

Razvoj i primjena AC MIG postupka zavarivanja

Stunja, Patrik

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://um.nsk.hr/um:nbn:hr:235:460794>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-04-02**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Patrik Stunja

Zagreb, 2022.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentori:

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

Student:

Patrik Stunja

Zagreb, 2022.

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

Zahvaljujem se mentoru Izv. prof. dr. sc. Ivici Garašiću i asistentu mag. ing. nav. arch. Mislavu Štefoku na pomoći i savjetima 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.

Na kraju, posebno se zahvaljujem svojim roditeljima, rodbini, prijateljima, kolegama te svojoj djevojci. Oni su najteže studentske dane učinili ljepšim, jednostavnijim i zabavnijim.

Patrik Stunja



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: **Patrik Stunja** JMBAG: **0035216054**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Razvoj i primjena AC MIG postupka zavarivanja**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Development and application of the AC MIG welding process**

Proučiti razvoj MIG postupka zavarivanja sa stanovišta primjene modificiranih postupaka prijenosa metala u električnom luku s posebnim naglaskom na upotrebu izmjenične struje. Opisati specifičnosti izmjenične struje kod AC MIG zavarivanja te posljedične operativne značajke. Analizirati mogućnosti podešavanja značajki izmjenične struje i njihov utjecaj na geometriju spoja.

U eksperimentalnom dijelu na uređaju za AC MIG zavarivanje provesti detaljnu specifikaciju parametara i mogućnosti podešavanja. Ustanoviti osnovne i pomoćne parametre koji pomažu kod prijenosa metala u električnom luku pri zavarivanju aluminija. U konačnici ocijeniti primjenjivost AC MIG zavarivanja u realnim uvjetima zavarivačke proizvodnje aluminijskih konstrukcija.

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

Zadatak zadan:

30. 11. 2021.

Datum predaje rada:

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

Predviđeni datum obrane:

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

Zadatak zadao:

Izv. prof. dr. sc. Ivica Garašić

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Branko Bauer

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA.....	V
POPIS OZNAKA	VI
SAŽETAK.....	VII
SUMMARY	VIII
1. UVOD.....	1
2. MIG POSTUPAK ZAVARIVANJA.....	2
2.1. Konvencionalni načini prijenosa metala MIG postupkom.....	5
2.1.1. Prijenos metala kratkim spojem.....	5
2.1.2. Prijenos metala štrcajućim lukom.....	6
2.1.3. Prijenos metala mješovitim lukom.....	7
2.1.4. Prijenos metala pulsirajućim lukom (impulsni prijenos).....	7
2.2. Modificirani načini prijenosa metala	11
2.2.1. STT postupak zavarivanja.....	12
2.2.2. CMT postupak zavarivanja.....	13
2.2.3. FastRoot postupak zavarivanja.....	13
2.2.4. RMT postupak zavarivanja.....	14
2.2.5. ForceArc postupak zavarivanja.....	15
2.3. Utjecaj vste i jakosti struje kod MIG postupka.....	16
2.3.1. Istrosmjerna struja.....	17
2.3.2. Izmjenična struja	18
2.4. Utjecaj polariteta	19
3. ALUMINIJ I ALUMINIJSKE LEGURE.....	20
3.1. Aluminijske legure	20
4. AC MIG.....	22
4.1. Usporedba istosmjernog i izmjeničnog MIG postupka.....	22
4.2. EN omjer-balans negativnog i pozitivnog polariteta	24
4.2.1. Utjecaj balansa na geometriju zavara.....	25
4.3. Utjecaj frekvencije	28
5. EKSPERIMENTALNI RAD.....	30
5.1. Konvencionalni postupak zavarivanja	34
5.2. Oprema za zavarivanje.....	35
5.3. Osnovni i dodatni materijal.....	37
5.4. Postupak eksperimenta.....	43
5.5. Analiza	34

5.5.1. Analiza makroizbrusaka.....	46
5.5.2. Analiza postupka zavarivanja.....	46
5.6. T spoj zavaren AC MIG postupkom zavarivanja.....	48
5.7. Analiza deformacija T zavarenog spoja.....	49
6. ZAKLJUČAK.....	51
LITERATURA.....	52

POPIS SLIKA

Slika 1: Postupak MIG zavarivanja [2]	2
Slika 2: Položaji zavarivanja [3]	3
Slika 3: Shema opreme za MIG zavarivanje [1]	4
Slika 4: Dijelovi sapnice pištolja za MIG zavarivanje [4]	4
Slika 5: Shematski prikaz prijenosa metala kratkim spojem [6]	5
Slika 6: Prijenos metala kratkim spojem [8]	6
Slika 7: Shematski prikaz prijenosa metala štrcajućim lukom [6]	6
Slika 8: Prijenos metala štrcajućim lukom [8]	7
Slika 9: Shematski prikaz metala pulsirajućim lukom [6]	8
Slika 10: Prikaz prijenosa metala pulsirajućim lukom [8]	8
Slika 11: Shema prijenosa metala rotirajućim lukom [6]	Pogreška! Knjižna oznaka nije definirana.
Slika 12: Prikaz prijenosa metala rotirajućim lukom [8]	Pogreška! Knjižna oznaka nije definirana.
Slika 13: Prikaz dinamičke karakteristike izvora struje zavarivanja $U, I=f(t)$ za: a) konvencionalni i b) STT postupak MIG zavarivanja [9]	10
Slika 14: Gibanje žice za vrijeme CMT postupka zavarivanja [10]	11
Slika 15: Krivulja jakosti struje FastRoot postupka za jedan ciklus [9]	12
Slika 16: Prikaz kutnog spoja izvedenog RMT postupkom (materijal- ST 37) : a) $d=6\text{mm}$; b) $d=8\text{mm}$; c) $d=20\text{mm}$ [9]	13
Slika 17: Faze EWM ForceArc postupka zavarivanja [13]	14
Slika 18: Ovisnost jakosti struje o promjeru žice i brzini zavarivanja. [7]	15
Slika 19: Utjecaj jakosti struje na dubinu penetracije i nadvišenje zavara [1]	15
Slika 20: Promjene polariteta s različitim vrstama struje [7]	18
Slika 21: Utjecaj polariteta na dubinu penetracije [1]	19
Slika 22: Prikaz karakteristike struje i napona za DC MIG postupak [18]	22
Slika 23: Prikaz karakteristike struje i napona za AC MIG postupak [18]	23
Slika 24: Valni oblik struje za AC MIG [20]	25
Slika 25: Utjecaj balansa na geometriju zavara [22]	25
Slika 26: Ponašanje geometrije zavara u ovisnosti o jakosti struje i EN omjeru [23]	26
Slika 27: Ovisnost dubine penetracije o jakosti struje za različite EN omjere [23]	26
Slika 28: Ovisnost širine zavara o jakosti struje za različite EN omjere [23]	27
Slika 29: Ovisnost visine nadvišenja o jakosti struje za različite EN omjere [23]	27
Slika 30: Utjecaj različitih iznosa frekvencije na geometriju zavara [24]	28
Slika 31: Izgled zavara pri niskim i visokim iznosima frekvencije [26]	28
Slika 32: Priprema prije zavarivanja i debljine ploče	31
Slika 33: Provedeno zavarivanje	31
Slika 34: Geometrija zavara nastala MIG postupkom	33
Slika 35: PF položaj zavarivanja	34
Slika 36: Uređaj za zavarivanje Welbee Inverter W400	34
Slika 37: Namotaji žice na uređaju, ALMg5	36
Slika 38: Manometar sa zadanim protokom zaštitnog plina	37
Slika 39: Priprema osnovnog materijala	37
Slika 40: Uzorak 1 (Balans postavljen na 0)	38
Slika 41: Uzorak 2 (Balans postavljen na -30)	39
Slika 42: Uzorak 3 (Balans postavljen na +30)	39
Slika 44: Usporedba visine šavova uzoraka i postojeće tehnologije	40
Slika 44: Usporedba brzina zavarivanja uzoraka i postojeće tehnologije	40

Slika 45: Rezanje uzoraka na pili BS 350 GH.....	41
Slika 46: Skidanje oštih rubova i brušenje uzoraka.....	41
Slika 47: Stroj za brušenje makrouzoraka Mecatech 250 SPI.....	42
Slika 48: Otopina za nagrivanje aluminija.....	42
Slika 49: Postolje za slikanje makrostrukture.....	43
Slika 50: Prikaz geometrije uzorka br. 1.....	44
Slika 51: Prikaz geometrije uzorka br. 2.....	45
Slika 52: Prikaz geometrije uzorka br. 3.....	45
Slika 53: Histogramski prikaz dubine penetracije uzoraka.....	45
Slika 54: Histogramski prikaz širine zavara uzoraka.....	46
Slika 55: Histogramski prikaz nadvišenja zavara uzoraka.....	47
Slika 56: Zavareni T spoj.....	48
Slika 57: Mjerenje visine šava zavara.....	49
Slika 58: Makroizbrusak T spoja s označenim dimenzijama zavara 1 i 2.....	50
Slika 59: Kutna deformacija zavarenog spoja.....	51

POPIS TABLICA

Tablica 1: Označavanje legura aluminija [17].....	21
Tablica 2: Legirajući elementi i njihov učinak u kombinaciji s aluminijem[17].....	22
Tablica 3: Mehanička svojstva osnovnog materijala [25].....	32
Tablica 4: Kemijski sastav osnovnog materijala [25].....	32
Tablica 5: Tehničke karakteristike uređaja Welbee Inverter W400 [24].....	35
Tablica 6: Kemijski sastav i mehanička svojstva aluminijske legure AlMg5 [25].....	36
Tablica 7: Uzorci i parametri uzoraka eksperimenta.....	39
Tablica 8: Karakteristike zavarenih uzoraka i postojeće tehnologije.....	40
Tablica 9: Kemijski sastav otopine za nagrizanje aluminija.....	43
Tablica 10: Dimenzije geometrija zavara po poprečnom presjeku.....	44
Tablica 11: Rezultati zavarivanja zavara 1 i 2.....	47
Tablica 12: Dimenzije geometrije zavara 1 i 2.....	48

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
<i>a</i>	mm	Visina šava zavara
<i>I</i>	A	Jakost struje
<i>I_{EN}</i>	A	Jakost struje negativnog polariteta
<i>I_p</i>	A	Vrijednost impulsne struje
<i>U</i>	V	Napon
<i>m</i>	kg	Masa
<i>P</i>	W	Snaga
<i>P</i>	mm	Dubina penetracije
<i>R</i>	mm	Visina zavara
<i>t</i>	s	Vrijeme
<i>v</i>	mm/min	Brzina zavarivanja
<i>W</i>	mm	Širina zavara

SAŽETAK

Rad se bavi razvojem i primjenom AC MIG postupka zavarivanja. Naglasak je na razvoju MIG postupka zavarivanja sa stanovišta primjene modificiranih postupaka prijenosa metala u električnom luku s posebnim naglaskom na upotrebu izmjenične struje. Objasnjeni su konvencionalni i modificirani postupci. Opisan je utjecaj vrste struje i polariteta na zavarivanje. Navedene su značajke izmjenične struje i primjena AC MIG postupka te utjecaj pojedinih parametara poput EN omjera i frekvencije. U eksperimentalnom dijelu zavareni su kutni zavari u PF položaju, s variranjem iznosa balansa, kako bi se postigla veća produktivnost u odnosu na konvencionalni MIG postupak. Dobiveni rezultatom postignuta je brzina zavarivanja veća za čak 80% na balansu postavljenom na -30. Zaključno, ocijenjena je primjenjivost AC MIG postupka zavarivanja u realnim uvjetima zavarivačke proizvodnje aluminijskih konstrukcija.

Ključne riječi: AC MIG, EN omjer, balans, frekvencija, aluminij

SUMMARY

The paper deals with the development and application of the AC MIG welding process. The emphasis is on the development of the MIG welding process from the point of view of applying modified methods of metal transfer in the electric arc with special emphasis on the use of alternating current. Conventional and modified procedures are explained. The influence of current type and polarity on welding is described. The characteristics of alternating current and the application of the AC MIG procedure are listed, as well as the influence of certain parameters such as the EN ratio and frequency. In the experimental part, fillet welds were welded in the PF position, with varying amounts of balance, in order to achieve higher productivity compared to the conventional MIG process. As a result, the welding speed is even 80% higher on the balance set at -30. In conclusion, the applicability of the AC MIG welding procedure in the real conditions of the welding production of aluminum structures was evaluated.

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

1. UVOD

Aluminij i aluminijeve legure u današnjici su jedni od najzastupljenijih materijala u svim granama industrije upravo zbog svojih specifičnih svojstva. Zbog puno manje gustoće u odnosu na čelik, čvrstoće koja pomoću legiranih elemenata postaje približna čvrstoći čelika, korozivnoj postojanosti te dobroj zavarljivosti, najznačajnija primjena im je u graditeljstvu, brodogradnji, automobilskoj i zrakoplovnoj industriji. Navedene grane industrije napreduju i razvijaju se velikom brzinom s naglaskom na povećanu produktivnost i visoku kvalitetu s minimalnim troškovima pri proizvodnji.

Za zavarivanje aluminijevih legura, MIG postupak zavarivanja (engl. Metal Inert Gas) je postupak koji se najviše koristi, upravo zbog svoje jednostavnosti i široke primjene. Zbog potrebe za poboljšanjem kvalitete i produktivnosti postupaka zavarivanja pa i mogućnosti automatizacije, neophodno je razvijati nove tehnike i načine zavarivanja. U ovom radu objašnjene su tehnike koje su razvijene zbog navedenih razloga.

Upravo jedan od načina razvoja je primjena AC MIG postupka (eng. Alternating Current MIG). AC MIG je postupak zavarivanja nastao u Japanu, a u Europi se počeo primjenjivati tek krajem 1990.-ih godina. Tehnologija se krenula razvijati zbog povećane upotrebe legura aluminija i prethodno navedenih razloga. Zbog specifičnosti materijala, aluminij može biti problematičan za zavarivanje konvencionalnim MIG postupkom. Prednosti AC MIG postupka nad konvencionalnim MIG postupkom postižu se promjenjivim polaritetom. Pomoću negativnog polariteta moguće je postići veći depozit materijala uz manji unos topline, međutim električni luk je nestabilniji i ima dosta rasprskavanja. Pomoću balansiranja negativnog i pozitivnog polariteta elektrode i radnog komada postiže se precizna kontrola raspodjele topline električnog luka. AC MIG je zbog svojih svojstva i velike produktivnosti postupka našao primjenu u prije navedenim granama industrije u zavarivanju lakših materijala. [1][2]

U nastavku je opširnije objašnjen postupak MIG zavarivanja i njegove značajke poput načina prijenosa metala, kao i modificirani načini prijenosa metala u električnom luku s posebnim naglaskom na AC MIG, odnosno prijenos metala pomoću izmjenične struje.

2. MIG POSTUPAK ZAVARIVANJA

MIG zavarivanje je postupak elektrolučnog zavarivanja uz pomoć taljive elektrode uz zaštitnu atmosferu inertnog plina poput argona (Ar) ili helija (He). Izvodi se tako što dolazi do uspostave i održavanja električnog luka između taljive žice i radnog komada. MIG postupak koristi se za širok raspon različitih materijala te zbog toga ima široku primjenu. Glavne karakteristike postupka su visoka produktivnost i velika učinkovitost, što je dobro za masovnu proizvodnju. Postupak se koristi u zavarivanju jednostavnih i složenih konstrukcija poput posuda pod tlakom, cijevi, automobila, raznih strojeva i sl. [1]

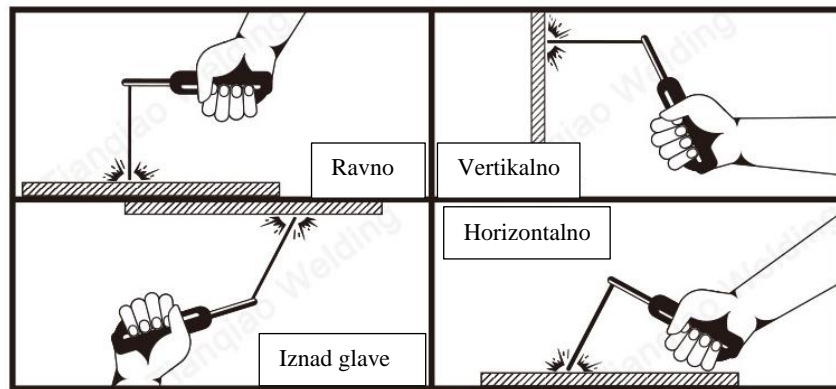
Na slici 1 prikazan je postupak MIG zavarivanja.



