarivanja Parametri uzoraka A2, B2, C3 su jednaki te je uzet B2 uzorak za prikaz rezultata.

Navar uzorka A1 ima bolju estetiku navara od uzorka A2 zbog toga jer je stabilniji luk na istosmjernoj struji nego na izmjeničnoj struji. Vidljiva je jasna razlika u širini navara pojedinog uzorka kao posljedica promjene vrste struje i parametra jakosti struje i balansa. Duž svih zavara vidljiva je crna linija čađe, takva pojava vrlo je česta prilikom zavarivanja legura iz serije 5XXX zbog veće količine Mg. Uzorci navarivani s izmjeničnom strujom imaju na samom navaru manje čađe od uzorka A1.



Slika 28. Uzorak A1 - istosmjerna struja, $I = 150 \text{ A}$, $U = 22,8 \text{ V}$



Slika 29. Uzorak B1 - izmjenična struja, $I = 120 \text{ A}$, $U = 21,8 \text{ V}$, $f = 127,2 \text{ Hz}$, $EN = 0 \%$



Slika 30. Uzorak A2, B2, C3 - izmjenična struja, $I = 150 \text{ A}$, $U = 23,3 \text{ V}$, $f = 144,8 \text{ Hz}$, $EN = 0 \%$



Slika 31. Uzorak B3 - izmjenična struja, $I = 180 \text{ A}$, $U = 24,8 \text{ V}$, $f = 136,4 \text{ Hz}$, $EN = 0 \%$



Slika 32. Uzorak C1 - izmjenična struja, $I = 150 \text{ A}$, $U = 23,8 \text{ V}$, $EN = - 50 \%$



Slika 33. Uzorak C2 - izmjenična struja, $I = 150 \text{ A}$, $U = 22,8 \text{ V}$, $EN = 50 \%$

5.4. Unos topline

Unos topline se računa zbog utjecaja topline na deformacije u aluminiju.

Unos topline u navar izračunava se prema formuli (2) :

$$Q = \frac{k \times U \times I \times 60}{v_z \times 1000} \quad (2)$$

gdje je:

Q - unesena toplina , kJ/cm

U - napon zavarivanja, V

I - jakost struje zavarivanja, A

v_z - brzina zavarivanja, cm/min

k - koeficijent toplinske iskoristivosti postupka zavarivanja (prema normi HRN EN 1011 - 1, za MIG postupak $k = 0,8$)

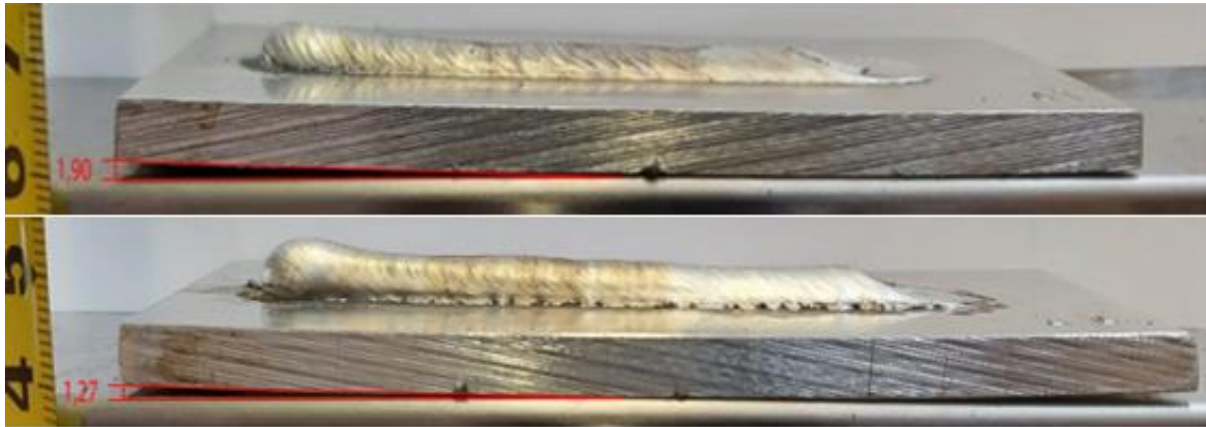
5.5. Analiza deformacija

Za vrijeme navarivanja došlo je do deformacije aluminijske ploče jer ploče nisu bile stegnute. U tablici 6. su prikazane deformacije ovisne o različitim parametrima i vrsti struje. Unesena toplina uzorka A1 je veća od svih ostalih uzoraka te je došlo do najvećih deformacija ploče aluminijske.

