

Utjecaj helija u zaštitnom plinu na oblik spoja pri zavarivanju aluminijskih legura AC MIG postupkom

Toma, Dominik

Master's thesis / Diplomski rad

2024

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:965291>

Rights / Prava: [Attribution 4.0 International](#)/[Imenovanje 4.0 međunarodna](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-18**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Dominik Toma

Zagreb, 2024.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

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

Student:

Dominik Toma

Zagreb, 2024.

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

Zahvaljujem se mentoru prof. dr. sc. Ivica Garašić i asistentu mag. ing. mech. 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.

Zahvaljujem se svojoj obitelji i curi Tei na velikoj podršci tijekom izrade diplomskog rada i tijekom cijelog diplomskog studija.

Dominik Toma



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:
Proizvodno inženjerstvo, inženjerstvo materijala, industrijsko inženjerstvo i menadžment,
mehatronika i robotika, autonomni sustavi i računalna inteligencija

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

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Dominik Toma** JMBAG: 0035214140

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Utjecaj helija u zaštitnom plinu na oblik spoja pri zavarivanju aluminijevih legura AC MIG postupkom**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Influence of helium in gas shielding on weld shape in AC MIG welding of aluminium alloys**

Opis zadatka:

Primjena aluminijevih legura u proizvodnji zahtjeva i uvođenje modernih postupaka zavarivanja od kojih AC MIG postaje najčešći izbor u industriji. Na temelju literaturnog pregleda objasniti fiziku procesa zavarivanja punom žicom u električnom luku izmjenične struje. Posebno specificirati sve parametre koji određuju valni oblik struje te njihov utjecaj na operativne karakteristike zavarivanja. Dodatno navesti vrste plinova koje se koriste za zavarivanje aluminija te posebno analizirati utjecaj helija na stabilnost procesa i oblik spoja.

U eksperimentalnom dijelu potrebno je razraditi odgovarajući plan zavarivanja uz primjenu AC MIG postupka na aluminijevim legurama. Odabrati dodatni materijal kao i prikladnu zaštitnu plinsku mješavinu s određenim udjelom helija. Za više razina unosa topline i balansa polariteta ocijeniti utjecaj helija na stabilnost električnog luka i prijenos metala. Na zavarenim spojevima provesti ispitivanja makrostrukture i oblika zavara te u konačnici donijeti zaključke o prednostima i nedostacima primjene helija u inertnim zaštitnim mješavinama.

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

Zadatak zadan:

18. siječnja 2024.

Datum predaje rada:

21. ožujka 2024.

Predviđeni datumi obrane:

25. – 29. ožujka 2024.

Zadatak zadao:

Prof. dr. sc. Ivica Garašić

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Ivica Garašić

SADRŽAJ

POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA.....	V
POPIS OZNAKA	VI
POPIS KRATICA	VII
SAŽETAK.....	VIII
SUMMARY	IX
1. UVOD.....	1
2. ALUMINIJ I ALUMINIJSKE LEGURE.....	3
2.1. TIG postupak zavarivanja	4
2.2. MIG postupak zavarivanja	5
2.3. Zavarivanje aluminija	7
2.3.1. Poroznost u aluminiju	8
2.3.2. Uklanjanje oksidnog filma tijekom zavarivanja	9
2.3.3. Tople pukotine	11
2.3.4. Gubitak čvrstoće	13
2.4. Zaštitni plin kod zavarivanja aluminija.....	13
3. AC MIG POSTUPAK ZAVARIVANJA	18
3.1. Pozitivan i negativan polaritet.....	20
3.2. Utjecaj balansa polariteta na veličinu kapi tijekom zavarivanja	23
3.3. Utjecaj frekvencije na geometriju zavara.....	24
3.4. Utjecaj balansa polariteta na brzinu taljenja žice	25
3.5. Utjecaj balansa polariteta na penetraciju zavara	26
3.6. Utjecaj balansa polariteta na izgled zavara i premošćivanje zazora	26
3.7. Utjecaj balansa polariteta na unos topline.....	27
3.9. Efekt smanjenja stvaranja štetnih plinova tijekom zavarivanja	31
4. EKSPERIMENTALNI DIO	35
4.1. Osnovni i dodatni materijal.....	35
4.2. Oprema za navarivanje.....	38
4.2.1. Uređaj za AC MIG zavarivanje	38
4.2.2. Bug – O System	40
4.3. Navarivanje uzoraka	41
4.3.1. Vizualna analiza navara	44
4.4. Izrada makroizbruska	45
4.5. Analiza makrostrukture	47
4.5.1. Utjecaj balansa polariteta na geometriju i poroznost navara	48
4.5.2. Utjecaj helija na geometriju navara	60
4.5.3. Utjecaj balansa polariteta i zaštitnog plina na poroznost.....	69
4.5.4. Usporedba rezultata utjecaja balansa polariteta i udjela helija na geometriju zavara	72
5. ZAKLJUČAK.....	75

LITERATURA..... 77

POPIS SLIKA

Slika 1. Automatizirani postupak DC impulsnog MIG zavarivanja trupa jedrilice od aluminija i problemi kod zavora [4]	2
Slika 2. Prikaz TIG postupka [6].....	4
Slika 3. Prikaz MIG postupka zavarivanja [6]	6
Slika 4. Različiti načini prijenosa metala za različite promjere žice [6]	7
Slika 5. Poroznost u TIG zavaru ploče debljine 6 mm [5]	8
Slika 6. Topljivost vodika u aluminiju [5]	8
Slika 7. Zarobljen oksid u kutnom zavaru [5].....	10
Slika 8. Efekt polariteta na katodno čišćenje i balans topline [5]	11
Slika 9. Pucanje tijekom solidifikacije u ploči A6082 debljine 3 mm MIG zavora [5].....	11
Slika 10. Osjetljivost na pojavu pukotina kod legura aluminija lijevanih u kalupe [7]	12
Slika 11. Makrostrukture zavora pri različitim protocima plina Ar, l/min [10].....	16
Slika 12. Makrostrukture zavora pri zavarivanju različitim plinovima [10].....	17
Slika 13. Shematski dijagram sustava za AC MIG impulsno zavarivanje [12]	19
Slika 14. Tipični obrasci struje i napona tijekom zavarivanja [1].....	20
Slika 15. Prikaz valnog oblika struje pri impulsnom AC MIG zavarivanju [14].....	21
Slika 16. Ponašanje električnog luka tijekom trajanja negativnog polariteta AC MIG-a [15]	22
Slika 17. Ponašanje električnog luka tijekom trajanja negativnog polariteta AC MIG-a [15]	22
Slika 18. Formiranje kapljica s različitim EN omjerom i različitim strujama zavarivanja [14]	23
Slika 19. Odnos veličina kapi i omjera EN za različite struje zavarivanja [14].....	24
Slika 20. Utjecaj frekvencije na oblik zavora [16]	24
Slika 21. Odnos ovisnosti brzine taljenja žice, struje zavarivanja i EN omjera [14]	25
Slika 22. Razlika u električnom luku pozitivnog i negativnog polariteta [17]	25
Slika 23. Smanjenje dubine penetracije s povećanjem EN omjera u impulsnom AC MIG zavarivanju (brzina dodavanja žice $v_f = 6$ m/min, brzina zavarivanja $v_w = 60$ cm/min) [17].....	26
Slika 24. Utjecaj EN omjera na izgled zavora [12]	27
Slika 25. Usporedba tolerancije zazora između AC pulsnog zavarivanja i DC pulsnog zavarivanja (žica promjera 1,2 mm A5356, osnovni metal debljine 1,0 mm A5052, $v_f = 380$ cm/min, $v_w = 100$ cm/min) [17].....	27
Slika 26. Prosječni unos topline i procijenjena temperatura kapljice [18].....	28
Slika 27. Deformacije kod AC MIG zavarivanja [17]	29
Slika 28. Kontrola unosa topline podešavanjem EN omjera u AC pulsnom MIG zavarivanju ($v_f = 600$ cm/min, $v_w = 60$ cm/min) [17].....	29
Slika 29. Usporedba dubina penetracije između AC pulsnog zavarivanja i DC pulsnog zavarivanja uz konstantnu stopu taloženja metala ($v_f/v_w \sim 6,5$) [17].....	30
Slika 30. Usporedba zavarivanja tankih aluminijskih limova različitim MIG postupcima [12]	31
Slika 31. Efekt osnovnog materijala i procesa zavarivanja na stvaranje štetnih plinova [18]	32
Slika 32. Efekt napona električnog luka i procesa zavarivanja na generiranje štetnih plinova [18]	33
Slika 33. Efekt struje i procesa zavarivanja na generiranje štetnih plinova [18]	34
Slika 34. Specifikacija žice [21].....	37
Slika 35. Welbee Inverter W400	39
Slika 36. Bug-O System	40
Slika 37. Prikaz svih uzoraka nakon navarivanja.....	43

Slika 38. Prikaz svih uzoraka nakon čišćenja alkoholom	43
Slika 39. Uzorak 11 – 100% Ar, EN = 50%	44
Slika 40. Uzorak 21 – Ar + 15% He, EN = 50%	44
Slika 41. Uzorak 31 – 50% Ar + 50% He, EN = 50%	44
Slika 42. Uzorak 12 – 100% Ar, EN = 0%	44
Slika 43. Uzorak 22 – Ar + 15% He, EN = 0%	45
Slika 44. Uzorak 32 – 50% Ar + 50% He, EN = 0%	45
Slika 45. Uzorak 13 – 100% Ar, EN = - 50%	45
Slika 46. Uzorak 23 – Ar + 15% He, EN = - 50%	45
Slika 47. Uzorak 33 – 50% Ar + 50% He, EN = - 50%	45
Slika 48. Pila za rezanje uzoraka „BS 350 GH“	46
Slika 49. Mikroskop „Insize“ za slikanje makrostrukture uzoraka	47
Slika 50. Graf ovisnosti nadvišenja navara o EN omjeru	50
Slika 51. Graf ovisnosti penetracije navara o EN omjeru	51
Slika 52. Graf ovisnosti širine navara o EN omjeru	52
Slika 53. Graf ovisnosti kuta navara o EN omjeru	52
Slika 54. Graf ovisnosti nadvišenja navara o EN omjeru	54
Slika 55. Graf ovisnosti penetracije navara o EN omjeru	55
Slika 56. Graf ovisnosti širine navara o EN omjeru	56
Slika 57. Graf ovisnosti kuta navara o EN omjeru	56
Slika 58. Graf ovisnosti nadvišenja navara o EN omjeru	58
Slika 59. Graf ovisnosti penetracije navara o EN omjeru	59
Slika 60. Graf ovisnosti širine navara o EN omjeru	59
Slika 61. Graf ovisnosti kuta navara o EN omjeru	60
Slika 62. Graf ovisnosti nadvišenja navara o udjelu He u zaštitnom plinu (EN = 50%)	61
Slika 63. Graf ovisnosti penetracije navara o udjelu He u zaštitnom plinu (EN = 50%)	62
Slika 64. Graf ovisnosti širine navara o udjelu He u zaštitnom plinu (EN = 50%)	62
Slika 65. Graf ovisnosti kut navara o udjelu He u zaštitnom plinu (EN = 50%)	63
Slika 66. Graf ovisnosti nadvišenja navara o udjelu He u zaštitnom plinu (EN = 0%)	64
Slika 67. Graf ovisnosti penetracije navara o udjelu He u zaštitnom plinu (EN = 0%)	64
Slika 68. Graf ovisnosti širine navara o udjelu He u zaštitnom plinu (EN = 0%)	65
Slika 69. Graf ovisnosti kut navara o udjelu He u zaštitnom plinu (EN = 0%)	66
Slika 70. Graf ovisnosti nadvišenja navara o udjelu He u zaštitnom plinu (EN = -50%)	67
Slika 71. Graf ovisnosti penetracije navara o udjelu He u zaštitnom plinu (EN = -50%)	68
Slika 72. Graf ovisnosti širine navara o udjelu He u zaštitnom plinu (EN = -50%)	68
Slika 73. Graf ovisnosti kut navara o udjelu He u zaštitnom plinu (EN = -50%)	69
Slika 74. Primjer izračunavanja površine u ImageJ	70
Slika 75. Primjer izračunavanja površine pora u ImageJ	70
Slika 76. Graf ovisnosti poroznosti o zaštitnom plinu i balansu polariteta	72

POPIS TABLICA

Tablica 1. Sažetak uzroka i prevencije poroznosti [5]	9
Tablica 2. Prednosti i nedostaci helija i argona [9]	15
Tablica 3. Usporedba svojstva inertnih plinova [10]	15
Tablica 4. Parametri zavarivanja [10]	17
Tablica 5. Mehanička svojstva osnovnog materijala [20]	35
Tablica 6. Kemijski sastav osnovnog materijala [19]	36
Tablica 7. Tehničke karakteristike uređaja "Welbee Inverter W400" [16]	40
Tablica 8. Parametri navarivanja.....	42
Tablica 9. Geometrija navara uzoraka.....	48
Tablica 10. Prikaz makrostruktura različitih EN omjera pri zaštiti 100%Ar	49
Tablica 11. Prikaz makrostruktura različitih EN omjera pri upotrebi zaštitnog plina Ar + 15% He	53
Tablica 12. Prikaz makrostruktura različitih EN omjera pri zaštiti 50% Ar + 50% He.....	57
Tablica 13. Prikaz površina pora i metala zavara, te njihov omjer	71
Tablica 14. Prikaz omjera geometrije navara i minimalnih vrijednosti uzoraka u ovisnosti o EN omjeru pri različitoj zaštiti	73
Tablica 15. Prikaz omjera geometrije navara i minimalnih vrijednosti uzoraka u ovisnosti o zaštitnom plinu pri različitim vrijednostima EN omjera	74

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

Kratika	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 radu se teoretski razmatraju aspekti zavarivanja aluminija, uključujući specifične izazove koji se pojavljuju pri zavarivanju ovog metala. Aluminij, iako je poznat po svojoj lakoći i otpornosti na koroziju, predstavlja posebne poteškoće tijekom zavarivanja zbog svoje visoke toplinske provodljivosti, sklonosti k formiranju oksidnog sloja i poroznosti u zavarenim spojevima. Ove poteškoće mogu utjecati na kvalitetu zavara i zahtijevaju posebne tehnike i postavke za efikasno zavarivanje. Razmatra se i uloga helija kao zaštitnog plina u procesu zavarivanja. Helij, kao zaštitni plin, igra značajnu ulogu zbog svojih jedinstvenih svojstava koja mogu značajno poboljšati kvalitetu zavara prilikom rada s aluminijem. Korištenje helija može rezultirati povećanjem toplinskog unosa, što dovodi do dublje penetracije i šireg zavara. Istražuje se AC MIG (Alternating Current Metal Inert Gas) metoda zavarivanja aluminija, koja omogućava bolje upravljanje toplinskim unosom i smanjenje formiranja oksida zahvaljujući izmjeničnom toku struje. Ova metoda pomaže u prevladavanju nekih od osnovnih izazova zavarivanja aluminija, pružajući čišće i kvalitetnije zavare.

U eksperimentalnom dijelu ovog rada prikazano je navarivanje koristeći aluminij 5083, koji je poznat po svojoj dobroj zavarljivosti i otpornosti na koroziju. U eksperimentu su detaljno analizirani kako različiti parametri zavarivanja, poput balansa polariteta i udjela helija u zaštitnom plinu, utječu na kvalitetu i geometriju navara. Nakon navarivanja izrađeni su makroizbrusci na kojima je analizirana geometrija navara u ovisnosti o balansu polariteta i udjelu helija u zaštitnom plinu. Prikazan je rezultat koliko značajno balans polariteta utječe na geometriju navara, te koliko udio helija povećava penetraciju i smanjuje utjecaj balansa polariteta.

Ključne riječi: aluminij, AC MIG, balans polariteta, helij

SUMMARY

The paper theoretically considers aspects of aluminum welding, including specific challenges that arise when welding this metal. Aluminum, known for its lightness and corrosion resistance, presents particular difficulties during welding due to its high thermal conductivity, tendency to form an oxide layer, and porosity in the welded joints. These difficulties can affect the quality of the welds and require special techniques and settings for efficient welding. The role of helium as a shielding gas in the welding process is also discussed. Helium, as a shielding gas, plays a significant role due to its unique properties that can significantly improve the quality of welds when working with aluminum. The use of helium can result in increased heat input, leading to deeper penetration and a wider weld. The AC MIG (Alternating Current Metal Inert Gas) method of aluminum welding is explored, which allows for better heat input management and reduction of oxide formation thanks to the alternating current flow. This method helps overcome some of the fundamental challenges of welding aluminum, providing cleaner and higher-quality welds.

In the experimental part of this work, build-up welding using aluminum 5083, known for its good weldability and corrosion resistance, is demonstrated. The experiment detailed how various welding parameters, such as EN ratio and the proportion of helium in the shielding gas, affect the quality and geometry of the build-up. After build-up welding, macro sections were prepared on which the geometry of the build-up was analyzed depending on the EN ratio and the proportion of helium in the shielding gas. The results show how significantly the EN ratio affects the geometry of the build-up, and how the proportion of helium increases penetration and reduces the impact of EN ratio.

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

1. UVOD

Raznolika primjena različitih vrsta legura aluminija, kao i rastući značaj konačnih karakteristika proizvoda, poput estetike, otpornosti na koroziju i male specifične mase zahtijevaju poboljšanje postojećih tehnologija spajanja i razvoj novih. Teškoće poput poroznosti i toplih pukotina se javljaju prilikom zavarivanja aluminija i njegovih legura dobro su poznate. Prilikom zavarivanja limova bitno je uzeti u obzir moguće nepravilnosti poput nedovoljne penetracije, poroznosti, viška materijala, te protaljivanje osnovnog materijala ili neprihvatljivih deformacija zavarenih elemenata. Specifične karakteristike materijala čine zavarivanje tankih elemenata od aluminija konvencionalnom MIG metodom izuzetno zahtjevnim procesom. Različite varijante MIG postupka zavarivanja pružaju mogućnosti za poboljšanje kvalitete i estetike zavarenih spojeva od legura aluminija: zavarivanje s izmjeničnom strujom, zavarivanje putem metoda manjih unosa topline, kao i AC MIG - om.

Neke od prednosti AC MIG-a od konvencionalnog MIG-a [1] :

- manja potrebna struja za taljenje 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.

AC MIG zavarivanje pruža niz prednosti u usporedbi s konvencionalnim MIG postupkom, zbog mogućnosti kontrole perioda pozitivnog i negativnog polariteta. Korištenjem negativnog polariteta, smanjuje se unos topline, povećava depozit materijala te smanjuje penetracija, no električni luk postaje nestabilan s većim raspršivanjem. Kombinacijom pozitivnog i negativnog polariteta na elektrodi i radnom komadu omogućuje se precizna kontrola distribucije topline unutar električnog luka [2].

Aluminij i njegove legure se široko koriste u zrakoplovstvu i automobilskoj industriji zbog niske gustoće i visokog omjera čvrstoće i mase. Legure aluminij-magnezij predstavljaju važnu grupu materijala unutar aluminijevih legura, poznate po svojim jedinstvenim svojstvima koja

ih čine prikladnim za širok spektar primjena. Ove legure, često označene kao serija 5xxx, sadrže magnezij kao primarni legirajući element, koji znatno povećava njihovu čvrstoću i poboljšava otpornost na koroziju, posebno u morskim uvjetima. Magnezij u ovim legurama ne povećava samo njihovu mehaničku čvrstoću već i doprinosi boljoj zavarljivosti, čineći ih izvrsnim izborom za različite industrijske primjene. Legure aluminij – magnezij se široko koriste u različitim industrijskim sektorima poput brodogradnje, transporta, izrade spremnika. Postupci zavarivanja se često koriste za izradu u mnogim inženjerskim aplikacijama kao što su zrakoplovstvo, automobilska i brodska industrija. Parametri MIG zavarivanja su najvažniji čimbenici koji utječu na kvalitetu, produktivnost i troškove zavarenog spoja [3].

Brodogradilišta za manje brodove sve češće koriste aluminij u svojim konstrukcijama zbog njegove izvrsne otpornosti na koroziju te povoljnog omjera između mehaničkih karakteristika i težine. Na primjeru slike 1., prikazano je zavarivanje trupa jedrilice (debljina materijala 8 mm) koristeći MIG postupak zavarivanja. Iz ovog razloga, industrija brodogradnje teži inovacijama u automatizaciji zavarivačkih procesa, te primjenu tehnike i metode poput AC MIG zavarivanja [4].



Slika 1. Automatizirani postupak DC impulsnog MIG zavarivanja trupa jedrilice od aluminija i problemi kod zavara [4]

2. ALUMINIJ I ALUMINIJSKE LEGURE

Raznovrsnost primjena aluminija ukazuje na velik asortiman legura koje su danas dostupne konstruktoru. Također, ukazuje na poteškoće s kojima se susreće inženjer za zavarivanje. S neprestano sve većom sofisticiranošću procesa, materijala i specifikacija, inženjer za zavarivanje mora imati široko, sveobuhvatno znanje o metalurgiji i zavarivanju aluminija [5].

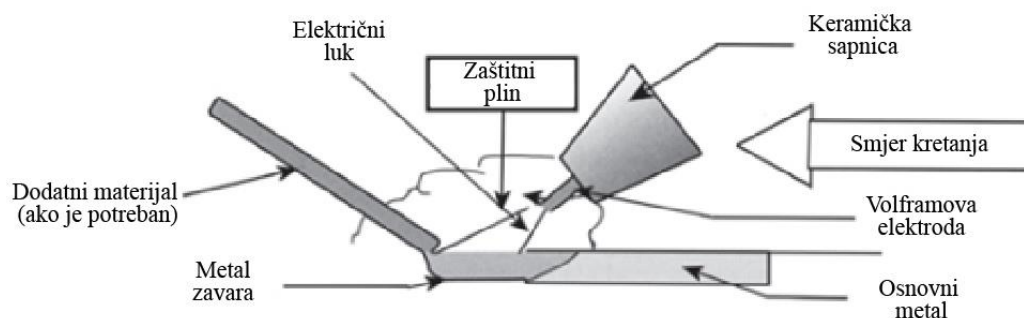
Kako se vidi iz slijedećeg popisa, postoji nekoliko važnih razlika između aluminija i čelika koje utječu na ponašanje pri zavarivanju [5]:

- razlika u točkama taljenja između ta dva metala i njihovih oksida je značajna: oksid željeza se tale blizu ili ispod točke taljenja samog metala, dok se oksid aluminija tali na 2060 °C, što je otprilike 1400 °C iznad temperature taljenja aluminija, što ima važne implikacije za proces zavarivanja jer je bitno ukloniti ovaj oksidni film prije i tijekom zavarivanja kako bi se postigla potrebna kvaliteta zavara
- oksidni film na aluminiju je trajan, izrazito čvrst i obnovljiv, što daje legurama aluminija izvrsnu otpornost na koroziju i omogućava njihovu upotrebu u različitim okolinama bez dodatne zaštite
- koeficijent toplinskog rastezanja aluminija je otprilike dvostruko veći od čelika, zbog toga može doći do neželjenih deformacija tijekom zavarivanja
- koeficijent toplinske provodljivosti aluminija je šest puta veći od čelika, zbog čega izvor topline za zavarivanje aluminija mora biti znatno intenzivniji i koncentriraniji nego za čelik, što je posebno izraženo kod debelih dijelova gdje brzi gubitak topline može izazvati nedostatke u zavarenom spoju
- specifična toplina aluminija - količina topline potrebna za podizanje temperature tvari - dvostruko je veća od čelika
- aluminij ima visoku električnu provodljivost, tri četvrtine bakra, ali šest puta veću od čelika, što je nedostatak kod točkastog zavarivanja gdje se toplina za zavarivanje mora proizvesti električnim otporom
- aluminij ne mijenja boju s porastom temperature, za razliku od čelika, te to može otežati zavarivaču procjenu kada će doći do taljenja, zbog čega je ključno provesti adekvatno prekvalificiranje zavarivača prilikom prelaska sa zavarivanja čelika na aluminij
- aluminij nije magnetičan, što znači da je problem puhanja luka eliminiran kod zavarivanja

- aluminij ima tri puta manji modul elastičnosti od čelika, što znači da se pod opterećenjem savija tri puta više od čelika, ali može apsorbirati više energije pri udarnom opterećenju
- aluminij ne mijenja svoju kristalnu strukturu pri zagrijavanju i hlađenju, za razliku od čelika koji podliježe transformacijama kristalne strukture ili promjenama faza pri određenim temperaturama.

2.1. TIG postupak zavarivanja

TIG postupak ili elektrolučno zavarivanje netaljivom elektrodom u zaštiti inertnog plina, prikazan na slici 2., koristi električni luk koji se stvara između netaljive volframove elektrode i radnog komada kako bi se generirala potrebna toplina za stvaranje zavarenog spoja. Kao zaštitni plin koristi se inertni plin poput argona, helija ili njihove mješavine kako bi se štitila volfram elektroda i zavarena površina od oksidacije. Proces se može provoditi sa ili bez dodatnog materijala. TIG se može izvoditi pomoću istosmjerne struje (DC), ili izmjenične struje (AC). U prvom slučaju, volfram elektroda može biti povezana ili s pozitivnim ili s negativnim terminalom izvora struje, rezultirajući u istosmjernoj struji s pozitivnom elektrodom (DCEP – direct current electrode positive) i istosmjernoj struji s negativnom elektrodom (DCEN – direct current electrode negative). Kod DCEN-a, 70% topline generira se na anodi (radnom komadu), dok se 30% generira na katodi (elektrodi); obrnuto se događa s DCEP-om. Veći unos topline na radnom komadu kod DCEN-a rezultira dubljim protaljivanjem zavara nego kod načina rada DCEP. Suprotno tome, kod DCEP-a, veća toplina je na volfram elektrodi što znači da je potrebno hlađenje elektrode vodom. Način rada DCEP također rezultira katodnim čišćenjem radnog komada kao rezultat velikih pozitivnih iona koji udaraju u površinu, uklanjajući prisutni sloj oksida. DCEP je važan u zavarivanju aluminija zbog katodnog čišćenja, ali je ograničena sposobnost katodnog čišćenja zbog pregrijavanja. Ovaj način rada je važan u spajanju [6].



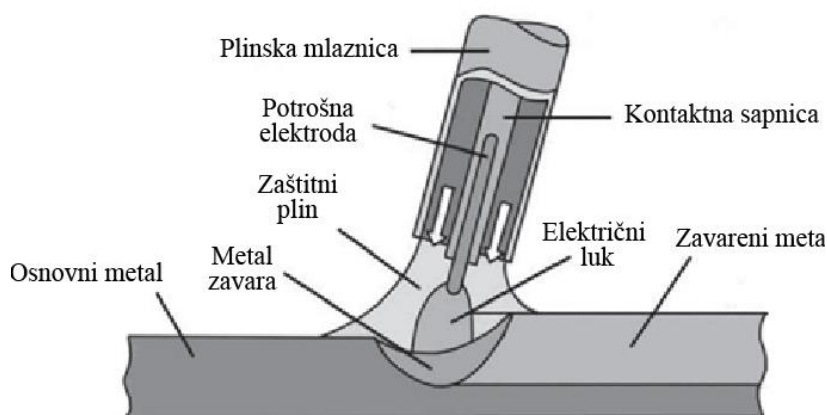
Slika 2. Prikaz TIG postupka [6]

Kada se TIG izvodi izmjeničnom strujom (AC – alternative current), dolazi do periodične promjene polariteta elektrode. Stoga, AC može kombinirati djelovanje katodnog čišćenja pozitivne elektrode s manjim unosom topline. Kada struja opadne na nulu, događaju se različiti efekti, ovisno o polaritetu. Kada elektroda postane negativna, odmah isporučuje elektrone za ponovno pokretanje luka, međutim kada metal zavara postane negativan, ne može isporučiti elektrone dok se napon dovoljno ne poveća da bi se pokrenula emisija hladne katode. Bez ovog napona, luk postaje nestabilan. Moderni izvori struje za TIG zavarivanje imaju mogućnost izmjene strujne karakteristike izmjenične struje i kontrolu periode pozitivnog i negativnog polariteta, što rješava ovaj problem s nestabilnošću luka tijekom AC zavarivanja [6].

Prednosti TIG-a uključuju manji unos topline koji omogućuje bolju kontrolu i čini ga prikladnim za zavarivanje tankih limova. Izvrsno zaštitno djelovanje koje nude argon, helij ili njihove mješavine znači da je proces osiguran od djelovanja kisika i dušika iz atmosfere. Međutim, njegovo najveće ograničenje je relativno niska količina depozita nataljenog materijala [6].