Slika 1: Postupak MIG zavarivanja [3]

Zaštitna atmosfera koja se dobiva iz plinova kod MIG postupka omogućuje kontrolirani rad i čist zavar uz minimalnu pojavu oksida. Plin koji se koristi za zavarivanje aluminija i njegovih legura je argon, a moguća je i upotreba mješavina plinova. Pištolj za zavarivanje ima automatsko dovodenje žice koja ima ulogu dodatnog materijala te elektrode. U odnosu na neke druge postupke poput TIG postupka (eng. Tungsten Inert Gas) ima i manju zonu utjecaja topline. Ovaj postupak spajanja materijala je moguće izvoditi u gotovo svim pozicijama zavarivanja. [1]

Slika 2. prikazuje općenite položaje pri zavarivanju, na slici je prikazano ručno elektrolučno zavarivanje, iako su pozicije jednake i za ostale postupke pa tako i MIG.

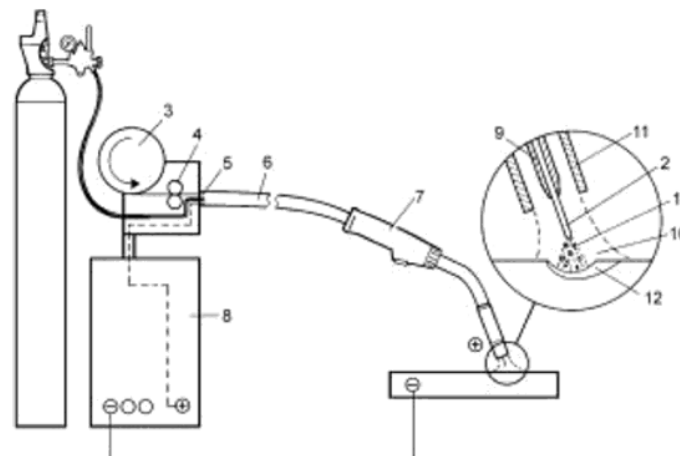


Slika 2: Položaji zavarivanja [3]

Na slici 3 nalazi se shematski prikaz opreme za MIG zavarivanje.

Brojevi redom označavaju:

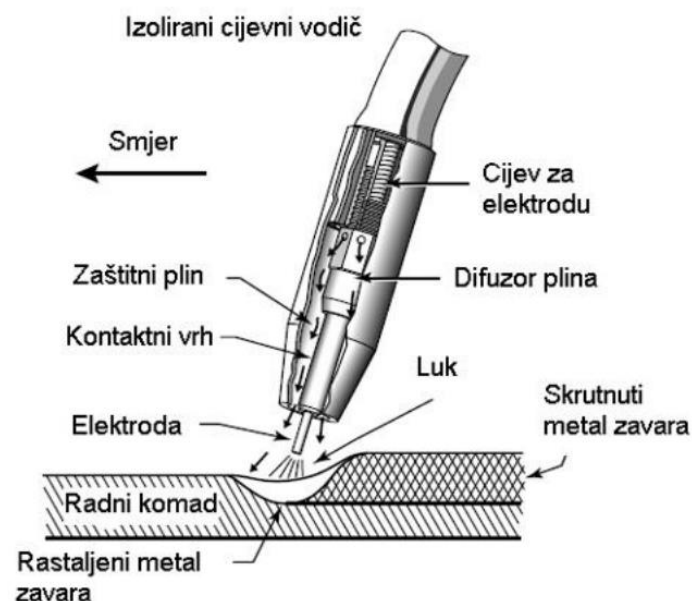
1. Rastaljeni dodatni materijal u obliku kapljica
2. Dodatni materijal
3. Žica za zavarivanje
4. Pogonski kotačići za dodavanje žice
5. Crijevo za protok zaštitnog plina
6. Crijevo pištolja za zavarivanje
7. Pištolj za zavarivanje
8. Izvor napajanja
9. Kontaktna vodilica
10. Zaštitni plin
11. Sapnica pištolja za zavarivanje
12. Zavar. [1]



Slika 3: Shema opreme za MIG zavarivanje [1]

MIG postupak uz sve navedene prednosti ima i svoje nedostatke. Jedan od nedostataka je složenija oprema u odnosu na neke druge postupke poput npr. TIG postupka (eng. Tungsten Inert Gas). Oprema za MIG postupak sadrži skupe komponente kao što su sustav dovođenja žice i automatska regulacija, također je zbog toga i manje prijenosna. Osim toga ako se ne koriste odgovarajući parametri zavarivanja moguće su greške pri zavarivanju, kao poroznost i naljepljivanje. Zbog zaštitnog plina postupak je ograničen za vanjsku upotrebu zbog utjecaja vjetra. [1]

Na slici 4 prikazani su dijelovi sapnice pištolja kod navedenog postupka.



Slika 4: Dijelovi sapnice pištolja za MIG zavarivanje [4]

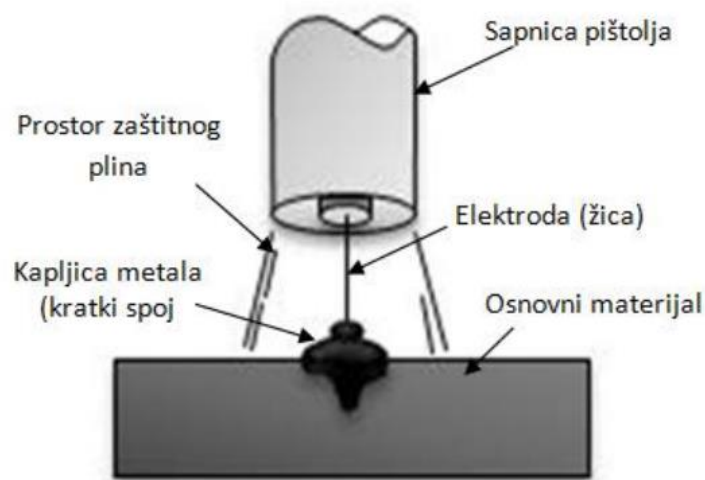
2.1. Konvencionalni načini prijenosa metala MIG postupkom

Kod MIG postupka talinu je moguće prenositi na 4 osnovna načina: kratkim spojem, štrcajućim lukom, mješovitim prijenosom, impulsnim prijenosom.

2.1.1. Prijenos metala kratkim spojem

Prijenos materijala upotrebom najmanjih jačina struja, najčešće s malim debljinama dodatnog materijala (žice). Kontinuirano dovođena žica stvara zavar prilikom uspostavljanja kontinuiranih kratkih spojeva. Postupak se koristi za spajanje tankih limova i izradu korijena zavora kod većih debljina. Pogodan je za zavarivačke zahvate gdje se zahtijevaju male deformacije spoja jer ova vrsta prijenosa ima mali unos topline. Napon postupka, za žicu debljine 1,2 mm, iznosi 13-21 V, a iznos jakosti struje 50-170 A. [5][6]

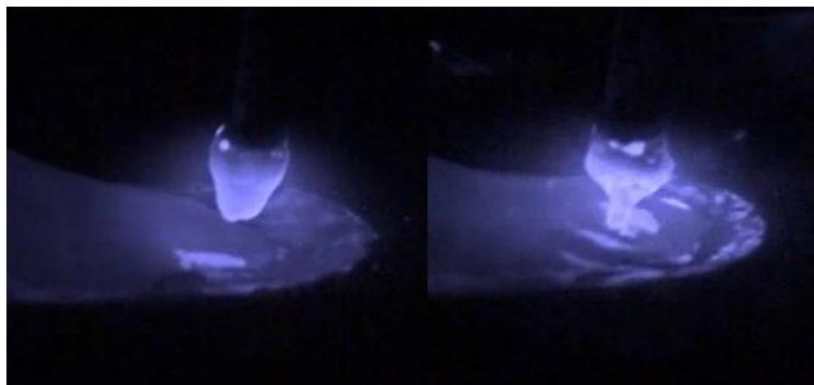
Na slici 5. nalazi se shematski prikaz navedenog prijenosa.



Slika 5: Shematski prikaz prijenosa metala kratkim spojem [6]

Prednosti prijenosa kratkim spojevima su primjene u svim zavarivačkim položajima, jednostavno rukovanje, male deformacije, velika iskoristivost elektrode (90% i više), a nedostaci su ograničenje radi debljine materijala i lošija mogućnost kontrole prskanja. [7]

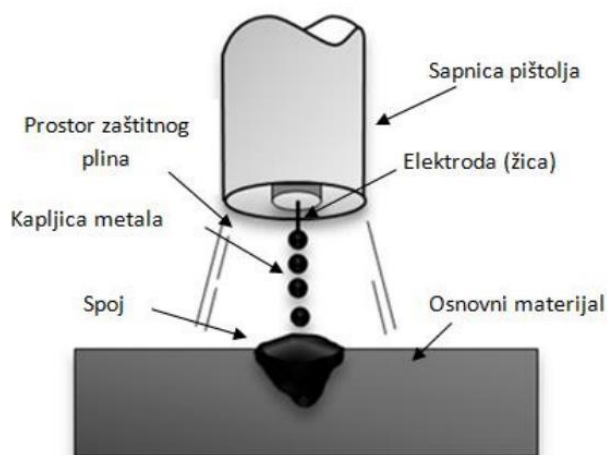
Na slici 6 vidi se realna slika prijenosa kratkim spojem.



Slika 6: Prijenos metala kratkim spojem [8]

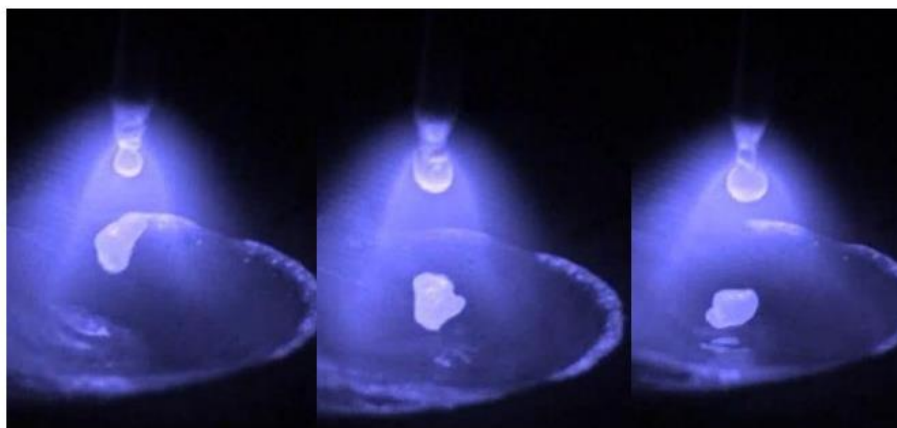
2.1.2. Prijenos metala štrcajućim lukom

Pomoću velike jakosti struje i velikih napona električnog luka postiže se druga vrsta prijenosa, nazvana prijenos štrcajućim lukom. Rastaljene kapljice metala odvajaju se s vrha elektrode te se prenose na osnovni metal slobodnim letom kroz zaštitnu atmosferu. Dolazi do formiranja sitnih kapi taline na osnovnom metalu iako elektroda nema direktan kontakt s njime. Glavni uvjet ovog postupka prijenosa je korištenje mješavina plinova s maksimalnom koncentracijom aktivnih plinova od 18%. Mješavine koje se koriste često imaju mali postotak kisika u sebi. [6] Na slici 6 nalazi se shematski prikaz prijenosa štrcajućim lukom.



Slika 7: Shematski prikaz prijenosa metala štrcajućim lukom [6]

Prednosti ovog postupka su velika količina rastaljenog dodatnog materijala, moguća primjena za širok spektar materijala, minimalno štrcanja, a time i manje naknadnog čišćenja zavara, dok su nedostaci povećana koncentracija nastalih plinova pri zavarivanju, veliki unos topline, povećano zračenje i mogućnost primjene postupka samo u horizontalnom položaju. [7]



Slika 8: Prijenos metala štrcajućim lukom [8]

2.1.3. *Prijenos metala mješovitim lukom*

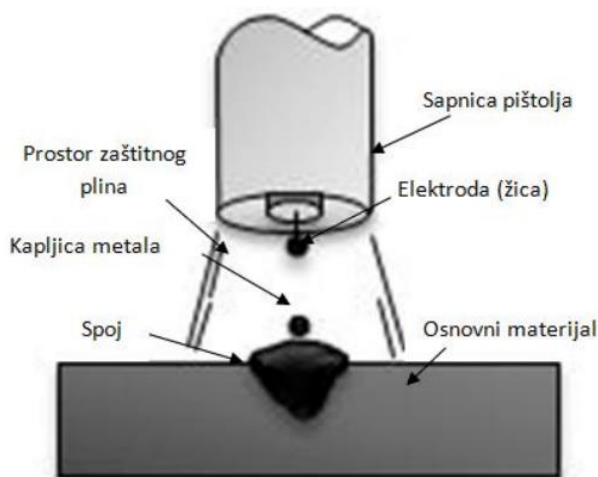
Kod prijenosa metala mješovitim lukom dolazi do stvaranja krupnih kapljica na vrhu elektrode koje se odvajaju u električnom luku, pod djelovanjem gravitacijske sile, i padaju u talinu. Prijenos mješovitim lukom je zapravo kombinacija prijenosa kratkim spojevima i štrcajućim lukom, dok se izmjena i redosljed mehanizama prijenosa odvija na slučajan način. Samim time postupak je težak za kontroliranje i nepredvidiv. Postupak je bio zastupljen 60-ih i 70-ih godina prošlog stoljeća, a danas je zamijenjen modernijim i naprednijim postupcima prijenosa metala. [6]

Nedostaci ovog postupka su nepredvidivost geometrije zavara i moguć nastanak nepotpunog stapanja dodatnog i osnovnog metala, povećano štrcanje, niska iskoristivost elektrode i razlika u promjeru kapljica u električnom luku. [7]

2.1.4. *Prijenos metala pulsirajućim lukom (impulsni prijenos)*

Prijenos metala pulsirajućim lukom je oblik prijenosa štrcajućim lukom. Kod ovog postupka iznos prosječne struje zavarivanja manji je od minimalne vrijednosti struje. Iznosi jakosti struje variraju između minimalnog iznosa struje (bazna ili osnovna struja) i maksimalnog iznosa (vršna struja). Vršna struja je maksimalna struja impulsa i ona omogućuje prijenos metala bez uspostave kratkog spoja. Ona osigurava odvajanje jedne kapi rastaljenog metala pri svakom impulsu, dok minimalna struja, bazna ili osnovna, služi za održavanje električnog luka. [6]

Na slici 7 je shema impulsnog mehanizma prijenosa metala.

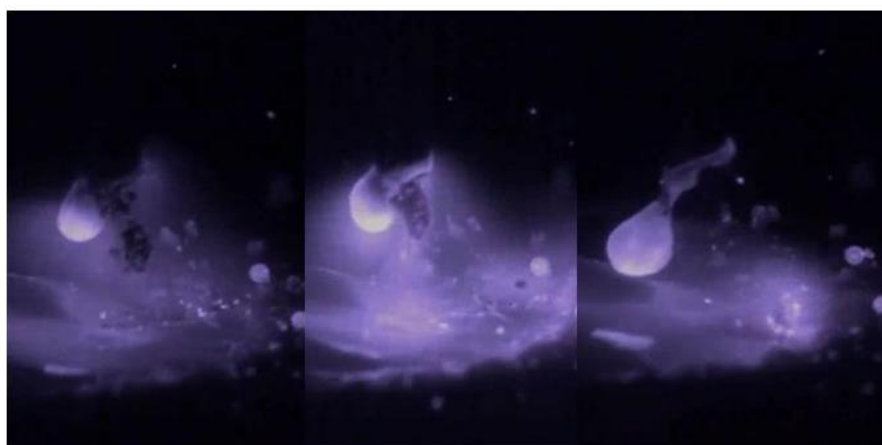


Slika 9: Shematski prikaz metala pulsirajućim lukom [6]

Postupak omogućuje manji unos topline u proces pošto je iznos jakosti prosječne struje niži nego kod prijenosa metala štrcajućim lukom. Koristi se kod zavarivanja tanjih materijala, čak s korištenjem žica većeg promjera. Upravo pomoću namještanja bazne i vršne jakosti struje može se namjestiti prosječna struja tako da se s jednim promjerom žice zavaruje širok raspon debljina materijala. Postupak je pogodan za primjenu u svim položajima zavarivanja, ima malo prskanja i time se postiže odličan vanjski izgled zavara. Ostale prednosti su: velika brzina zavarivanja, pogodnost za automatiziranje procesa i manje deformacije zbog manjeg unosa topline.

Nedostaci su složenost parametara zavarivanja, skuplja oprema, korištenje skupljih plinskih mješavina.