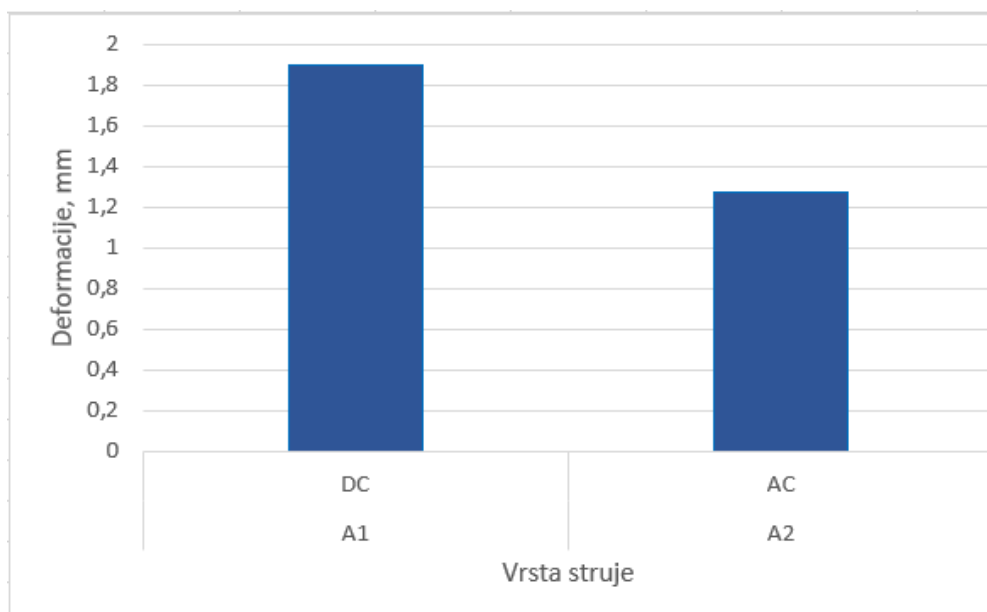
Tablica 6. Prikaz deformacija uzoraka

Uzorak	Vrsta struje	Jakost Struja, A	Frekvencija, Hz	Balans, %	Deformacije, mm	Unesena toplina, kJ/cm
A1	DC	150	158	0	1,90	4,10
A2	AC	150	144,8	0	1,27	4,19
B1	AC	120	127,2	0	1,62	3,14
B2	AC	150	144,8	0	1,27	4,19
B3	AC	180	136,4	0	1,02	5,36
C1	AC	150	206,5	- 50	1,16	4,28
C2	AC	150	131	50	0,91	4,10
C3	AC	150	144,8	0	1,27	4,19

Pri usporedbi istosmjerne i izmjenične struje s slike 34. i histograma s slike 35., može se uočiti kako je veća deformacija prisutna kod istosmjerne.