2.2. MIG postupak zavarivanja

MIG postupak zavarivanja ili elektrolučno zavarivanje taljivom žicom u zaštiti inertnog plina je vrsta elektrolučnog zavarivanja prikazan na slici 3. Prednosti MIG-a uključuju visoke brzine zavarivanja, izvrsno uklanjanje sloja oksida i sposobnost zavarivanja u svim položajima. Te karakteristike čine MIG najčešće korištenim procesom ručnog zavarivanja aluminija. Kao zaštitni plinovi koriste se argon, helij ili njihove kombinacije. Najčešće se koristi argon koji proizvodi stabilan luk. Međutim, argon rezultira manjim unosima topline i manjim brzinama zavarivanja u odnosu na helij. Helij povećava napon luka za ~20% u usporedbi s argonom, rezultirajući intenzivnijim unosom topline, većom penetracijom i širim zavarom. Povećani unos topline također omogućuje veće brzine zavarivanja od onih postignutih s argonskom zaštitom na sličnom spoju [6].

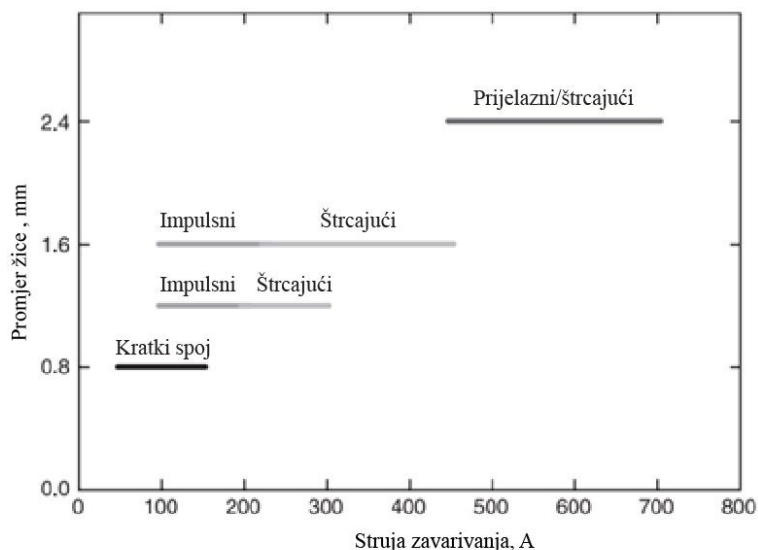


Slika 3. Prikaz MIG postupka zavarivanja [6]

Koriste se izvori strujne karakteristike konstantnog napona istosmjerne struje (constant voltage), bilo s DCEN-om ili DCEP-om, ali je način rada s pozitivnom elektrodom češći. U DCEP načinu rada, elektroni s negativno nabijenog radnog komada udaraju u pozitivnu žicu, predajući svoju kinetičku energiju u obliku topline i pomažući taljenju žice. Postoji i dodatna prednost katodnog čišćenja za uklanjanje oksida. Jedna od bitnih prednosti MIG-a je sposobnost promjene i kontrole načina prijenosa metala upotrebom odgovarajuće kombinacije sastava zaštitnog plina, vrste izvora struje, struje i napona električnog luka, te brzine dovoda žice. Tri glavna načina prijenosa metala su kratkim spojevima, prijelaznim lukom i štrcajućim lukom. Kod prijenosa kratkim spojevima do odvajanja kapljice dolazi u prvoj fazi u kojoj se vrh elektrode nalazi u fizikalnom kontaktu sa rastaljenim metalom pri čemu raste jakost struje što dovodi do povećanja magnetske sile, koja se javlja na vrhu elektrode zbog djelovanja elektromagnetskog polja, i steže kapljicu taline vrha žice. Ova pojava je još poznata i kao „pinch effect“. Kapljica metala kod kratkih spojeva većeg je promjera od žice kojom se zavaruje. Broj kratkih spojeva u sekundi se kreće od 50 do 250. Kod viših struja prijenos je štrcajućim lukom, gdje se dodatni materijal tali s vrha žice i prenosi u obliku sitnih, diskretnih taljenih čestica ili kapi. Prijenos metala je vrlo stabilan, usmjeren, te ima manje štrcanja i dublju penetraciju od prijenosa kratkim spojevima. Tijekom MIG zavarivanja aluminijskog spoja, prijenos štrcajućim lukom događa se pri relativno niskim strujama zbog niske točke taljenja, što rezultira spojem bez prskanja [6].

Umjesto korištenja načina prijenosa kratkog spoja tijekom zavarivanja, također je moguće zavarivati koristeći postupak impulsne struje, pri čemu se prekidaju, visoko amplitudni impulsi, te nadovezuju na nisku stalnu struju koja održava luk. Pozadinska struja nije dovoljna da otopi

dotatnu žicu, ali impuls visoke struje to čini, projicirajući kontroliranu veličinu taljenih čestica kao preko luka, što pruža izvrstan prijenos metala pri nižim prosječnim strujama zavarivanja od štrcajućeg prijenosa. Slika 4. prikazuje tipične raspone struja za zavarivanje različitih načina prijenosa metala za različite promjere žice [6].



Slika 4. Različiti načini prijenosa metala za različite promjere žice [6]

Ostali postupci zavarivanja aluminija su lasersko zavarivanje, elektrootporno zavarivanje, zavarivanje trenjem, ultrazvučno zavarivanje, magnetsko zavarivanje, eksplozijsko zavarivanje itd.

2.3. Zavarivanje aluminija

Idealno zavarena konstrukcija, koja podrazumijeva potpuni spoj uključujući zavareni metal, zone utjecaja topline (ZUT) i osnovni metal, trebala bi imati iste karakteristike kao osnovni metal. Međutim, postoje određeni problemi povezani s zavarivanjem aluminija i njegovih legura koji otežavaju postizanje tog ideala. Značajke i nedostaci pri zavarivanju legura aluminija [5]:

- poroznost zavara
- uključci oksida i stvaranje oksidnih filmova
- tople pukotine
- smanjena čvrstoća u zavaru i ZUT-u

- smanjena otpornost područja metala zavara na koroziju
- smanjena električna otpornost.

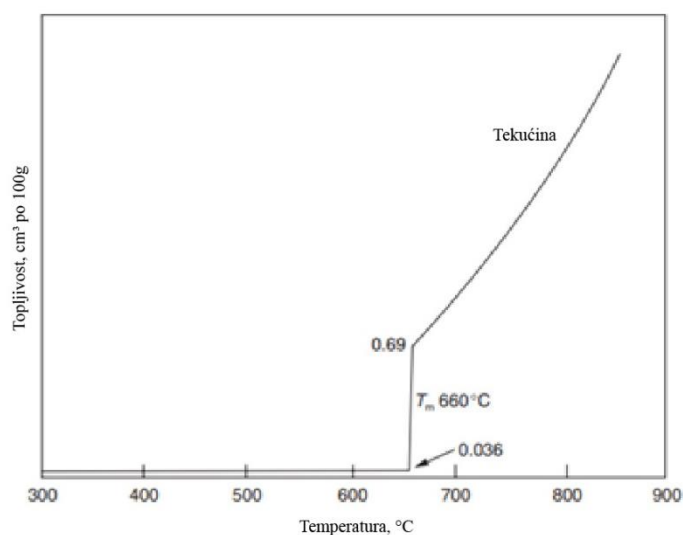
2.3.1. Poroznost u aluminiju

Poroznost je problem koji je ograničen na područje metala zavara. Nastaje iz plina otopljenog u rastaljenom zavarenom metalu koji ostaje zarobljen u fazi skrućivanja, tvoreći mjehuriće u zavaru u krutom stanju, slika 5. [5].



Slika 5. Poroznost u TIG zavaru ploče debljine 6 mm [5]

Poroznost može varirati od izuzetno fine mikro-poroznosti do grubih pora promjera 3 ili 4 mm. U slučaju aluminija krivac je vodik, koji ima visoku topljivost u rastaljenom aluminiju, ali vrlo nisku topljivost u čvrstom stanju, kako je prikazano na slici 6. Topljinost se smanjuje dvadeset puta tijekom procesa skrućivanja, a smanjenje je toliko značajno da postaje izuzetno teško izvesti zavarivanje bez poroznosti kod aluminija [5].



Slika 6. Topljinost vodika u aluminiju [5]

Poroznost je najniža kod zavarivanja bez dodatnog materijala. Kada se koristi dodatni materijal, razine poroznosti obično rastu zbog kontaminacije iz žice. Od konvencionalnih procesa

zavarivanja, TIG ima niže razine poroznosti od MIG-a zbog kontaminacije vodikom iz žice. Povećanje struje kod zavarivanja se povećava temperatura područja metala zavara i povećava se brzina apsorpcije vodika u rastaljenom metalu. Smanjenje brzine kojom se zavar skrućuje omogućuje vodikom da izađe iz zavara. Sličan učinak može se postići smanjenjem brzine zavarivanja. Povećanje napona električnog luka ili duljine luka povećava se izloženost rastaljenog metala kontaminaciji, pa će poroznost time porasti. Sastav legure također može utjecati na količinu poroznosti, gdje magnezij posebno ima povoljan učinak. Pri 6% magnezija povećava se topljivost i smanjuje apsorpcija vodika čak i do dva puta u odnosu na ostale legirne elemente. Bakar i silicij imaju suprotan učinak. Upotreba Al-Mg dodatnog materijala može pomoći u smanjenju poroznosti kod zavarivanja aluminija. Naravno, pretpostavlja se da je takav dodatni materijal prihvatljiv u određenoj primjeni [5].

Tablica 1. prikazuje sažetak uzroka i rješenja za prevenciju poroznosti.

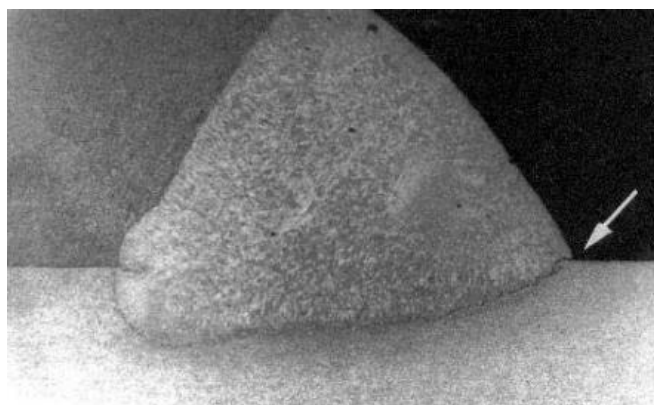
Tablica 1. Sažetak uzroka i prevencije poroznosti [5]

Mehanizam formiranja poroznosti	Mogući uzroci	Mjere za izbjegavanje poroznosti
Zarobljavanje vodika	Oksidni film, masnoća, prljavština na osnovnom materijalu, prljavština/masnoća u oblozi, kontaminirani zaštitni plin; prskanje na licu zavara.	Očistiti žicu, koristiti plin visoke kvalitete, zaštititi žicu od kontaminacije, promijeniti plamenik, očistiti ploču, minimizirati prskanje.
Zarobljavanje zraka/plina	(a) Turbulencija rastaljenog zavara zbog visoke struje. (b) Širenje plina iz korijena zavara.	(a) Koristiti nižu struju, smanjiti brzinu zavarivanja, promijeniti kut pištolja. (b) Koristiti puni prodirajući zavar, dopustiti razmak u korijenu kutnog zavara, koristiti visoki unos topline.
Brzo „zamrzavanje“ zarobljenog plina	Unos topline je prenizak, brzi gubitak topline, hladna zaštitna podloška.	Povećati struju, usporiti brzinu zavarivanja, razmotriti predgrijavanje, zagrijati zaštitnu podlošku, zamijeniti argonski zaštitni plin s helijem.
Nepredvidljivi dovod žice	Savijena, blokirana ili pogrešna veličine žica, netočno ili loše prilagođeni valjci za pogon, oštećen vrh kontakta, nestabilan izvor struje.	Ispraviti vod za žicu, zamijeniti vrh kontakta, prilagoditi pritisak valjka za pogon, ugraditi valjke s utorima.

2.3.2. Uklanjanje oksidnog filma tijekom zavarivanja

Aluminijev oksid (Al_2O_3) je izuzetno čvrst i brzo nastajući oksid koji daje aluminiju izvrsnu otpornost na koroziju. Aluminijev oksid ima vrlo visoku točku taljenja, $2060\text{ }^\circ\text{C}$ u usporedbi s čistim metalom koji se tali na $660\text{ }^\circ\text{C}$. Oksidi većine drugih metala tale se na temperaturama koje su jednake ili niže od njihovih metala, te će tijekom zavarivanja plutati na površini rastaljenog metala zavara. Zagrijavanje aluminija do njegove točke taljenja bez raspršivanja oksidnog filma rezultirat će rastaljenim metalom zavara aluminija zatvorenim u sloju oksida. Tijekom zavarivanja taj se sloj mora ukloniti nekim prikladnim sredstvom [5].

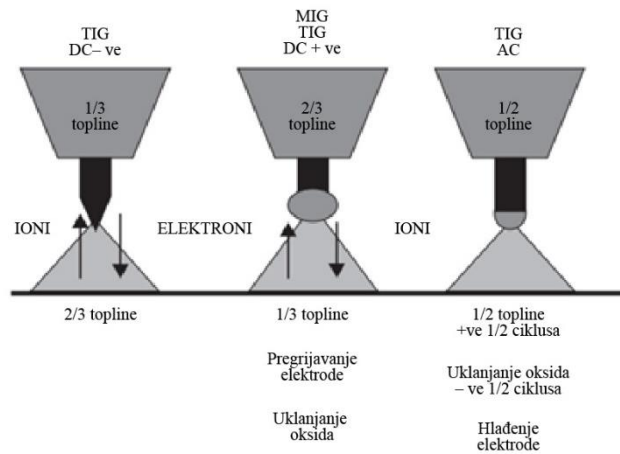
Slika 7. ilustrira zarobljen oksid u zavarenom spoju koji će očitito imati izražen utjecaj na čvrstoću spoja.



Slika 7. Zarobljen oksid u kutnom zavaru [5]

Srećom, u zavarivanju s zaštitnim plinom postoji fenomen poznat kao katodno čišćenje koje se može primijeniti kako bi se postigao željeni rezultat. Kada je elektroda spojena na pozitivan pol izvora struje za zavarivanje i protječe istosmjerna struja, dolazi do protoka elektrona iz radnog komada prema elektrodi s ionima koji putuju u suprotnom smjeru i bombardiraju površinu radnog komada. Ovo bombardiranje ionima razbija i raspršuje oksidni film i omogućava zavarenom metalu da teče i spoji se s osnovnim metalom. Postupak MIG zavarivanja koristi često samo istosmjernu struju elektrode pozitivnog polariteta (DCEP) jer korištenje istosmjerne struje elektrode negativnog polariteta (DCEN) rezultira nestabilnim lukom, nepredvidivim prijenosom metala i lošu kvalitetu zavara. Uklanjanje oksidnog filma stoga je bitan dio MIG postupka. Kasnije će se vidjeti prednosti AC MIG zavarivanja aluminija [5].

Kompromis se postiže korištenjem izmjenične struje (AC) gdje se uklanjanje oksidnog filma odvija tijekom pozitivne polovice ciklusa, a hlađenje elektrode tijekom negativne polovice ciklusa, kako je prikazano na slici 8. TIG zavarivanje aluminija stoga se obično provodi s AC-om, iako postoje nekoliko tehnika koje koriste ili DCEP ili DCEN [5].

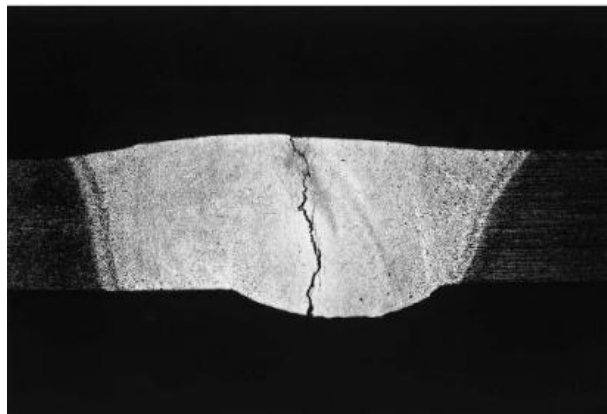


Slika 8. Efekt polariteta na katodno čišćenje i balans topline [5]

2.3.3. Tople pukotine

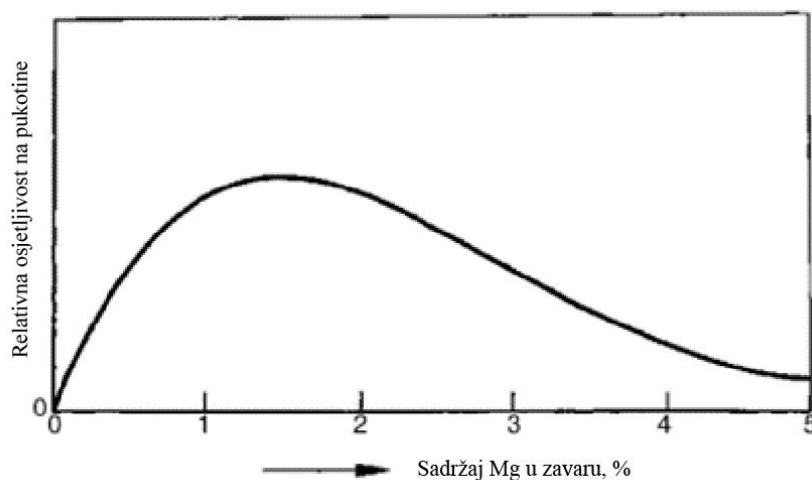
Tople pukotine su problem zavarivanja koji se ne javlja kod čistih metala, ali može se naći u određenim legurama. Nije ograničen samo na legure aluminija, već se susreće i u čeliku, niklu i bakrenim legurama. Temeljni mehanizam jednak je u svim legiranim spojevima i ovisi o načinu na koji se legure metala solidificiraju. Kako samo ime sugerira, ovo je mehanizam pucanja pri visokim temperaturama koji je zbog svoje učestalosti poznat po nekoliko različitih naziva [5].

Ako je razlika u točkama taljenja između niske točke taljenja eutektika i većeg dijela metala dovoljno velika, tada se tekući film duž granica zrna može razdvojiti dok se metal hladi i skuplja. Rezultati toga prikazani su na slici 9 [5].



Slika 9. Pucanje tijekom solidifikacije u ploči A6082 debljine 3 mm MIG zvara [5]

Tople pukotine su drugi najveći problem pri zavarivanju aluminija. Čisti metali se stvrdnjavaju pri jednoj temperaturi, dok se legure uglavnom pretvaraju iz tekućeg u čvrsto stanje tijekom šireg raspona temperatura. Raspon temperatura u kojem se ovaj postupak postupno događa poznat je kao "raspon skrućivanja ili zamrzavanja". Očito je termomehaničko ponašanje polučvrstog tijela uvelike ovisno o njegovim mehaničkim svojstvima. Stoga, različite legure aluminija pokazuju različite sklonosti prema pukotinama. Konvencionalne metalurške legure koje sadrže bakar i magnezij najosjetljivije su na tople pukotine kao što je prikazano na slici 10. [7].



Slika 10. Osjetljivost na pojavu pukotina kod legura aluminija lijevanih u kalupe [7]

Ukratko, tople pukotine moguće je eliminirati jednim od sljedećih postupaka [5]:

- malom veličinom zrna koja se postiže dodavanjem malih količina elemenata kao što su titan i cirkonij, koji služe kao nukleusi kristalizacije tijekom procesa solidifikacije
- korištenje odgovarajuće pripreme i dovoljnog razmaka između spojeva kako bi se omogućilo dodavanje dovoljno dodatnog materijala da se postigne sastav zavarenog metala izvan raspona visoke osjetljivosti
- korištenje velike brzine zavarivanja - visoke brzine smanjuju vrijeme koje zavar provodi unutar raspona visoke osjetljivosti na tople pukotine, i smanjuju veličinu zone utjecaja topline (ZUT)
- korištenje postupaka zavarivanja s velikom brzinom zavarivanja s malim volumenom višestrukih prolaza umjesto postupaka s velikim volumenom i jednim prolazom
- odabir postupka zavarivanja i montaže koji minimiziraju zaostala naprezanja

- primjena vanjske sile kako bi se održao zavar u kompresiji dok se nalazi unutar raspona visoke osjetljivosti
- odabir dodatnog materijala s točkom taljenja bliskom onoj osnovnog materijala.

2.3.4. Gubitak čvrstoće

Toplina zavarivanja provodi se u osnovni metal tako da u bilo kojem zavarenom spoju postoje tri različita područja - zavareni metal, zona utjecaja topline (ZUT) u osnovnom materijalu i osnovni metal. Zona utjecaja topline može se dodatno podijeliti na područja s posebnim svojstvima ovisno o uključenom legirnom materijalu. Budući da će ZUT proći kroz jedan ili više ciklusa grijanja i hlađenja, svojstva se mogu radikalno razlikovati od onih nezahvaćenog osnovnog metala. To je posebno slučaj s aluminijevim legurama koje su ojačane hladnim oblikovanjem ili precipitacijom. Jedan aspekt toga je širina ZUT-a, što proizlazi iz visoke toplinske provodljivosti aluminija i veličine područja gdje je došlo do značajnog gubitka čvrstoće. Samo kada je legura u stanju nakon lijevanja svojstva ZUT-a odgovaraju onima nezahvaćenog osnovnog metala [5].

Još jedan problem odnosi se na mogućnost gubitka legirajućih elemenata iz rastaljenog metala zavara što može rezultirati smanjenjem čvrstoće. Istina je da neki elementi, uglavnom magnezij s niskom točkom isparavanja i litij koji je visoko reaktivan s kisikom, mogu biti izgubljeni ili oksidirani tijekom zavarivanja. Međutim, nedostaje informacija koja kvantificira bilo kakve učinke, što sugerira da se to ne doživljava kao problem. Gubitak magnezija najgori je tijekom MIG zavarivanja, što rezultira crnim talogom povremeno viđenim duž rubova zavara, ali pažljiva pozornost na zaštitu plinom će minimizirati bilo kakav problem [5].

2.4. Zaštitni plin kod zavarivanja aluminija

Inertni zaštitni plin eliminira utjecaj okoline na proces zavarivanja i utjecaj na sam proces zavarivanja. Odabir plina ovisi o željenim svojstvima zavara. Zaštitni plin ima dvije glavne funkcije [8]:

- zaštita procesa i materijala od okolnog zraka
- utjecaj na stabilnost električnog luka, produktivnost, pouzdanost, kvalitetu i radnu okolinu.

Za postizanje zavara određene kvalitete utjecaj okolnog zraka mora biti minimiziran. U rastaljenom materijalu kod zavarivanja može doći do otapanja kisika i dušika zbog okolnog zraka. Kisik i dušik se pojavljuju kao čvrste otopine i njihov utjecaj u zavaru može biti vrlo

štetan na svojstva materijala nakon skrućivanja. Još jedan važan efekt zaštitnog plina je poboljšanje procesa. Neki od tih faktora na koje utječe zaštitni plin su [8]:

- paljenje električnog luka
- stabilnost luka
- količina taljenog materijala
- dubina penetracije i oblik zavara
- prskanje
- ispuštanje štetnih plinova.

Aluminij i aluminijske legure formiraju relativno čvrstu oksidnu prevlaku. Preporučeno je da se oksidni sloj odstrani prije zavarivanja [8].

Zaštitni plinovi su inertni plinovi argon i helij ili njihove kombinacije kod zavarivanja TIG ili MIG postupkom. Aktivni plinovi poput kisika i dušika čak i u malim količinama će doprinijeti poroznosti i problemima onečišćenja kod zavarivanja. Najčešći plin koji se koristi je argon za ručno i automatizirano zavarivanje. Jeftiniji je od helija, proizvodi stabilniji električni luk koji daje širok, gladak zavar s dobrom penetracijom. Nedostatak kod argona je nizak unos topline i samim time i niske brzine zavarivanja. Kod zavarivanja pod zaštitom argona može nastati oksidna prevlaka na zavaru koja se lako uklanja metalnom četkom [5].

Helij je skup i daje nestabilniji luk od argona. Helij se zato najviše koristi kod mehaniziranog ili automatiziranog zavarivanja [5].

Za ručno zavarivanje i neke mehanizirane primjene koriste se kombinacije argona i helija s dobrim rezultatima. Kombinacije tih plinova su korisne kod debljih materijala zbog većeg unosa topline i pružaju veću toleranciju kod odgovarajućih parametara od korištenja samo argona. Povećavaju produktivnost jer omogućavaju veće brzine zavarivanja. Najčešće kombinacije su 50 % i 75 % helija u argonu [9].

Usporedba karakteristika argona i helija je prikazana u tablici 2. Ionizacija električnog luka korištenjem argona je puno manja od helija, stoga je puno teže paljenje električnog luka kod helija nego kod argona. Toplinska vodljivost je isto bitna karakteristika koja je puno veća kod helija [9].

Tablica 2. Prednosti i nedostaci helija i argona [9]

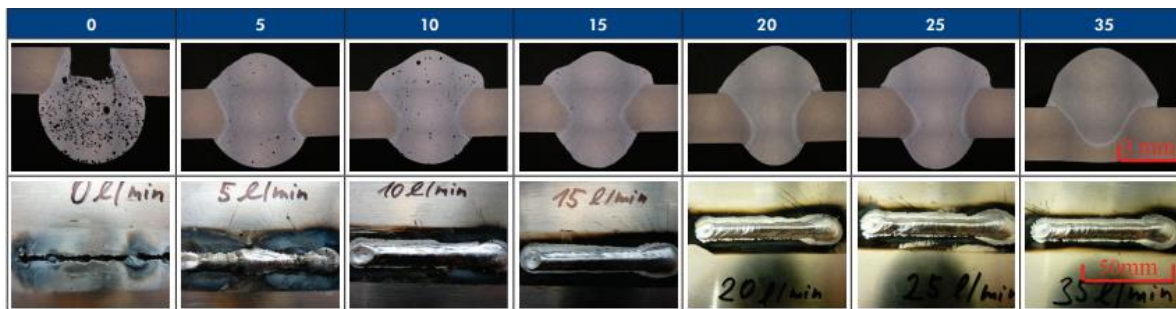
	Prednosti	Nedostaci
Helij	Veći napon električnog luka i veći unos topline (veća penetracija i veće brzine zavarivanja)	Slabo čišćenje oksida
	Širok raspon zavora korijena	Otežana uspostava i stabilnost električnog luka
		Veća cijena
		Zahtijeva veći protok plina
Argon	Dobra uspostava i stabilnost električnog luka	Male tolerancije pripreme kod zavarivanja korijena
	Efektivna zaštita	
	Niža cijena	
	Dobro čišćenje	

Funkcije zaštitnog plina ovise o fizičkim, kemijskim i toplinskim svojstvima zaštitnog plina i ta svojstva su poznata i prikazana u tablici 3.

Tablica 3. Usporedba svojstva inertnih plinova [10]

Plin	Gustoća usporedba s zrakom, zrak = 1	Ionizacijski potencijal, eV	Toplinski kapacitet 20°C, J/kg·K	Toplinska vodljivost na 0°C, W/m·K
Ar	1,38	15,69	0,523	164×10^4
He	0,14	24,49	5,230	1500×10^4

Utjecaj brzine protoka plina vidi se na slici 11. Kod slabog protoka plina pojavljuje se velika poroznost. Dušik i ostali plinovi u zraku stvaraju poroznost kod zavarivanja. Optimalni rezultati se postižu na 15 l/min koji ima dobru penetraciju, širinu i malo poroznosti. Sve iznad te brzine protoka promijeni se i oblik zavora i ne postiže se potpuna penetracija. Dolazi i do smanjenja širine i dubine koja je uzrokovana zbog efekta hlađenja protokom plina. Previsok protok može povući i zrak iz okoline što značajno utječe na kvalitetu zaštite kod zavarivanja [10].

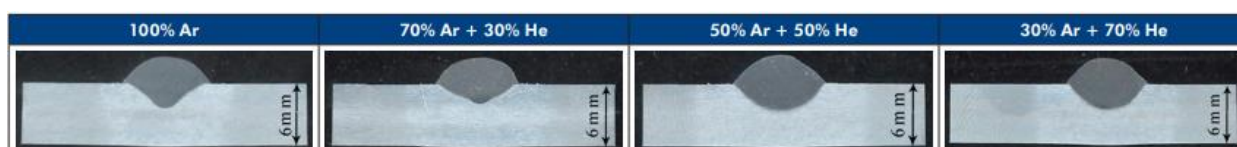


Slika 11. Makrostrukture zavora pri različitim protocima plina Ar, l/min [10]

Budući da plinovi Ar i He imaju različite gustoće, kako bi se održao približno isti učinak zaštite, potrebno je promijeniti protok mješavine. S povećanjem udjela He u mješavini, zbog njegove niske gustoće, protok treba povećati. Važno je napomenuti da je također potrebno prilagoditi napon kako bi luk ostao stabilan. Povećanje prisutnosti He zahtjeva je da se postavi viši napon kako bi se održala stabilnost luka, zbog višeg ionizacijskog potencijala. Potreban napon za mješavinu koja sadrži 70% He je najviši. U tablici 4. su prikazani parametri zavarivanja gdje se vidi promjena napona, te promjena protoka plina s povećanjem He. Slika 12. prikazuje oblik zavora s povećanjem He. Tipičan oblik zavora pri korištenju zaštitnog plina argona ima uski korijen, dok upotreba helija proširuje i zaobljuje oblik korijena, zavora i ZUT. To je uzrokovano zbog dva faktora: 1. He u usporedbi s Ar ima veću toplinsku provodljivost i 2. He ima veću ionizacijsku energiju, pa je potreban veći napon luka. Oba ova faktora zbrojena dovode do povećanja unosa topline. Najveće povećanje dubine i širine zavora primijećeno je kada se čisti Ar uspoređi s 70% He, gdje se dubina i širina zavora povećala. S tog stajališta, 50% i 70% He daju najbolje rezultate. Također, slika 12. pokazuje smanjenje nadvišenja zavora s povećanjem He, što je dobro kada su u pitanju dinamička svojstva zavora. Općenito se povećanje širine zavora i dubine penetracije smatra povoljnim za zavarivanje [10].