Postupak ima čestu upotrebu u zavarivanju aluminija i njegovih legura te u zavarivanju nehrđajućeg čelika. [7]



Slika 10: Prikaz prijenosa metala pulsirajućim lukom [8]

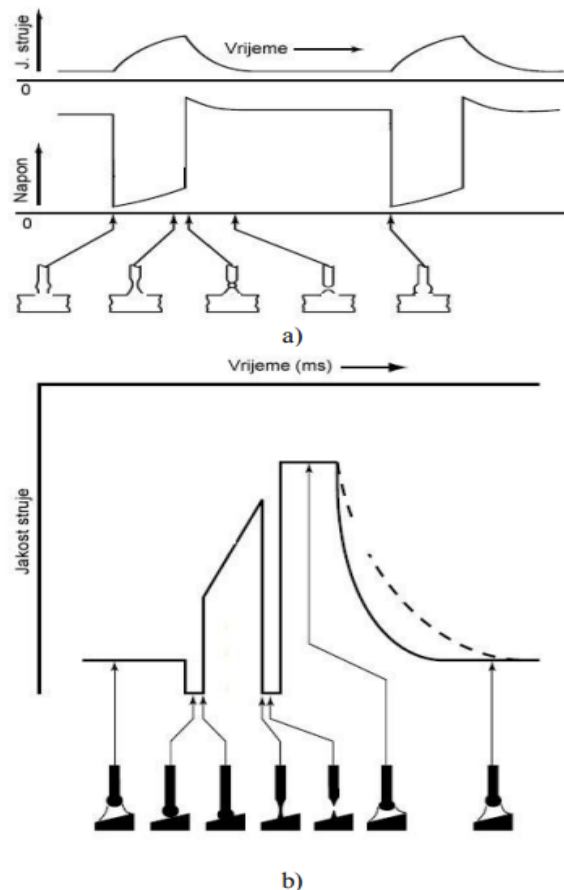
2.2. Modificirani načini prijenosa metala

Osim klasičnih načina prijenosa metala zbog napretka tehnologije razvili su se moderniji postupci, odnosno modificirani postupci. Modifikacija prijenosa metala kratkim spojevima je temelj na kojem su nastali modificirani postupci poput STT-a, CMT-a, FastROOT-a. Dok su RMT i ForceArc nastali modifikacijom prijenosa metala štrcajućim lukom. U ovom dijelu navedene su primjene tih postupaka uz objašnjenje načina na koji funkcioniraju. Poseban naglasak je na načinu prijenosa pomoću izmjenične struje koji je detaljno objašnjen u idućem poglavlju.

2.2.1. STT postupak zavarivanja

STT (eng. Surface Tension Transfer) razvila je tvrtka Lincoln Electric. Ovaj postupak je izrazito učinkovit pri zavarivanju korijena zavara u žlijebu u jednom prolazu. Najčešće se koristi pri zavarivanju cijevi i cijevnih elemenata u automobilskoj i prehrambenoj industriji. Ovim postupkom zavaruju se prvenstveno čelici, poput visokočvrstih čelika i nehrđajućih čelika iz razloga što se uspješnije izbjegava kritična temperatura za stvaranje rupičaste korozije, CPT (eng. „Critical Pitting Temperature“), u odnosu na klasičan postupak MIG zavarivanja. Ovaj postupak je predviđen za zahtjevnija automatska ili poluautomatska zavarivanja pri kojima se upotrebljava robot radi bolje kontrole postupka. [9]

Kod STT postupka prijenos metala se odvija na način kao kod prijenosa kratkim spojem, međutim samo odvajanje kapljice rastaljenog metala vrši mehanizam površinske napetosti. Uz vrlo preciznu kontrolu struje zavarivanja, izvor struje daje maksimum jakosti struje u trenutku kada je za prijenos metala dovoljan mehanizam površinske napetosti. Na taj način se izbjegava rasprskavanje pri prijenosu kratkim spojem te se uz to prekida nepotreban unos topline kao kod klasičnog MIG postupka. Nakon odvajanja jedne kapljice, jakost struje se ponovno naglo povećava i zagrijava vrh elektrode na prethodan način kako bi se odvojila nova kapljica. [9] Slika 13 prikazuje usporedbu ponašanja jakosti struje STT postupka s konvencionalnim MIG postupkom.



Slika 11: Prikaz dinamičke karakteristike izvora struje zavarivanja za: a) konvencionalni i b) STT postupak MIG zavarivanja [9]

Osim navedenih prednosti STT postupak je lako automatizirati, a moguće je i postići veće brzine zavarivanja u odnosu na klasični MIG postupak. [9]

2.2.2. CMT postupak

CMT (eng. Cold Metal Transfer) ili „hladni prijenos metala“ je modificirani MIG postupak s izrazito malim unosom topline u odnosu na klasični MIG postupak zavarivanja. Pomoću regulacije dodavanja žice, točnije oscilatornim dodavanjem dolazi do prijenosa metala kratkim spojem. To se odvija na način da se žica primiče radnom komadu dok se ne ostvari kratki spoj, a nakon toga se mijenja smjer njene putanje te se ona odmiče od radnog komada. Ovo pomicanje žice odvija se pri frekvenciji oko 70 Hz. Postiže se prijenos s izrazito malom strujom zavarivanja te je iz tog razloga i smanjen unos topline. Odmicanje žice od radnog komada potpomaže prijenosu metala uslijed površinske napetosti taline. [10,11]

Slika 14 ispod, pokazuje shemu gibanja žice.



Slika 12: Gibanje žice za vrijeme CMT postupka zavarivanja [10]

Ukoliko se zahtijeva veći unos topline od onog koji se može postići CMT postupkom zavarivanja, postoji mogućnost regulacije struje dodavanjem strujnih impulsa. Oni omogućuju više unesene topline te veću penetraciju između ciklusa odvajanja kapljica. Ovaj način prijenosa se upotrebljava u MIG postupku lemljenja za zavarivanje aluminijskih tankih limova za čelik. Prednosti ovog modificiranog postupka zavarivanja su: manji unos topline, bolja kontrola i upravljanje duljinom električnog luka, nepotrebna naknadna obrada površina zavarivanja zbog minimalne pojave štrcanja te sposobnost premošćivanja prilikom izrade korijena zavara. Nedostatak je što je postupak ne upotrebljiv pri većim jakostima struje zavarivanja. [10][11]

2.2.3. FastRoot postupak zavarivanja

FastRoot postupak zavarivanja razvijen je u Finskoj tvrtki Kemppi. Postupak se temelji na digitalnom upravljanju parametrima struje i napona. Postupak se može podijeliti na 2 dijela. U prvom intervalu se metal prenosi kratkim spojem pomoću „pinch“ efekta, a u drugom intervalu dolazi do naglog povećanja jakosti struje, a time i topline, što služi za oblikovanje spoja, jer se osnovni metal zagrijava. (slika 15). Nakon oba intervala stvara se nova kapljica te se odvoja u idućem ciklusu. Nakon dva nagla povećanja unosa topline, odnosno struje zavarivanja, ona pada na minimalnu vrijednost što omogućuje stabilnost procesu i kontrolu nad idućim ponavljanjem ciklusa.

Pomoću digitalnog upravljanja postiže se modificirani postupak pogodan za zavarivanje metala tanjih debljina, najčešće su to konstrukcijski i nehrđajući čelici, te za zavarivanje korijena zavara većom brzinom i produktivnosti u odnosu na klasični MIG ili TIG postupak zavarivanja. [9]



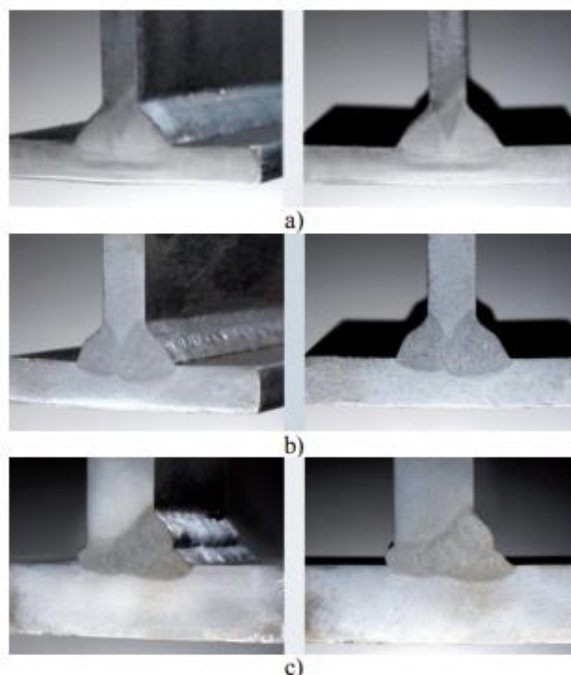
Slika 13: Krivulja jakosti struje FastRoot postupka za jedan ciklus [9]

Preciznim upravljanjem električnog luka uz minimalni unos topline proces daje zavare izvrsne kvalitete i izgleda, zbog smanjenog štrcanja pri samom procesu. Uz pravilno postavljenje parametre, osnovne tj. bazne i vršne struje, ovim postupkom postiže se izvrsna produktivnost. [9]

2.2.4. RMT postupak zavarivanja

RMT (eng. Rapid MIG/MAG Tehnology) postupak se bazira na prijenosu metala štrcajućim lukom. Za razliku od klasičnog postupka gdje je promjer kapljica nešto manji od samog promjera žice dodatnog materijala, pri RMT postupku prijenos metala se događa pomoću vrlo malih kapljica i ostvaruje se neprekinutim nizom frekvencijom od svega 2-3 Hz. Na ovaj se način sužava jezgra električnog luka te se smanjuje njegova visina te napon procesa, što kao rezultat daje koncentriraniji luk i bolju penetraciju. Postupak je razvila njemačka tvrtka ESS Schweisstechnik. Ovaj postupak omogućuje jednostavno zavarivanje metala većih debljina i kutnih zavara debljine do 8 mm u jednome prolazu, bez pripreme. Osim toga, omogućuje smanjenje broja prolaza zbog manjeg kuta pripreme te zbog manjeg unosa topline i smanjeno štrcanje. Postupkom se može i postići veće brzine zavarivanja. [9] [12]

Na slici 16 može se vidjeti prikaz kutnog spoja nastalog ovim postupkom na različitim debljinama metalnih čeličnih ploča.

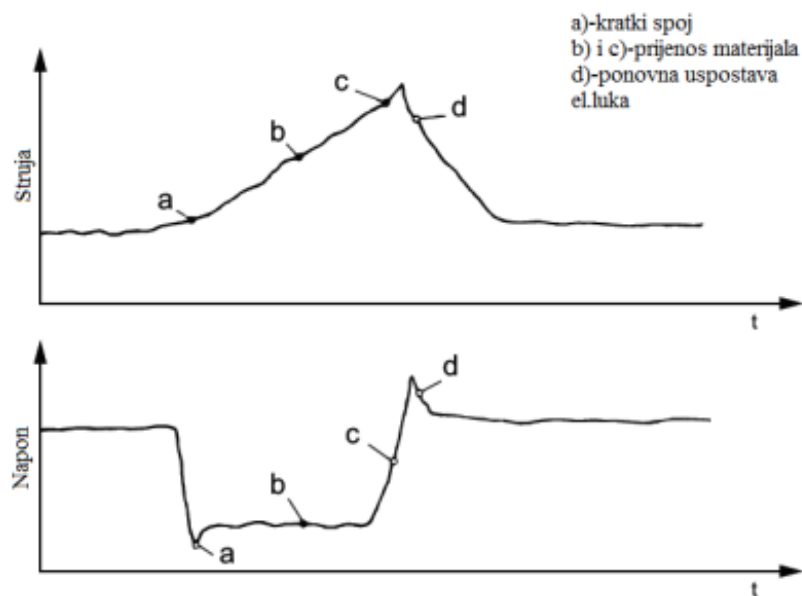


Slika 14: Prikaz kutnog spoja izvedenog RMT postupkom (materijal- ST 37) : a) d=6mm; b) d=8mm; c) d=20mm [9]

2.2.5. ForceArc postupak zavarivanja

ForceArc postupak je također modificirani postupak prijenosa štrcajućim lukom, kao i RMT postupak. Kod ovog postupka duljina električnog luka je kraća nego u klasičnom MIG postupku zavarivanja. U ovom se postupku talina formira uslijed plazme električnog luka što se očituje u malim i srednje velikim kapljicama koje se, jedna za drugom, prenose velikom brzinom kroz električni luk. Posljedica toga je povremena pojava kratkih spojeva zbog međusobnog kontakta kapljica pri slobodnom kretanju uslijed djelovanja gravitacijske sile čime se ostvaruje direktan spoj s talinom. Zahvaljujući digitalnoj kontroli i korekciji parametar pri padu napona, kao rezultata navedenog djelovanja, vrlo se brzo smanjuje struja zavarivanja sve do ponovne uspostave el. luka, dok se napon ne vrati na zadanu vrijednost. Posljedica toga je štrcajući luk. To uvelike smanjuje vrijeme kratkog spoja i k tome smanjuje štrcanje na minimum. Kada se pokuša još dodatno smanjiti duljina luka, a time i iznosa napona zavarivanja, dolazi do povećanog štrcanja kao rezultata duljeg vremena kratkih spojeva. Prednost ovog modificiranog prijenosa u odnosu na klasičan MIG postupak su: povećanje produktivnosti zbog veće brzine zavarivanja, lakše rukovanje pri ručnom zavarivanju zbog duljine električnog luka te viša kvaliteta zavara. Postupak svoju uporabu nalazi u izgradnji vozila, čeličnih konstrukcija, spremnika i u brodogradnji. [13]

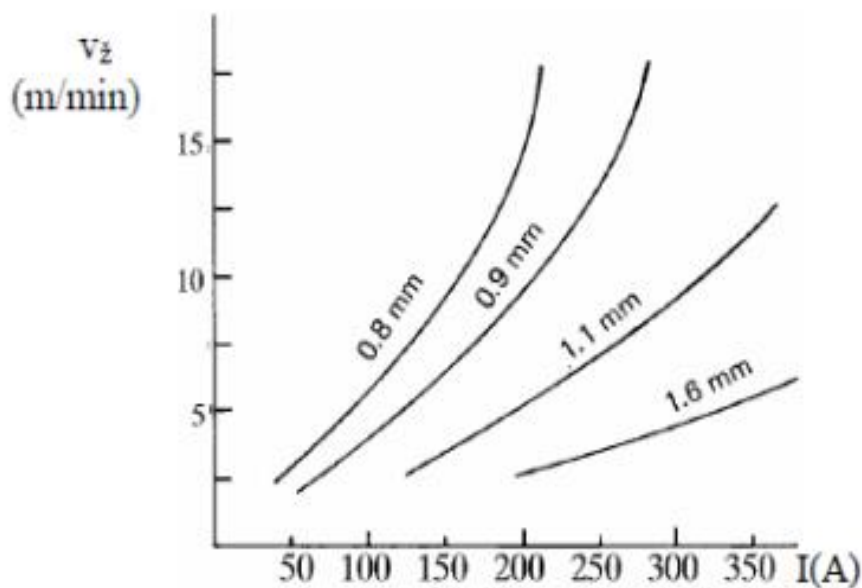
Na slici 17. ispod mogu se vidjeti dijagrami jakosti struje i napona u vremenu sa naznačenim fazama ForceArc postupka.



Slika 15:Faze EWM ForceArc postupka zavarivanja [13]

2.3. Utjecaj vrste i jakosti struje kod MIG postupka

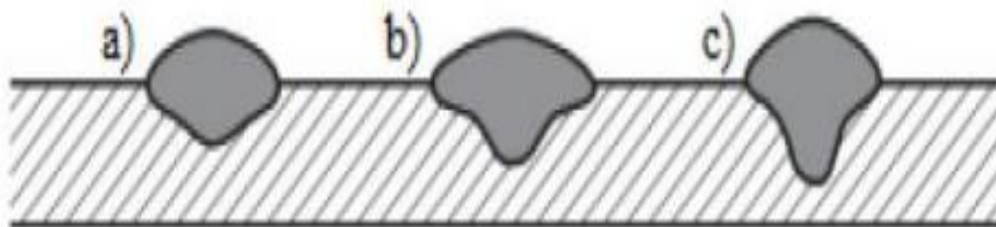
Jakost struje je osnovni parametar kod MIG postupka, ali i svih ostalih postupaka zavarivanja. Najvažniji je parametar jer o njemu ovisi način prijenosa rastaljenog metala u električnom luku, te stabilnost samoga luka. Osim toga, o jakosti ovisi dubina penetracije, količina taline i brzina zavarivanja. Također ima značaja utjecaj na vanjski izgled zavara. Jakost struje određuje se ovisno o vrsti materijala, debljini radnog komada i položaju zavarivanja. Kad su ostali parametri konstantni, jakost struje ovisi o brzini žice tj. dodatnog materijala. Odnosno, ovisi o brzini dovođenja žice, materijalu žice i njoj debljini. Ukoliko je brzina dovođenja veća, posljedično tome i jakost struje mora biti veća. Isto vrijedi i za promjer žice. Za manje vrijednosti struje ovisnost brzine dovođenja žice i jakosti je linearna, dok za veće iznose to ne vrijedi. To se jasno može vidjeti na slici 18. gdje je prikazana ovisnost jakosti struje i brzine dovođenja žice. [14]



Slika 16: Ovisnost jakosti struje o promjeru žice i brzini zavarivanja. [7]

Osim vanjskog izgleda zavara, jakost struje definira i unutarnju geometriju zavara, pa s povećanjem jakosti struje dubina penetracije i nadvišenje zavara su veći te se sama geometrija i oblik zavara po presjeku mijenja ovisno o jakosti. [14][1]

Na slici 19 je označeno: a) mala struja, b) srednja struja i c) visoka struja



Slika 17: Utjecaj jakosti struje na dubinu penetracije i nadvišenje zavara [1]

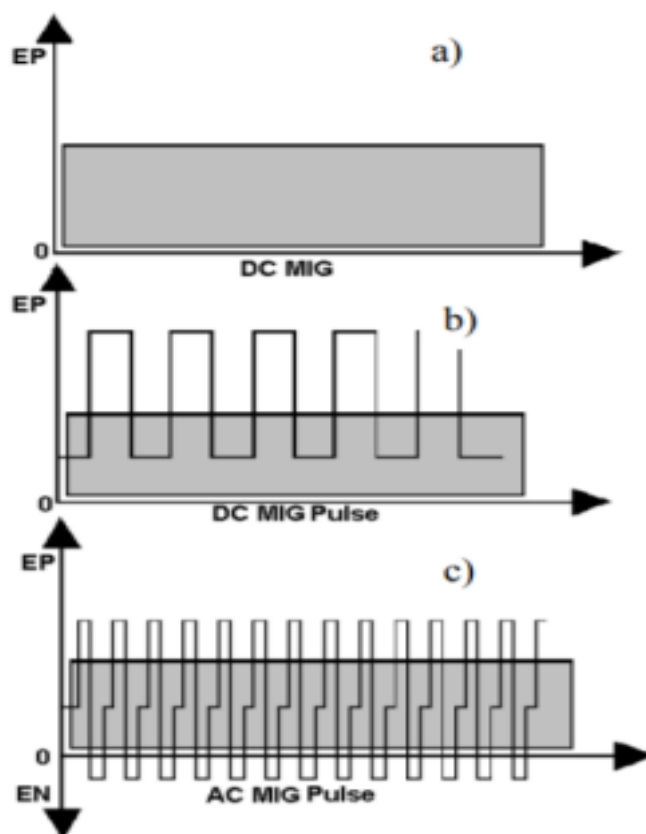
Uz jakost struje i vrsta struje ima značajan utjecaj pri zavarivanju. Svaka vrsta ima svoje prednosti i nedostatke, kao i svoju primjenu u zavarivanju. Za većinu postupaka koristi se istosmjerna struja, ali za neke namjene je upotreba izmjenične struje neophodna. Posebno se ističe u zavarivanju aluminija jer pruža određene mogućnosti koje s istosmjernom nisu moguće.