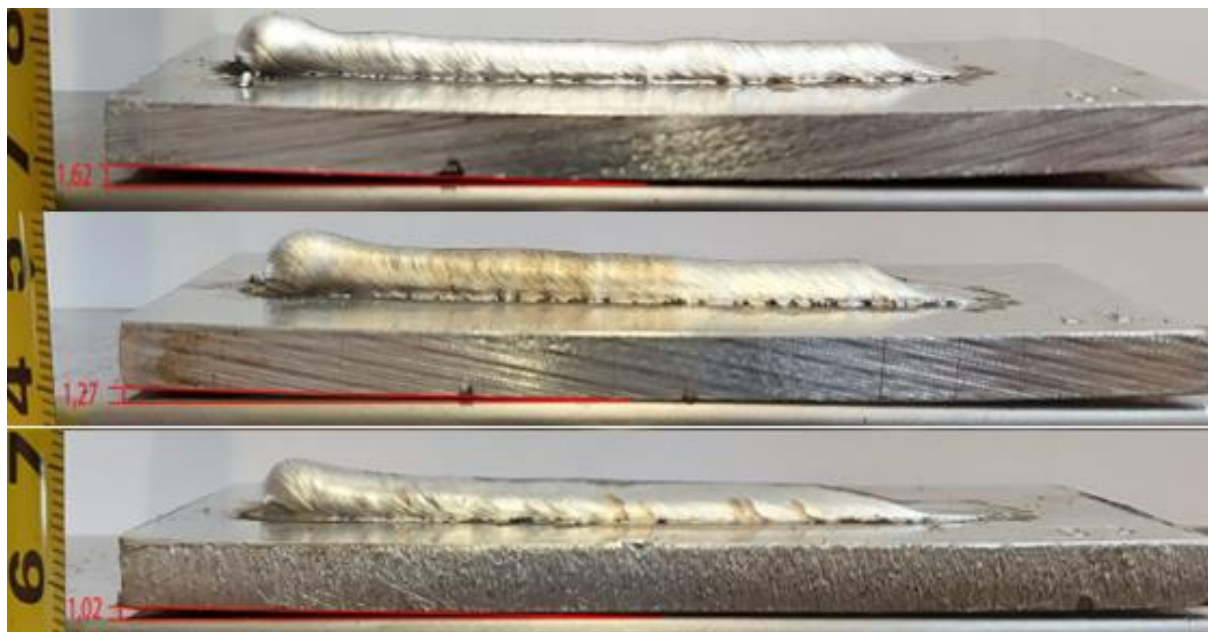


Slika 34. Ovisnost kutne deformacije o vrsti struje - uzorci A1 i A2

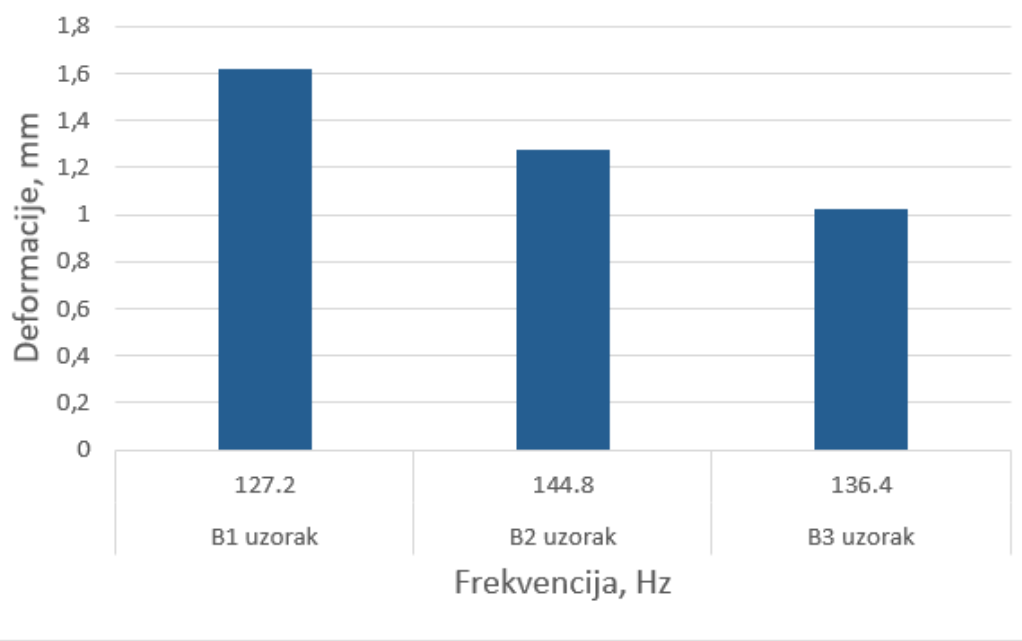


Slika 35. Grafički prikaz ovisnosti kutne deformacije o vrsti struje

Na slici 36. i 37. prikazuje se ovisnost kutne deformacije o frekvenciji. Nije došlo do većih promjena u deformacijama s obzirom na frekvenciju. Najveća deformacija se dogodila na najnižoj frekvenciji na uzorku B1 koja je imala i najmanji unos topline, dok se najmanja deformacija javila na frekvenciji uzorka B3 s najvećim unosom topline.



Slika 36. Ovisnost kutne deformacije o frekvenciji - uzorci B1, B2 i B3

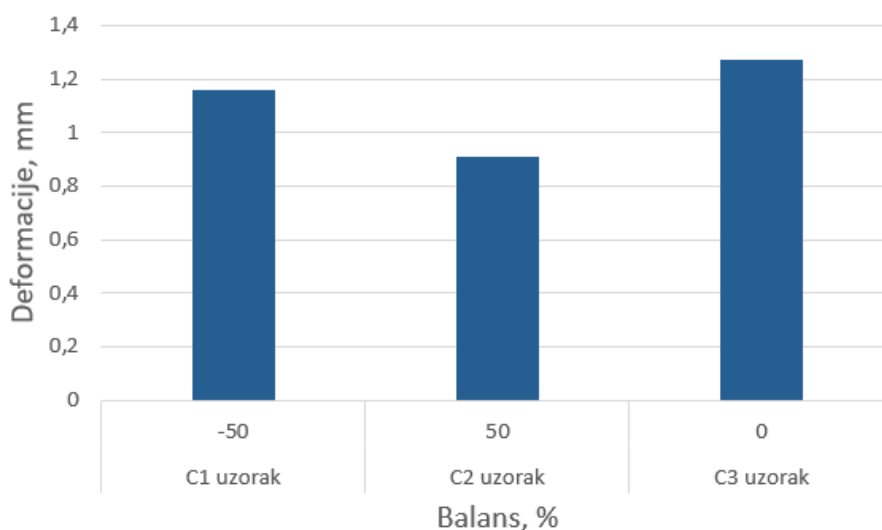


Slika 37. Grafički prikaz ovisnosti kutne deformacije o frekvenciji

Na slici 37. i 38. se vide minimalne razlike u kutnim deformacijama uzoraka C1, C2 i C3. Najmanja kutna deformacija se javlja kod uzorka C2 zbog najvećeg balansa gdje je ujedno i najmanji unos topline, neznatno veća je kutna deformacija uzorka C1 s najmanjim balansom.



Slika 38. Ovisnost kutne deformacije o balansu - uzorci C1, C2 i C3



Slika 39. Grafički prikaz ovisnosti kutne deformacije o balansu

5.6. Izrada makroizbrusaka

Nakon navarivanja i čišćenja uzoraka izrađeni su makroizbrusci. Postupak izrade makroizbruska se sastoji od rezanja, turpijanja, brušenja, poliranja te kemijskog nagrizanja uzorka. Uzorci su prerezani na tračnoj pili prikazanoj na slici 40. Za dobivanje odgovarajućeg poprečnog presjeka svi uzorci su bili rezani na jednakim mjestima prikazanim na slici 41.