Tablica 4. Parametri zavarivanja [10]

Plin		U, V	I, A	Brzina zavarivanja, mm/s	Brzina dodavanja žice, mm/s	Protok plina, l/min	Q, kJ/mm
100% Ar	ARGON 4.6	20,7	120	8,3	117	16	0,25
70% Ar + 30% He	He 30	22				22	0,25
50% Ar + 50% He	He 50	23				28	0,26
30% Ar + 70% He	He 70	24,5				34	0,28



Slika 12. Makrostrukture zavara pri zavarivanju različitim plinovima [10]

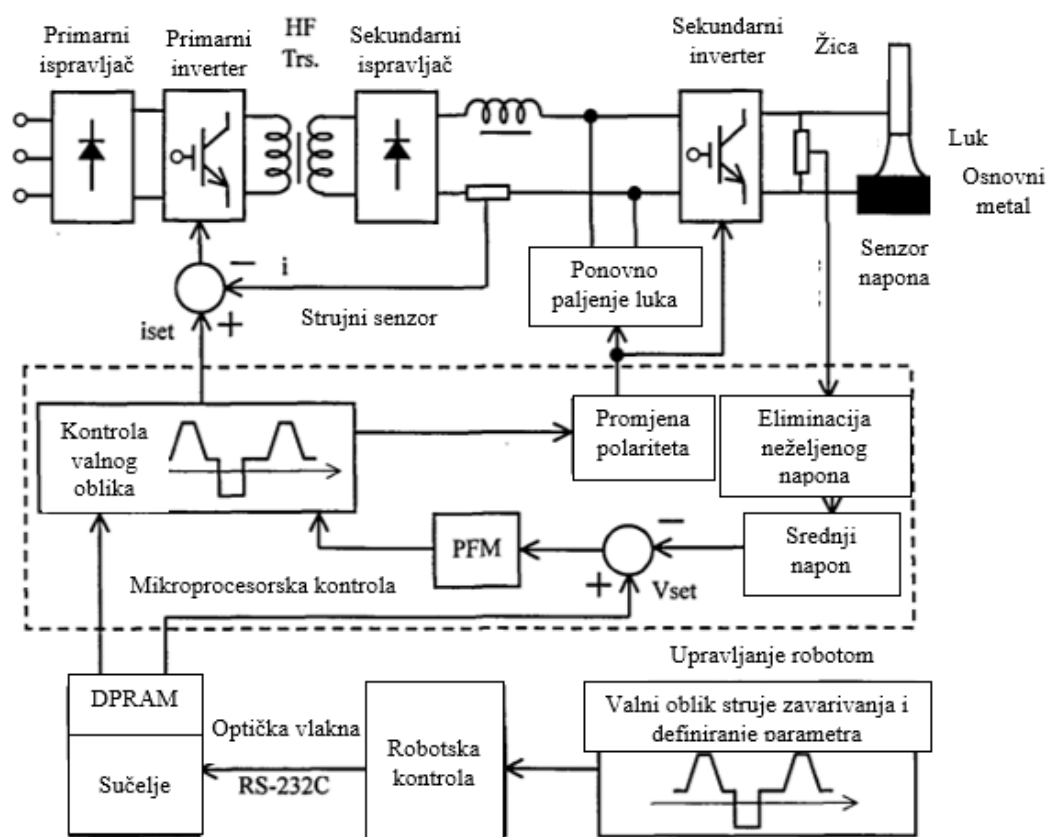
Povećani unos topline uzrokovan je svojstvima He, višim ionizacijskim potencijalom (tj. naponom luka) i toplinskom provodljivošću. Sveukupno, upotreba He može poboljšati učinkovitost i brzinu zavarivanja, te postići poboljšani oblik zavara i smanjenje poroznosti [10].

3. AC MIG POSTUPAK ZAVARIVANJA

Nedavno je zaštita okoliša postala važna zbog problema globalnog zatopljenja uzrokovanog stakleničkim efektom i djelomično, prekomjernom emisijom CO₂ plinova u atmosferu. Smanjenje težine vozila se neprestano razmatra kao jedno od najefikasnijih sredstava za poboljšanje učinkovitosti goriva i smanjenje emisija ispušnih plinova. Budući da je legura aluminija lagana, snažna i može se reciklirati, nove vrste automobila i motocikala proizvedene od tankih legura aluminija brzo se razvijaju, a neki proizvodi već su i na tržištu [11].

Zavarivanje je jedna od ključnih tehnologija u masovnoj proizvodnji automobila i motocikala, pa je stoga hitno potreban novi sustav zavarivanja kako bi se poboljšala kvaliteta zavarivanja i produktivnost kod spajanja limova od legure aluminija [11].

Slika 13. prikazuje sustav impulsnog AC MIG zavarivanja. Glavni krug izvora struje za zavarivanje sastoji se od dva invertera. Primarni inverter precizno kontrolira apsolutnu vrijednost izlazne struje s brzim odzivom. Sekundarni inverter mijenja polaritet izlazne struje između elektrode pozitivne (EP) i elektrode negativne (EN). Krug za ponovno paljenje luka primjenjuje visokonaponski impuls preko žice i osnovnog metala u trenutku kad se polaritet izlazne struje mijenja iz EN u EP. Strujni porast napona generiran sekundarnim inverterom tijekom promjene polariteta iz EP u EN dovoljan je za ponovno paljenje luka, stoga nije potreban vanjski visokonaponski impuls [12].

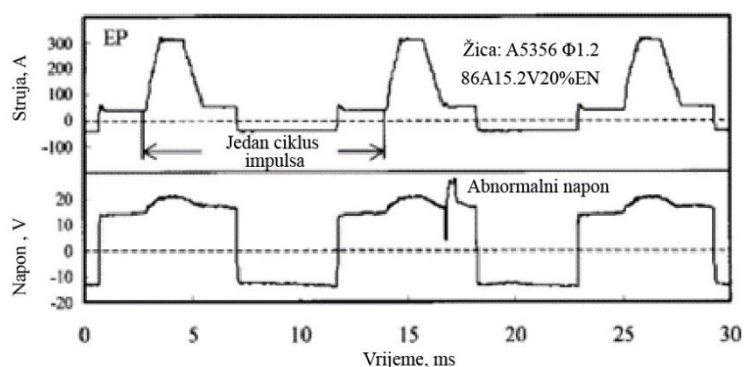


Slika 13. Shematski dijagram sustava za AC MIG impulsno zavarivanje [12]

Ugrađeni mikroprocesor obavlja sve kontrolne funkcije kao što su slijed, oblik pulsne struje i prilagodba duljine luka. Parametri pulsno oblika struje i uvjeti zavarivanja uneseni s "teach pendants" robota prenose se optičkim vlaknom u dvoportnu RAM memoriju (DPRAM) na ploči sučelja za zavarivanje smještenoj u izvoru napajanja za zavarivanje. Mikroprocesor čita parametre pulsno oblika struje iz DPRAM-a i postavlja strujne signale za primarni inverter. Kontroler modulacije frekvencije pulsa (PFM-pulse frequency modulation) prilagođava frekvenciju pulsno toka prema razlici između upute o naponu luka i povratnog napona luka kako bi održao konstantnu duljinu luka. Struja pulsa i njegovo trajanje pravilno su postavljeni kako bi se osigurao prijenos 'jedna kap po pulsu' metala. Struja i trajanje polariteta EN postavljeni su kako bi se kontrolirao koeficijent taljenja (brzina taljenja žice po jedinici struje), unosa topline i dubine prodiranja [12].

Na slici 14. prikazani su tipični obrasci struje i napona zavarivanja. Promjena polariteta iz EP u EN ne izvodi se odmah nakon pulsa, već se događa nakon namjernog vremenskog čekanja od otprilike 1,5ms kako bi se izbjegle mala štrcanja koja se emitiraju iz otvorenog luka (bez pojave

kratkog spoja). Vremensko trajanje odmah nakon polariteta EN (stoga i frekvencija pulsa) prilagođeno je PFM kontrolom kako bi se održala konstantna duljina luka [1].



Slika 14. Tipični obrasci struje i napona tijekom zavarivanja [1]

Ciklus impulsa definiran je kao period od početka pulsa do kraja vremena neposredno prije sljedećeg pulsa. Razvijen je algoritam za kontinuirano praćenje povratnog napona luka trenutnog ciklusa pulsa i određivanje je li dostignuto prikladno vrijeme za završetak trajanja trenutnog ciklusa pulsa. Upotrebom ovog algoritma, prosječna struja i prosječni napon svakog ciklusa pulsa prikazuju linije s padajućim karakteristikama i poboljšava se stabilnost luka [1].

Još jedan faktor koji utječe na stabilnost luka je povratni napon luka. Primjer je prikazan na slici 14., naponska oscilacija luka koja je puno veća od impulsnog napona, dogodi se odmah nakon trenutnog kratkog spoja. Ovaj tip naponskih oscilacija napona uzrokovan je ponašanjem katodnih dijelova kod ponovnog paljenja luka nakon trenutnog kratkog spoja. Naponska oscilacija luka se eliminira prije nego se koristi za PFM kontrolu električnog luka, a stabilnost luka se dodatno poboljšava [1].

3.1. Pozitivan i negativan polaritet

Oblik struje pokazuje da se AC MIG zavarivanje sastoji od pozitivnog (EP – electrode positive) i negativnog (EN – electrode negative) polariteta MIG zavarivanja. S obzirom na oblik električnog luka i prijenos metala, AC MIG proces nije jednostavno nadopunjavanje ova dva zavarivačka postupka. U EP dijelu AC MIG zavarivanja, oblik luka nije znatno različit od jednostavnog pulsno-galvaniziranog MIG zavarivanja s istosmjernom strujom pozitivne elektrode (DCEP – direct current electrode positive), iako je broj kapljica (3 - 4 kapljice) i volumen prve kapljice veći. Oblik luka u EN dijelu AC MIG zavarivanja razlikuje se od jednostavnog pulsno-galvaniziranog MIG zavarivanja s istosmjernom strujom negativne elektrode (DCEP – direct current electrode positive) oblika luka. Katoda vrlo nasilno luta odmah nakon promjene faze, te se luk penje

mного više. Kapljica se može prenijeti tijekom pulsa. Budući da je magnituda struje velika, veličina kapljice je mala. Veličina kapljice tijekom pozadinskog perioda je vrlo mala jer je dio žice uklonjen tijekom EN faze, a preostala čvrsta žica koja može biti taljena ima manji promjer [13].

Slika 15. prikazuje oblik vala struje za impulsni AC MIG, koji se izražava omjerom EN. Omjer EN definiran je omjerom između područja struje polariteta EN i ukupnog područja struje jednog ciklusa. Jednadžba omjera EN prikazana je u jednadžbi (1) [14].

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

gdje je:

I_p , A - impulsna struja

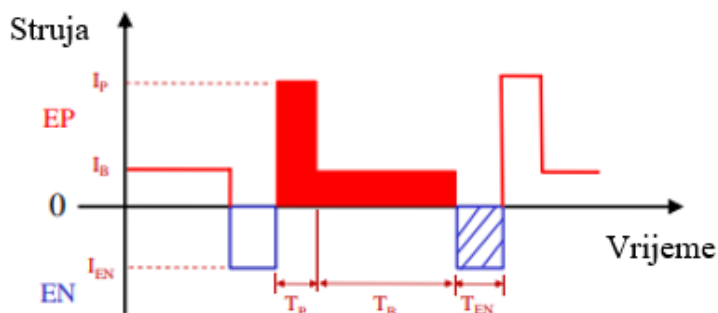
I_B , A – bazna struja

I_{EN} , A – struja negativnog polariteta

T_p , s – vrijeme impulsa

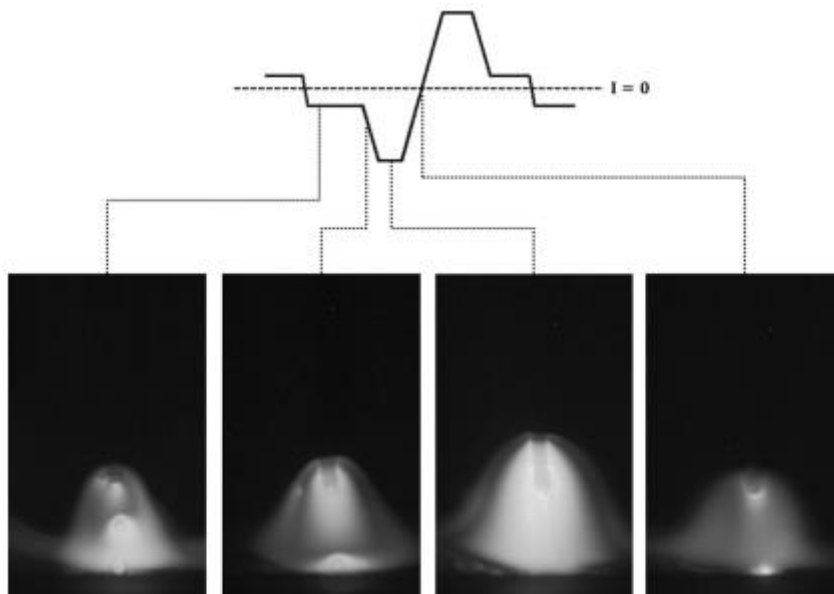
T_B , s – vrijeme bazne struje

T_{EN} , s – vrijeme negativnog polariteta.



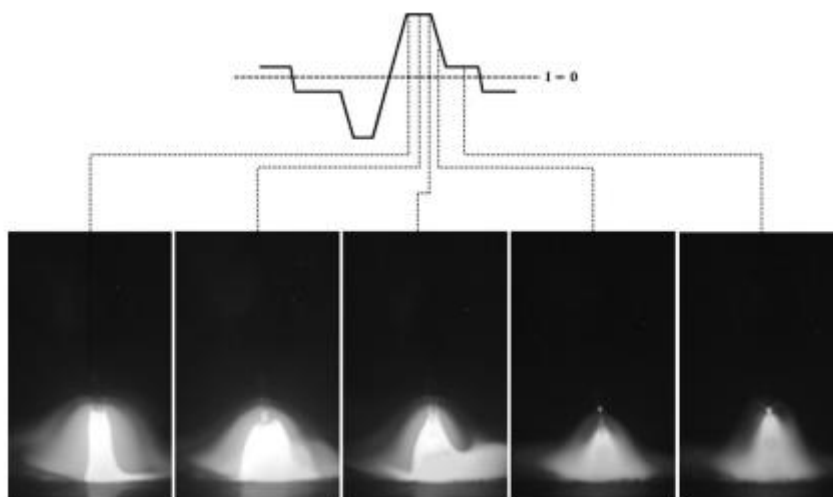
Slika 15. Prikaz valnog oblika struje pri impulsnom AC MIG zavarivanju [14]

U periodu EN faze, povećana vrijednost struje uzrokuje da se luk brzo penje prema čvrstom dijelu žice izvan rastaljene kapljice, kao što je prikazano na slici 16. Tijekom tog vremena, površina žice izložena luku se tali, ali unutrašnjost žice nije rastaljena. Na kraju periode EN, na vrhu žice formira se velika rastaljena kapljica [15].



Slika 16. Ponašanje električnog luka tijekom trajanja negativnog polariteta AC MIG-a [15]

U periodi EP faze, glavni fenomen koji se opaža je odvajanje kapljice, kao što je prikazano na slici 17. U periodu EP kapljica formirana u periodu EN se odvojila od vrha žice i pala na osnovni metal, dok se luk kreće duž padajuće kapljice. Nakon potpunog odvajanja kapljice, luk se ponovno povezuje sa žicom i brzo tali još čvrstu sekciju. U periodu EP, mala kapljica se odvojila i luk je stabiliziran [15].





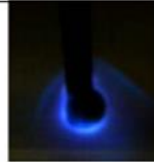


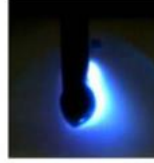

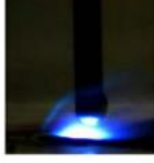




Slika 17. Ponašanje električnog luka tijekom trajanja negativnog polariteta AC MIG-a [15]

Prijelaz s polariteta EP na polaritet EN provodi se ne samo nakon najviše struje impulsa, već nakon vremenskog odmaka od otprilike 1,5ms. Ovo vrijeme čekanja namijenjeno je sprječavanju pojave sitnih prskotina koje bi se mogle raspršiti izvan luka do njegove neposredne okoline, bez obzira na stanje električnog luka. Prskotine se nakupljaju na površini osnovnog

metala padajući na obje strane zavara i dovode do značajnog gubitka izgleda i kvalitete rada. Prskotine su sklonije nastanku u AC pulsnom MIG zavarivanju nego u DC pulsnom MIG zavarivanju. Prskanje se posebno događa tijekom AC pulsnog zavarivanja legura Al - Mg, nehrđajućeg čelika i nelegiranih čelika [15].

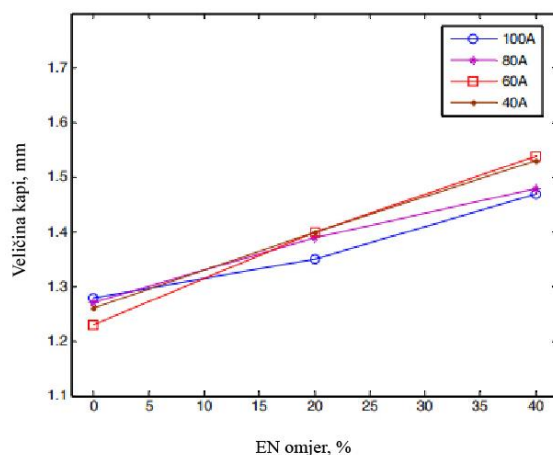
3.2. Utjecaj balansa polariteta na veličinu kapi tijekom zavarivanja

Slika 18. pokazuje kako veličina kapi varira prema omjeru EN pod prosječnim strujama zavarivanja od 40, 60, 80 i 100 A. Kada je omjer EN 0% u impulsnom DC MIG načinu rada, formira se kap čija je veličina gotovo ista kao i promjer žice te se stabilno odvaja i prenosi. Veličina kapi pri omjeru EN od 20% je veća od one pri omjeru EN od 0%. Veličina kapi pri omjeru EN od 40% također je veća od one pri omjeru EN od 20%. Kao što je prikazano na slici 18., brzina taljenja žice i veličina kapi povećavaju se s povećanjem omjera EN, jer je žica bila izravno zagrijavana u EN dijelu AC MIG zavarivanja [14].

EN omjer Struja	0 %	20 %	40 %
40 A			
60 A			
80 A			
100 A			

Slika 18. Formiranja kapljica s različitim EN omjerom i različitim strujama zavarivanja [14]

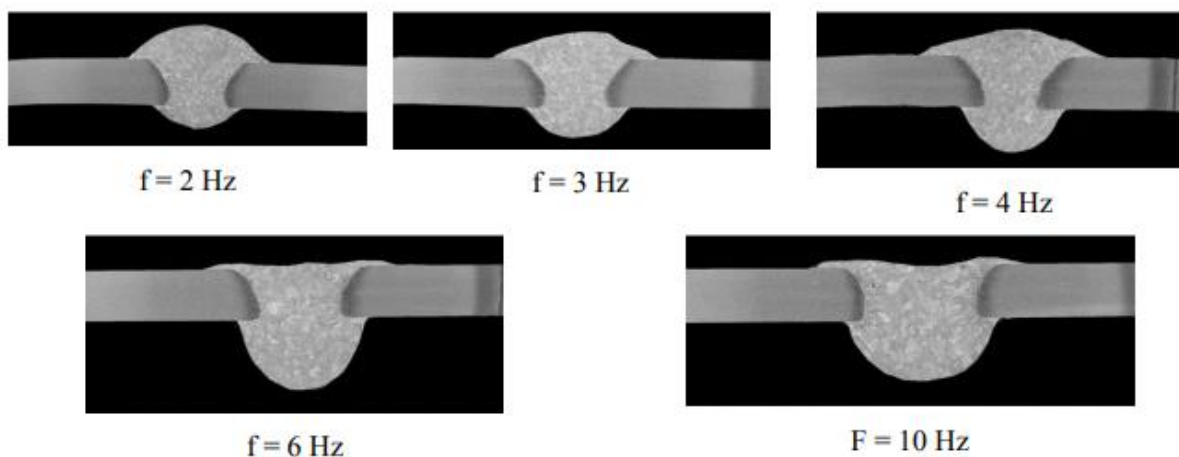
Slika 19. pokazuje odnos između veličina kapi i omjera EN za različite struje zavarivanja. Na ovoj slici prikazano je da veličina kapi raste s povećanjem omjera EN s jednakom strujom zavarivanja [14].



Slika 19. Odnos veličina kapi i omjera EN za različite struje zavarivanja [14]

3.3. Utjecaj frekvencije na geometriju zavara

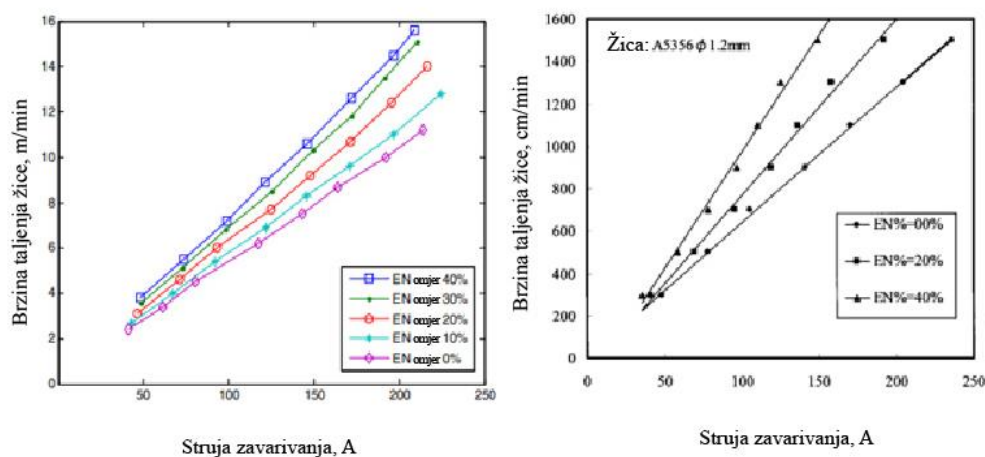
Frekvencija ima utjecaj na dubinu penetracije i unos topline u radni komad, slika 20. Povećanje frekvencije prati povećanje zavara s korijenske strane spoja i smanjenje visine lica zavara. Frekvencija u AC MIG zavarivanju aluminija ključna je za pročišćavanje površine, kontrolu topline, penetraciju zavara i stabilnost luka. Visoke frekvencije poboljšavaju čišćenje i stabilnost, usmjeravaju toplinu, omogućavaju bolju kontrolu nad penetracijom i rezultiraju užim zavarima s manjom deformacijom. Odabir prave frekvencije ovisi o zahtjevima materijala i aplikacije, a prilagodba može znatno poboljšati kvalitetu zavara.



Slika 20. Utjecaj frekvencije na oblik zavara [16]

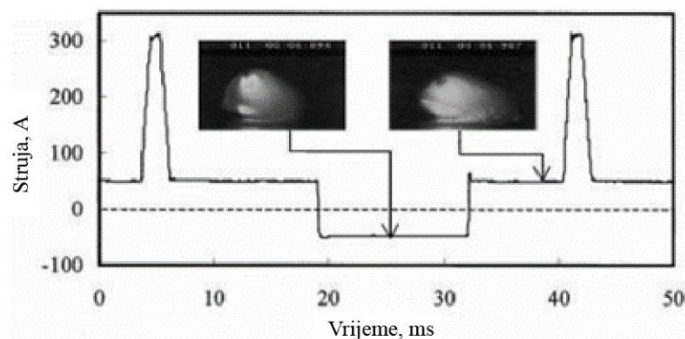
3.4. Utjecaj balansa polariteta na brzinu taljenja žice

Slika 21. prikazuje vezu između brzine taljenja žice i EN omjera. Za konstantnu jakost struje zavarivanja, brzina taljenja žice se značajno povećava s povećanjem EN omjera. Brzina taljenja žice se povećava za 60 % kada se EN omjer mijenja s 0% do 40 %.



Slika 21. Odnos ovisnosti brzine taljenja žice, struje zavarivanja i EN omjera [14]

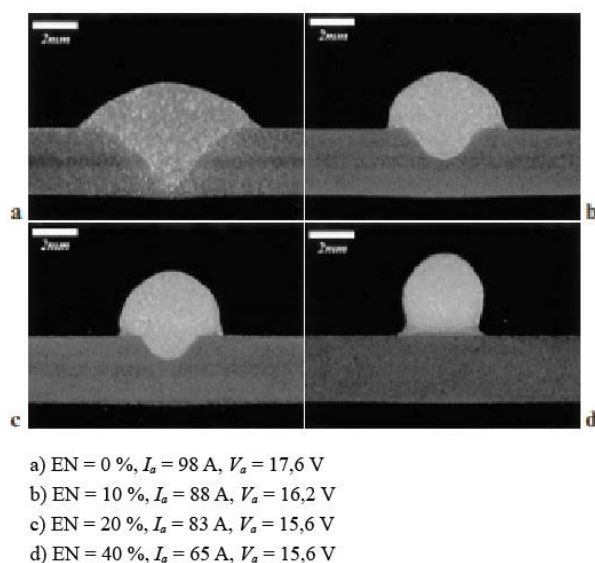
Slika 22. prikazuje značajke električnog luka za EN i EP polaritete snimane pomoću visoko brzinske kamere. Kod EN faze kapljica je jednolično pokrivena električnim lukom, a katodni dijelovi odlaze često na čvrsti dio iznad kapljice jer se katoda lako formira na oksidima. Stoga se toplina luka efektivno koristi za taljenje žice i brzina taljenja se povećava. Suprotno tome, tijekom EP faze luk se nalazi na donjoj polovici kapljice gdje se pregrijava, rezultat toga je manja brzina taljenja žice. Povećanjem EN omjera toplina luka se koristi efektivnije za taljenje žice. Prosječna temperatura kapljice u DC impulsnom zavarivanju je za 110 K viša nego kod AC MIG zavarivanja [17].



Slika 22. Razlika u električnom luku pozitivnog i negativnog polariteta [17]

3.5. Utjecaj balansa polariteta na penetraciju zavara

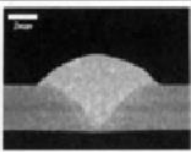
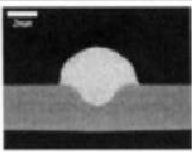
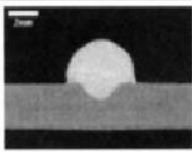
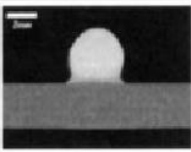
Slika 23. prikazuje odnos između dubine penetracije i EN omjera pri konstantnoj brzini dodavanja žice i brzini zavarivanja. Dubina penetracije značajno se smanjuje s povećanjem EN omjera s 0% do 40%. U AC MIG zavarivanju s konstantnom brzinom dodavanja žice i brzinom zavarivanja dubina penetracije postaje plića s povećanjem EN omjera zbog male struje zavarivanja, što je razlog visokog koeficijenta taljenja na visokom EN omjeru. Zbog male dubine penetracije AC MIG zavarivanje se smatra jednim od optimalnih procesa za zavarivanje tankih limova [17].