2.3.1. Istosmjerna struja

Istosmjerna struja ili DC (eng. Direct Current) je struja konstantnog polariteta te sadrži elektrone s istim nabojem koji putuju u jednom smjeru. Mogu biti pozitivnog ili negativnog polariteta. Pozitivan polaritet omogućava stabilniji luk, dok kod negativnog polariteta imamo manji unos topline. Osim toga pomoću istosmjerne struje postiže se dobra kontrola zavarivanja s malo rasprskavanja te velika čvrstoća zavara. Neki od nedostataka istosmjerne struje su viša cijena u odnosu na izmjeničnu zbog toga što unutrašnje komponente moraju moći pretvarati izmjenični polaritet u istosmjerni (što također dodaje na težini opreme) te otežano zavarivanje materijala poput aluminija. [15]

2.3.2. Izmjenična struja

Izmjenična struja ili AC (eng. Alternating Current) sadrži elektrone promjenjivog polariteta, a samim time periodički mijenja smjer njihova gibanja. Promjenom polariteta mijenja se i smjer gibanja, dok se u jednom trenutku polaritet mora naći na naboju jednakom nuli. Prednosti u zavarivanju izmjeničnom strujom su: kao što je navedeno, upotreba pri zavarivanju aluminijskih legura, u zavarivanju magnetskih materijala, može se koristiti za razne debljine metala, oprema je lakša za prenošenje te ima manju cijenu s obzirom na opremu s istosmjernom strujom. Nedostaci su veće štrcanje, manja stabilnost luka, a time i manja kontrola zavarivanja. Izmjenična struja se kod MIG postupka koristi za specijalizirane primjene i u određenim slučajevima. Slika 20. prikazuje promjene polariteta struje s različitim vrstama struja zavarivanja MIG postupkom. [15]

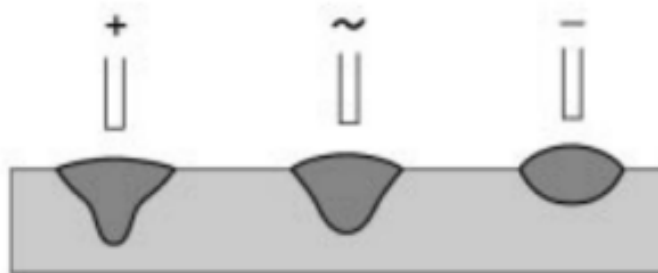


Slika 20: Promjene polariteta s različitim vrstama struje (EP (eng. Electron Positive), EN (eng. Electron Negative))[7]

2.4. Utjecaj polariteta na MIG postupak

Električni polaritet struje također ima veliki utjecaj u procesu zavarivanja. Mehanizmi razvoja topline su različiti za različite procese zavarivanja, a oni uvelike ovise o polaritetu, odnosno razvoju topline na anodi i katodi. Kod MIG postupka, polaritet ima utjecaj na formiranje zavora, ponašanje električnog luka, prijenos metala, taljenje dodatnog metala i dubinu penetracije. Zavarivanje pozitivnom elektrodom daje stabilan luk i zadovoljavajuću kvalitetu zavora te se najčešće koristi pri MIG zavarivanju. [15]

Na slici 21. prikazan je utjecaj negativnog i pozitivnog polariteta na geometriju zavora.



Slika 21: Utjecaj polariteta na dubinu penetracije [1]

Kada se koristi pozitivan polaritet kod MIG postupka katoda je na osnovnom metalu. Katodu je lako formirati na osnovnom metalu zbog povišene temperature na oksidnom sloju. Taljeni materijal lako se širi po zavarenom području zbog površinske napetosti. Negativan polaritet nema široku i značajnu primjenu kao pozitivan kad se govori o MIG postupku zavarivanja. Pri zavarivanju pozitivnim polaritetom najveća količina topline odlazi u dio gdje se elektroni stabilnije emitiraju. To je tako zbog oksida formiranih na radnoj površini komada. Oni olakšavaju proces emisije elektrona, što kao krajnji rezultat donosi stabilan električni luk. To je najveći razlog široke primjene pozitivnog naboja kod MIG postupka. Budući da je dodatni materijal negativno nabijen, električni luk je znatno viši u odnosu na pozitivan naboj jer se sloj oksida na površini razbija brže nego što se može formirati. Upravo zbog toga katoda se ne zadržava u jednoj točki jer elektroni traže mjesto s minimalnim opterećenjem. Pri normalnim uvjetima zavarivanja odvojena kapljica dodatnog materijala će na negativnom polaritetu biti veća nego ona na pozitivnom. Uzrok tome je razlika u silama koje djeluju na vrh žice. Sile koje djeluju na katodu su veće nego one na anodi, što sprječava padanje kapljica i čini ih većima. [15]

Sa slike 21. usporedbom zavara možemo zaključiti da pozitivan polaritet daje dublju penetraciju uz manje nadvišenje zavara, za razlike od negativnog gdje je penetracija nije značajna te je nadvišenje veće. Također će brzina taljenja žice za istu jakost struje biti puno veća pri negativnom polaritetu.

3. ALUMINIJ I ALUMINIJSKE LEGURE

Aluminij je, u prošlom stoljeću, bio poznat po svojoj skupoj cijeni i rijetkosti. Od tada je u međuvremenu, zajedno s razvojem tehnologije, identificiran kao najčešći metal na Zemlji koji čini čak 8% Zemljine kore. To ga čini trećim najbrojnijim elementom poznatom čovjeku, odmah iza kisika i silicija (pijeska).

Aluminij je poznat po svojstvima izvrsne električne i toplinske vodljivosti te otpornosti na korozijsko djelovanje. Posjeduje i svojstvo dobre zavarljivosti ukoliko se primjenjuje odgovarajući postupak zavarivanja. Iako je relativno slab u čistom stanju, pomoću legiranja aluminija drugim odgovarajućim kemijskim elementima mogu se postići izvrsna svojstva. Aluminij je gotovo 3 puta lakši metal u odnosu na čelik ($\rho_{Al} = 2660 \text{ kgm}^{-3}$, $\rho_{\text{č}} = 7850 \text{ kgm}^{-3}$), a njegovim legiranjem može se postići ista ili viša čvrstoća nego kod ugljičnog čelika. Točka tališta metala čelika i aluminija se također dosta razlikuju. Željezov oksid na površini čelika tali se približno istom temperaturom kao što je talište metala, dok je kod aluminija talište pri $660 \text{ }^\circ\text{C}$, u slučaju legura i niže, a aluminijev oksid se tali tek pri temperaturi od $2060 \text{ }^\circ\text{C}$. To ima veliki utjecaj na postupak zavarivanja, jer je nužno ukloniti sloj oksida kako bi se postiglo pravilno povezivanje osnovnog metala sa rastaljenim kapljicama. Još je važno napomenuti kako aluminijev oksidni sloj osigurava izvrsnu otpornost na koroziju i posjeduje svojstvo samoobnovljivosti. To omogućuje primjenu aluminija u teškim eksplozijskim uvjetima, bez dodatne površinske zaštite.

Aluminijev modul elastičnosti je tri puta manji od čelika, što znači da se pod djelovanjem opterećenja deformira tri puta više, ali i apsorbira tri puta više energije pri udarnom opterećenju. ($E_{\text{č}} = 210 \text{ GPa}$, $E_{Al} = 70 \text{ GPa}$).

S obzirom da je aluminijeva mikrostruktura u obliku plošno centrirane kubne rešetke, on zadržava svoju tvrdoću prilikom pada temperature. Osim toga zbog oblika rešetke ima izvrsnu sposobnost oblikovanja, omogućujući korištenje postupaka poput ekstruzije, valjanja i dubokog vučenja u proizvodnji aluminijskih konstrukcija. [16]

3.1. Aluminijske legure

Aluminijske legure koriste se u lijevanom ili gnječenom stanju. Mehanička svojstva moguće je dalje poboljšati precipitacijskim očvrnućem, ali se brojne koriste i bez navedene obrade.

Lijevane legure mogu se svrstati u 3 osnovne skupine: Al-Si, Al-Mg i Al-Cu čijom kombinacijom se ostvaruju neka osnovna svojstva. Primjerice, AlMg3 i AlMg5 imaju izrazitu

otpornost na koroziju, dok AlSi12 ima dobru sposobnost lijevanja. Aluminijske legure mogu se lijevati na sve osnovne načine s jednako dobrom kvalitetom.

Najpoznatiju podjelu gnječanih aluminijskih legura razvio je The Aluminium Association iz SAD-a. Temelji se na kombinaciji četveroznamenkastih brojeva i slova. Prva četiri broja predstavljaju kemijsku strukturu legure, dok slovo i sljedeći broj označavaju uvjete u kojima je provedeno očvršćivanje legure. Ova metoda je široko prihvaćena u cijelom svijetu. [17]

U tablici 1. ispod je prikazana navedena podjela.

Tablica 1: Označavanje legura aluminija [17]

SERIJA	GLAVNI LEGIRAJUĆI ELEMENT
1XXX	Al
2XXX	Al-Cu
3XXX	Al-Mn
4XXX	Al-Si
5XXX	Al-Mg
6XXX	Al-Mg-Si
7XXX	Al-Zu
8XXX	Ostali legirni elementi

Primjena čistog aluminija nije uobičajena zbog izuzetno male granice razvlačenja, od 28 MPa. Otapanjem legirnih elemenata u osnovnom metalu i naknadnim hlađenjem ostvaruje se čvrsta otopina. Atomi legirnih elemenata tvore intersticijske ili supstitucijske kristale mješance unutar kristalne rešetke aluminija. Supstitucijski kristali mješanci pridonose poboljšavanju svojstva žilavosti i čvrstoće, dok intersticijski smanjuju žilavost, uz značajniji porast čvrstoće. Najčešći legirni elementi koji se danas koriste u aluminijskim legurama su: silicij, magnezij, litij, cink i mangan. Dok se elementi poput nikla, kroma i titana dodaju u manjim količinama za postizanje specifičnih svojstva.

Tablica 2. sadrži legirajuće elemente i opise njihovog učinka kod legiranja s aluminijem.

Tablica 2: Legirajući elementi i njihov učinak u kombinaciji s aluminijem [17]

ELEMENT	UČINAK
Mg	Povećava čvrstoću i poboljšava očvršnuće deformacijom
Mn	Povećava čvrstoću i poboljšava očvršnuće deformacijom
Cu	Značajno poboljšava čvrstoću, omogućuje precipitacijsko očvršćivanje te smanjuje duktilnost, zavarljivost i otpornost na koroziju
Si	Povećava svojstva duktilnosti i čvrstoće, omogućuje precipitacijsko očvršćivanje (u kombinaciji s magnezijem)
Zn	Značajno povećava čvrstoću, omogućuje precipitacijsko očvršćivanje, može izazvati napetosnu koroziju
Fe	Povećava čvrstoću, ali ne značajno u odnosu na druge elemente
Cr	Povećava otpornost na napetosnu koroziju
Ni	Poboljšava otpornost na visoke temperature zadržavanjem čvrstoće
Pb	Poboljšava svojstva pri obradi odvajanjem čestica

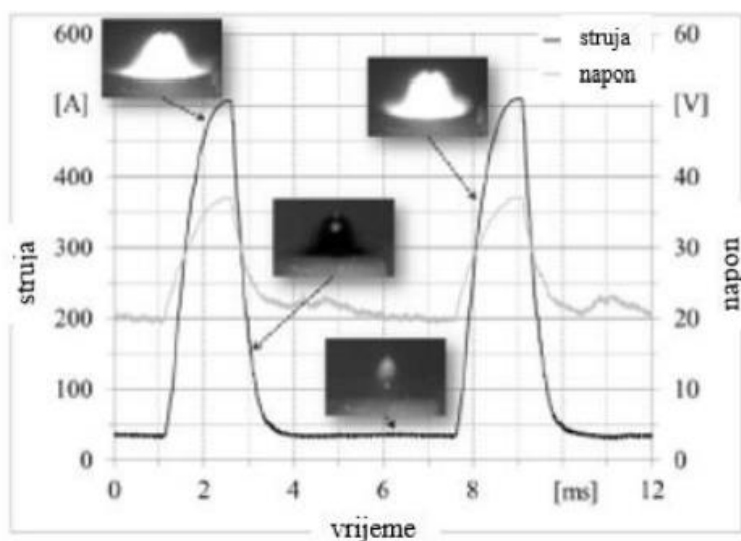
4. AC MIG

Upravo zbog gore navedenih razloga AC MIG postupak nalazi posebnu upotrebu i ističe se u odnosu na druge modificirane načine prijenosa metala. On je jedinstveni postupak, od gore navedenih, zbog razloga što koristi izmjeničnu struju. U ovome poglavlju su navedene specifičnosti izmjenične struje kod AC MIG zavarivanja kroz njezine dvije glavne značajke: frekvenciju i EN omjer, tj. balans polariteta.