Slika 40. Pila "BS 350 GH"



Slika 41. Mjesto rezanja uzoraka

Nakon rezanja uzoraka turpijanjem su izgladeni oštri bridovi uzoraka za lakšu upotrebu i brušenje. Brušenje uzoraka provedeno je brusnim papirom različitih granulacija: P120, P200, P320, P600, P1200, P2400, P4000. Brušenje započinje najvećom granulacijom sve dok se ne dođe do brusnog papira najmanje granulacije. Kod koraka brušenja granulacijama P320 do P4000 brzina okretaja ploče je 300 okr/min, također kod brušenja teče voda za hlađenje i podmazivanje. Nakon brušenja uzorci su zatim u Laboratoriju za materijalografiju nagrizani u Kellers otopini da bi makrostruktura zavara bila uočljivija.

5.7. Analiza makrostrukture

Ispitivanje makroizbrusaka sastoji se od vizualnog pregleda poprečnog presjeka navara golim okom ili uz pomoć mikroskopa. Nakon nagrizanja napravljene su fotografije makroizbrusaka na mikroskopu Leica MZ6 prikazan na slici 42. koji je smješten u Laboratoriju za materijalografiju.



Slika 42. Mikroskop Leica MZ6

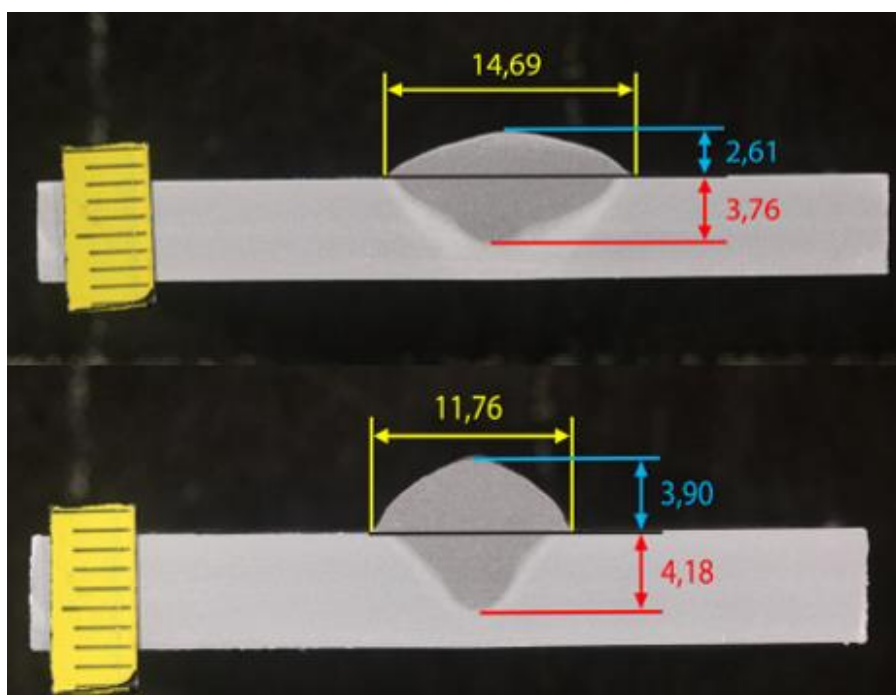
Iznosi veličina penetracije, širine lica i nadvišenja navara izmjereni su pomoću programa ImageJ. Tablica 7. prikazuje penetraciju, širinu lica, nadvišenje navara i iznose unesene topline za pojedini uzorak.

Tablica 7. Iznosi vrijednosti geometrije navara i unesene topline

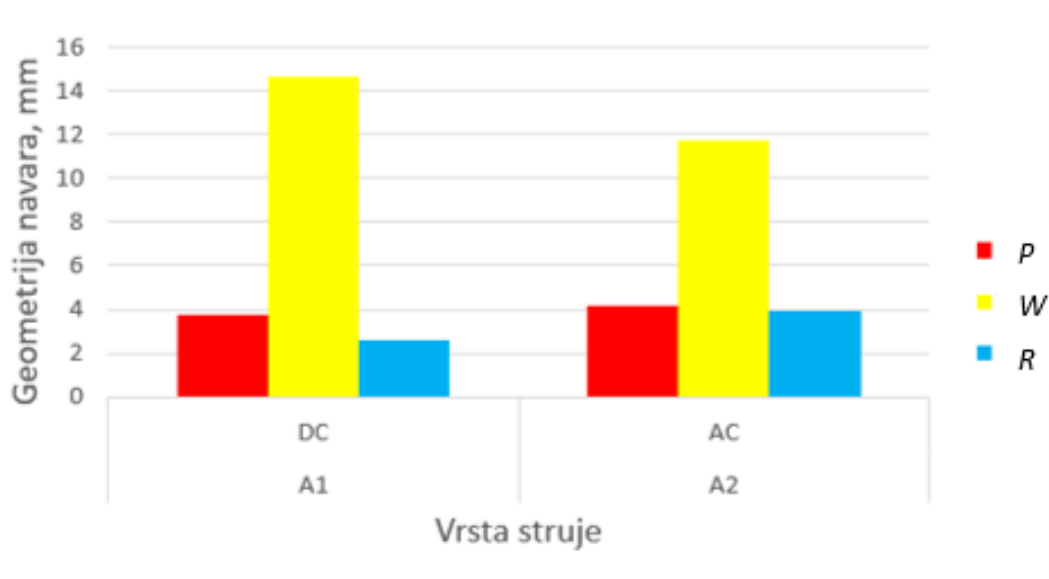
Uzorak	Penetracija (P), mm	Širina (W), mm	Nadvišenje (R), mm	Unos topline, kJ/cm
A1	3,76	14,69	2,61	4,10
A2	4,18	11,76	3,90	4,19
B1	2,13	9,03	3,80	3,14
B2	4,18	11,76	3,90	4,19
B3	4,69	16,27	3,23	5,36
C1	4,73	15,52	2,75	4,28
C2	3,82	12,47	4,60	4,10
C3	4,18	11,76	3,90	4,19