Slika 23. Smanjenje dubine penetracije s povećanjem EN omjera u impulsnom AC MIG zavarivanju (brzina dodavanja žice $v_f = 6$ m/min, brzina zavarivanja $v_w = 60$ cm/min) [17]

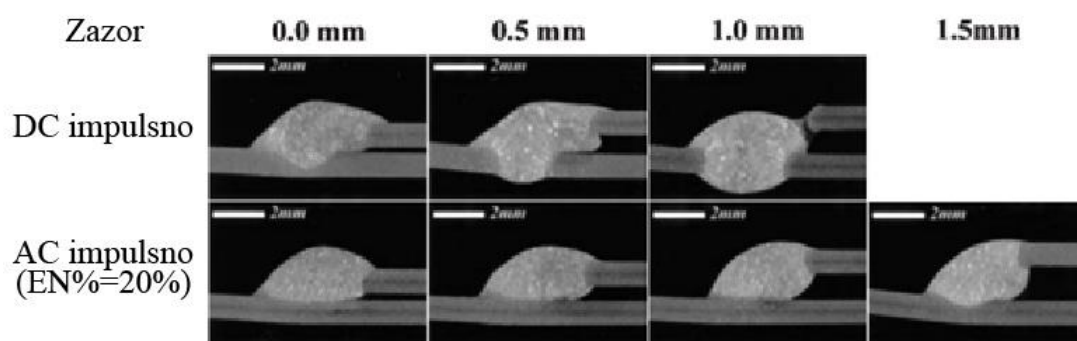
3.6. Utjecaj balansa polariteta na izgled zavara i premošćivanje zazora

Širina i nadvišenje zavara se može kontrolirati promjenom EN omjera prikazanim na slici 24. Povećanjem EN omjera od 0% do 40% nadvišenje se povećava za 54%. Mnogo veće nadvišenje se dobiva zbog niske temperature taljenog materijala kod visokog EN omjera, a količina taljenog materijala je ista [17].

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

Slika 24. Utjecaj EN omjera na izgled zavara [12]

Sposobnost premošćivanja zazora se povećava s većim EN omjerom. Slika 25. prikazuje usporedbu premošćivanja zazora za DC i AC MIG zavarivanje na 20 % EN omjera. AC MIG zavarivanje ima tri puta veću sposobnost premošćivanja zazora od DC MIG zavarivanja za preklonni spoj limova debljine do 1,5 mm [17].

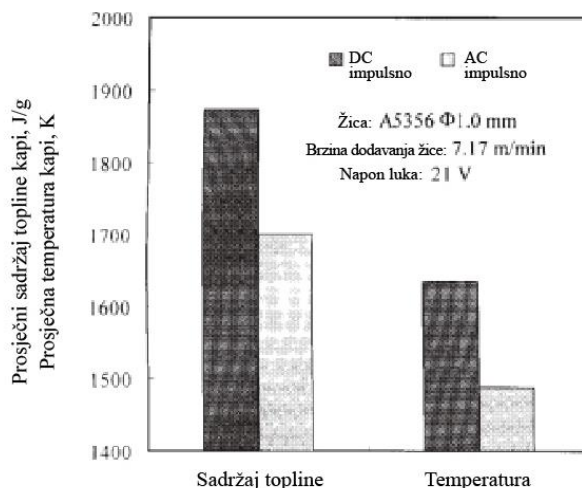


Slika 25. Usporedba tolerancije zazora između AC pulsno zavarivanja i DC pulsno zavarivanja (žica promjera 1,2 mm A5356, osnovni metal debljine 1,0 mm A5052, $v_f = 380$ cm/min, $v_w = 100$ cm/min) [17]

3.7. Utjecaj balansa polariteta na unos topline

Pretpostavlja se da je raspodjela temperature unutar kapljica ujednačena kod zavarivanja. Pod učinkom katodnog čišćenja na vrhu žice, oksidni film prisutan na površini žice se uklanja, i vrlo malo oksida ostaje na površini kapljice. Temperatura između kapljica i čvrste zone na vrhu žice daje točku taljenja žice, koja je konstantna vrijednost. Kako se temperaturni gradijent unutar kapljica razlikuje ovisno o polaritetu elektrode žice, prosječna temperatura ili prosječni sadržaj topline kapljica stoga varira. Slika 26. prikazuje prosječni sadržaj topline kapljica s procijenjenom prosječnom temperaturom kapljica. Kapljice imaju izrazito veći prosječni sadržaj topline u DC pulsnom MIG zavarivanju nego u AC pulsnom MIG zavarivanju. Ovaj

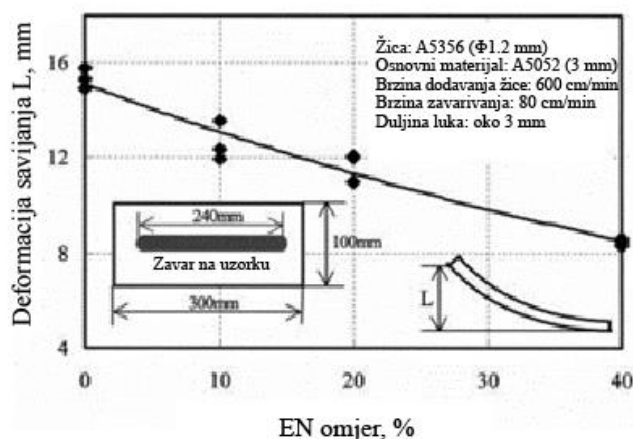
visoki prosječni sadržaj topline također dovodi do intenzivnog isparavanja magnezija unutar kapljica, uzrokujući gubitak topline kapljica. Stoga se pretpostavlja da je stvarni prosječni sadržaj topline kapljica veći od izmjerene vrijednosti [18].



Slika 26. Prosječni unos topline i procijenjena temperatura kapljice [18]

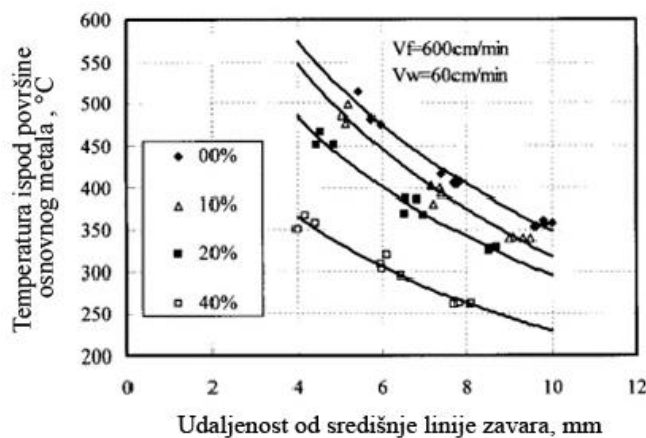
Tijekom DC impulsnog MIG zavarivanja, kapljice imaju veliku unutarnju razliku u temperaturi i može se pretpostaviti da temperatura lokalno premašuje točku isparavanja. Kao rezultat, magnezij sadržan u žici intenzivno isparava, što dovodi do intenzivne proizvodnje dima. S druge strane, tijekom AC pulsog MIG zavarivanja, prosječna temperatura kapljice je otprilike 345 K niža od točke isparavanja. Također, kapljice tada doživljavaju malo lokalno pregrijavanje povezano s isparavanjem magnezija tijekom trajanja EN polariteta. Iz tog razloga, AC pulsnom MIG zavarivanje vodi učinkovitom suzbijanju isparavanja magnezija unutar kapljica i značajno pomaže u smanjenju generiranja para i plinova [18].

Još jedan problem koji rješava AC MIG su deformacije kod zavarivanja tankih limova. Slika 27. prikazuje kako se deformacija smanjuje s porastom EN omjera. Deformacija na 40 % EN omjera je manja za 45 % u usporedbi s DC zavarivanjem zbog manjeg unosa topline [17].



Slika 27. Deformacije kod AC MIG zavarivanja [17]

Slika 28. prikazuje temperature izmjerene ispod površine osnovnog metala tijekom zavarivanja. Unos topline se smanjuje s porastom EN omjera. Za 40 % EN omjera temperatura je za 140 K manja nego kod DC zavarivanja. S manjim unosom topline manje su i deformacije, te je veća sposobnost premoščivanja zavara jer je taljenje gornjeg lima kod preklopnog spoja smanjeno [17].

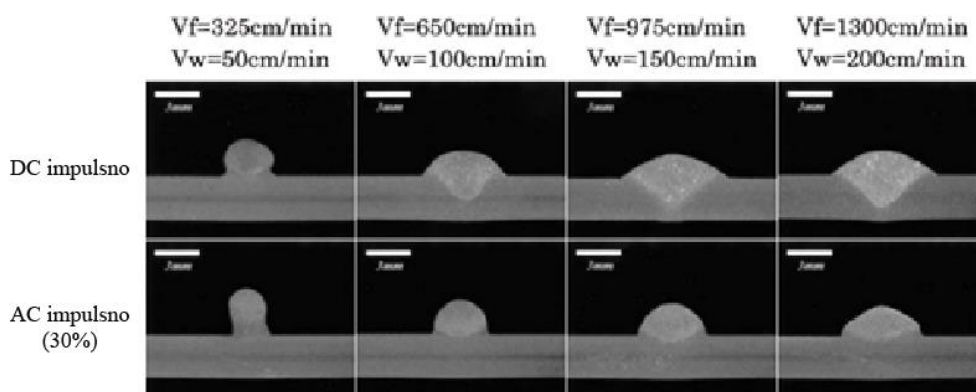


Slika 28. Kontrola unosa topline podešavanjem EN omjera u AC pulsnom MIG zavarivanju ($v_f = 600$ cm/min, $v_w = 60$ cm/min) [17]

3.8. Utjecaj balansa polariteta na produktivnost za zavarivanje tankih limova

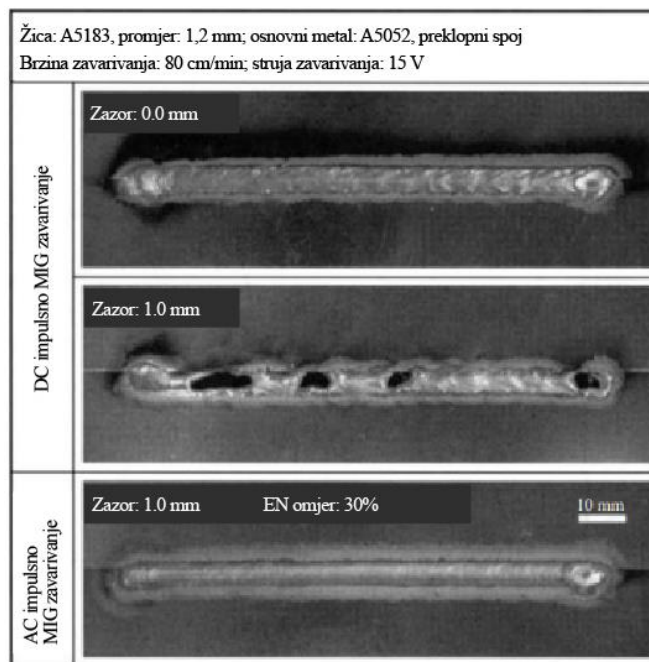
Prednost visoke produktivnosti kod zavarivanja tankih je prikazana na slici 29. Količina deponiranog metala održava se konstantnom održavanjem konstantnog omjera brzine dovoda žice i brzine zavarivanja. Iako je pri niskoj brzini zavarivanja od 50 cm/min dubina penetracije za zavarivanje s impulsnom istosmjernom strujom gotovo jednako plitka kao i kod zavarivanja s pulsnom izmjeničnom strujom, znatno se povećava kako brzina zavarivanja raste. Kao rezultat

toga, maksimalna dostupna brzina zavarivanja za zavarivanje tankih limova impulsnom istosmjernom strujom znatno je ograničena, dok je zavarivanje pulsnom izmjeničnom strujom idealan proces za zavarivanje tankih limova pri mnogo većoj brzini. Na slici 29. se može uočiti da pri zavarivanju impulsnim AC MIG postupkom s 30% EN omjera dolazi do protaljivanja kod brzine od 200 cm/min, dok zavarivanjem impulsnim DC MIG postupkom dolazi do protaljivanja već pri brzini od 120 cm/min. Kao rezultat, maksimalna brzina zavarivanja za zavarivanje pulsnom izmjeničnom strujom u slučaju sa slike veća je za faktor od otprilike tri u usporedbi s impulsnom istosmjernom strujom [17].



Slika 29. Usporedba dubina penetracije između AC pulsno zavarivanja i DC pulsno zavarivanja uz konstantnu stopu taloženja metala ($v_f/v_w \sim 6,5$) [17]

Slika 30. prikazuje usporedbu rezultata dobivenih DC pulsno MIG zavarivanjem i AC pulsno MIG zavarivanjem u preklopnom zavarivanju 1 mm tankog lima Al–Mg legure (A5052) pri struji zavarivanja od 50 A. Kada se koristi DC pulsno MIG zavarivanje, zavarivanje je završeno bez protaljivanja kada nije bilo praznine, ali za prazninu od 1,0 mm, bilo je nedovoljno nataljenog metala da se premosti praznina i unesena toplina koncentrirana je u donjem limu, što je dovelo do protaljivanja osnovnog metala. S druge strane, kada se koristilo AC pulsno MIG zavarivanje, nataljeni metal bio je dovoljan, razina nadvišenja je visoka, te se praznina od 1 mm ili veća lako zavarila, s rezultatom da se toplina nije koncentrirala u donjem limu, izbjegavajući bilo kakav rizik od protaljivanja [12].



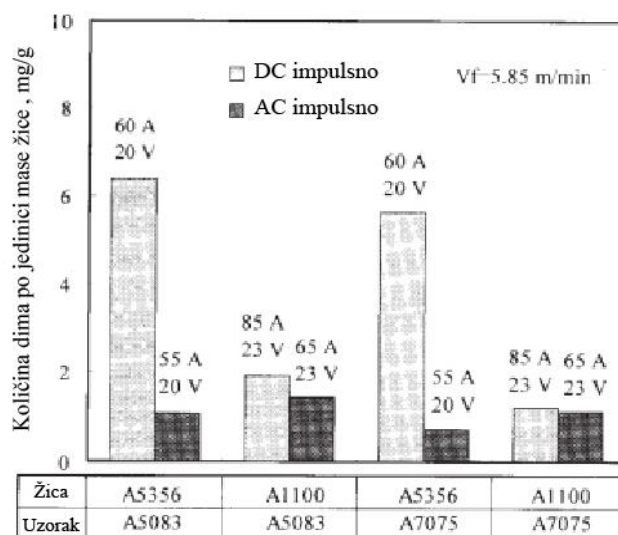
Slika 30. Usporedba zavarivanja tankih aluminijskih limova različitim MIG postupcima [12]

3.9. Efekt smanjenja stvaranja štetnih plinova tijekom zavarivanja

Štetni plinovi, koji se neizbježno generiraju tijekom procesa zavarivanja, može biti izvor profesionalne pneumokonioze kada se dugoročno udiše, te zaslužuje ozbiljno razmatranje u pogledu higijene na radu. Za poboljšanje radnog okruženja na gradilištima zavarivanja, ključno je osigurati potpunu izmjenu zraka na radnim mjestima, lokalnu ekstrakciju u blizini zavarenih objekata te korištenje zaštitnih respiratornih uređaja gdje je potrebno. Međutim, trenutno dostupne preventivne mjere imaju određene nedostatke, kao što su velika ulaganja u opremu i objekte te otežana operabilnost zbog nošenja respiratornih zaštitnih uređaja. Osim takvih pasivnih mjera, poželjno je razviti zavarene materijale ili metode koje su u stanju suzbiti generiranje para i plinova pri zavarivanju [18].

Slika 31. uspoređuje učinke sastava žice i osnovnog metala na opseg stvaranja štetnih plinova tijekom DC MIG zavarivanja i AC MIG zavarivanja. Individualni testovi provedeni su s različitim kombinacijama žica i osnovnog metala pri konstantnom protoku žice od 5,85 m/min i podešavanjem napona zavarivanja za postizanje minimalnog stvaranja štetnih plinova. Tijekom DC MIG zavarivanja, količina plinova tijekom zavarivanja s žicom A5356 je oko 3 do 4,5 puta veća nego s žicom A1100. Glavna razlika u sastavima obiju žica je sadržaj magnezija. Žica A1100 ne sadrži magnezij, dok žica A5356 sadrži 4,69% Mg. Tijekom DC

MIG zavarivanja legura Al-Mg, sadržaj magnezija koji je uključen u žicu kao legirajući element stoga znatno doprinosi povećanju generiranja plinova tijekom zavarivanja [18].

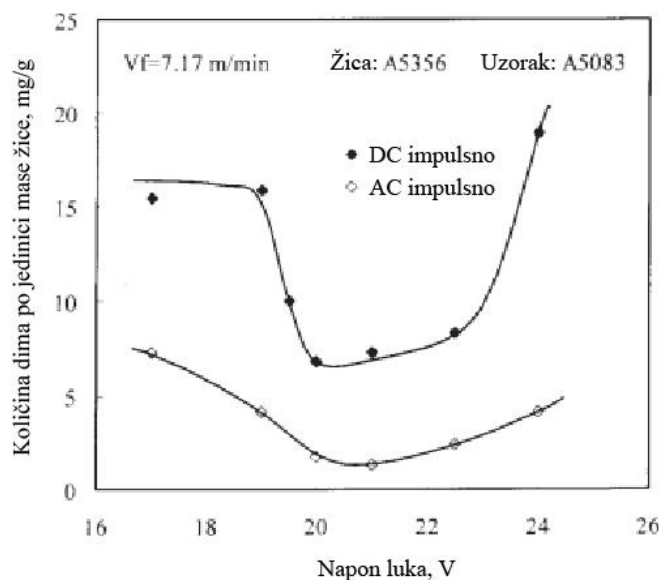


Slika 31. Efekt osnovnog materijala i procesa zavarivanja na stvaranje štetnih plinova [18]

AC MIG zavarivanjem količina generiranih štetnih plinova ostaje gotovo konstantna bez obzira na tip žice (sadržaj legirajućih elemenata), pri čemu se generira manje plinova nego tijekom DC MIG zavarivanja s A1100 žicom. AC MIG zavarivanje učinkovito suzbija doprinos generiranja plinova koji proizlazi iz magnezija uključenog u žicu. Odnos između gore navedenih količina generiranog plina, sastava žice i zavarivačkih procesa pokazuje točno isti trend i za A5083 i A7075 radne komade. A5083 radni komadi sadrže 5,6% Zn s točkom taljenja od 1184 K. Iako cink lakše isparava od magnezija s točkom taljenja od 1363 K, količina generiranog plina tijekom zavarivanja A7075 radnih komada često nije veća nego kada se koriste A5083 radni komadi. Iako isparljivi legirajući elementi na strani osnovnog metala malo doprinose generiranju plinova tijekom DC MIG zavarivanja kada je postavljen odgovarajući napon električnog luka, dok je u ovom pogledu dominantan doprinos lako isparljivih legirajućih elemenata na strani žice [18].

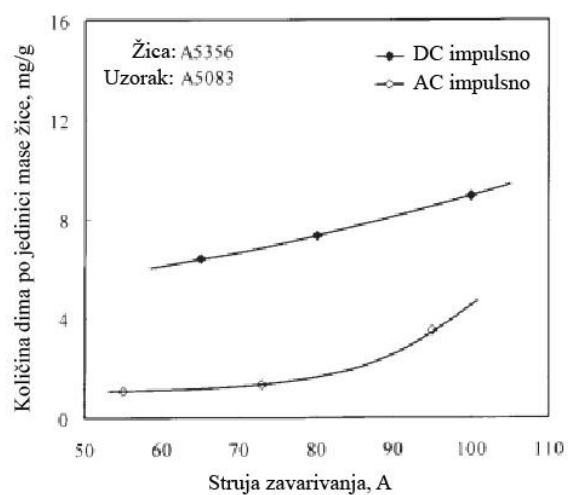
Slika 32. prikazuje učinak napona luka na generiranje plinova. Ovdje je napon električnog luka variran u širokom rasponu od 17 do 24 V pri konstantnoj brzini dovoda žice od 7,7 m/min. Količina generiranja plina tijekom AC MIG zavarivanja značajno je manja nego kod DC MIG zavarivanja. I DC MIG zavarivanje i AC MIG zavarivanje imaju optimalni raspon napona luka (20~22,5 V) unutar kojeg je količina generiranja plina minimalna. Ako se nadmaši optimalni

raspon napona električnog luka, količina generiranja plina tijekom DC MIG zavarivanja oštro se povećava, dok je povećanje generiranja plina tijekom AC MIG zavarivanja relativno blaže. [18].



Slika 32. Efekt napona električnog luka i procesa zavarivanja na generiranje štetnih plinova [18]

Slika 33. prikazuje učinak struje zavarivanja na generiranje plina. Napon električnog luka pri svakoj struji zavarivanja postavljen je na vrijednost koja daje najmanju količinu plina, kako je naznačeno rezultatima optimalnog raspona napona električnog luka. Količina generiranja plinova tijekom DC i AC MIG zavarivanja obično raste s povećanjem struje zavarivanja, iako je količina generiranja plinova kod AC MIG zavarivanja znatno manja nego kod DC MIG zavarivanja u cijelom eksperimentalnom rasponu struje zavarivanja. Ako se tijekom AC MIG zavarivanja premaši struja od 90 A, povećanje generiranja plinova je također mnogo veće. To je zbog toga što, povećanjem struje zavarivanja, kroz veću frekvenciju pulsa i kraće vrijeme trajanja EN polariteta, utjecaj struje zavarivanja postaje slabiji na način da se približava DC MIG zavarivanju [18].



Slika 33. Efekt struje i procesa zavarivanja na generiranje štetnih plinova [18]

4. EKSPERIMENTALNI DIO

U eksperimentalnom radu istražuje se utjecaj balansa polariteta i vrste zaštitnog plina, s posebnim naglaskom na utjecaj helija, na izgled zavara i stabilnost luka prilikom navarivanja devet uzoraka aluminija koristeći AC (izmjeničnu struju) MIG postupak zavarivanja. Balans polariteta struje i pravilan odabir zaštitnih plinova ključni su faktori koji direktno utječu na kvalitetu zavara, uključujući dubinu penetracije, geometriju zavarenog spoja te mehanička i korozijska svojstva zavarenog spoja.

4.1. Osnovni i dodatni materijal

Aluminij oznake EN AW 5083 [19], prema normi HRI CEN ISO/TR 15608:2018 pripada grupi 22.4, je korišten u eksperimentu kao osnovni materijal, karakterizira ga izvrsna otpornost na koroziju, osobito u morskoj i industrijskoj atmosferi. Ova legura je primarno sastavljena od aluminija, a obogaćena je magnezijem, što joj daje poboljšana mehanička svojstva i čini je jednom od najjačih legura aluminija koje nisu toplinski obrađene. Legura 5083 se koristi u različitim primjenama poput konstrukcije brodova, kontejnera, željezničkih i industrijskih vozila, te vojnih primjena. Aluminij 5083 zadržava izvanredne performanse čak i nakon dugotrajne izloženosti ekstremnim okruženjima, što ga čini pouzdanim izborom za mnoge industrijske i inženjerske primjene. Tablica 5. i 6. prikazuju mehanička svojstva i kemijski sastav osnovnog materijala, aluminijske legure 5083.

Tablica 5. Mehanička svojstva osnovnog materijala [20]

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 tečenja, MPa	190

Tablica 6. Kemijski sastav osnovnog materijala [20]

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%

Za dodatni materijal je korištena žica legure aluminija šeste serije promjera 1,0 mm. Može se koristiti za zavarivanje spojeva, kao i za aditivnu proizvodnju električnim lukom i žicom (WAAM). Specifikacija žice je prikazana na slici 34.

MIGAL.CO GmbH

Abnahmeprüfzeugnis 3.1 / Test Certificate 3.1

nach /based on EN 10204

WAZ-Nummer / doc.-number: **0000486**Datum / date: **3.3.2023**Bezeichnung/Designation **MA-6063**Legierung/Alloy: **AlMgSi0,5**Aufmachung/Packaging: **MIG, 7 kg, B-300**

Zusammensetzung / chemical composition

(Istwert nach Angabe des Vordraht Lieferanten / actual value according to rod supplier)

Werte in % values in %	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	B	Be	Al	
Sollwerte target values	0,2-0,6	max 0,35	max 0,1	max 0,1	0,45-0,9	max 0,1	max 0,1	0,2-0,3	0,04-0,06	max 0,0003		
Istwert / actual value Charge/batch 0000486	0,52	0,23	0,05	0,02	0,5	<0,01	0,01	0,32	0,05	0,00	Bal.	

Mechanisch-technologische Mindestwerte des reinen Schweißgutes (Zeugnis EN 10204-2.2)

Mechanical-technological minimum values of the pure weld metal (Certificate EN 10204-2.2)

Zugfestigkeit tensile strength Rm N/mm ²	Streckgrenze yield strength Rp0,2 N/mm ²	Dehnung elongation %
150	80	15

Drahtdurchmesser / wire diameter in mm	0,98
---	-------------

Wir bescheinigen hiermit, dass das oben beschriebene Material geprüft wurde und den Bedingungen des Auftrags entspricht.
We hereby certify that the material described above has been tested and complies with the terms of the order contract.

Bemerkungen / notes:

Dieses Dokument wurde elektronisch erstellt und ist auch ohne Unterschrift gültig.

This document was generated electronically and is valid without signature.

MIGAL.CO GmbH
Waltstraße 2
94405 Landau/Isar
Tel.: +49 9951 69059-0
Email: info@migal.co

MIGAL.CO
WIR SIND AUF DRABT!

Slika 34. Specifikacija žice [21]

4.2. Oprema za navarivanje

Korištenje opreme kao što su Welbee Inverter W400 proizvođača OTC Daihen i Bug-O System za mehanizirano zavarivanje omogućuje visoku preciznost, dosljednost i učinkovitost u procesu navarivanja. Welbee Inverter W400, proizvod tvrtke OTC Daihen, je napredni zavarivački izvor struje koji nudi izvanredne performanse za MIG/MAG i TIG zavarivanje. S druge strane, BUG-O System je sistem za mehanizirano zavarivanje koji pruža konzistentnu i preciznu primjenu zavarivanja na uzorcima. Sistem je dizajniran da poboljša produktivnost i kvalitetu zavarivanja, smanjujući pritom utjecaj ljudskih pogrešaka. Kombinacija ovog sistema s Welbee Inverterom W400 omogućuje automatizaciju procesa navarivanja.

4.2.1. Uređaj za AC MIG zavarivanje

Welbee Inverter W400 je posebno dizajniran kako bi zadovoljio različite industrijske potrebe i primjenjiv je u širokom spektru zavarivačkih primjena. Zahvaljujući modernoj tehnologiji invertera, ovaj uređaj može provesti precizno zavarivanje s visokom razinom kontrole i smanjenim utjecajem topline, što je ključno za kvalitetno zavarivanje. Uređaj je prikazan na slici 35.



Slika 35. Welbee Inverter W400

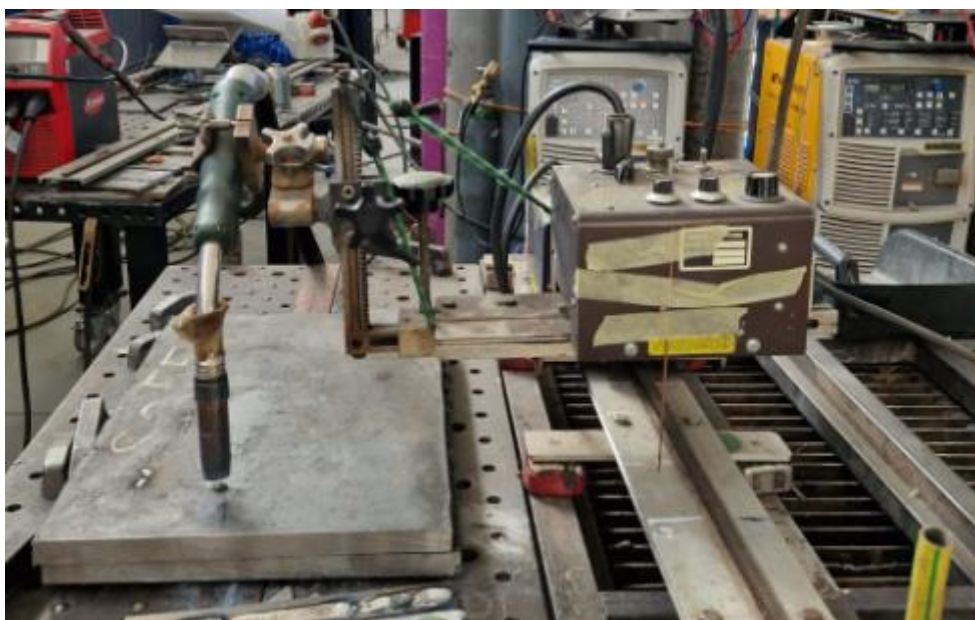
Značajke uređaja za zavarivanje su prikazane u tablici 7.

Tablica 7. Tehničke karakteristike uređaja "Welbee Inverter W400" [16]

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

4.2.2. Bug – O System

BUG-O Systems predstavlja seriju modularnih sustava i alata dizajniranih za precizno vođenje zavarivačke opreme tijekom procesa zavarivanja i rezanja. Ovi sustavi su posebno korisni u procesima navarivanja uzoraka jer pružaju visoku razinu preciznosti, ponovljivosti i efikasnosti. Primjena BUG-O sistema u navarivanju uzoraka može znatno poboljšati kvalitetu i dosljednost zavarenih spojeva, smanjiti troškove i povećati produktivnost. Slika 36. prikazuje uređaj za mehanizirano navarivanje.