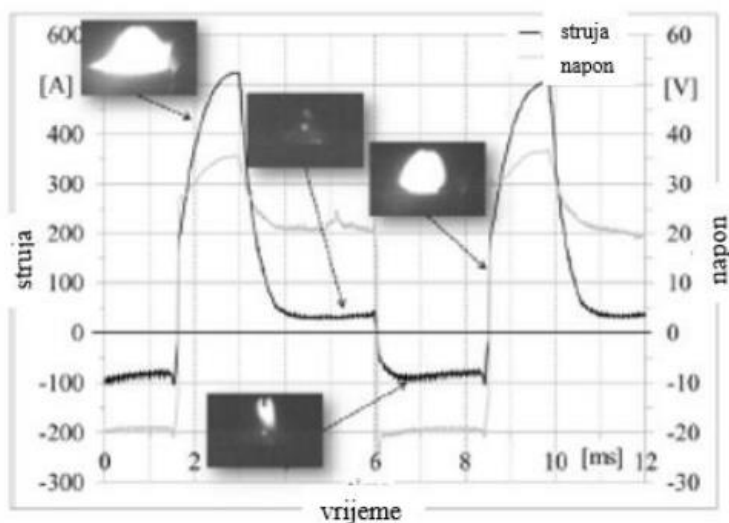
4.1. Usporedba istosmjernog i izmjeničnog postupka zavarivanja

Glavni razlog upotrebe AC MIG postupka zavarivanja u odnosu na upotrebu istosmjerne struje je veća produktivnost postupka, odnosno brzina zavarivanja. Upravo je to jedan od glavnih zahtjeva industrije, uz kvalitetu i izgled zavara. Razlika između ova dva postupka nalazi se u polaritetu struje. Sposobnost mijenjanja polariteta struje omogućuje mijenjanje raspodjele udjela energije za taljenje dodatnog i osnovnog metala. [18]

Na slikama 22 i 23 vide se karakteristike struje i napona kod MIG postupka istosmjernom i izmjeničnom strujom



Slika 22: Prikaz karakteristike struje i napona za DC MIG postupak [18]



Slika 23: Prikaz karakteristike struje i napona za AC MIG postupak [18]

Kod postupka s istosmjernom strujom se može primijetiti promjena polariteta u fazi osnovne struje. Prilikom negativnog polariteta unos topline u osnovni materijal je smanjen, a u tom vremenu se povećava brzina taljenja žice, dok se istovremeno penetracija smanjuje. To omogućuje korištenje tehnologije za izrazito tanke materijale poput aluminija i do debljina manjih od 1 milimetra. [18]

Također, pri zavarivanju aluminija istosmjernom strujom s vanjske strane metala dolazi do nastanka sloja oksida. Taj sloj uz istosmjernu struju uzrokuje nejednoliko zagrijavanje slojeva osnovnog metala, odnosno sprječava pravilno formiranje zavora. Dok kod izmjenične struje, ona omogućuje prodiranje luka direktno do osnovnog materijala razbijajući oksidni sloj. [19]

Prednosti AC MIG postupka su [18]:

- Minimizacija deformacija i povećano taloženje dodatnog materijala uslijed manjeg unosa topline
- Slična vanjska i unutarnja geometrija zavora, uz odgovarajuće parametre te pri većoj brzini zavarivanja
- Postupak je pogodan za sve debljine materijala, čak i do jednog milimetra debljine
- Prednost u zavarivanju aluminija u usporedbi s konvencionalnim postupkom
- Lakša oprema, a time i prenosivost
- Smanjeni rizik nastanka toplih pukotina
- Mogućnost zavarivanja magnetskih materijala [18]

Negativne strane:

- Veća nestabilnost električnog luka
- Manja kontrola nad postupkom u usporedbi s konvencionalnim MIG postupkom

4.2. EN omjer- balans negativnog i pozitivnog polariteta

EN omjer definira se kao omjer struja različitih polariteta u jednom izmjeničnom ciklusu, definiran je donjim izrazom: [20]

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

Gdje je :

I_p – jakost impulsne struje

I_b - jakost osnovne struje

I_{EN} - jakost struje negativnog polariteta

T_p - vrijeme impulsa

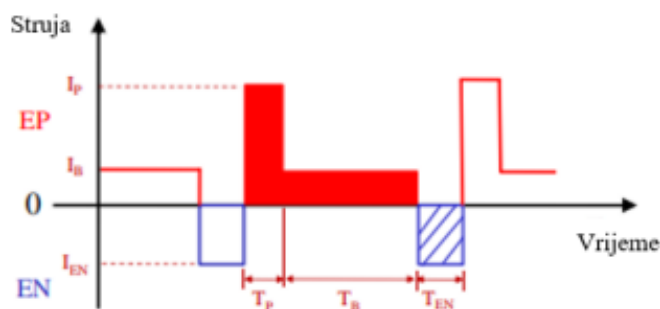
T_p - vrijeme osnovne struje

T_p - vrijeme negativnog polariteta

EN označava period gdje je osnovni metal pozitivno nabijen, a dodatni materijal negativno, dok EP označava obrnut slučaj: osnovni metal negativno nabijen, a dodatni pozitivno. Povećanjem EN omjera direktno se utječe na brzinu taljenja žice, odnosno, ona se povećava. Ukoliko je EN omjer jednako raspodijeljen na pozitivan i negativan polaritet onda iznosi 50%. Ukoliko je EN omjer veći od 50% to znači da prevladava period negativnog polariteta u odnosu na pozitivni. [20] [21]

Na uređaju za zavarivanje koji je korišten u eksperimentalnom dijelu rada za postavljanje EN omjera postavlja se postavka „balans“. Kada EN omjer iznosi 50%, na uređaju je balans podešen na 0. EN omjer se mijenja za 1% sa pomicanjem gumba koji kontrolira balans za vrijednost od 1. Balans se može kontrolirati od -50 do 50. Ukoliko smanjimo balans za 1, EN omjer iznosi 49%. [21]

Slika 24 prikazuje valni oblik izmjenične struje kod AC MIG postupka.



Slika 24: Valni oblik struje za AC MIG [20]

4.2.1. Utjecaj balansa na geometriju zavora

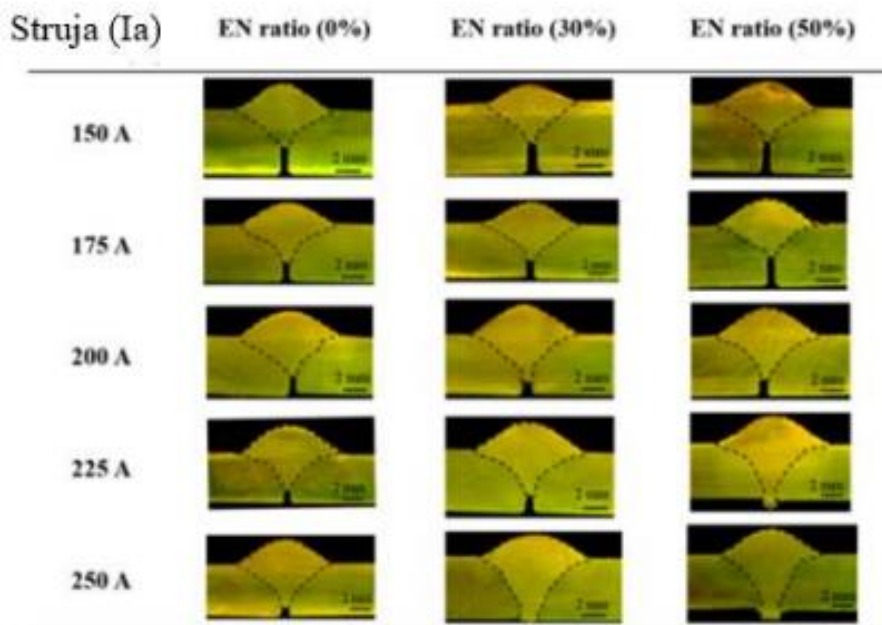
Balansom struje moguće je kontrolirati penetraciju zavora u osnovni materijal. Povećanjem EN omjera smanjuje se unos topline u osnovni metal. Slika 25. prikazuje promjene dubine penetracije pri AC MIG zavarivanju promjenom balansa dok je brzina dodavanja žice konstantna. Povećanjem EN omjera srednja struja i napon se smanjuju te se posljedično i dubina penetracije 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. [22]

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

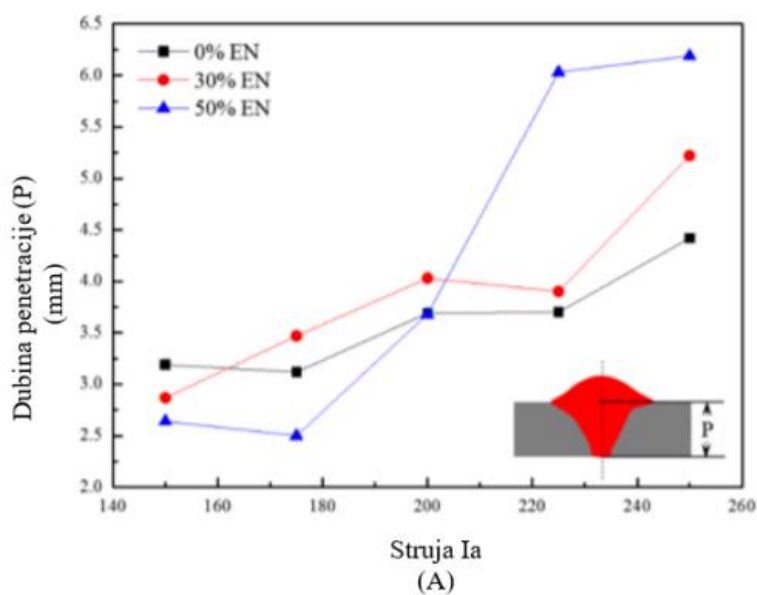
Slika 25: Utjecaj balansa na geometriju zavora [22]

Parametri geometrije zavora: dubina penetracije (P), širina zavora (W), visina zavora (R) u ovisnosti o EN omjeru i jakosti vidljivi su na slici 26. na slijedećoj stranici.

Kod manje jakosti struje dubina penetracije se smanjuje. Na manjim jakostima struje s povećanjem EN omjera do 50% penetracija se smanjuje, međutim pri jakosti struje većoj od 200 A dolazi do promjene u rezultatima i s povećanjem EN omjera penetracija uvelike raste. To nam govori kako s velikim iznosom jakosti struje i EN omjerom ovaj postupak omogućava lako zavarivanje debljih materijala, to se jasnije može vidjeti na slici 27. [23]

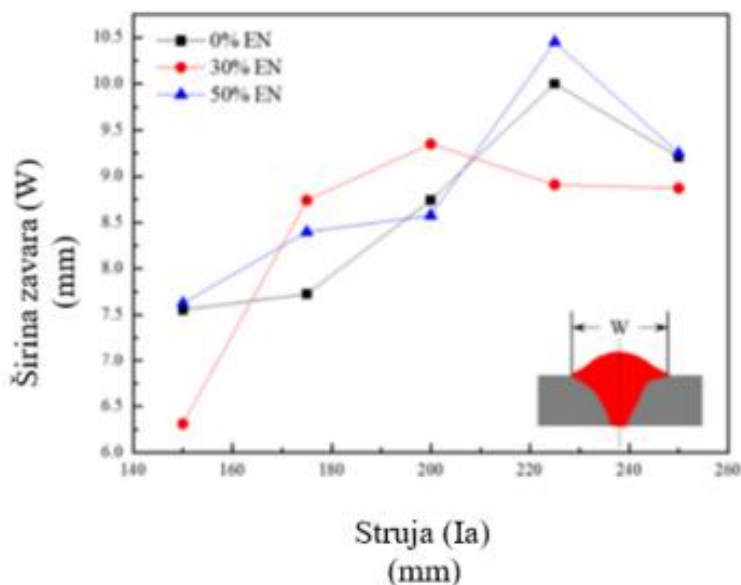


Slika 26: Ponašanje geometrije zavora u ovisnosti o jakosti struje i EN omjeru [23]



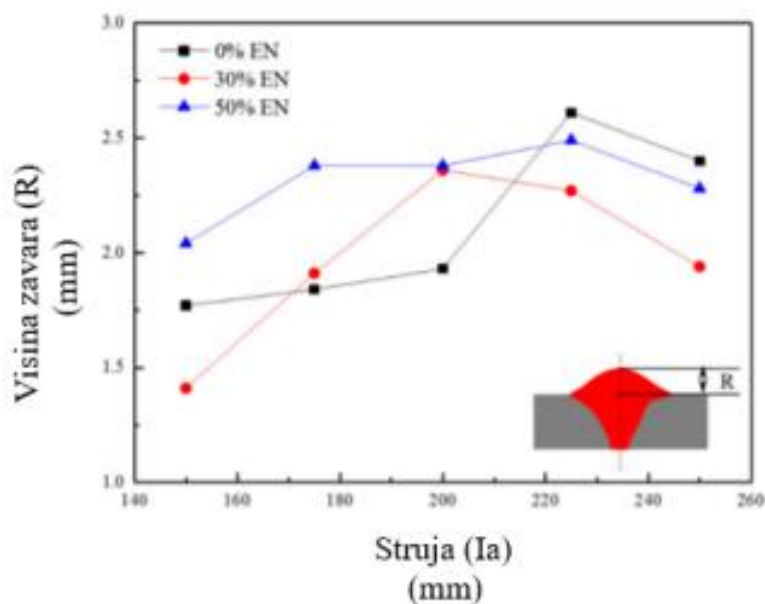
Slika 27: Ovisnost dubine penetracije o jakosti struje za različite EN omjere [23]

S povećanjem jakosti struje, na EN omjerima od 30% i 50% vidljivo je da se i širina zavara povećala. S time da je rast veći pri EN od 30%. Ipak, suprotno prethodnoj tvrdnji, s porastom jakosti struje iznad 225 A dolazi do smanjenja širine zavara, to se događa zbog dubokog prodiranja rastaljenog materijala u nastali zavareni spoj. Na EN omjeru od 0% širina zavara ima nagli porast u srednjem području jakosti struje od 170 do 220 A. Maksimalna širina postignuta je na struji 225A i EN omjeru od 50% (Slika 28).



Slika 28: Ovisnost širine zavara o jakosti struje za različite EN omjere [23]

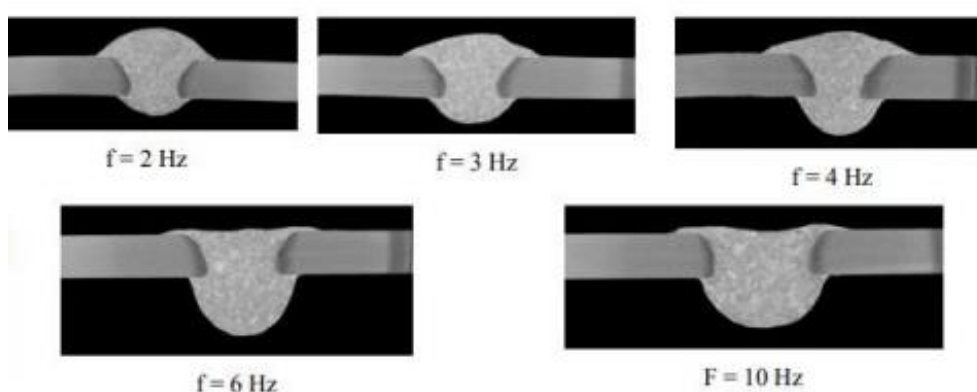
Kao što je vidljivo na slici 29, visina zavara i nadvišenje se povećavaju zajedno s jakosti struje i EN omjerom od malih iznosa jakosti struje sve do približno 225 A gdje počinje naglo padati.



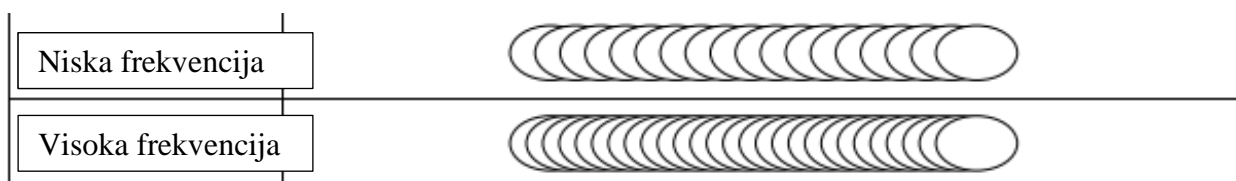
Slika 29: Ovisnost visine nadvišenja o jakosti struje za različite EN omjere [23]

4.3. Utjecaj frekvencije

Još jedan oblik korištenja izmjenične struje uključuje impulsno zavarivanje izmjeničnom strujom. Frekvencija pri impulsnom zavarivanju utječe na dubinu penetracije pomoću regulacije unosa topline u zavar kao što je vidljivo na slici 30. Jedan Herz (1 Hz) predstavlja jedan impuls po sekundi, odnosno promjenu od bazne jakosti struje do vršne. To znači da je vrijeme jednog impulsa jednako jednoj sekundi. Tako je za frekvenciju iznosa dva Hz impulsu potrebno pola sekunde da se završi. Frekvencija kontrolira koliko brzo želimo da se impulsi odvijaju. Na slici 31. prikazan je izgled zavara pri nižoj i višoj frekvenciji. [24][25]



Slika 30: Utjecaj različitih iznosa frekvencije na geometriju zavara (materijal: aluminij, postupak:AC MIG impulsno zavarivanje)[24]



Slika 31: Izgled zavara pri niskim i visokim iznosima frekvencije [26]

Ispod 3 Hz jasno se vide nakupine dodatnog materijala na zavaru koje liče na „ljuskice“ koje se preklapaju i daju zavaru karakterističan i lijep izgled. Povećavanjem frekvencije „ljuskice“ postaju zbijenije jedna uz drugu, dok pri iznosima većim od 5 Hz gubi se izgled „ljuskica“. Važno je napomenuti kako je efekt „ljuskica“ ovisi o vrsti materijala koji se zavaruje te brzini zavarivanja i unesenoj toplini. Pomoću ovakve vrste zavarivanja moguće je postići vizualno kvalitetnije zavare, a i moguće je i prelaziti preko ranije napravljenih zavara kako bi dobili ljepši vanjski izgled. [26]

5. EKSPERIMENTALNI RAD

Eksperimentalni rad izrađen je s ciljem poboljšanja već postojeće tehnologije MIG zavarivanja uz pomoć upotrebe izmjenične struje. Točnije, korištenjem AC MIG impulsnog postupka zavarivanja. U poglavlju 5.1. navedena je postojeća tehnologija koja je unaprijeđena novom tehnologijom dobivenom ovim eksperimentom. Eksperiment je izveden što sličnije postojećoj tehnologiji postupka. Pomoću variranja značajki izmjenične struje poput balansa i frekvencije postignuti su zadovoljavajući rezultati. Provedena su 3 zavarivanja jednostranih kutnih zavara vertikalnom tehnikom prema gore, s različitim parametrima, kako bi se utvrdila najkvalitetnija tehnologija. Zatim, nakon analize geometrije zavara, zavaren je obostrani kutni spoj, te je navedena usporedba rezultata s konvencionalnim postupkom.