Na slici 43. prikazuje se geometrija navara ovisna o vrsti struje, a usporedba njihovih vrijednosti je prikazana na slici 44. Usporedbom makroizbrusaka A1 i A2 penetracija se nije znatno povećala s promjenom istosmjerne struje na izmjeničnu struju, ali se širina navara znatno smanjila. Došlo je i do znatnog povećanja u nadvišenju navara promjenom istosmjerne struje

na izmjeničnu struju. Navar kod uzorka A1 s istosmjernom strujom izgleda položenije od navara uzorka A2.



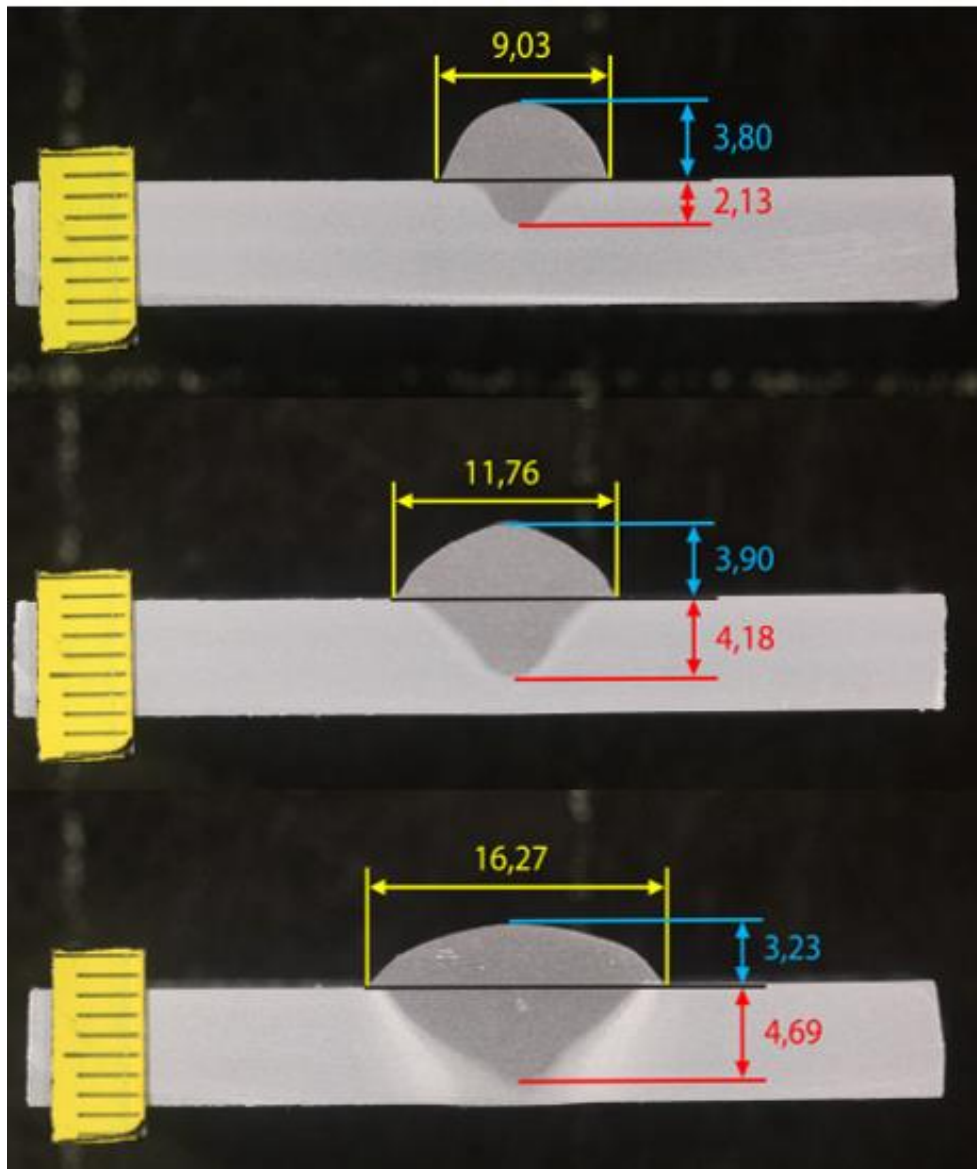
Slika 43. Ovisnost geometrije navara o vrsti struje - uzorci A1 i A2