Slika 36. Bug-O System

Primjena Bug-O system - a za zavarivanje uključuje razne sektore kao što su brodogradnja, proizvodnja teške opreme, konstrukcija cjevovoda, te proizvodnja industrijskih i željezničkih

vozila. Bug-O System može se koristiti za automatizaciju raznih zavarivačkih tehnika, uključujući MIG, TIG, podvodno i elektrolučno zavarivanje.

4.3. Navarivanje uzoraka

Korištenjem različitih parametara AC MIG postupka zavarivanja, navarivana su 9 uzoraka na tri metalne ploče dimenzija 220 x 160 mm (š x d) i debljine od 8 mm. Kao pripremni korak, svaka ploča je temeljito očišćena alkoholom kako bi se osigurala maksimalna kvaliteta navarivanja te uklonile nečistoće s površine. Za proces navarivanja korišten je postupak AC MIG, koji se ističe svojom sposobnošću da osigura čvrste i pouzdane zavare uz minimalno prskanje. Jedinstvenost ovog postupka leži u upotrebi precizno reguliranog balansa polariteta, što omogućuje optimalne rezultate navarivanja i adaptaciju na specifične zahtjeve svakog pojedinog zavara. Ova metoda nije samo efikasna, već i pruža dodatnu fleksibilnost u radu s različitim materijalima i uvjetima navarivanja. Promatran je utjecaj zaštitnog plina, uglavnom udjela He i balansa polariteta na geometriju navara i stabilnost procesa.

Parametri koji su držani konstantnim tijekom zavarivanja su:

- struja zavarivanja, $I = 170 \text{ A}$
- konstantna brzina zavarivanja, $v = 76 \text{ cm/min}$
- protok zaštitnog plina 18 l/min
- slobodni kraj žice 10 mm.

Unos topline se izračunava prema formuli (2):

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

gdje je:

Q - unesena topline, 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 $k = 0,8$)

Tablica 8. prikazuje parametre navarivanja iz kojeg se može uočiti da s promjenom balansa polariteta dolazi do promjene napona električnog luka, koji se povećava sa smanjenjem EN

omjera, te se smanjuje i brzina taljenja žice. Razlog smanjenja je zbog manjeg koeficijenta taljenja žice sa smanjenjem EN omjera što je sukladno teoriji. Povećanjem udjela He na 50% povećava se i napon zavarivanja zbog većeg ionizacijskog potencijala i veće toplinske vodljivosti iz tih razloga zahtijeva veću energiju da bi zadržao luk stabilnim.

Tablica 8. Parametri navarivanja

UZORAK	Jakost struje, A	Napon, V	Zaštitni plin	Balans, %	Brzina dodavanja žice, m/min	Unos topline, kJ/cm
11	170	19,5->19,5	Ar	50	18	2,09
12		22,6->20,3		0	17,2	2,42
13		22,9->20,9		-50	15,2	2,46
21		19,5->20,3	Ar + 15% He	50	18	2,09
22		22,6->20,5		0	17,2	2,42
23		22,9->21,5		-50	15,2	2,46
31		24,5->22,9	Ar + 50% He	50	18	2,63
32		27,6->24,8		0	17,2	2,96
33		27,9->24,4		-50	15,2	3,00

Na uzorcima je ispitivan utjecaj balansa polariteta i utjecaj udjela He u zaštitnom plinu na oblik zavara i stabilnost luka. Utjecaj balansa istraživao je na različitim skupinama uzoraka: uzorci 11, 12 i 13 testirani su pri uvjetima korištenja 100% Ar, dok su uzorci 21, 22 i 23 ispitani s obzirom na utjecaj balansa pri mješavini Ar i 15% He. Nadalje, uzorci 31, 32 i 33 analizirani su pod utjecajem balansa pri jednakim udjelima argona i helija, odnosno pri mješavini 50% Ar + 50% He.

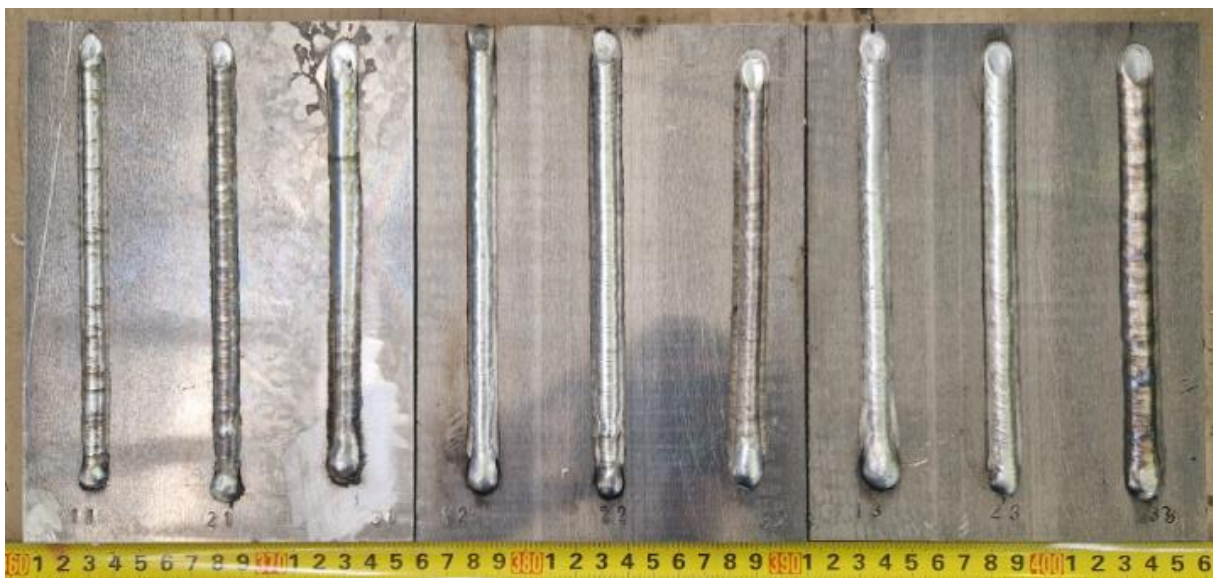
Istraživanje utjecaja zaštitnog plina na zavarivanje provodilo se kroz tri različite grupe uzoraka, svaka s određenim balansom polariteta (EN). Na uzorcima 11, 21 i 31 analiziran je utjecaj zaštitnog plina pri balansu EN = 50%. U drugoj skupini, uzorci 12, 22 i 32 bili su predmet istraživanja utjecaja zaštitnog plina pri balansu EN = 0%. Naposljetku, na uzorcima 13, 23 i 33 ispitivan je utjecaj zaštitnog plina pri balansu EN = -50%.

Slika 37. prikazuje uzorke navarivanja prije čišćenja alkoholom. Primjetna je očita promjena u širini navara svakog uzorka uslijed promjene balansa polariteta i udjela helija u zaštitnom plinu kod navarivanja. Na svim spojevima uočava se crni trag čađi, što je čest fenomen pri zavarivanju legura serije 5XXX zbog visoke prisutnosti magnezija.

Slika 38. prikazuje uzorke navarivanja nakon čišćenja.



Slika 37. Prikaz svih uzoraka nakon navarivanja



Slika 38. Prikaz svih uzoraka nakon čišćenja alkoholom

4.3.1. Vizualna analiza navara

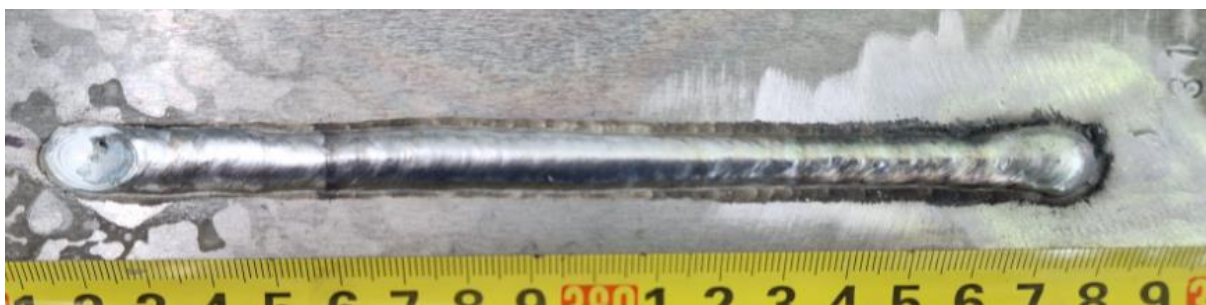
Slike 39. – 47. prikazuju sve uzorke navarivanja nakon čišćenja. Kod zavarivanja s Ar ili kombinacijom Ar i He nema vidljivih kapljica metala izvan područja zavora, malo je prskanje. Navar s 100% Ar ima svjetliju i jednoličnu boju bez znakova pretjerane oksidacije u usporedbi s bojom navara kod 50% He gdje je tamnija boja zbog veće toplinske vodljivosti i bržeg hlađenja. Nema vidljivih pogrešaka na površini navara.



Slika 39. Uzorak 11 – 100%Ar, EN = 50%



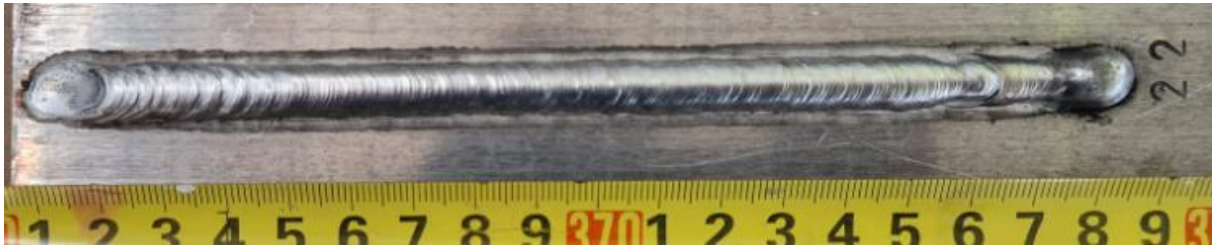
Slika 40. Uzorak 21 – Ar + 15% He, EN = 50%



Slika 41. Uzorak 31 – 50% Ar + 50% He, EN = 50%



Slika 42. Uzorak 12 – 100%Ar, EN = 0%



Slika 43. Uzorak 22 – Ar + 15% He, EN = 0%



Slika 44. Uzorak 32 – 50% Ar + 50% He, EN = 0%



Slika 45. Uzorak 13 – 100%Ar, EN = - 50%



Slika 46. Uzorak 23 – Ar + 15% He, EN = - 50%



Slika 47. Uzorak 33 – 50% Ar + 50% He, EN = - 50%

4.4. Izrada makroizbruska

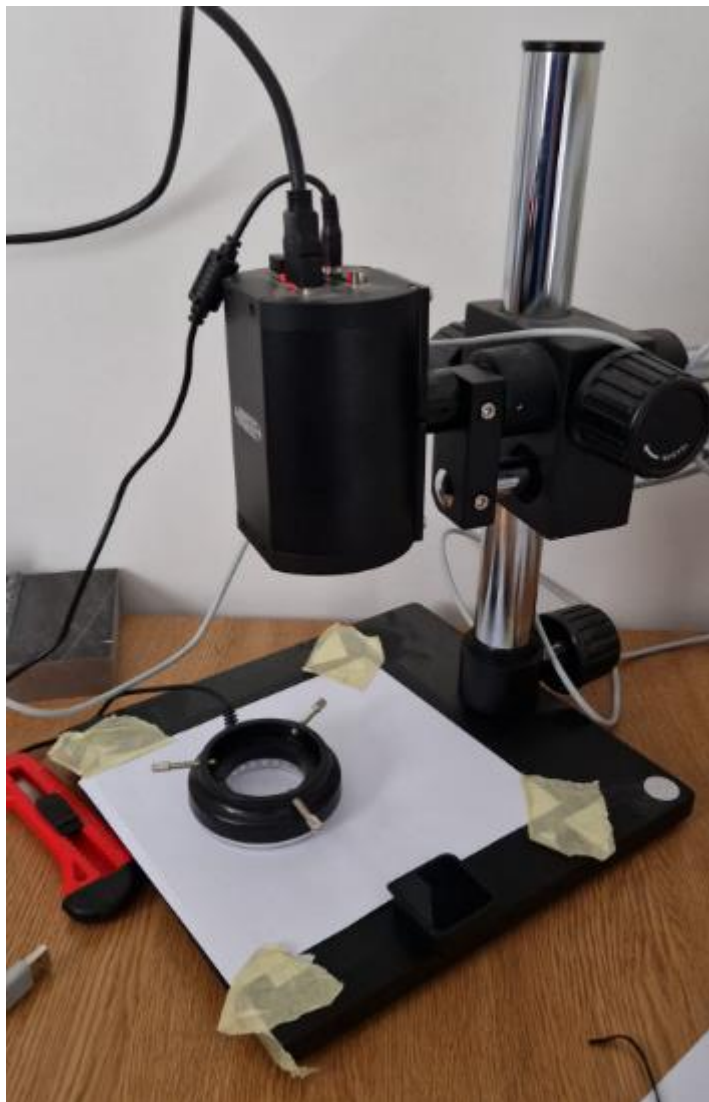
Nakon navarivanja i čišćenja uzoraka, slijedilo je rezanje uzoraka na jednakim udaljenostima od početka navarivanja, tračnom pilom na slici 48., za dobivanje poprečnog presjeka navara.

Proces izrade makroizbrusaka uključuje seriju koraka: turpijanja, brušenja, poliranja te kemijskog nagrivanja uzoraka.



Slika 48. Pila za rezanje uzoraka „BS 350 GH“

Nakon što su uzorci izrezani, turpijom su im se izgladili oštri rubovi kako bi se olakšalo daljnje rukovanje i brušenje. Brušenje je obavljeno koristeći se brusnim papirima s različitim stupnjevima hrapavosti: P120, P200, P320, P600, P1200, P2400, i P4000, počevši od najgrubljeg prema najfinijem. Pri brušenju uzoraka, posebno od hrapavosti P320 do P4000, brzina vrtnje ploče bila je postavljena na 300 okretaja u minuti, a tijekom postupka koristila se i voda za hlađenje. Nakon završetka brušenja, uzorci su u Laboratoriju za materijalografiju nagriveni kemijskom otopinom kako bi se jasnije istaknula makrostruktura navara. Slika 49. prikazuje mikroskop kojim se slikala makrostruktura navara.



Slika 49. Mikroskop „Insize“ za slikanje makrostrukture uzoraka

4.5. Analiza makrostrukture

Analiza makrostrukture zavara je detaljan postupak koji se koristi za ispitivanje, ocjenjivanje, te procjene pogrešaka i analize geometrije zavara. Analiza makrostrukture pruža ključne informacije o kvaliteti zavara, otkrivajući potencijalne probleme i omogućujući poboljšanja u procesu zavarivanja. Tablica 9. prikazuje nadvišenje, penetraciju, širinu, te kut navara za svaki uzorak. Kvalitetna analiza geometrije zavara mora obuhvatiti sve elemente kako bi se osiguralo da zavar ispunjava sve tehničke i sigurnosne zahtjeve. Pravilna širina, penetracija, kut i nadvišenje ključni su za osiguranje strukturne čvrstoće i dugovječnosti zavarenog spoja.

Tablica 9. Geometrija navara uzoraka

UZORAK	Nadvišenje(R), mm	Penetracija(P), mm	Širina(W), mm	Kut(α), °
11	3,20	2,10	7,68	113,06
12	2,99	2,86	9,16	138,37
13	2,50	3,57	10,00	141,80
21	3,00	2,15	8,23	116,57
22	2,84	3,03	9,02	122,79
23	2,39	3,94	9,57	142,91
31	2,96	3,17	10,11	129,71
32	2,99	3,95	8,92	126,87
33	2,40	4,99	10,92	143,79

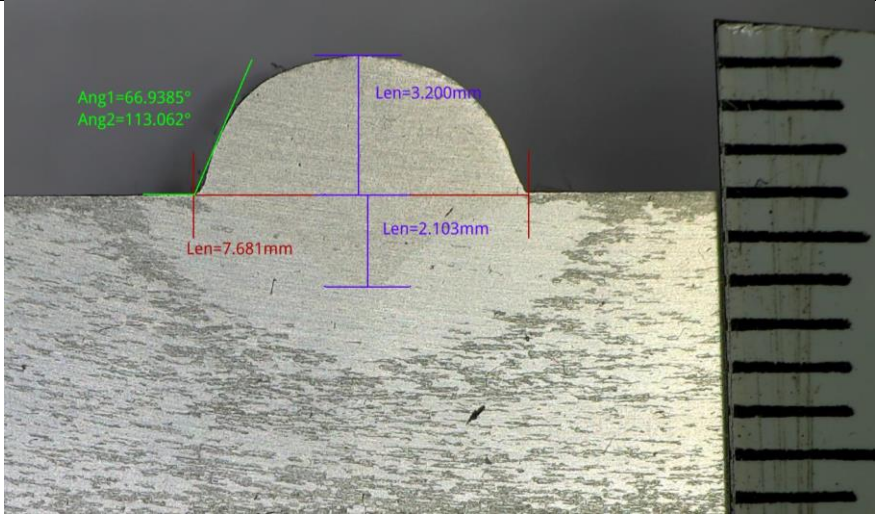
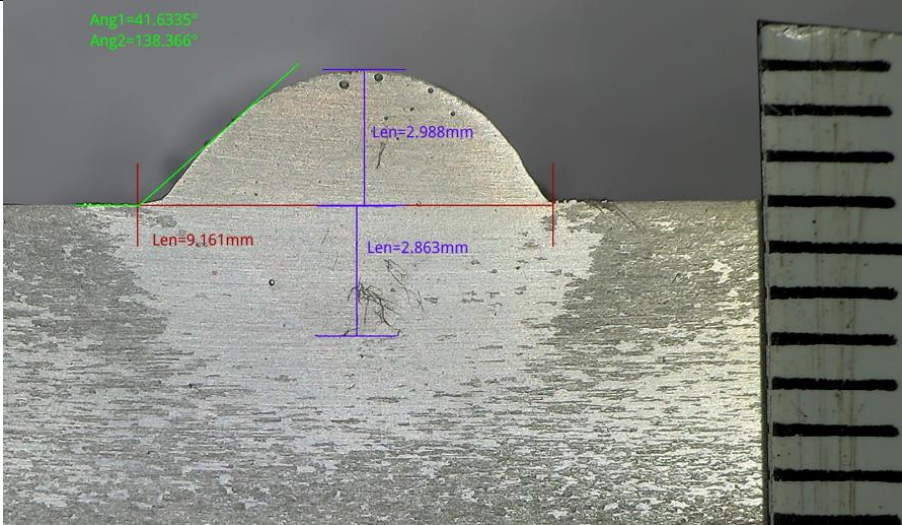
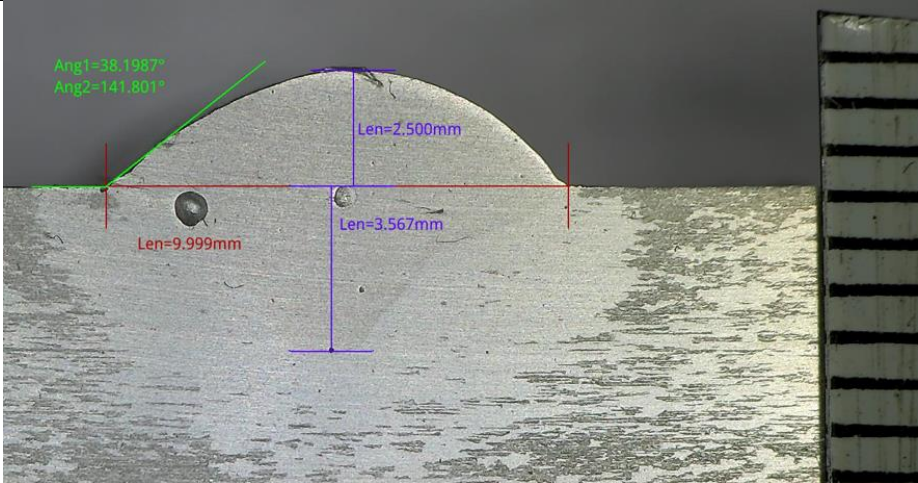
4.5.1. Utjecaj balansa polariteta na geometriju i poroznost navara

U AC MIG zavarivanju aluminija, iznos EN omjera značajno utječu na izgled i geometrijske karakteristične veličine zavora. Ova analiza istražuje kako se karakteristike zavora, posebno nadvišenje, širina, penetracija i kut mijenjaju pod uvjetima variranja EN omjera.

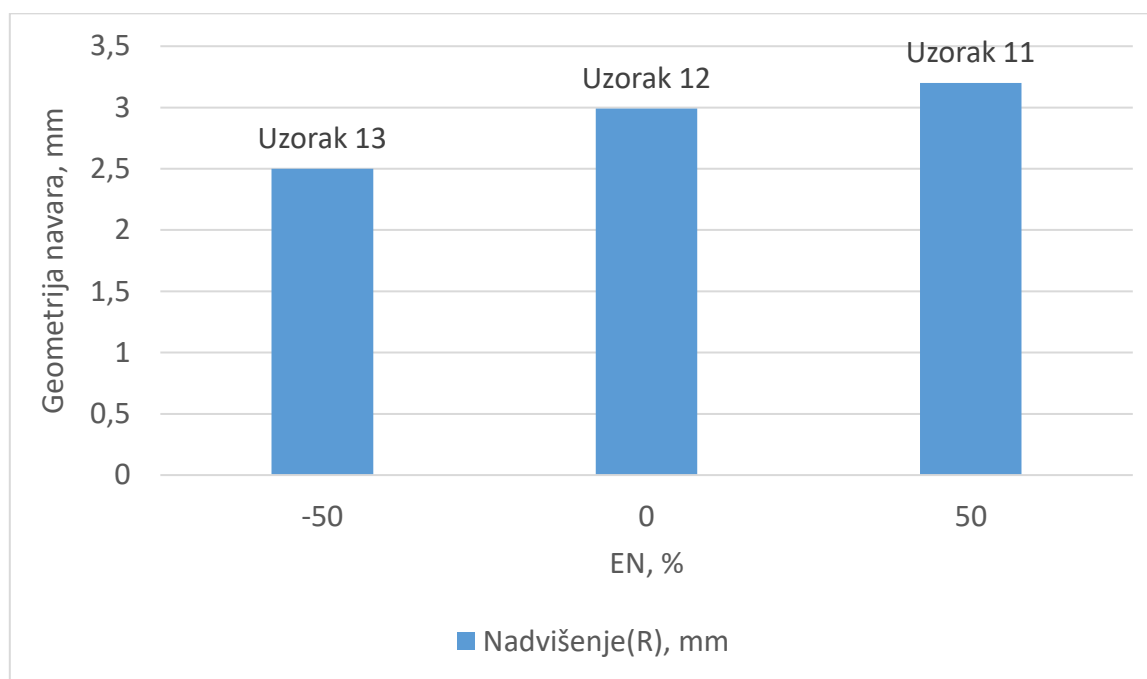
Tablica 10. prikazuje makrostrukture uzoraka 11, 12, 13 pri zaštiti od 100% Ar s različitim EN omjerom. Sa povećanjem EN omjera uočljiva je razlika izgleda i poroznosti navara.

Poroznost kod zavarivanja aluminija predstavlja značajan izazov koji utječe na kvalitetu i integritet zavarenih spojeva. Ovaj fenomen, karakteriziran formiranjem malih plinskih mjehurića ili šupljina unutar metala zavora, može znatno umanjiti mehanička svojstva i trajnost spoja. Stoga je razumijevanje uzroka koji doprinose nastanku poroznosti od ključne važnosti za osiguravanje optimalnih rezultata zavarivanja.

Tablica 10. Prikaz makrostrukture različitih EN omjera pri zaštiti 100%Ar

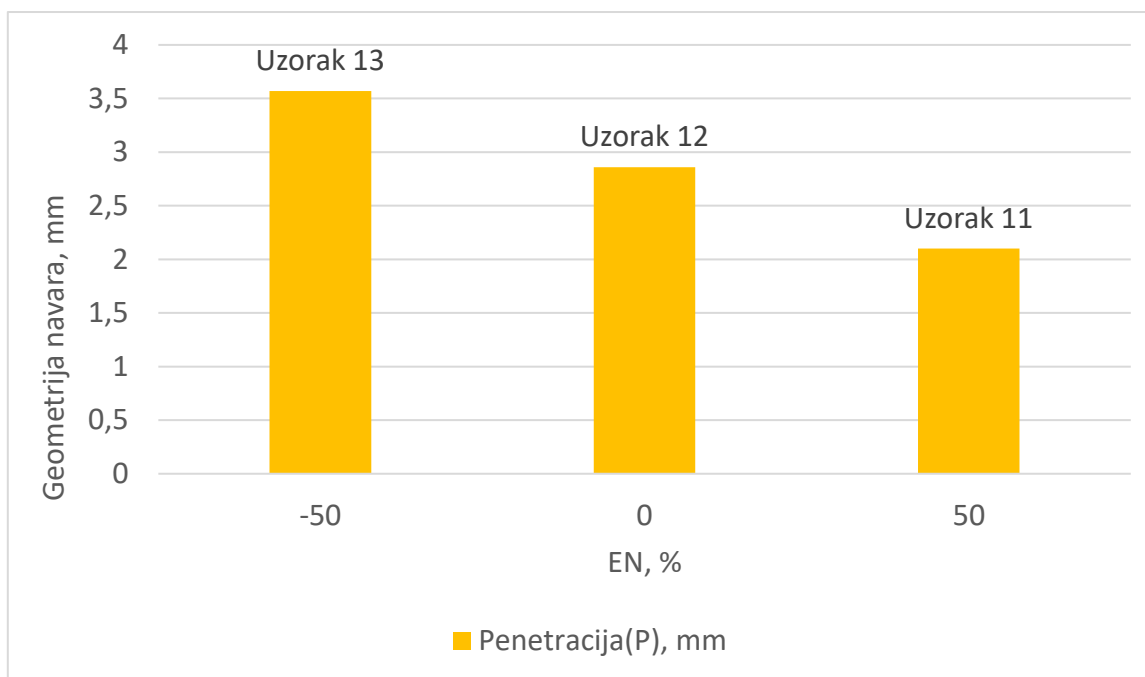
UZORAK	Makrostrukture (100% Ar)
<p>11</p> <p>EN = 50 %</p>	
<p>12</p> <p>EN = 0 %</p>	
<p>13</p> <p>EN = - 50 %</p>	

Slika 50. prikazuje ovisnost nadvišenja navara u ovisnosti o EN omjeru pri zaštitnom plinu 100% Ar. Prikazan je trend povećanja nadvišenja s povećanjem EN omjera. Na 50% EN omjera navari imaju najviše nadvišenje. Na 0% EN omjera nadvišenje je bilo niže što ukazuje na manje materijala odloženog na površini radnog komada, rezultat većeg zagrijavanja površine. Na -50% EN omjera nadvišenje je bilo najniže jer je unos topline bio još veći. S većim EN omjerom unos topline se smanjuje, te se iz tog razloga se stvara sve veće nadvišenje navara.