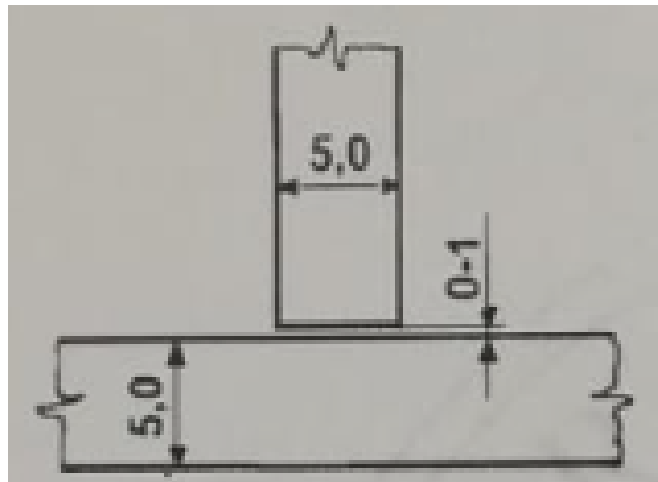
5.1. Konvencionalni postupak zavarivanja

Karakteristike i parametri tehnologije konvencionalnog MIG postupka zavarivanja su:

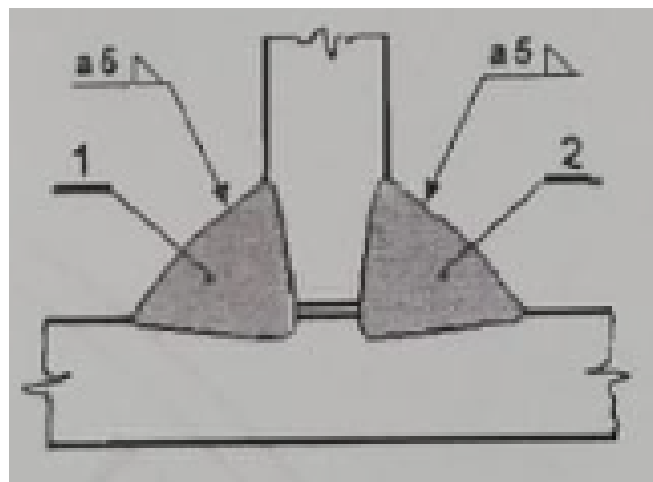
- Impulsno MIG zavarivanje
- Jakost struje: $I_g = 130$ A, $I_d = 80$ A , nazivna struja $I = 110$ A
- Polaritet struje DC (+)
- Napon: 20 V
- Frekvencija: 50 Hz
- Klasifikacija postupka prema HRN EN ISO 4063 : postupak 131 (MIG zavarivanje punom žicom)
- Vrsta spoja: T- oblik zavara
- Specifikacija osnovnog materijala: 22.4 (EN AW 5083)
- Debljina osnovnog materijala: 5mm
- Položaj zavarivanja: PF položaj (Vertikalno zavarivanje odozdo prema gore)
- Zaštitni plin: Argon (100 % Ar), HRN EN ISO 14175:11
- Protok plina: 18 l/min
- Brzina zavarivanja:
 - 1) 26,5 cm/ min
 - 2) 26,1 cm/ min
- Visina zavara:

- 1) $a = 6 \text{ mm}$
- 2) $a = 5 \text{ mm}$

Detalji pripreme zavara (skica):



Slika 32: Priprema prije zavarivanja i debljine ploče



Slika 33: Provedeno zavarivanje

Kao osnovni materijal koristila se legura aluminija: EN AW 5083. Karakterizira je velika otpornost na morska i industrijska okruženja. Legura je izrazito otporna na korozijsko djelovanje i ekstremnu okolinu. U tablici 3. prikazana su mehanička svojstva legure, a na tablici 4. vidljiv je kemijski sastav. Za dodatni materijal koristila žica proizvođača SAF-FRO ALUFIL: AlMg4.5Mn.

Promjer žice iznosi je 1,2 mm. Sličnog je kemijskog sastava kao i legura osnovnog materijala, a time i ima slična svojstva.

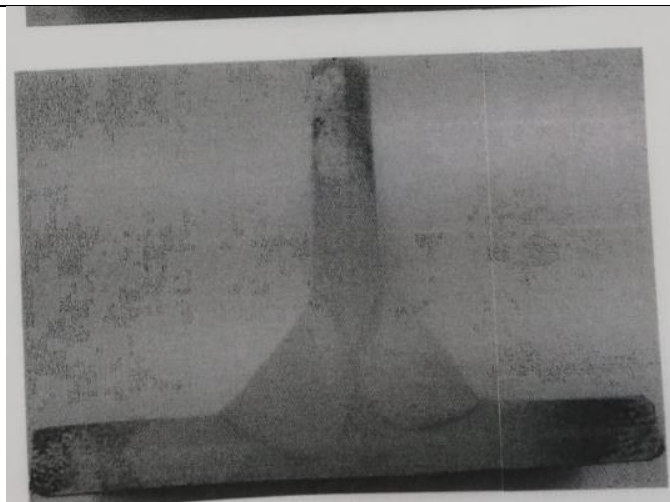
Tablica 3: Mehanička svojstva osnovnog materijala [27]

Gustoća, g/cm ³	2,66
Modul elastičnosti, kN/mm ²	71
Vlačna čvrstoća, MPa	300
Tvrdoća, HB	75
Toplinska provodnost, W/mK	118
Električna vodljivost, % IACS	28,6
Granica elastičnosti, MPa	192

Tablica 4: Kemijski sastav osnovnog materijala [27]

Al	92,4-95,7 %
Cr	0,05-0,25 %
Cu	<0,10 %
Fe	<0,40 %
Mg	4,0-5,0 %
Mn	0,4-1,0 %
Si	<0,45 %
Zn	<0,20 %

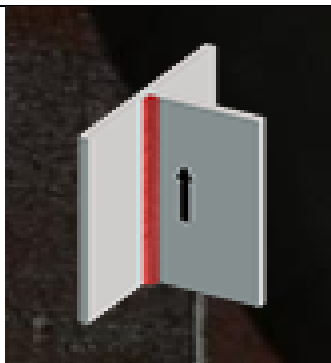
Na slici ispod prikazan je uzorak nakon makroispitivanja. Aluminij je nagrižen otopinom NaOH, natrijev hidroksid. Prikazana je geometrija nastalih zavara.



Slika 34: Geometrija zavora nastala MIG postupkom

Problematika postupka je upravo položaj zavarivanja PF. Vertikalno zavarivanje je zahtjevnije od preferiranih i češće korištenih položaja poput ravnog zavarivanja (1F) ili horizontalnog zavarivanja (2F). U PF položaju zbog utjecaja gravitacije rastaljeni metal se vraća prema dolje i ima tendenciju skupljanja i formiranja nakupina. Upravo zbog toga je potrebno usporiti proces zavarivanja kako bi se spriječila ta pojava. U vertikalnom zavarivanju postoje dvije varijacije: prema gore i prema dolje. Prilikom zavarivanja prema gore, kao u našem slučaju, zavarivač mora dodatno savladavati gravitacijsku silu i time je brzina zavarivanja manja. Dok u zavarivanju prema dolje gravitacijska sila pomaže vodeći talinu u smjeru zavarivanja. [4]

Slika 35. prikazuje PF položaj.



Slika 35: PF položaj zavarivanja [7]

Rezultat koji je potrebno postići prilikom upotrebe AC MIG zavarivanja je veća brzina uz jednaku ili bolju kvalitetu nastalih zavara te istu visinu šava iznosa 5-6 mm.

5.2. Oprema za zavarivanje

Za postupak zavarivanja korišten je uređaj „Welbee Inverter W400“ proizvođača OTC Daihen (Slika 36). Uređaj ima više različitih mogućnosti zavarivanja, a u ovom eksperimentu je korišten postupak AC MIG impulsnog zavarivanja. Eksperiment je proveden u Laboratoriju za zavarivanje na Fakultetu strojarstva i brodogradnje.



Slika 36: Uređaj za zavarivanje Welbee Inverter W400

Tablica 3. prikazuje tehničke karakteristike navedenog uređaja

Tablica 3: Tehničke karakteristike uređaja Welbee Inverter W400 [26]

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
Balans (EN omjer)	(-50) – (+50)
Masa, kg	86
Dimenzije, mm	395 x 710 x 762

5.3. Osnovni i dodatni materijal

Osnovni materijal koji se koristio je aluminijska legura 5086, kao i u slučaju s kojim se uspoređuje. Glavne karakteristike i kemijski sastav već je naveden u tablicama 1. i 2.

Materijal žice, odnosno dodatni materijal, je AlMg₅ (Slika 37). To je aluminijska legura s 5% udjela Mg. Uobičajeno se koristi pri zavarivanju aluminijskih legura: Al-Mg i Al-Mg-Si. Debljina dodatnog materijala je 1,2 mm. Sastav dodatnog materijala također je sličan sastavu osnovnog materijala. Vrlo je bitno da su osnovni i dodatni materijal sličnih karakteristika i kemijskog sastava kako bi pri zavarivanju došlo do stvaranja kvalitetnog zavarenog spoja. Kemijski sastav žice prikazan je u slijedećoj tablici 6. zajedno s mehaničkim svojstvima dodatnog materijala .



Slika 37: Namotaji žice na uređaju, AlMg5

Tablica 6: Kemijski sastav i mehanička svojstva aluminijske legure AlMg5 [27]

Kemijski sastav AlMg5	
Al	Bal.
Mg	5,00%
Mn	0,15%
Cr	0,10%
Si	0,05%
Fe	0,15%
Mehanička svojstva AlMg5	
$R_{p0,2}$	120 N/mm ²
R_m	260 N/mm ²
A_s	>25%

Zaštitni plin koji se koristi za zavarivanje aluminijske legure je argon. Trgovački naziv zaštitnog plina je Argon 5.0 u kojem je volumni udio argona 99,999%. Prema normi EN ISO 14175:2008 naziva se EN 439-II. Korišteni protok plina pri postupku zavarivanja iznosi 19 l/min. (Slika 38.)



Slika 38: Manometar sa zadanim protokom zaštitnog plina

5.4. Postupak eksperimenta

Ploče dimenzija 100x300 mm i debljine 8 mm je prije postupka zavarivanja bilo potrebno pripremiti. Ploče su očišćene metalnom četkom radi skidanja sloja oksida s površine te nakon toga isprane u alkoholu. Označene su prije zavarivanja radi lakšeg praćenja postupka. Slike pripremljenih ploča prikazane su na slici 39.



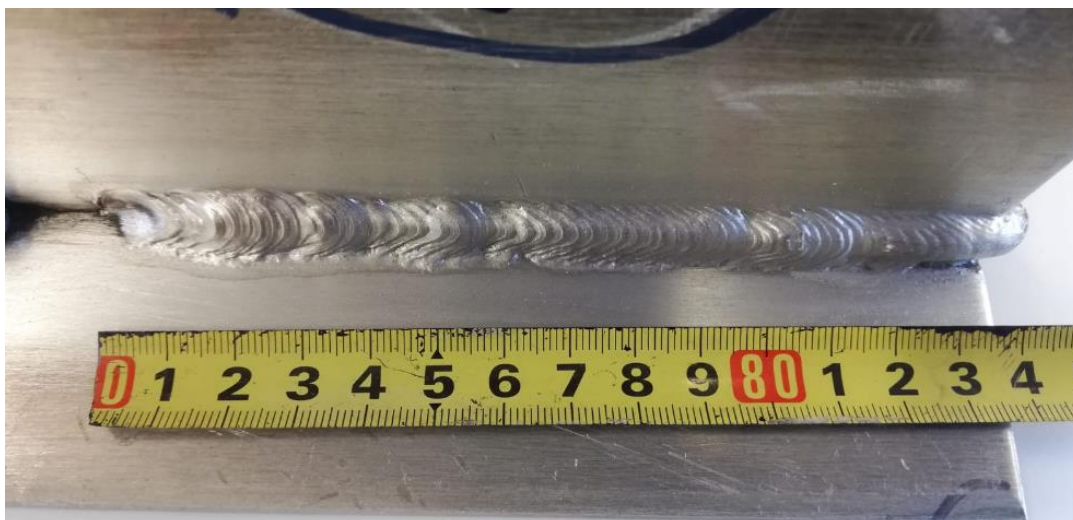
Slika 39: Priprema osnovnog materijala

Nakon pripreme ploča postavljeni su parametri zavarivanja na uređaju za zavarivanje. U tablici 7. nalaze se brojevi uzoraka i navedeni su parametri zavarivanja za svaki pojedini uzorak. Uzorci su zavareni u PF položaju.

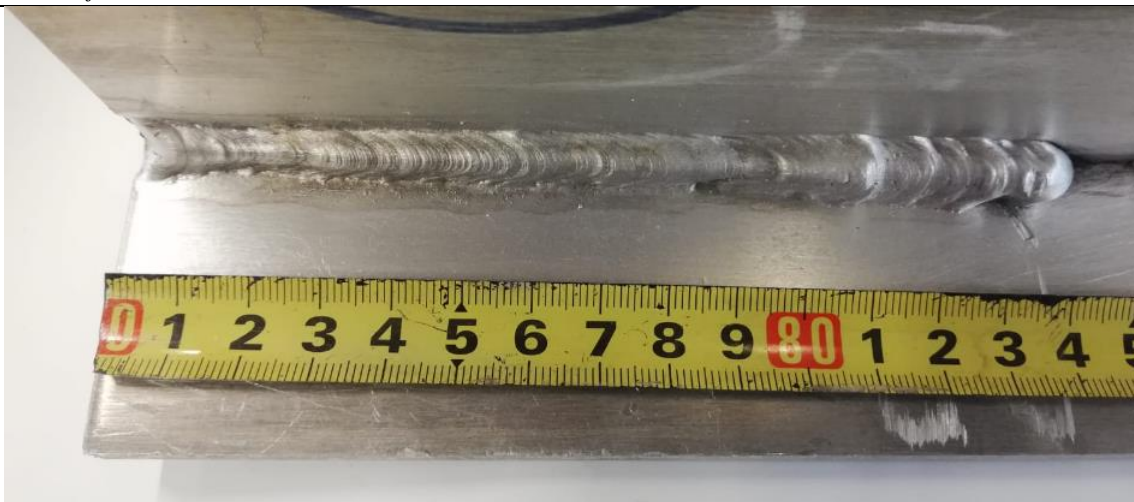
Tablica 7: Uzorci i parametri uzoraka eksperimenta

Broj uzorka	Nazivna Struja, A	Nazivni napon, V	Zadani iznos balansa -	Zadana frekvencija, Hz
1	200	23,5	0	3
2	200	23,5	+30	3
3	200	23,5	-30	3

Na slikama 40,41 i 42 prikazani su uzorci nakon zavarivanja. Prilikom zavarivanja koristila se zaštitna oprema za zavarivanje: zaštitna maska, rukavice i kuta. Za vrijeme zavarivanja mjereno je vrijeme zavarivanja da bi se dobila brzina zavarivanja te je snimano ponašanje parametara struje i napona prilikom zavarivanja za izračun srednjih vrijednosti istih.



Slika 40: Uzorak 1 (Balans postavljen na 0)



Slika 41: Uzorak 2 (Balans postavljen na -30)



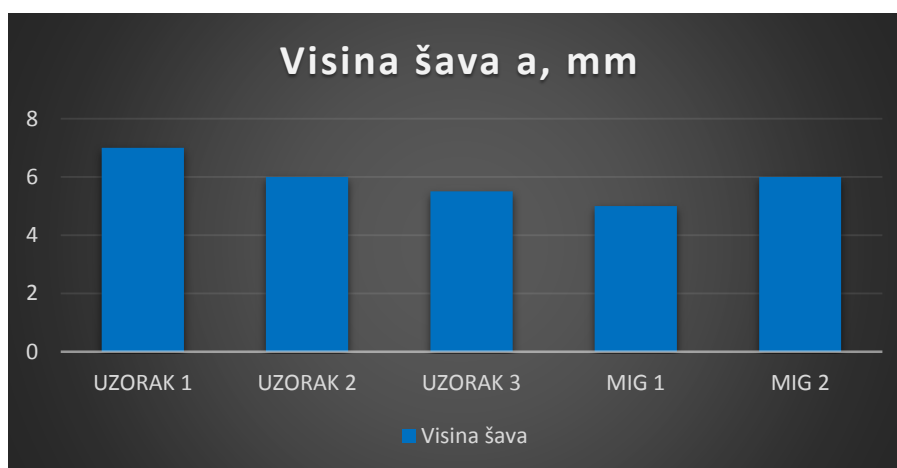
Slika 42: Uzorak 3 (Balans postavljen na +30)

Vizualno su postignuti zadovoljavajući rezultati. Tablica 8. sadrži stvarne parametre i karakteristike izrađenih zavara. MIG 1 i MIG 2 označavaju zavare 1 i 2 izrađene tehnologijom iz poglavlja 4.1.