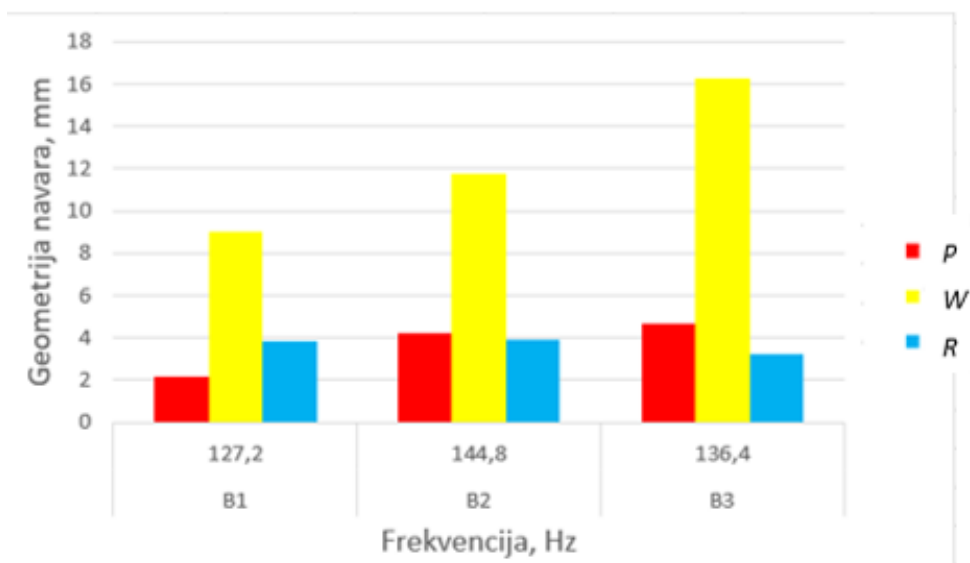
Slika 44. Grafički prikaz ovisnosti geometrije navara o vrsti struje

Na slici 45. prikazuje se geometrija navara ovisna o frekvenciji, a usporedba njihovih vrijednosti je prikazana na slici 46. Usporedbom makroizbrusaka vidljive su promjene geometrije navara s povećanjem struje, odnosno promjenom frekvencije. Penetracija se povećala s povećanjem struje i najveća je postignuta na najvećoj jakosti struje od 180 A,

vrijednost frekvencije 136,4 Hz, ali je znatno veća razlika između vrijednosti penetracije B1 i B2 nego kod razlike penetracije između B2 i B3 zbog pada frekvencije. Širina navara se znatno povećala između uzoraka B2 i B3 kada je došlo do pada frekvencije. Nadvišenje navara se povećanjem frekvencije povećalo, a padom frekvencije se smanjilo.