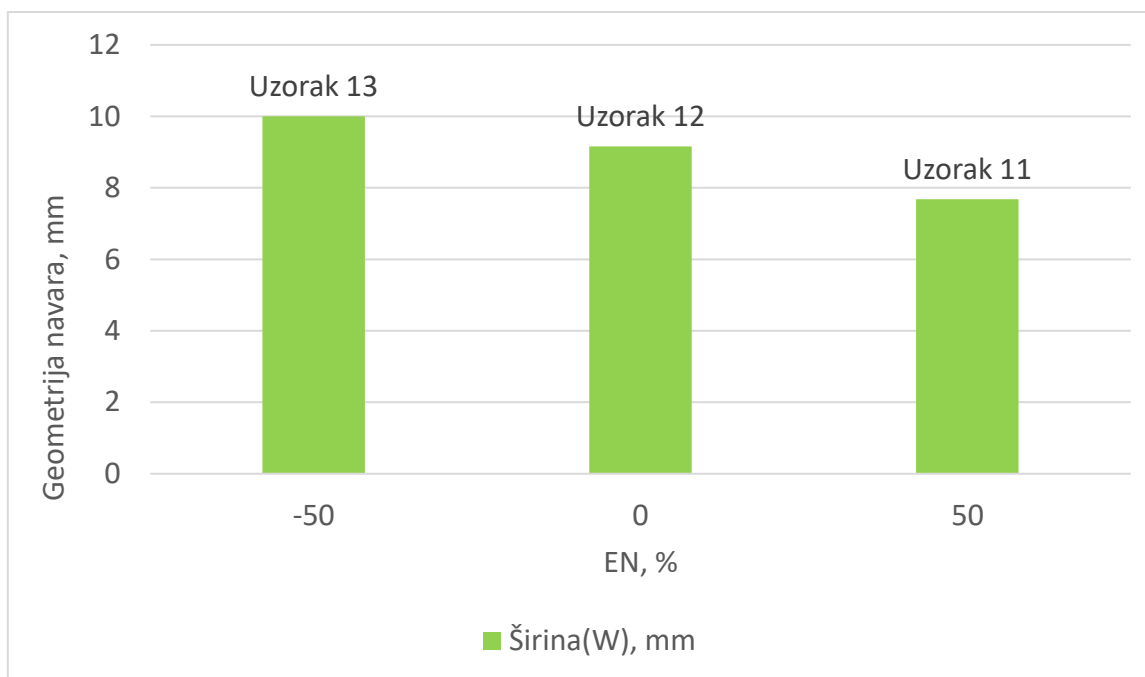
Slika 50. Graf ovisnosti nadvišenja navara o EN omjeru

Slika 51. prikazuje ovisnost penetracije navara u ovisnosti o EN omjeru pri zaštitnom plinu 100% Ar. Povećanjem EN omjera smanjuje se penetracija. Na 50% EN omjera navar ima najmanju penetraciju u usporedbi s -50% i 0% EN omjera. Najveća penetracija je na -50% i razlog tome je najveći unos topline u radni komad, dok na 50% EN se unosi najmanje topline u radni komad. Na 0% EN omjera je samo EP faza koja je učinkovitija u razbijanju sloja aluminijskog oksida i omogućavaju dublji unos topline u radni komad od 50% EN.



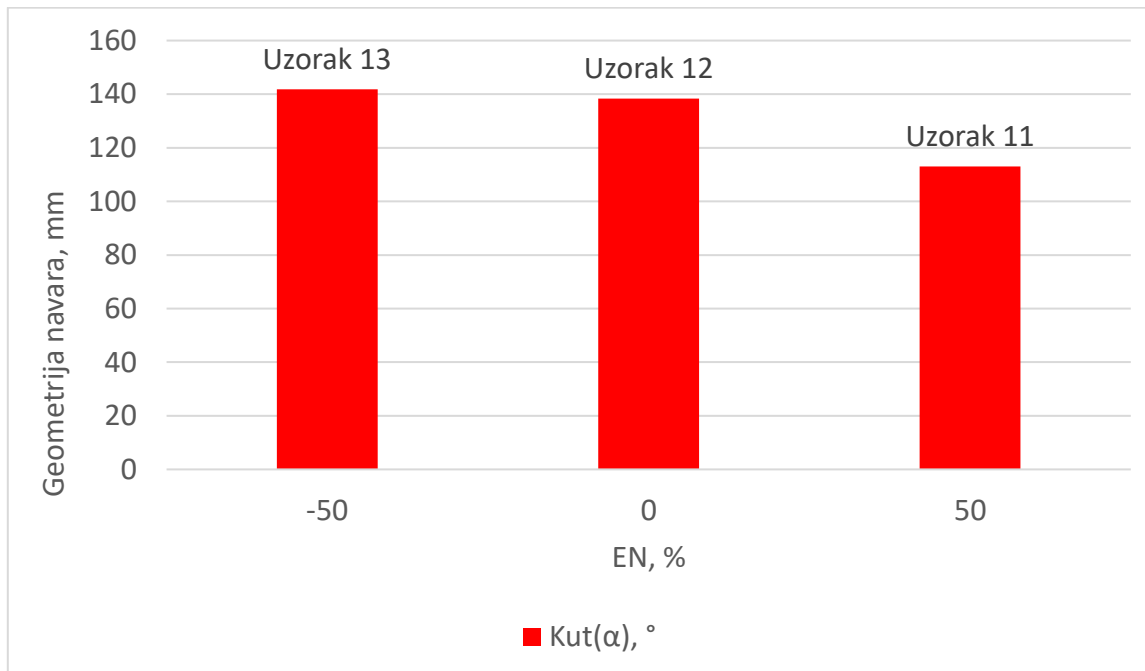
Slika 51. Graf ovisnosti penetracije navara o EN omjeru

Slika 52. prikazuje ovisnost širine navara u ovisnosti o EN omjeru pri zaštitnom plinu 100% Ar. Povećanjem EN omjera smanjuje se širina zavara. Na 50% EN omjera širina navara je najmanja zbog najmanjeg unosa toplina u usporedbi s 0% i – 50% EN omjera. Na 0% EN omjera navar je širi zbog povećane topline na površini, ukupni učinak još uvijek može rezultirati dovoljno širokim navarom, prikladnim za pokrivanje većih područja. Na -50% EN omjera je najširi navar jer se najviše topline unosi u radni komad.



Slika 52. Graf ovisnosti širine navara o EN omjeru

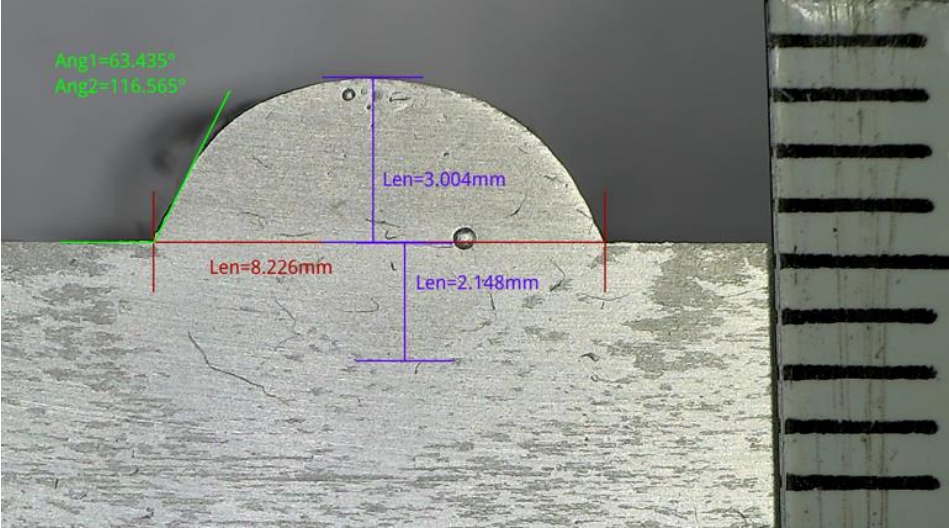
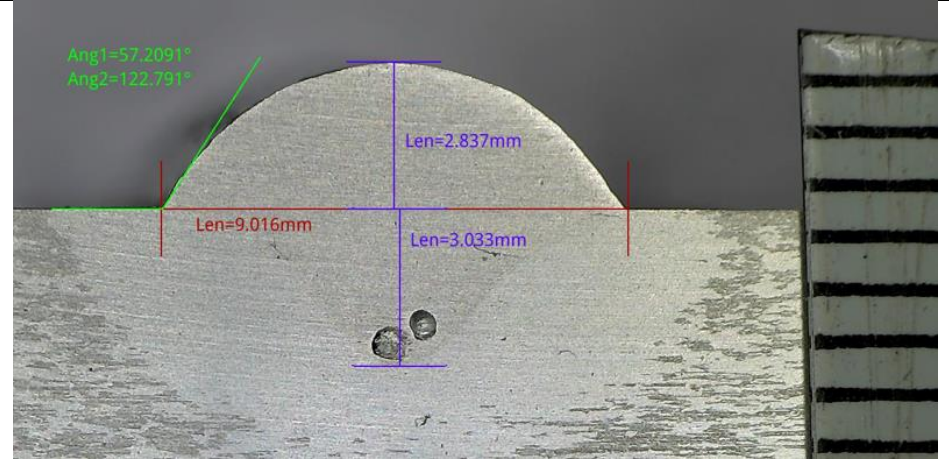
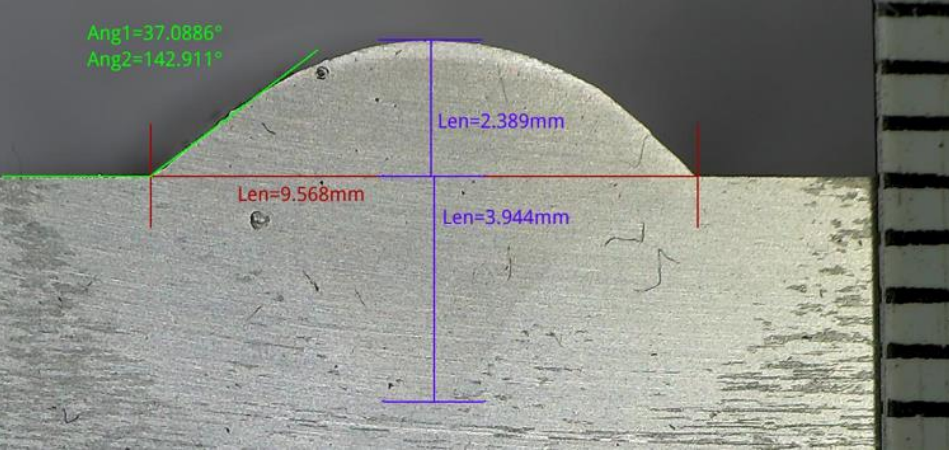
Slika 53. prikazuje ovisnost kuta navara u ovisnosti o EN omjeru pri zaštitnom plinu 100% Ar. Na 50% EN omjera kut navara je značajno manji i strmiji od 0% i -50% EN omjera što je logično s obzirom na povećanje nadvišenja i zaobljenja oblika navara s povećanjem EN omjera.



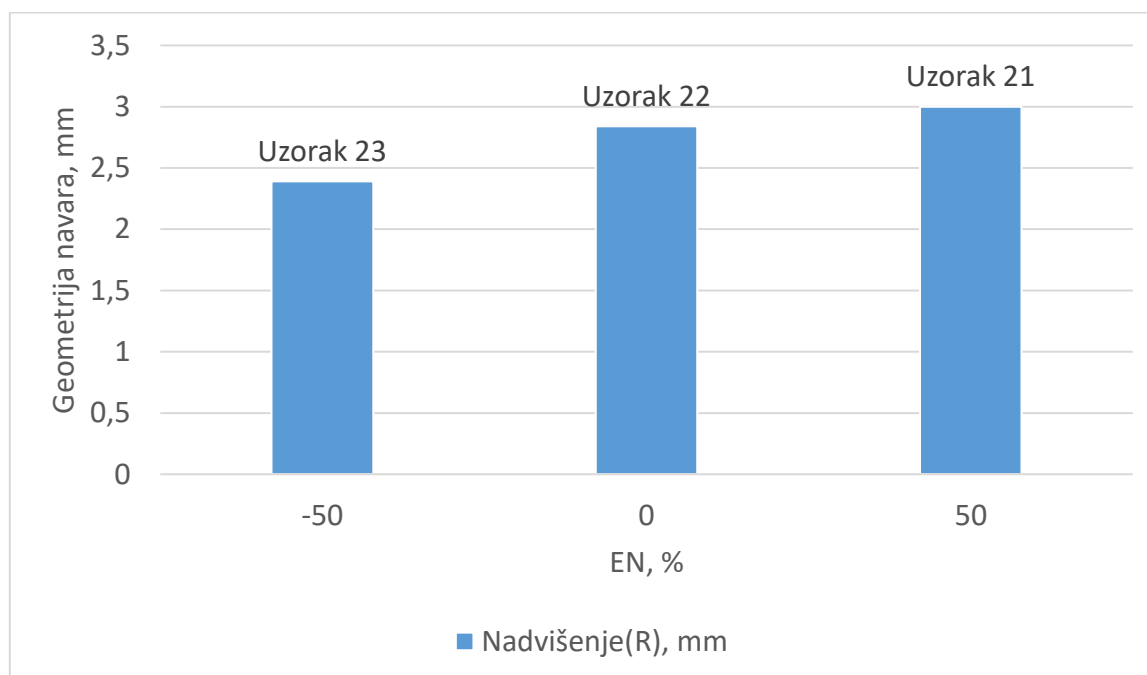
Slika 53. Graf ovisnosti kuta navara o EN omjeru

Tablica 11. prikazuje makrostrukture uzoraka 21, 22, 23 pri zaštiti od Ar + 15% He s različitim EN omjerom.

Tablica 11. Prikaz makrostrukture različitih EN omjera pri upotrebi zaštitnog plina Ar + 15% He

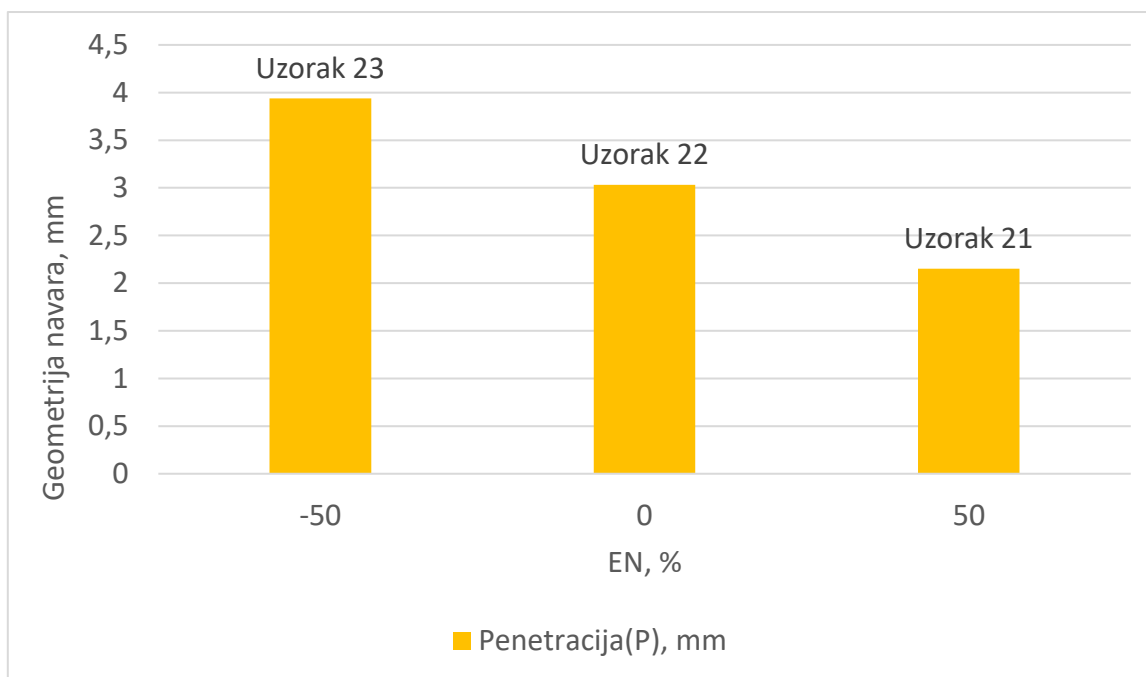
UZORAK	Makrostruktura (Ar + 15% He)
21 EN = 50 %	 <p>Ang1=63.435° Ang2=116.565° Len=8.226mm Len=3.004mm Len=2.148mm</p>
22 EN = 0	 <p>Ang1=57.2091° Ang2=122.791° Len=9.016mm Len=2.837mm Len=3.033mm</p>
23 EN = -50 %	 <p>Ang1=37.0886° Ang2=142.911° Len=9.568mm Len=2.389mm Len=3.944mm</p>

Slika 54. prikazuje ovisnost nadvišenja navara u ovisnosti o EN omjeru pri zaštitnom plinu Ar + 15% He. Promjene geometrije navara u ovisnosti o EN omjeru su dosljedne rezultatima pri zaštitnom plinu od 100% Ar, stoga povećanjem EN omjera povećavaju se i nadvišenja. Kod omjera EN od 0% nadvišenje je bilo smanjeno, što sugerira manju količinu materijala nanijetu na površinu, posljedicu povećanog unosa topline. S omjerom EN od -50%, nadvišenje je najmanje zbog većeg unosa topline.



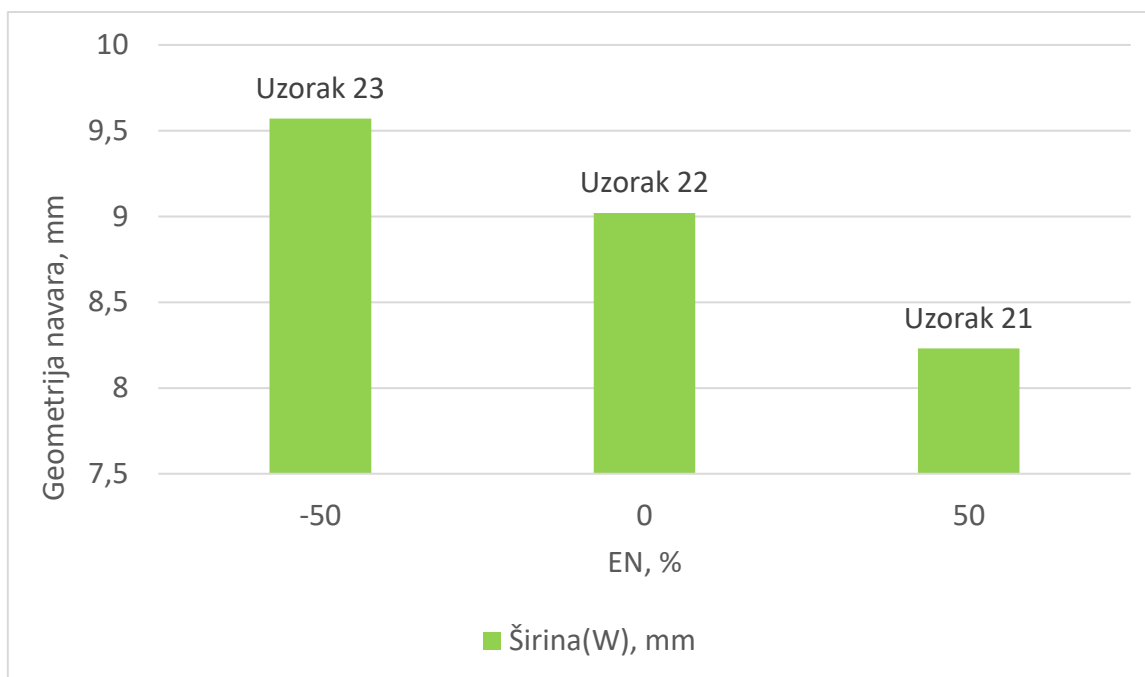
Slika 54. Graf ovisnosti nadvišenja navara o EN omjeru

Slika 55. prikazuje ovisnost penetracije navara u ovisnosti o EN omjeru pri zaštitnom plinu Ar + 15% He. Penetracija je isto dosljedna rezultatima kao i pri zaštiti od 100% Ar. Kod omjera EN od 0%, prisutna je samo faza EP, koja bolje uklanja oksidni sloj aluminijske površine i dopušta dublji prijenos topline unutar osnovnog materijala u usporedbi s 50% EN omjera. S omjerom EN od -50% ostvaruje se najdublja penetracija zbog najveće količine topline koja se prenosi u osnovni materijal.



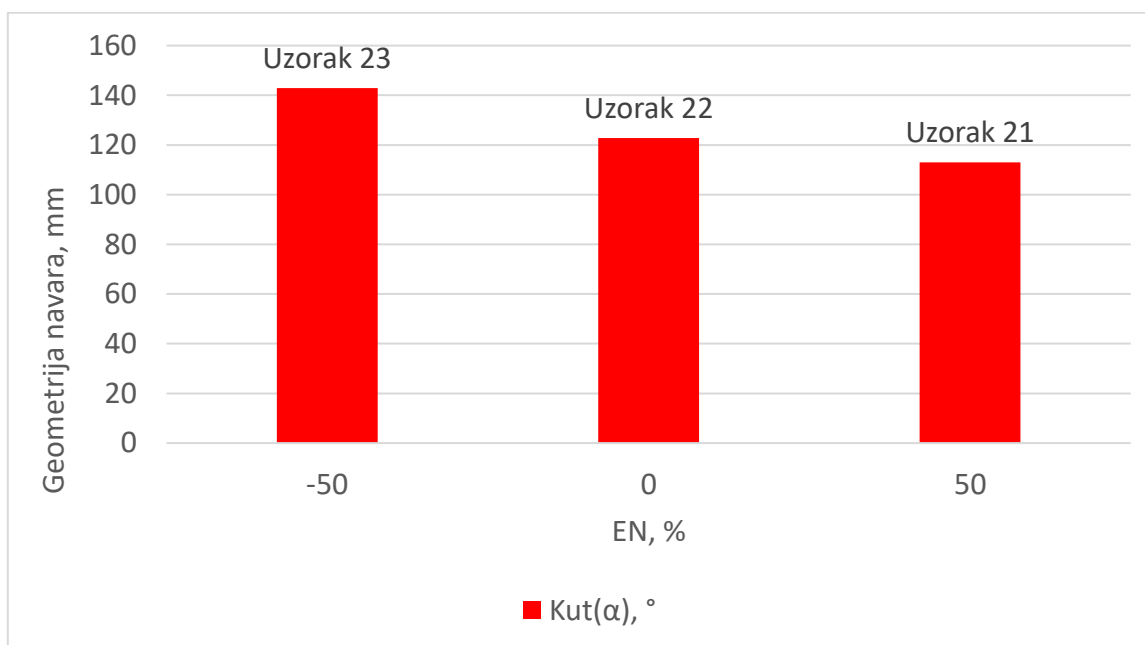
Slika 55. Graf ovisnosti penetracije navara o EN omjeru

Slika 56. prikazuje ovisnost širine navara u ovisnosti o EN omjeru pri zaštitnom plinu Ar + 15% He. Kod 50% EN omjera dobiva se najmanja širina dosljedna rezultatima i na 100% Ar. Pri omjeru EN od 0%, zavar postaje širi zbog većeg zagrijavanja površine, te omogućuje stvaranje širokog zavara koji može obuhvatiti veće površine. S omjerom EN od -50%, zavar postaje najširi zbog najvećeg unosa topline u materijal.



Slika 56. Graf ovisnosti širine navara o EN omjeru

Slika 57. prikazuje ovisnost kuta navara u ovisnosti o EN omjeru pri zaštitnom plinu Ar + 15% He. Na 50% EN omjera kut navara je značajno manji i strmiji od 0% i -50% EN omjera, što je logično s obzirom na povećanje nadvišenja i zaobljenja oblika navara s povećanjem EN omjera.



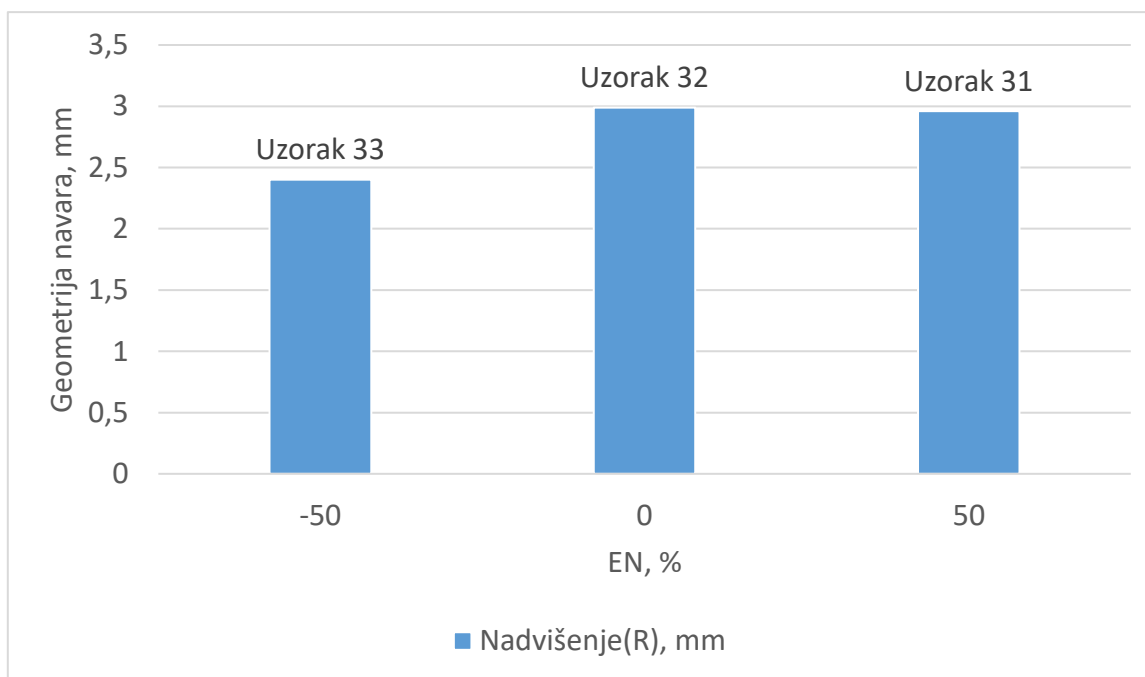
Slika 57. Graf ovisnosti kuta navara o EN omjeru

Tablica 12. prikazuje makrostrukture uzoraka 31, 32, 33 pri zaštiti od 50% Ar + 50% He s različitim EN omjerom.

Tablica 12. Prikaz makrostrukture različitih EN omjera pri zaštiti 50% Ar + 50% He

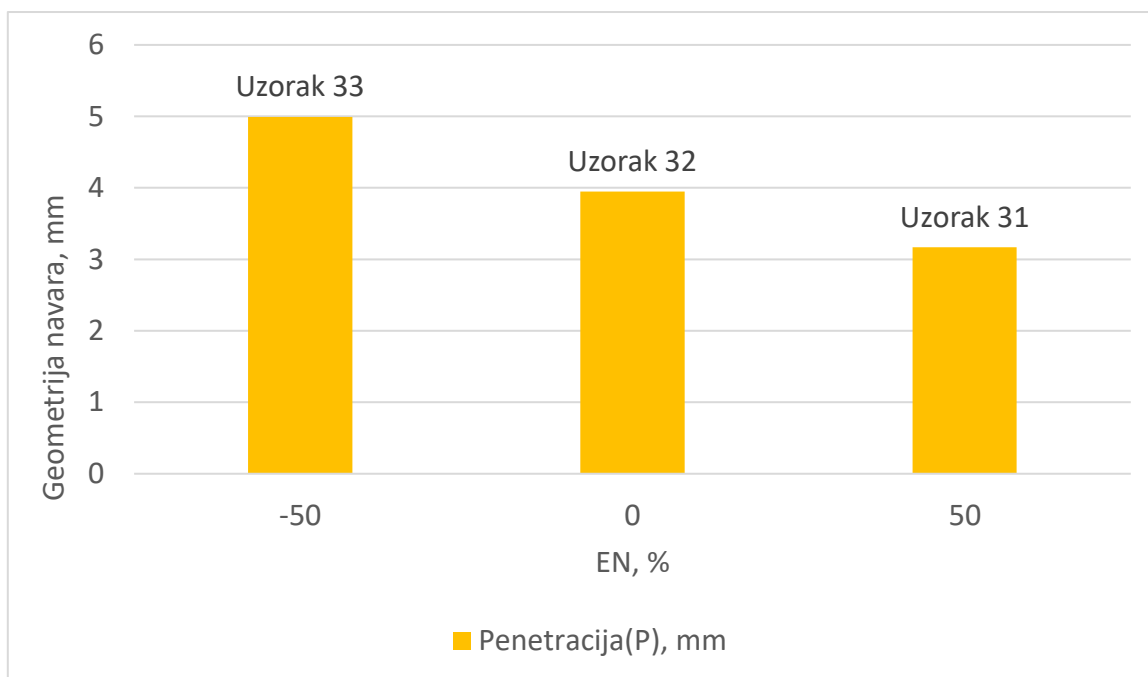
UZORAK	Makrostruktura (50% Ar + 50% He)
31 EN = 50%	
32 EN = 0%	
33 EN = -50 %	

Slika 58. prikazuje ovisnost nadvišenja navara u ovisnosti o EN omjeru. Zaštitni plin utječe na penetraciju i brzinu taljenja žice, stoga se i vide promjene u geometriji navara i rezultati više nisu dosljedni kao kod 100% Ar i 15% He. Na 50% EN omjera nadvišenje više nije najveće nego je podjednako s 0% EN omjera jer je utjecaj EN omjera umanjen s povećanjem udio He u zaštitnoj atmosferi. Najmanje nadvišenje je još uvijek kod -50% EN omjera.