Tablica 8: Karakteristike zavarenih uzoraka i postojeće tehnologije

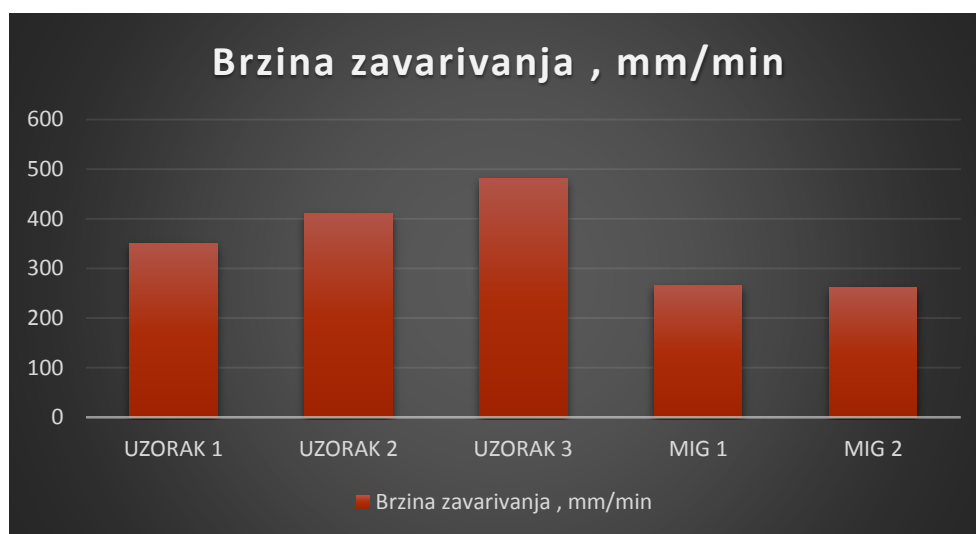
Redni broj uzorka	Srednja jakost struje I_{sr} , A	Srednji napon, V	Visina šava a , mm	Brzina zavarivanja, mm/min
UZORAK 1	213	22,9	6,2	350
UZORAK 2	211	23	6,9	410
UZORAK 3	208	23,2	5,2	480
MIG 1	110	20,5	5	265
MIG 2	110	20,5	6	261

Usporedba visine šavova uzoraka i postojeće tehnologije nalazi se na slici 43 ispod.



Slika 43: Usporedba visine šavova uzoraka i postojeće tehnologije

Usporedba brzina zavarivanja uzoraka s postojećom tehnologijom prikazano je na slici 44.



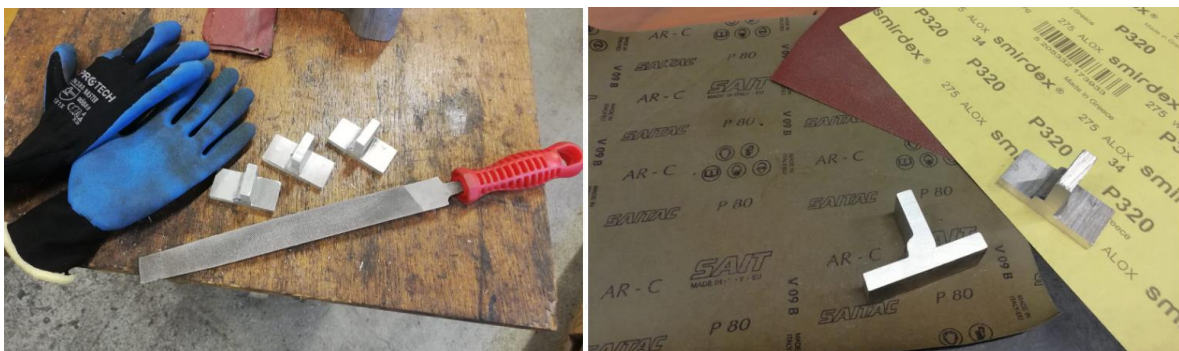
Slika 44: Usporedba brzina zavarivanja uzoraka i postojeće tehnologije

Nakon izrade zavora izrezani su sitni uzorci da bi bila vidljiva geometrija zavora. Ploče su izrezane na odabranim mjestima pomoću pile za rezanje metala „BS 350 GH“ . (Slika 45)



Slika 45: Rezanje uzoraka na pili BS 350 GH

Nakon rezanja, s uzoraka je potrebno skinuti oštre rubove turpijom za lakše rukovanje te obraditi površine kako bi se dobio valjan prikaz geometrije makroizbrusaka. Površine su obrađene ručno suhim brušenjem pomoću brus papira s granulacijama 80,150,320. (Slika 46.)



Slika 46: Skidanje oštih rubova i brušenje uzoraka

Nakon ručnog brušenja, prije nagrizanja otopinom, uzorke je potrebno fino polirati na stroju za brušenje makroizbrusaka, „Mecatech 250 SPI“, granulacijama P600, P1000 pa P1500. Brzina okretanja ploče je 300 okr/min uz hlađenje i podmazivanje vodom. Stroj je prikazan na slici 47. ispod.



Slika 47: Stroj za brušenje makrouzoraka Mecatech 250 SPI

Kako bi geometrija zavara bila vidljiva po presjeku izbrušene površine potrebno je nagristi odgovarajućom otopinom s obzirom na vrstu metala o kojoj se radi. Otopina je prikazana na slici 46. ispod. Uzorke aluminijski držani su dvije i pol minute u otopini za dobivanje zadovoljavajućeg rezultata. U tablici 9. nalazi se kemijski sastav otopine.

Tablica 9: Kemijski sastav otopine za nagrizanje aluminijski

Ime spoja	Količina, ml
HCl	15
HF	10
H ₂ O	85

5.5. Analiza rezultata

U ovom poglavlju analizirani su rezultati zavarivanja: makroanaliza uzoraka, analiza postupka zavarivanja i analiza deformacija.

5.5.1. Analiza makroizbrusaka

Ispitivanje makroizbrusaka sastoji se od vizualnog pregleda poprečnog presjeka zavarenog spoja golim okom. Nakon nagrizanja makroizbrusaka, oni su poslikani na postolju prikazanom na slici 49.



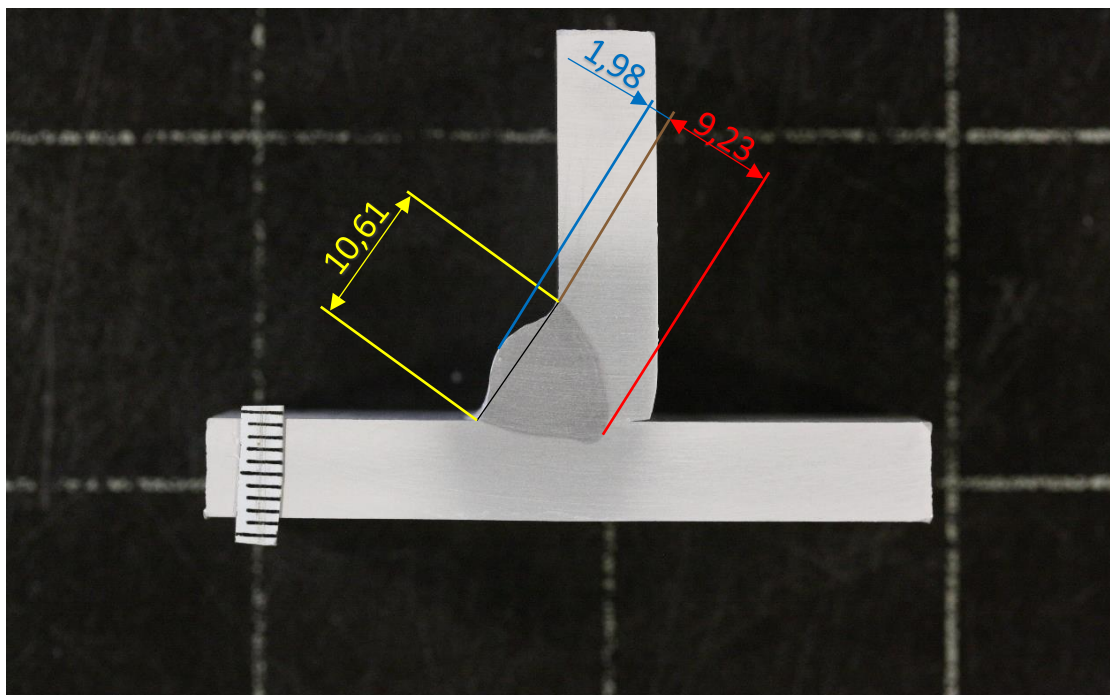
Slika 49: Postolje za slikanje makrostrukture

Iznosi dubine penetracije i visine šava zavara izmjereni su pomoću programa ImageJ. Tablica 10. prikazuje penetraciju, širinu i nadvišenje zavara za pojedini uzorak.

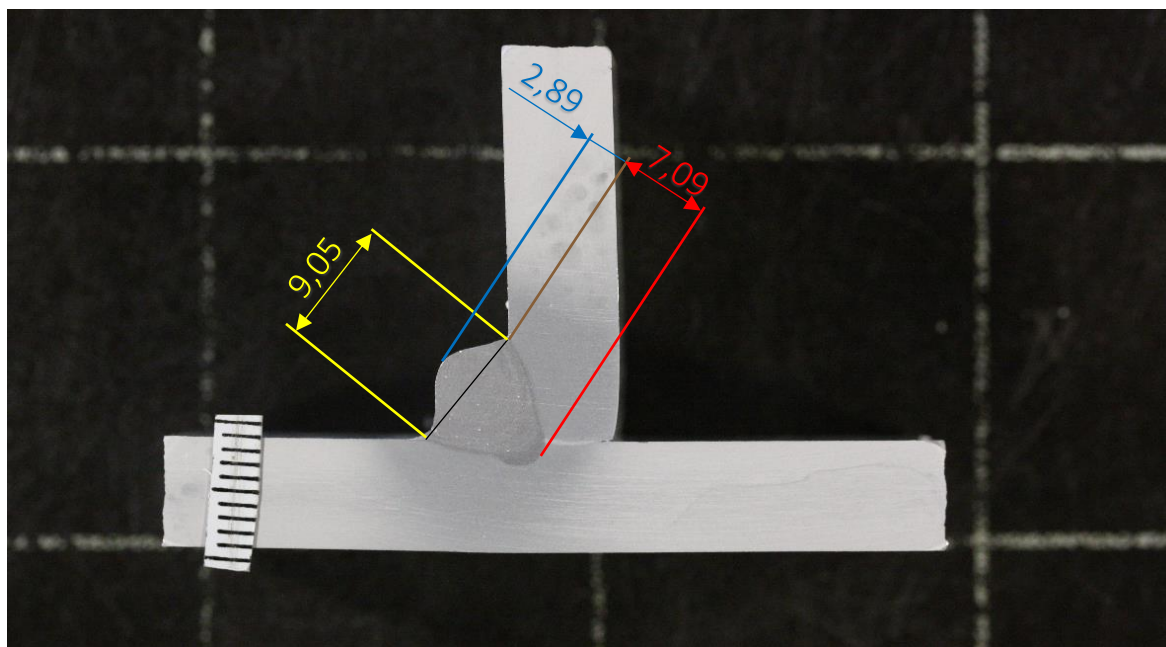
Tablica 10: Dimenzije geometrija zavara po poprečnom presjeku

Redni br. uzorka	Penetracija (P), mm	Širina (W), mm	Nadvišenje (R), mm	Visine šava a , mm
1	9,23	10,61	1,98	6,2
2	7,09	9,05	2,89	6,9
3	6,12	9,41	1,51	5,2

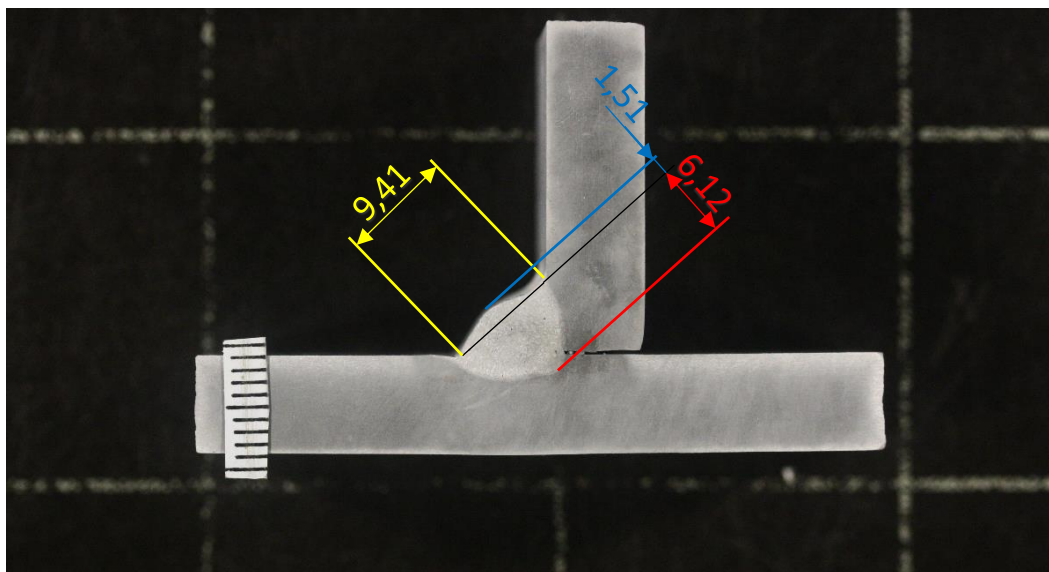
Na slijedećim slikama 50,51. i 52. prikazani su makrouzorci sa prikazanim dimenzijama geometrije zavara.



Slika 50: Prikaz geometrije uzorka br. 1



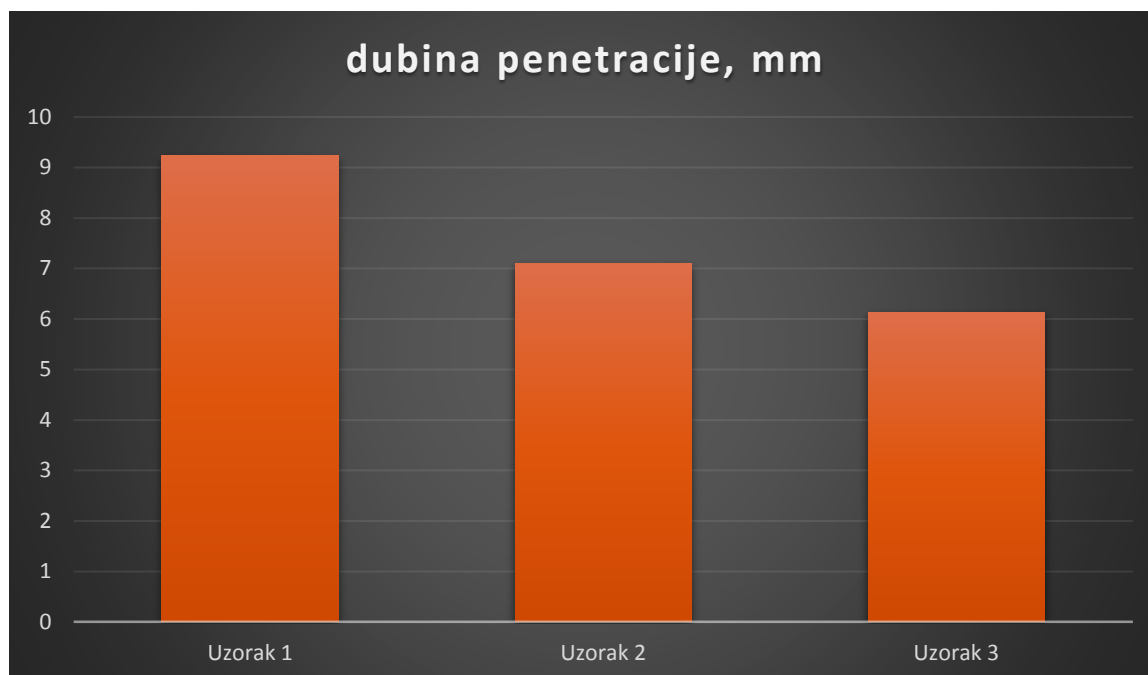
Slika 51: Prikaz geometrije uzorka br. 2



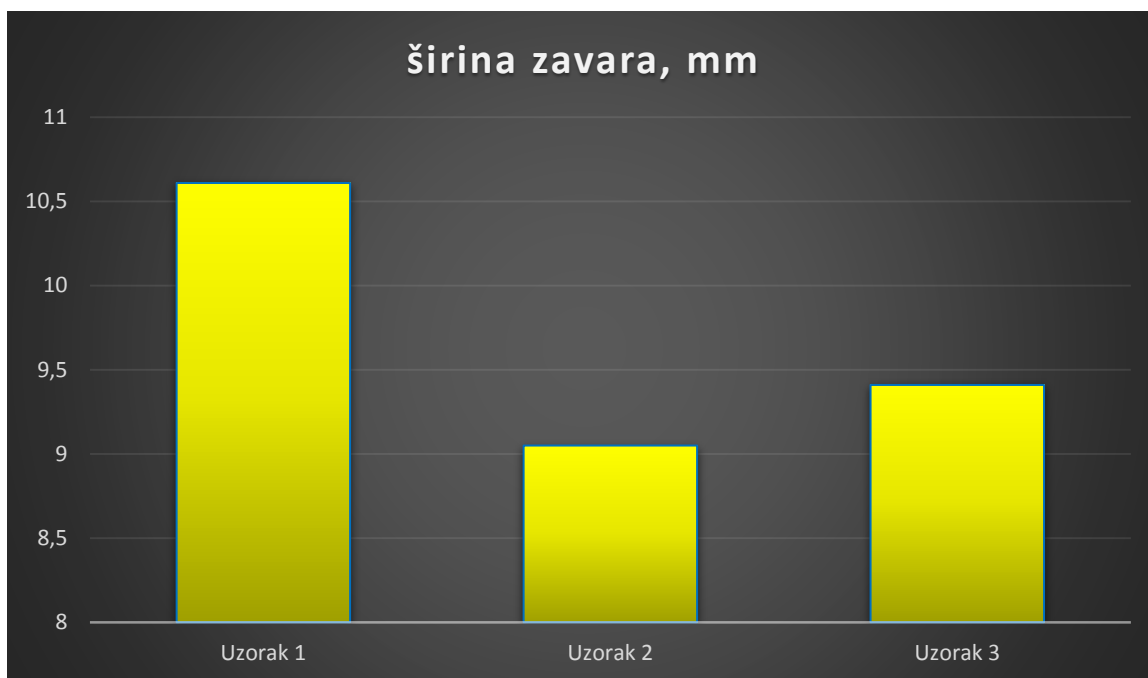
Slika 52: Prikaz geometrije uzorka br. 3

Kao što se može vidjeti u rezultatima uvjet da postignuta visina šava „a“ ne prelazi 6 mm zadovoljen je u uzorku 3. Također, u tom uzorku je penetracija ravnomjerno raspoređena po obje ploče.