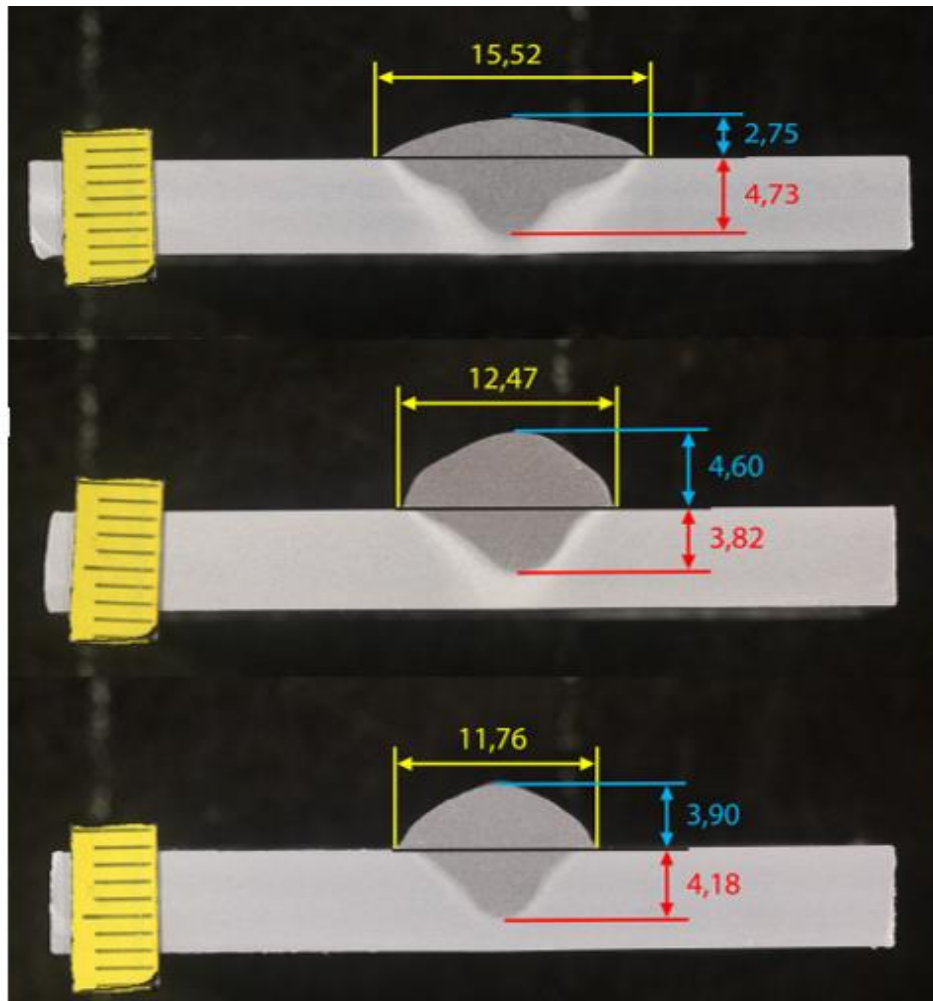


Slika 45. Ovisnost geometrije navara o frekvenciji - uzorci B1, B2 i B3

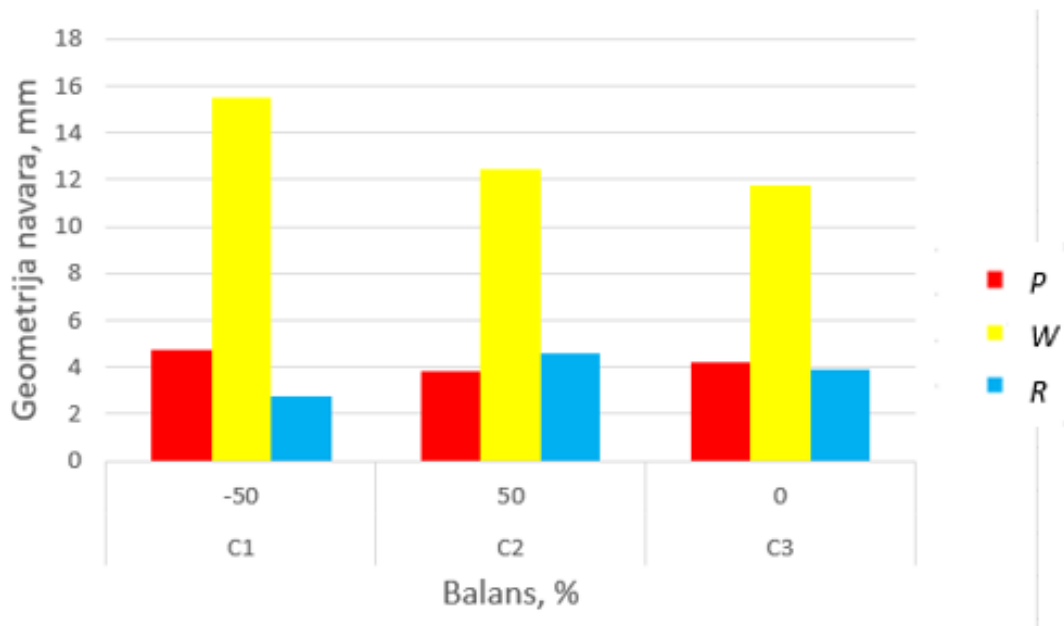


Slika 46. Grafički prikaz ovisnosti geometrije navara o frekvenciji

Na slici 47. prikazuje se geometrija navara ovisna o balansu, a usporedba njihovih vrijednosti je prikazana na slici 48. Balans omogućuje dobru kontrolu unosa topline. Usporedbom uzoraka može se zaključiti da se smanjivanjem balansa povećava penetracija. Penetracija se smanjila s promjenom vrijednosti balansa od - 50 % do 50 %. Povećanje balansa rezultira plićom penetracijom, ali se nadvišenje povećava. Širina navara se smanjila povećavanjem balansa što se može zaključiti usporedbom uzorka C1 s uzorcima C2 ili C3, ali je veća postala na uzorku C2 gdje je vrijednost balansa 50 % u usporedbi s uzorkom C3 gdje je balans 0 %.



Slika 47. Ovisnost geometrije navara o balansu - uzorci C1, C2 i C3



Slika 48. Grafički prikaz geometrije navara ovisnosti o balansu

6. ZAKLJUČAK

Najveći razlog za razvijanje AC MIG postupka je sve veće korištenje aluminija u svakakvim industrijama zbog svojih jedinstvenih svojstava koje pruža. Zbog svoje velike produktivnosti i prikladnosti za zavarivanje aluminija najviše se razvio u automobilskoj i brodskoj industriji.