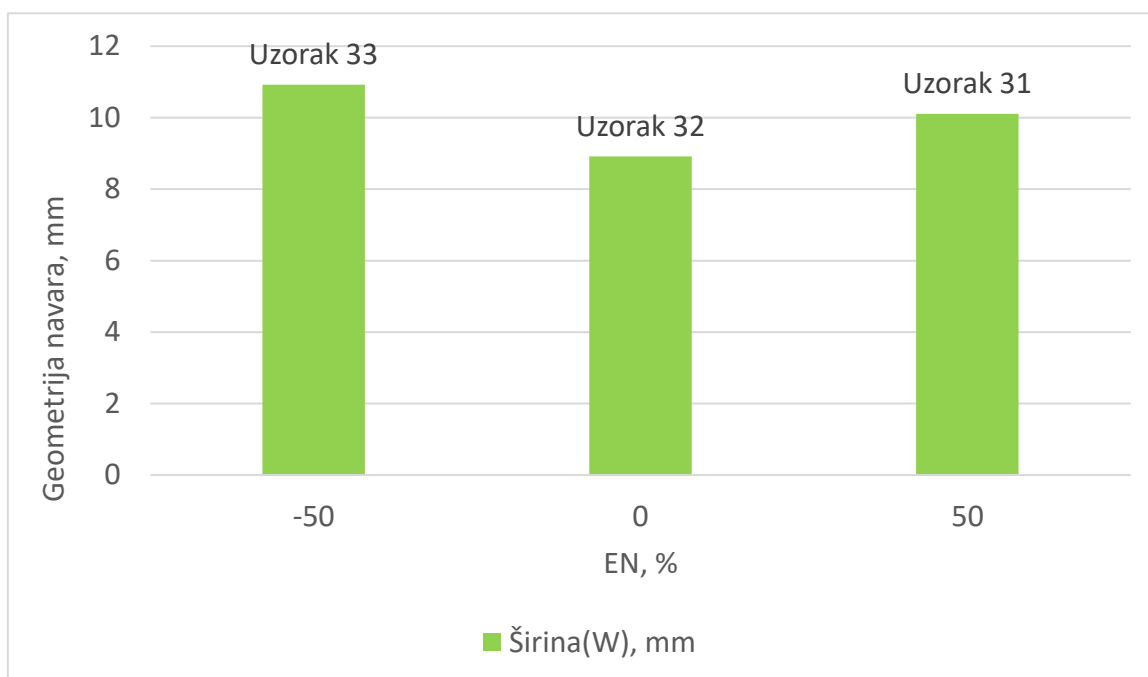
Slika 58. Graf ovisnosti nadvišenja navara o EN omjeru

Slika 59. prikazuje ovisnost penetracije navara u ovisnosti o EN omjeru. Kao i kod ostalih navara penetracija se povećanjem EN omjera povećava, što znači da je promjena geometrije navara jednako kao i kod ostalih kombinacija zaštitnog plina s promjenom EN omjera u eksperimentu. Najveća penetracija je na -50% EN omjera, a najmanja na 50% EN omjera.



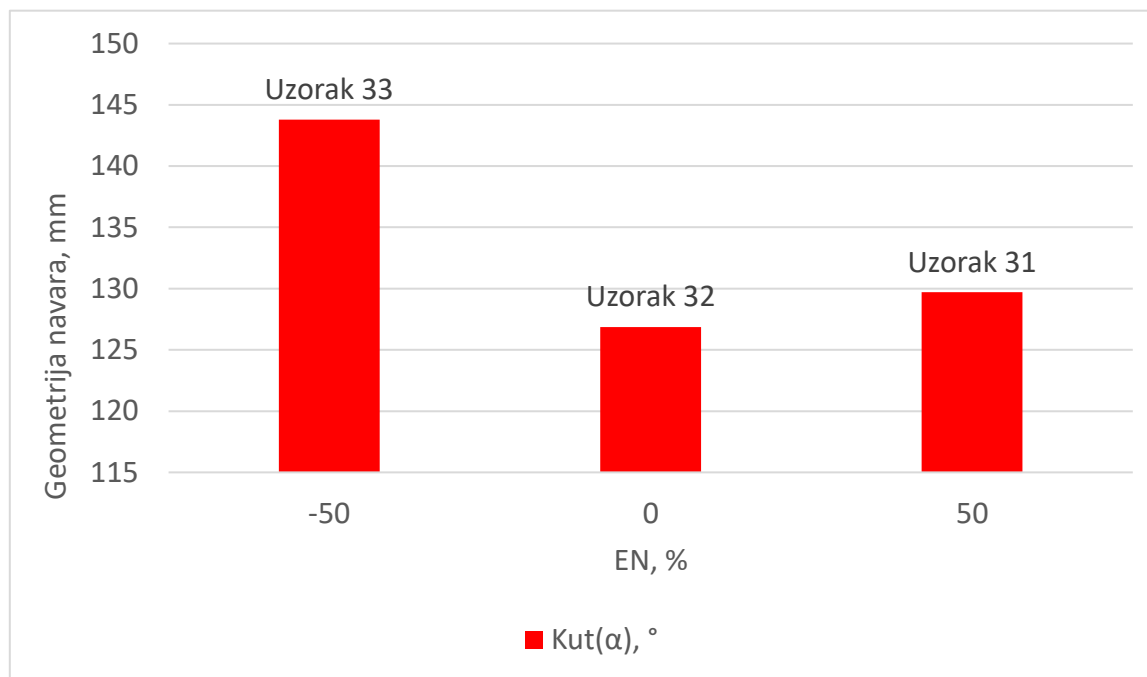
Slika 59. Graf ovisnosti penetracije navara o EN omjeru

Slika 60. prikazuje ovisnost širine navara u ovisnosti o EN omjeru. Za razliku od prijašnjih navara, najmanju širinu više nema uzorak na 50% EN omjera, te je razlog tome puno veći udio He u zaštitnom plinu. Najmanju širinu ima navar na 0% EN omjera, a najširi navar je još uvijek na – 50 % EN omjera.



Slika 60. Graf ovisnosti širine navara o EN omjeru

Slika 61. prikazuje ovisnost kuta navara u ovisnosti o EN omjeru. Navari na 0% i 50% EN omjera imaju podjednake kutove, dok je kut navara na -50% znatno blaži zbog niskog nadvišenja.



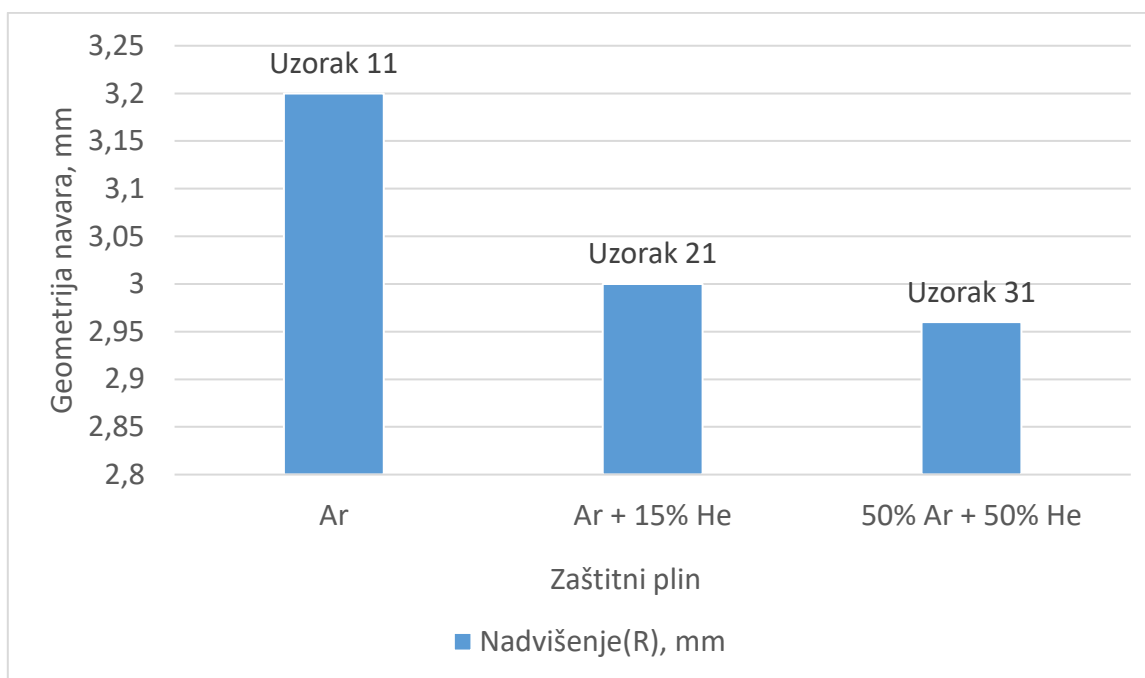
Slika 61. Graf ovisnosti kuta navara o EN omjeru

4.5.2. Utjecaj helija na geometriju navara

Korištenje zaštitnih plinova poput argona i kombinacije argona i helija igra ključnu ulogu u AC MIG zavarivanju aluminija, jer direktno utječe na kvalitetu i karakteristike zavara. Kombinacija argona i helija u zaštitnom plinu može ponuditi dodatne prednosti. Helij povećava temperaturu luka i poboljšava penetraciju zavara. Korištenje mješavine argona i helija može rezultirati širim i dubljim zavarima, što je idealno za deblje komade aluminija. Mješavina također može poboljšati brzinu zavarivanja i smanjiti poroznost. Korištenjem različite kombinacije zaštitnog plina Ar i He opisan je utjecaj na geometriju navara i poroznosti.

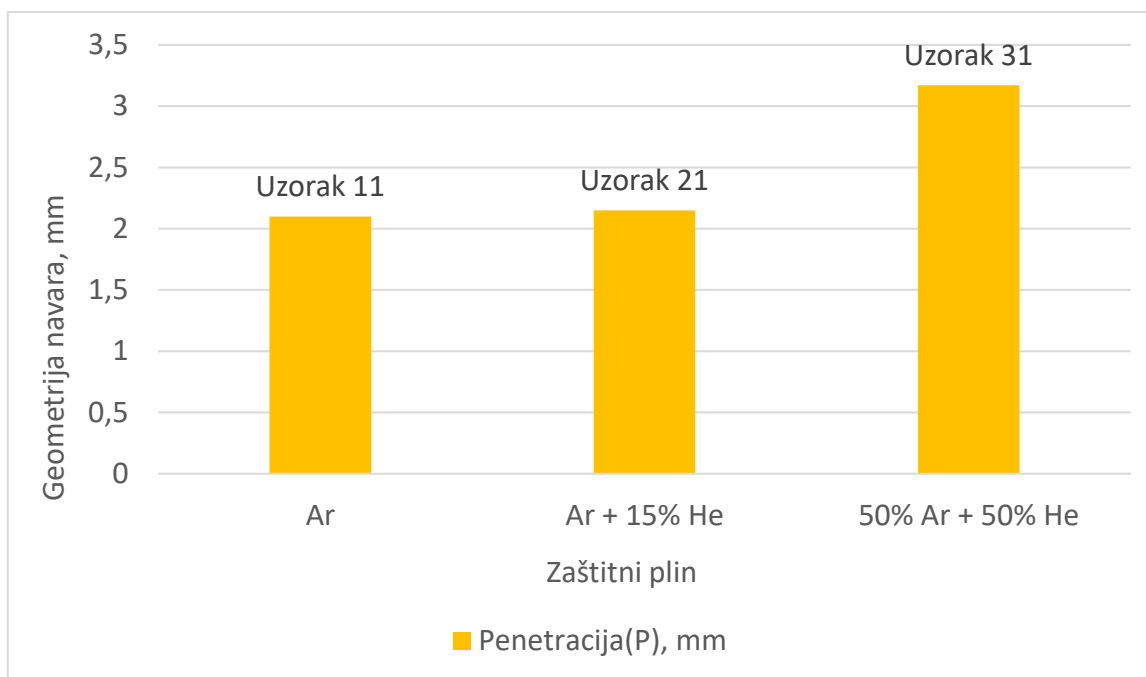
Slike 62. - 65. prikazuju ovisnosti geometrije navara s promjenom zaštitnog plina pri EN = 50% na uzorcima 11, 21, 31.

Slika 62. prikazuje ovisnost nadvišenja navara u ovisnosti o zaštitnom plinu pri konstantom EN omjeru od 50%. S povećanjem udjela He u zaštitnom plinu nadvišenje se smanjuje zbog većeg unosa topline u radni komad. Uzorak s 50% He nam daje najmanje nadvišenje. Vrlo je lako uočljiv utjecaj He na nadvišenje navara jer se vidi velika razlika između 100% Ar i 50% He.



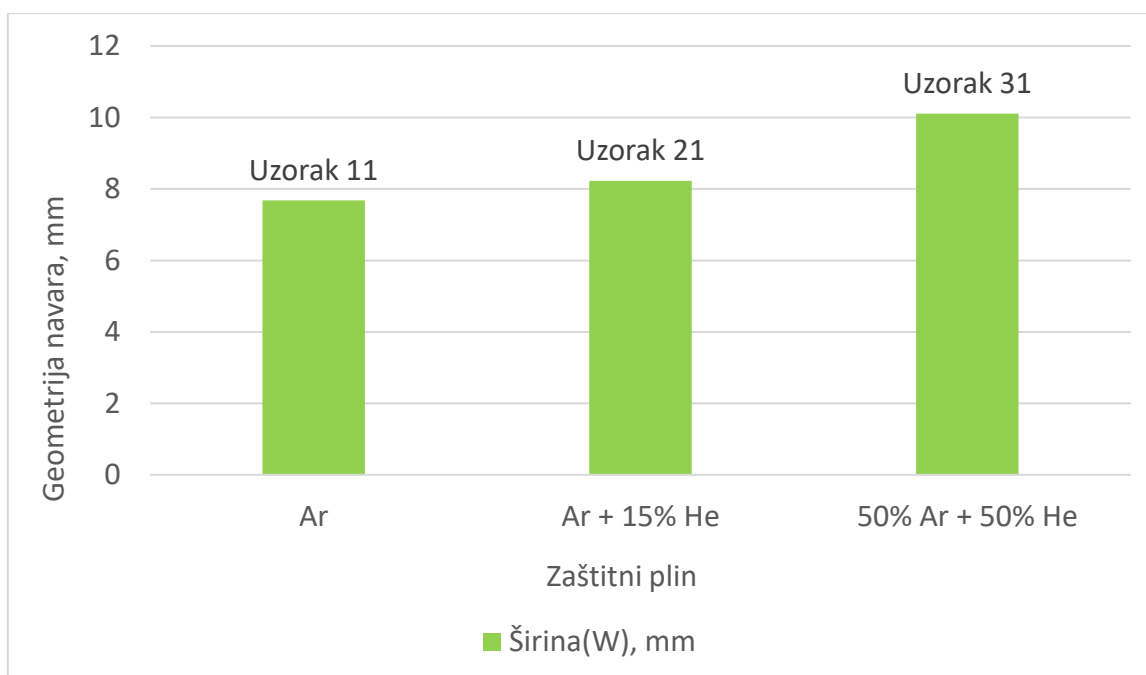
Slika 62. Graf ovisnosti nadvišenja navara o udjelu He u zaštitnom plinu(EN = 50%)

Slika 63. prikazuje ovisnost penetracije navara u ovisnosti o zaštitnom plinu pri konstantom EN omjeru od 50%. Ovisnost penetracije o udjelu plina He je vrlo izražena jer se s 50% He unosi puno više topline u radni komad. Uzorak s 15% He nije imao toliki utjecaj na penetraciju, ali je razlika u dubini penetracije u odnosu na 100% Ar još uvijek primjetna.



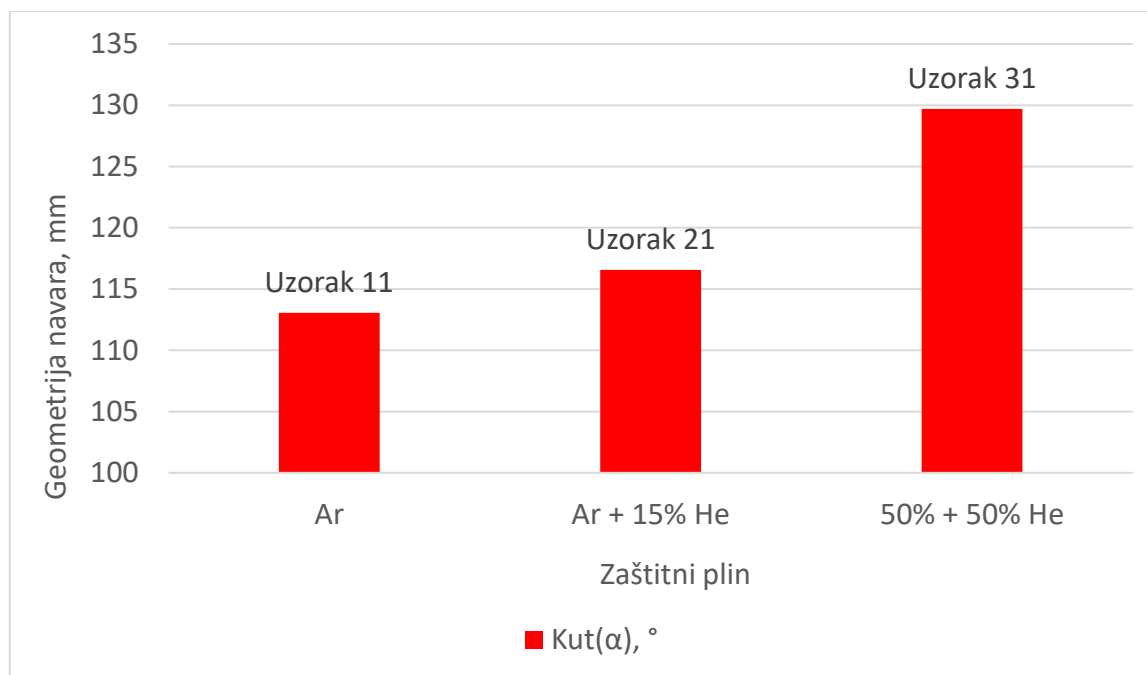
Slika 63. Graf ovisnosti penetracije navara o udjelu He u zaštitnom plinu(EN = 50%)

Slika 64. prikazuje ovisnost širine navara u ovisnosti o zaštitnom plinu pri konstantom EN omjeru od 50%. Kod širine navara primjetna razlika između uzoraka sa 100% Ar i 50% He, ali već samo 15% He nam daje veću širinu navara. Najveća širina je na najvećem udjelu He, dok je najmanja širina na 100% Ar, što je sukladno teoriji.



Slika 64. Graf ovisnosti širine navara o udjelu He u zaštitnom plinu(EN = 50%)

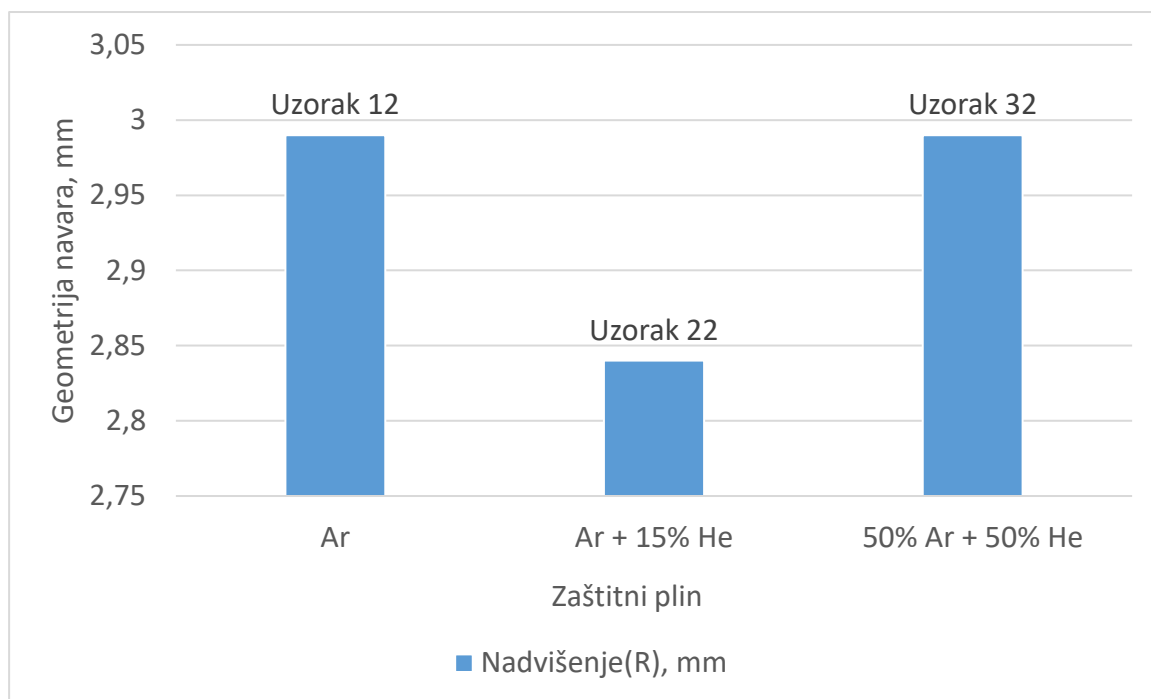
Slika 65. prikazuje ovisnost kuta navara u ovisnosti o zaštitnom plinu pri konstantom EN omjeru od 50%. Opet je vidljiva značajna razlika između kuteva uzoraka na 50% He i 100% Ar. Dok se kut s udjelom od 15% He ne razlikuje mnogo od 100% Ar, ali ta razlika je vidljiva već u nadvišenju navara, pa su i rezultati usporedbe kuteva sličnog omjera.



Slika 65. Graf ovisnosti kut navara o udjelu He u zaštitnom plinu (EN = 50%)

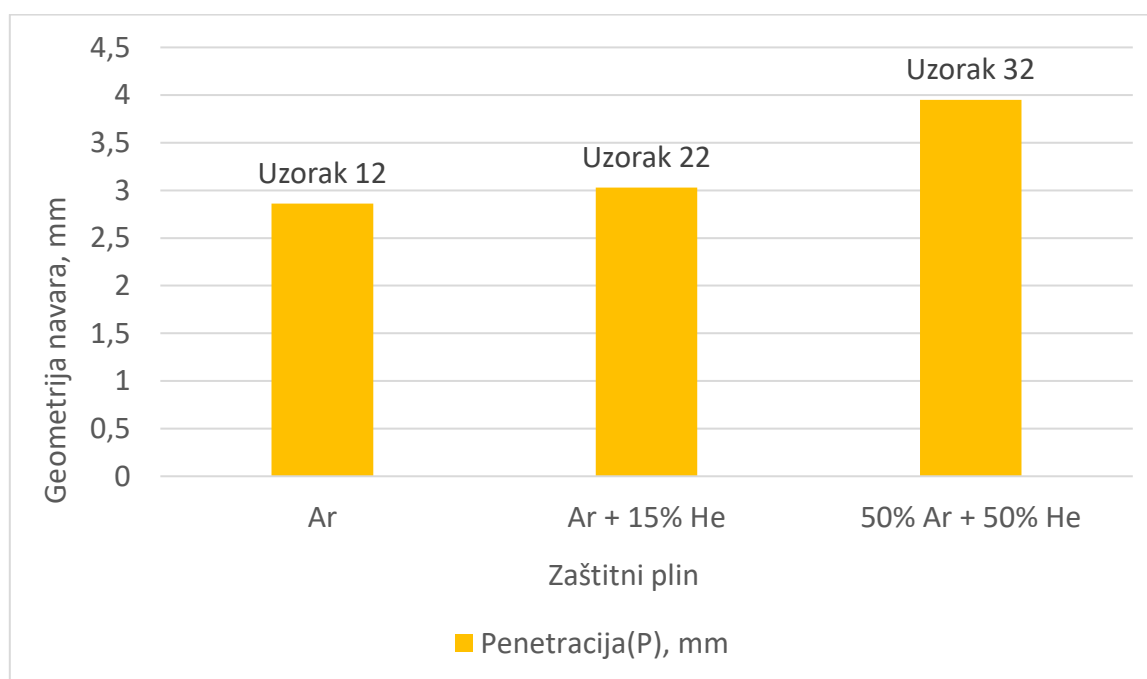
Slike 66. - 69. prikazuju ovisnosti geometrije navara s promjenom zaštitnog plina pri EN = 0% na uzorcima 12, 22, 32.

Slika 66. prikazuje ovisnost nadvišenja navara u ovisnosti o zaštitnom plinu pri konstantom EN omjeru od 50%. Za razliku od prijašnjih uzoraka na 50% EN omjera gdje su nadvišenja bila znatno različita s promjenom udjela He u zaštitnom plinu, kod ovih uzoraka na 0% EN omjera nadvišenja se nisu znatno promijenila s povećanjem udjela He jer nema utjecaja balansa koji značajno mijenja nadvišenje navara.



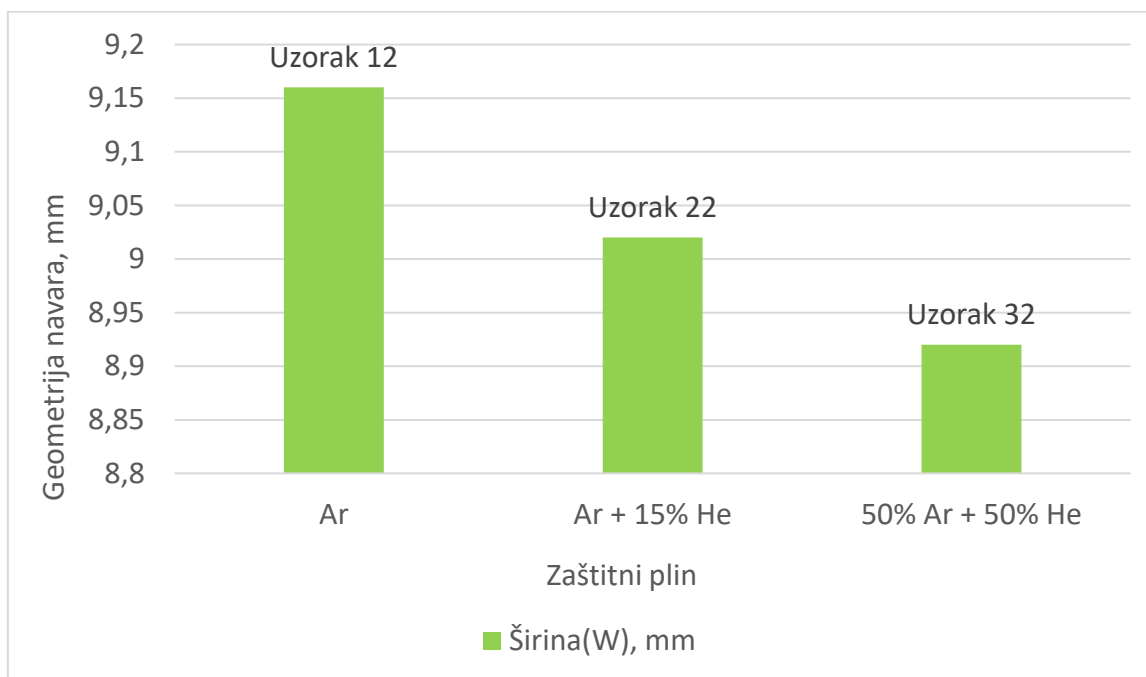
Slika 66. Graf ovisnosti nadvišenja navara o udjelu He u zaštitnom plinu (EN = 0%)

Slika 67. prikazuje ovisnost penetracije navara u ovisnosti o zaštitnom plinu pri konstantom EN omjeru od 50%. Penetracija je uvelike ovisna o udjelu He kao što se vidi iz slike, te sa smanjenjem udjela EN povećavamo unos topline što rezultira još većom penetracijom u kombinaciji s He. Stoga je najveća penetracija na 50% He, a najmanja na 100% Ar.



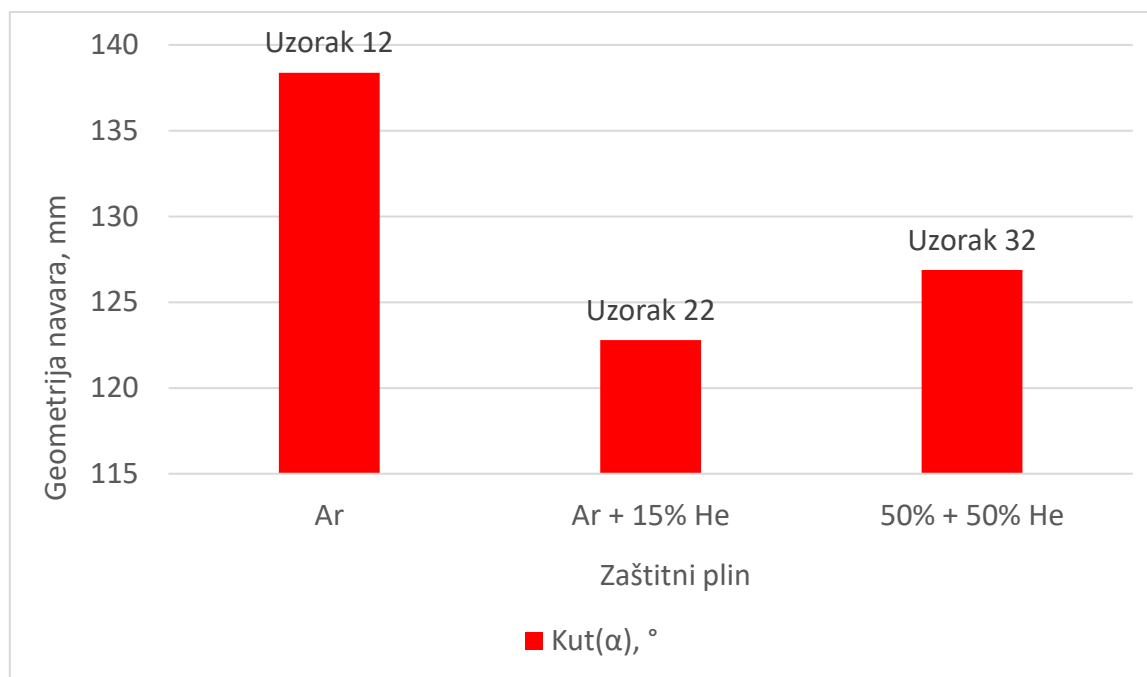
Slika 67. Graf ovisnosti penetracije navara o udjelu He u zaštitnom plinu (EN = 0%)

Slika 68. prikazuje ovisnost širine navara u ovisnosti o zaštitnom plinu pri konstantom EN omjeru od 50%. Na 0% EN omjera promjenom udjela He širina se nije znatno promijenila. Kod 0% EN omjera udio He nema veliki utjecaj na širinu zavara.