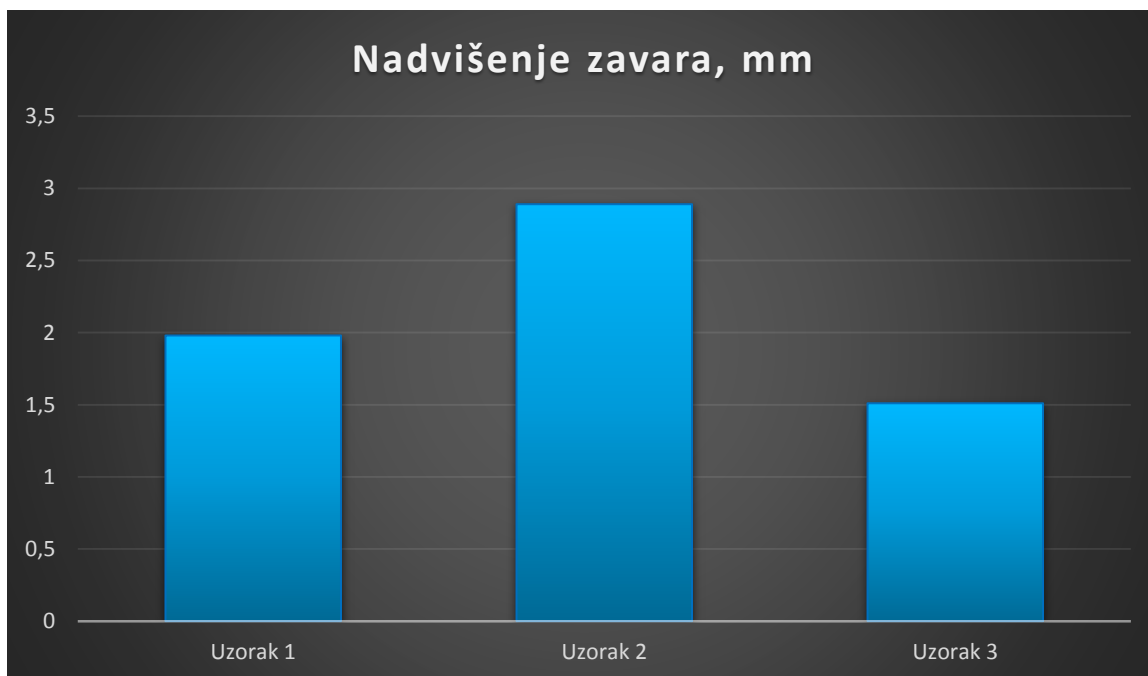
Na slikama 53, 54 i 55 nalaze se dijagrami penetracije, širine i nadvišenja uzoraka.



Slika 53: Histogramski prikaz dubine penetracije uzoraka



Slika 54: Histogramski prikaz širine zavora uzoraka



Slika 55: Histogramski prikaz nadvišenja zavora uzoraka

Analizom geometrije doneseni su slijedeći zaključci. Na uzorku 1, gdje je balans postavljen na 0, dubina penetracije je prevelika. U uzorku 2, iz dobivenih rezultata, vidimo kako je nadvišenje preveliko. Stoga, osim što uzorak 3 zadovoljava visinu šava zavara, i u geometriji pokazuje najbolje rezultate.

5.5.2. Analiza postupka zavarivanja

Usporedimo li brzine zavarivanja svih uzoraka možemo vidjeti kako je najveća brzina zavarivanja postignuta upravo na uzorku broj 3. u iznosu od 48,0 cm/min prema tablici 6. U analizi makroizbrusaka također uzorak 3. dao zadovoljavajuće rezultate poput dubine penetracije i nadvišenja zavara.

S obzirom na navedene razloge parametri kojima je zavarivan obostrani kutni zavar su oni kojima smo zavarili uzorak 3.

5.6. T spoj zavaren AC MIG postupkom zavarivanja

Na pripremljenu ploču vertikalno zavarujemo drugu ploču, te pritom na uređaju postavljamo navedene parametre:

- Jakost struje: 200 A
- Napon: 23,5 V
- Balans: -30
- Frekvencija: 3 Hz

Nakon zavarivanja jedne strane, nakon hlađenja ploča na sobnu temperaturu, zavarena je druga strana s istim parametrima. Na slici 56. ispod prikazan je dobiveni zavareni spoj.



Slika 56: Zavareni T spoj

Zavari su označeni znamenkama A i B Postignuti rezultati zavarivanja prikazani su u tablici 11. Slika 57. prikazuje mjerku pomoću koje je provjerena visina šava zavara.

Tablica 11: Rezultati zavarivanja zavara 1 i 2

ZAVARI	Srednja struja zavarivanja, A	Srednji napon zavarivanja, V	Visina šava zavara, mm	Brzina zavarivanja, mm/min
Zavar A	212	23,1	5,5	460
Zavar B	213	23,2	5,4	470



Slika 57: Mjerenje visine šava zavara

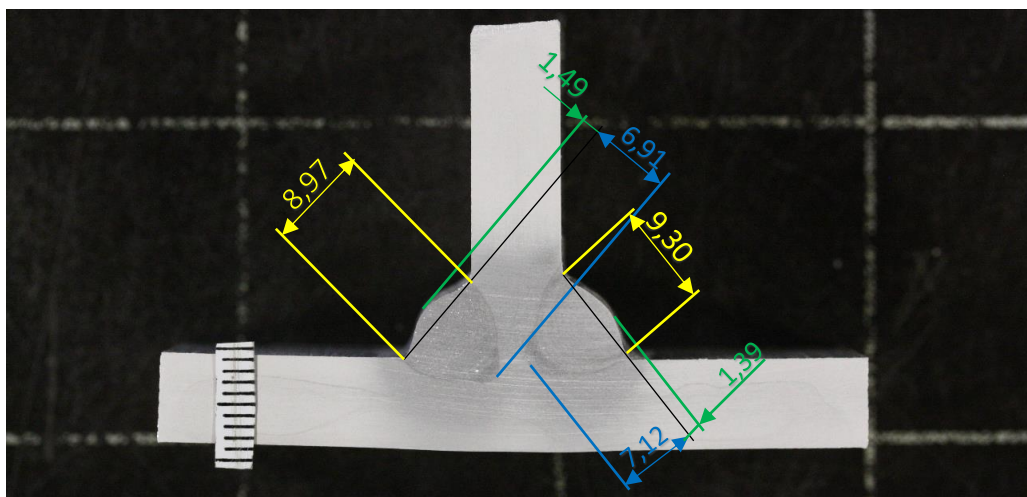
Postignuti rezultati zavarivanja su zadovoljavajući. Porast brzine zavarivanja u odnosu na konvencionalni postupak iznosi približno 80%

Uzorci zavara su izrezani, izbrušeni i polirani. Odnosni su, prvo na nagrizanje, pa makroanalizu kako bismo mogli vidjeti postignutu geometriju zavara.

Slika 58. prikazuje zavare A i B i njihove dimenzije dubine penetracije, nadvišenja i širine zavara. Dimenzije su prikazane u tablici 12.

Tablica 12: Dimenzije geometrije zavara 1 i 2

ZAVARI	Dubina penetracije, mm	Širina zavara, mm	Nadvišenje zavara, mm
Zavar A	6,91	8,97	1,49
Zavar B	7,12	9,3	1,39



Slika 58: Makroizbrusak T spoja s označenim dimenzijama zavara 1 i 2

Na slici je vidljivo kako su penetracija, širina i nadvišenje zavara zadovoljavajući. Na zavarenom mjestu nema vidljivih nepravilnosti.

5.7. Analiza deformacije zavarenog T spoja

Prilikom izrade zavarenog spoja ploče koje su se zavarivale nisu bile stegnute za radni stol. Zbog tog razloga prilikom hlađenja zavara, došlo je do skupljanja rastaljenog materijala što je rezultiralo deformacijom radnog komada. Pomoću programa ImageJ izmjerena je kutna deformacija radnog komada. Kutna deformacija iznosi $2,02^\circ$.

Ukoliko želimo ukloniti kutnu deformaciju pri zavarivanju, potrebno je stegnuti radni komad za površinu na kojoj se zavaruje.

Slika 59. prikazuje nastalu deformaciju.



Slika 59: Kutna deformacija zavarenog spoja

6. ZAKLJUČAK

U današnje vrijeme, industrija teži sve kvalitetnijim materijalima s vrhunskim karakteristikama, a opet s prihvatljivom cijenom. Aluminijske legure su upravo jedan od tih materijala zbog svojih specifičnih svojstava. Velike grane industrije poput građevinske, prehrambene, farmaceutske i automobilske industrije koriste se ovim materijalom. Upravo zbog svoje raznovrsne upotrebe je jedan od najkorištenijih materijala u današnje doba. Uz malu masu, povoljan omjer gustoće i čvrstoće, vrlo dobru električnu vodljivost te dobra mehanička svojstva aluminijske legure ima i svojstvo jako dobre zavarljivosti. Kako bi zavarljivost bila dobra potrebno je koristiti i odgovarajući postupak zavarivanja. Aluminijske legure se uobičajeno zavaruje TIG ili MIG postupkom zavarivanja. Noviji zahtjevi za kvalitetom i visokom produktivnošću razvili su ove postupke na različite načine. Jedan od razvoja MIG postupka je upravo upotreba modificiranog načina korištenja MIG zavarivanja pomoću izvora izmjenične struje. Korištenjem pravilno zadanih parametara poput jakosti struje, napona, brzine zavarivanja, protoka i vrste zaštitnog plina moguće je ostvariti zavare izrazito dobre kvalitete relativno ekonomične proizvodnje.

U eksperimentalnom dijelu je pomoću tehnologije AC MIG zavarivanja postignuti su izvrsni rezultati. Iako na spomenute poteškoće zavarivanja u PF položaju, variranjem parametra balansa na iznos od -30 postignuta je najbolja geometrija. Povećana je brzina zavarivanja u odnosu na konvencionalni način zavarivanja MIG postupkom od čak 80%. Analizom nastalih uzoraka uspoređene su i geometrije s konvencionalnim postupkom. Porast brzine zavarivanja upućuje kako je ovim postupkom moguće postići puno veću produktivnost u odnosu na klasičan MIG postupak. Pomoću AC Wavepulse MIG postupka nije bilo potrebe za njihanjem što zavarivaču olakšava postupak zavarivanja. Korištenjem ovog postupka značajno se unapređuje postupak zavarivanja aluminijskih legura. Ukoliko se radi o postupku zavarivanja aluminijske legure, upotreba AC MIG postupka biti će neophodna u skoroj budućnosti kako bi zavarivačke industrije ostale konkurentne. Također, automatizacijom postupka moguće je još više unaprijediti postupak i dobiti još bolje rezultate.

LITERATURA

- [1] K. Weman i G. Linden, MIG welding guide, Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 2006.
- [2] (Mrežno) A. Berk, Welding Mastermind, 2022.
<https://weldingmastermind.com/understanding-ac-and-dc-for-mig-welding/> ,
pristupljeno 2.9.2022.
- [3] (Mrežno) Slika <http://bs.tianqiaowelding.com/news/four-positions-of-electric-welding-and-welding-points-overhead-welding-flat-welding-vertical-welding-and-horizontal-welding/> , pristupljeno 2.9.2022.
- [4] I. Garašić, MIG/MAG-prezentacije, Zagreb, 2019.
- [5] S. Kralj, Š. Andrić: Osnove zavarivačkih i srodnih postupaka, Sveučilište u Zagrebu, FSB, Zagreb, 1992.
- [6] M. Horvat, V. Kondić, D. Brezovečki: Opravdanost primjene MAG forceArc postupka zavarivanja u izradi čeličnih konstrukcija, Tehnički glasnik, br. 8, 2014., str. 288-294
- [7] Lincoln Electric Company: Gas Metal Arc Welding Guidelines, Cleveland, Ohio, 2006.
- [8] (Mrežno) Canadian centre for welding CCWJ,
<https://www.ualberta.ca/~ccwj/videos/pages/Intro%20High%20Speed/index3.html#wires> , pristupljeno 2.9.2022.
- [9] M. Horvat, V. Kondić: Primjeri modificiranih postupaka MIG/MAG zavarivanja, Tehnički glasnik br. 6, 2012. , str. 137-140
- [10] T.M.V-B.Rosado: „Innovation in the MIG/MAG Process: Productivity analysis and Fume Emissions“, Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal, 2007.
- [11] K.Himmelbauer: „Postupak CMT-novo u zavarivačkoj tehnologiji“, Zavarivanje vol.51, pp. 115.-121., 2008.
- [12] M.Bajs: „Primjena i specifičnosti modificiranih MAG postupaka“, Završni rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2013.
- [13] B.Budig: „EWM-forceArc: Novi koncept prijenosa za MIG/MAG zavarivanje“, Zavarivanje vol.55, pp. 21.-27.
- [14] K.Shinagawa: Essential factors in gas metal arc welding, Kobe Steel LTD, 4. izdanje, Tokio, 2011.
- [15] (Mrežno) A. Berk, Welding Mastermind, 2022.
<https://weldingmastermind.com/understanding-ac-and-dc-for-mig-welding/> ,
pristupljeno 4.9.2022.

- [16] Ron Cobden, Alcan, Banbury, Aluminum: Physical Properties, Characteristic and Alloys, European Aluminium Association, 1994.
- [17] G. Mathers, The welding of aluminium and its alloys, Cambridge: CRC Press, 2002.
- [18] S. Brumm, G. Bürkner: Gas metal arc pulse welding with alternating current for lightweight materials, Conference MEFORM 2015, Light Metals – Forming Technologies and Further Processing, 2019.
- [19] M. Gojić: Tehnike spajanja i razdvajanja materijala, Metalurški fakultet, Sisak, 2003.
- [20] 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, 2010.
- [21] Daihen Corporation, Welbee Inverter W400 Owner's Manual, Osaka, 2016.
- [22] J. Adamiec i T. Pfeifer, Effect of Electrode Negative Ratio in AC MIG Welding of Aluminium, Solid State Phenomena Vol 211, pp. 39-46, 2013.
- [23] 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, 2017.
- [24] J. Adamiec i T. Pfeifer, Welding of Aluminium Alloy Thin Sheets Using Variable Polarity MIG Method, Solid State Phenomena Vol 211, pp. 15-22, 2013.
- [25] (Mrežno) <https://jattus.com/what-is-pulse-welding-and-what-do-you-use-it-for>, pristupljeno 9.9.2022.
- [26] Priručnik za upotrebu Welbee Inverter W400, AC/DC Pulsed MIG Welding Power Source
- [27] (Mrežno) AZO Materials, <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=2804>, pristupljeno 12.9.2022.
- [28] <https://repositorij.unin.hr/islandora/object/unin:829/preview>, pristupljeno 12.9.2022.