U eksperimentalnom dijelu je provedeno navarivanje 6 uzoraka AC i DC MIG impulsnim postupkom s promjenom značajki izmjenične struje. Brzina zavarivanja, protok zaštitnog plina i slobodni kraj žice su bili konstantni u eksperimentu. Zaštitni plin koji je korišten za navarivanje je bio Argon 4,8. Nakon navarivanja obavljena je analiza deformacija gdje je najveća deformacija u DC MIG postupku. Kod varijacije balansa najmanja deformacija se dogodila pri najvećoj vrijednosti balansa od 50 %. Promjenom vrste struje iz DC u AC dobivene su manje kutne deformacije zbog same razlike temperature pri navarivanju. Varijacijom frekvencije kutne deformacije se nisu znatno promijenile i najveća deformacija se dogodila pri najmanjoj frekvenciji. Balans nije znatno utjecao na promjene u deformacijama, ali se najmanja deformacija dogodila na najvećem balansu gdje je bio i najmanji unos topline.

Vizualnom kontrolom može se uočiti razlika u izgledu navara između AC i DC jer je na istosmjernoj struji navar položeniji. Analizom makrostrukture se vidi promjena geometrije zavara s promjenom značajki izmjenične struje. Kod navarivanja AC daje navar s malo većom penetracijom, ali znatnim povećanjem nadvišenja i smanjenjem širine u obzirom na DC navarivanje. Varijacijom frekvencije penetracija se povećavala, ali s padom frekvencije je došlo do manjeg rasta penetracije. Padom frekvencije se širina navara znatno povećala između uzoraka. Nadvišenje navara se povećanjem frekvencije povećalo, a padom frekvencije se smanjilo. Balans omogućuje kontrolu nad unesenom toplinom i nad penetracijom jer se sa svojim povećanjem smanjuje penetracija. Osim penetracije balans mijenja nadvišenje i širinu zavara. Povećanjem balansa širina navara se smanjuje, a nadvišenje navara se povećava. Za zavarivanje aluminija tanjih debljina potrebna je kontrola unosa topline da ne dođe do većih deformacija i protaljivanja, ali da proizvodi dovoljno taljenog materijala za zavareni spoj. Balansom se može kontrolirati brzina taljenja žice dok struja ostaje niska što omogućava zavarivanje aluminija tanjih debljina. Korištenjem AC MIG i promjenom značajki izmjenične struje omogućava se velika kontrola procesa što je vrlo prikladno za zavarivanje aluminijских limova tanjih debljina.

7. LITERATURA

- [1] K. Weman i G. Linden, MIG welding guide, Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 2006.
- [2] H. Tong i T. Ueyama, Improvement of aluminium alloy sheet metal welding quality and productivity with AC pulsed MIG welding system, *Welding International*, pp. 851-856, 2005.
- [3] K. Weman, Welding processes handbook, Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 2012.
- [4] T. Ueyama, T. Era, T. Uezono i H. Tong, Application of digital inverter-controlled AC pulsed MIG welding system to light metal joining, *Welding International*, pp. 676-682, 22 Prosinac 2014.
- [5] J. C. Dutra, R. H. Silva, B. M. Savi i C. Marques, New methodology for AC-pulsed GMAW parameterization applied to aluminum shipbuilding, Springer, Santa Catarina, 2015.
- [6] I. Garašić, *MIG/MAG-prezentacije*, Zagreb, 2019.
- [7] A. Berk, Welding Mastermind, 2022.
[Mrežno]<https://weldingmastermind.com/understanding-ac-and-dc-for-mig-welding/>.
- [8] J. Adamiec i T. Pfeifer, Effect of Electrode Negative Ratio in AC MIG Welding of Aluminium, *Solid State Phenomena Vol 211*, pp. 39-46, 29 Studeni 2013.
- [9] <https://subcontracteu.com/en/blog/aluminum-welding-manufacturing-aftermarket-automotive-parts>.
- [10] Arc control of CO2 welding and AC MIG welding, 2005, pp. 179-231.
- [11] G. Mathers, The welding of aluminium and its alloys, Cambridge: Woodhead Publishing, 2002.
- [12] A. Ikram i 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*, 24 Siječanj 2017.
- [13] H. J. Park, D. C. Kim, S. Rhee i M. J. Kang, The arc phenomenon by the characteristic of EN ratio, *Int J Adv Manuf Technol*, pp. 867-875, 30 Listopad 2010.
- [14] Daihen Corporation, Welbee Inverter W400 Owner's Manual, Osaka, 2016.
- [15] H. Tong, T. Mita i M. Tanaka, Mechanism of welding fume suppression during AC-pulsed MIG welding of Al-Mg alloys, *Welding International*, pp. 509-523, 8 Srpanj 2010.
- [16] K. Kim i H. Chung, Wire melting rate of alternating current gas metal arc welding, *Int J Adv Manuf Technol*, 23 Kolovoz 2016.
- [17] J. Adamiec i T. Pfeifer, Welding of Aluminium Alloy Thin Sheets Using Variable Polarity MIG Method, *Solid State Phenomena Vol 211*, pp. 15-22, 29 Listopad 2013.
- [18] T. Kim, J. Lee i H. Woong, Development of a power supply for the pulse MIG arc welding with a wire melting rate change, Korea, 2004.
- [19] AZO Materials, <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=2804>.