Slika 68. Graf ovisnosti širine navara o udjelu He u zaštitnom plinu (EN = 0%)

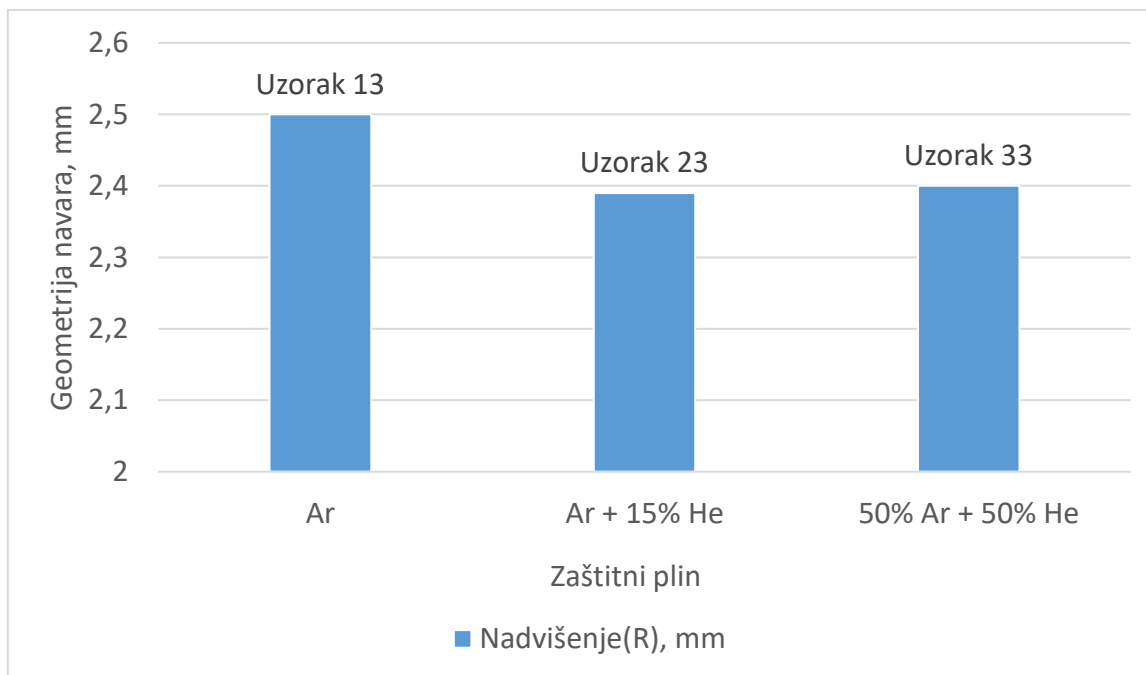
Slika 69. prikazuje ovisnost kuta navara u ovisnosti o zaštitnom plinu pri konstantom EN omjeru od 50%. Kut navara postaje puno blaži s povećanjem udjela He. Najveći kut nam daje 100% Ar, dok je najmanji na 15% He, ali nije znatna razlika između 15% i 50% He. Stoga već mali udio He nam daje znatno blaži kut navara.



Slika 69. Graf ovisnosti kut navara o udjelu He u zaštitnom plinu (EN = 0%)

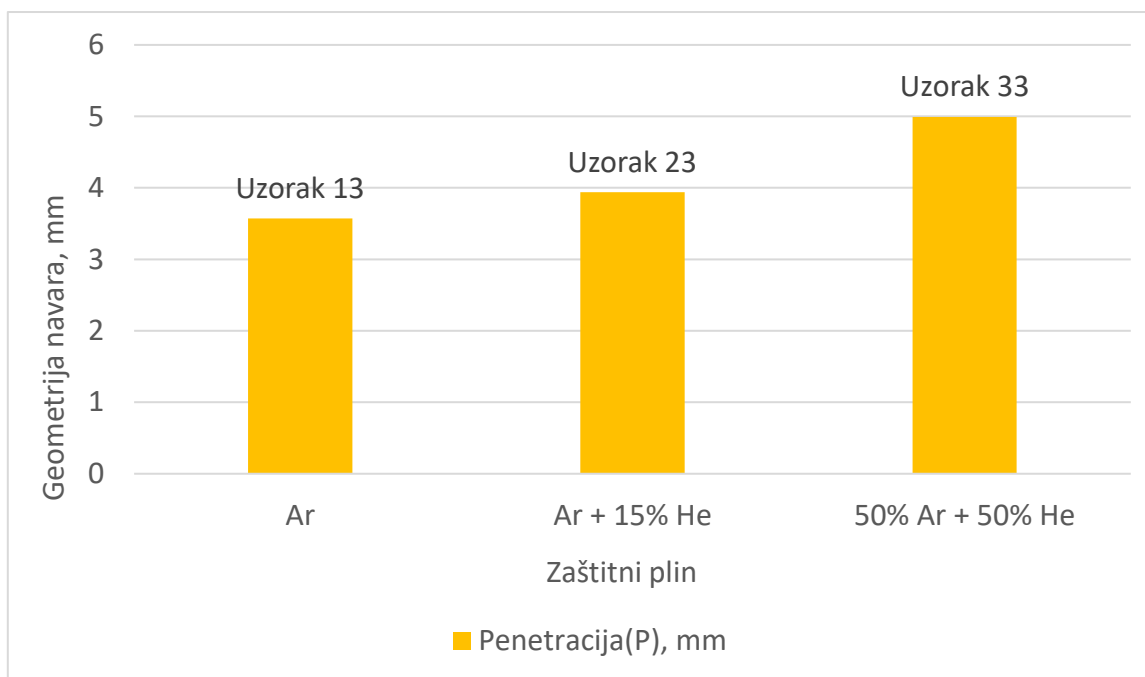
Slike 70. - 73. prikazuju ovisnosti geometrije navara s promjenom zaštitnog plina pri EN = -50% na uzorcima 13, 23, 33.

Slika 70. prikazuje ovisnost nadvišenja navara u ovisnosti o zaštitnom plinu pri konstantom EN omjeru od -50%. Na -50% EN omjera nadvišenje je najmanje u usporedbi s ostalim uzorcima. S povećanjem udjela He nadvišenje se je malo smanjilo jer puno veći utjecaj na nadvišenje ima balans polariteta od udjela He kod zavarivanja.



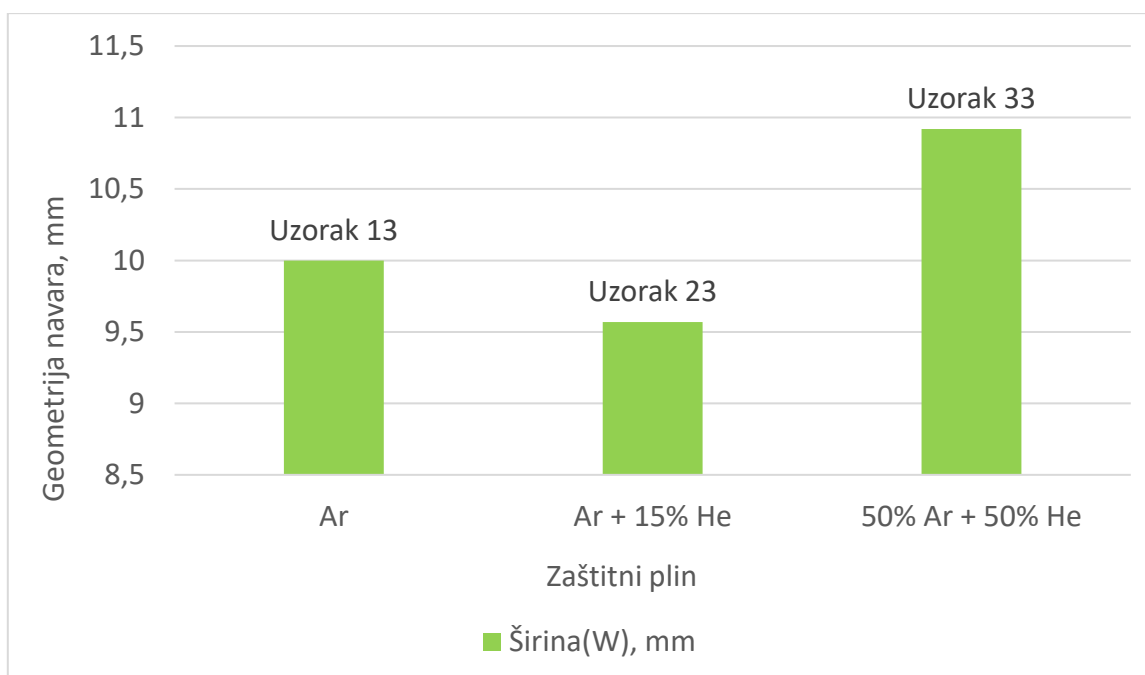
Slika 70. Graf ovisnosti nadvišenja navara o udjelu He u zaštitnom plinu(EN = -50%)

Slika 71. prikazuje ovisnost penetracije navara u ovisnosti o zaštitnom plinu pri konstantom EN omjeru od -50%. Penetracija na ovim uzorcima je značajno dublja od ostalih uzoraka zbog -50% EN omjera koji uzrokuje veliki unos topline u radni komad. S povećanjem udjela He penetracija postaje još veća jer sam udio He mijenja napon zavarivanja, što rezultira još većim unosom topline u radni komad.



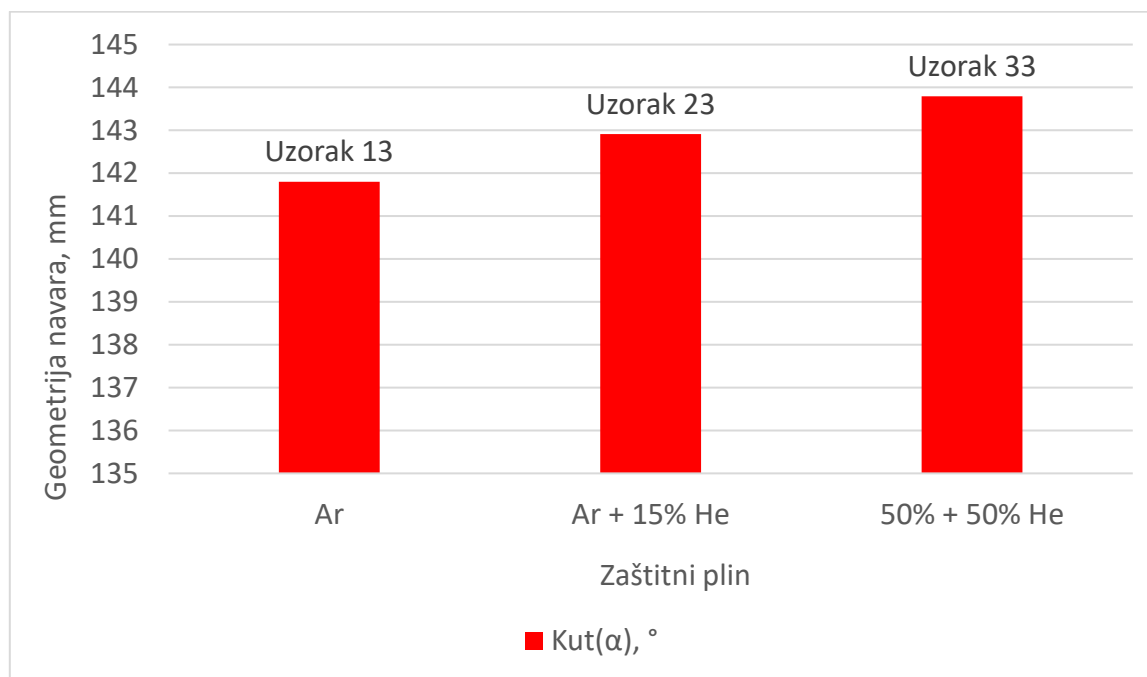
Slika 71. Graf ovisnosti penetracije navara o udjelu He u zaštitnom plinu(EN = -50%)

Slika 72. prikazuje ovisnost širine navara u ovisnosti o zaštitnom plinu pri konstantom EN omjeru od -50%. Isto kao i kod penetracije, uzorci na -50% EN omjera opet imaju znatno veću širinu od ostalih uzoraka. Povećanjem udjela He širina se povećava jer se dodatni materijal još više raspršuje po radnom komadu.



Slika 72. Graf ovisnosti širine navara o udjelu He u zaštitnom plinu(EN = -50%)

Slika 73. prikazuje ovisnost kuta navara u ovisnosti o zaštitnom plinu pri konstantom EN omjeru od -50%. Kutevi su značajno veći na sva tri uzorka i ne mijenjaju se značajno s promjenom udjela He jer se značajno ne mijenja ni nadvišenje navara.

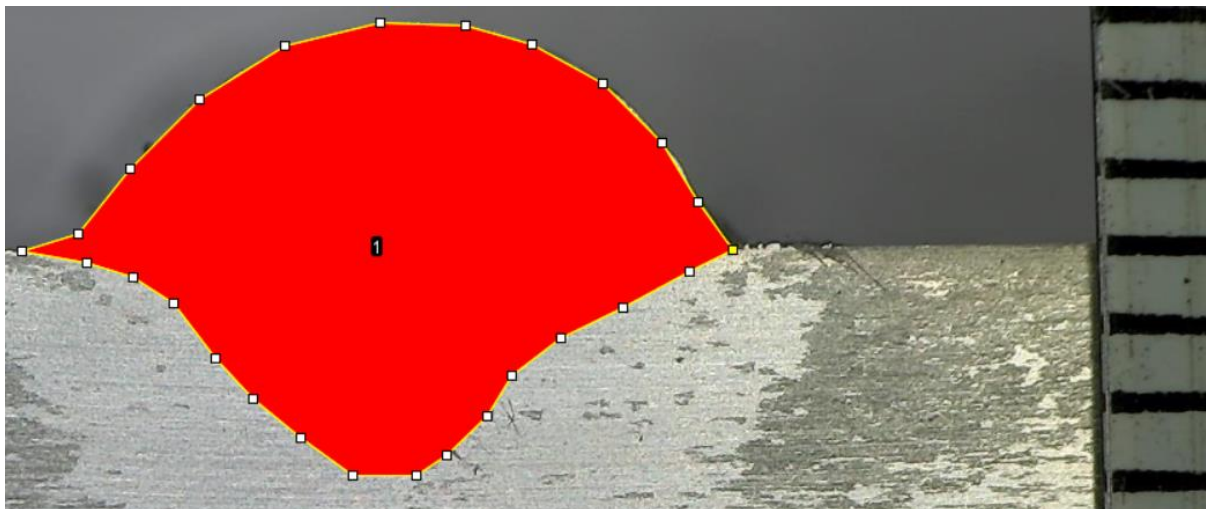


Slika 73. Graf ovisnosti kut navara o udjelu He u zaštitnom plinu (EN = -50%)

4.5.3. Utjecaj balansa polariteta i zaštitnog plina na poroznost

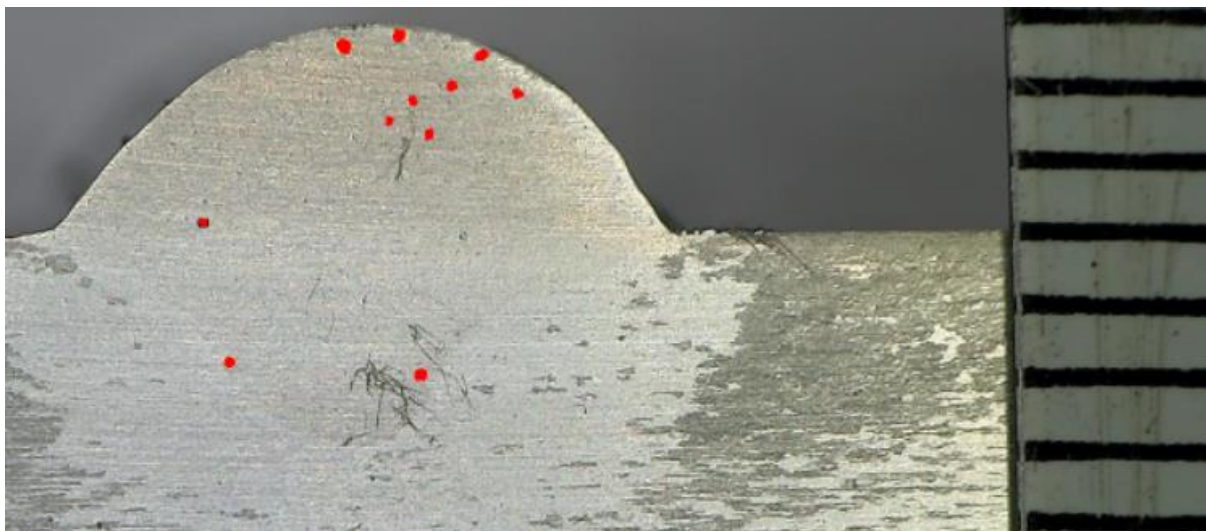
Zavarivanje aluminija, zbog njegovih jedinstvenih fizičkih i kemijskih svojstava, predstavlja posebne izazove u usporedbi s zavarivanjem čeličnih materijala. Među najvažnijim aspektima procesa zavarivanja aluminija su odabir odgovarajućeg zaštitnog plina i prilagođavanje balansa polariteta, koji igraju ključne uloge u kontroliranju kvalitete zavara, posebno u pogledu poroznosti. Poroznost, prisutnost plinovitih mjehurića unutar zavarenog spoja, može značajno oslabiti mehanička svojstva spoja i dovesti do neuspjeha pod opterećenjem.

Slika 74. prikazuje primjer izračunavanja površine navara u programu ImageJ.



Slika 74. Primjer izračunavanja površine u ImageJ

Slika 75. prikazuje primjer izračunavanja površine pora u programu ImageJ.



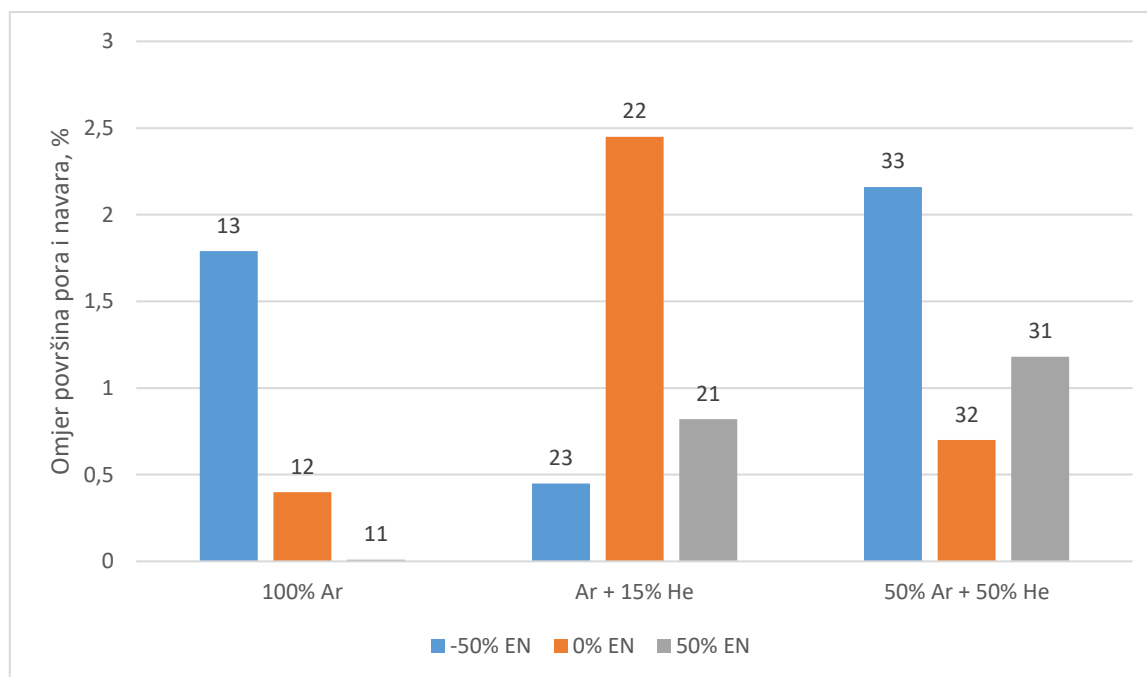
Slika 75. Primjer izračunavanja površine pora u ImageJ

Tablica 13. prikazuje omjer površine pora i površine zavara u svakom uzorku navara.

Tablica 13. Prikaz površina pora i metala zavara, te njihov omjer

Uzorak	Površina zavara, mm ²	Površina pora, mm ²	Omjer površine pora i zavara , %
11	25,47	0	0
12	29,52	0,124	0,4
13	33,58	0,602	1,79
21	26,58	0,218	0,82
22	30,13	0,738	2,45
23	31,61	0,142	0,45
31	30,29	0,356	1,18
32	32,86	0,230	0,70
33	39,02	0,843	2,16

Na slici 76. prikazana je ovisnost poroznosti za različiti EN i zaštitni plin. Najveća poroznost se pojavila kod uzorka 22 gdje je EN = 0% pod zaštitom Ar + 15% He. Minimalna poroznost se pojavila na uzorku 11 gdje je EN = 50% pod zaštitom 100% Ar. Sa smanjenjem EN omjera se povećala poroznost kad je navarivanje bilo pod zaštitom 100% Ar i 50% He, a na 15% He i EN = - 50% se poroznost smanjila. Rezultati poroznosti nisu sukladni teoriji jer je očekivano smanjenje poroznosti s povećanjem udjela helija zbog većeg unosa topline koji bi eliminirao mjehuriće plina da ne ostanu zarobljeni u metalu zavara, moguće su i ostale greške poput kontaminacije.



Slika 76. Graf ovisnosti poroznosti o zaštitnom plinu i balansu polariteta

4.5.4. Usporedba rezultata utjecaja balansa polariteta i udjela helija na geometriju zavora

Tablica 14. prikazuje omjere geometrije navara i minimalne vrijednosti geometrije navara u ovisnosti o EN omjeru pri različitom zaštitnom plinu. Iz omjera nadvišenja se vidi koliko povećanje EN omjera povećava nadvišenje, te da nadvišenje uvelike ovisi o EN omjeru.

Omjer penetracije prikazuje kako je s zaštitom od 15% He dobiven najveći omjer penetracije ovisan o EN omjeru. S povećanjem na 50% He penetracija se povećava, ali sam omjer penetracije je smanjen s promjenom EN omjera u odnosu na omjer penetracije sa 15% He, što znači da je s 50% He manji mogući raspon dobivanja željene geometrije navara promjenom EN omjera.

Raspon omjera širina i kutova se isto smanjuje s povećanjem udjela He.

Tablica 14. Prikaz omjera geometrije navara i minimalnih vrijednosti uzoraka u ovisnosti o EN omjeru pri različitoj zaštiti

Uzorak	Parametri	Omjer nadvišenja i minimalnog nadvišenje	Omjer penetracije i minimalne penetracije	Omjer širine i minimalne širine	Omjer kuta i minimalnog kuta
11	100% Ar	1,28	1,00	1,00	1,00
12		1,19	1,36	1,19	1,22
13		1,00	1,70	1,30	1,25
21	Ar + 15 % He	1,26	1,00	1,00	1,00
22		1,19	1,41	1,10	1,05
23		1,00	1,83	1,16	1,23
31	Ar + 50 % He	1,24	1,00	1,13	1,02
32		1,25	1,24	1,00	1,00
33		1,00	1,57	1,22	1,13

Tablica 15. prikazuje omjere geometrije navara i minimalne vrijednosti geometrije navara u ovisnosti o zaštitnom plinu pri različitom EN omjeru.

Analizom tablice 14. se vidi veliki utjecaj EN omjera na sve karakteristike geometrije zavara, dok se iz tablice 15. vidi da udio He u zaštitnom plinu značajnije utječe samo na penetraciju. Povećanjem udio He u zaštitnom plinu se smanjuje utjecaj EN omjera jer se svi omjeri smanjuju u tablici 14., osim penetracije koja je pri zaštiti od 15% He povećana i omjer penetracije je za 1,83 puta veći sa smanjenjem EN omjera od 50% na - 50%.

Tablica 15. Prikaz omjera geometrije navara i minimalnih vrijednosti uzoraka u ovisnosti o zaštitnom plinu pri različitim vrijednostima EN omjera

Uzorak	Parametri	Omjer nadvišenja i minimalnog nadvišenje	Omjer penetracije i minimalne penetracije	Omjer širine i minimalne širine	Omjer kuta i minimalnog kuta
11	EN = 50%	1,08	1,00	1,00	1,00
21		1,01	1,02	1,07	1,03
31		1,00	1,51	1,31	1,15
12	EN = 0%	1,05	1,00	1,03	1,13
22		1,00	1,06	1,01	1,00
32		1,05	1,38	1,00	1,03
13	EN = - 50%	1,04	1,00	1,05	1,00
23		1,00	1,10	1,00	1,00
33		1,00	1,40	1,14	1,01

5. ZAKLJUČAK

Zavarivanje aluminija predstavlja kompleksan proces zbog specifičnih karakteristika ovog materijala. Njegova široka primjena u industriji, posebno u sektorima poput svemirske i automobilske industrije, prvenstveno je zbog niske gustoće, visoke otpornosti na koroziju i težine. Legure aluminija-magnezija široko se koriste u različitim industrijskim sektorima zahvaljujući svojim izvanrednim svojstvima.

AC MIG tehnologija zavarivanja aluminija postaje sve značajnija zbog svoje sposobnosti poboljšanja kvalitete zavarenih spojeva. Konvencionalne metode zavarivanja aluminija često nailaze na izazove kod tanjih elemenata, poput neadekvatne penetracije, poroznosti i deformacija. Upravo ovdje AC MIG tehnologija pokazuje svoj potencijal, pružajući alternativne načine zavarivanja koji omogućuju bolju kontrolu nad taljenjem metala i smanjenje nedostataka.

Ovaj modificirani postupak zavarivanja koristi se za smanjeni unos topline i taljenja metala putem izmjenične struje. To pruža veću kontrolu nad zavarivanjem i smanjuje pojavu nedostataka u spojevima. AC MIG tehnologija omogućuje prilagodbu različitih varijanti MIG metode, uključujući impulsno zavarivanje i metode s manjim unosom topline, čime se poboljšava kvaliteta spojeva, a istovremeno se olakšava rad s tanjim elementima od aluminija.

Analizom utjecaja EN omjera i udjela helija (He) u zaštitnom plinu na proces zavarivanja aluminija, uočava se kako promjene ovih parametara značajno utječu na karakteristike zavarenog spoja. Povećanjem EN omjera dolazi do povećanja nadvišenja, smanjenja penetracije i širine navara, te strmijeg kuta zavara, što je posljedica manjeg unosa topline. S druge strane, povećanjem udjela helija u zaštitnom plinu primjećuje se smanjenje nadvišenja, dok penetracija i širina navara rastu, a kut zavara postaje blaži, što ukazuje na manju ovisnost o EN omjeru u odnosu na druge parametre.

Usporedbom dijagrama u ovisnosti o utjecaju balansa polariteta na geometriju zavara dobiveni su podjednaki trendovi ponašanja geometrije navara na 100% Ar i 15% He, te su dosljedni rezultatima iz literature, dok na 50% He rezultati više ne prate uobičajene trendove. Uvijek je najveće nadvišenje, najmanju penetraciju, širinu i kut imao navar s najvećim EN omjerom, ali pri zaštiti od 50% He nadvišenje je bilo jednako na 50% i 0% EN omjera, dok je širina postala veća na 50% EN omjera. Tablice omjera prikazuju kako značajno EN omjer utječe na svu geometriju navara, dok udio helija u zaštitnom plinu samo značajno utječe na penetraciju i smanjuje utjecaj EN omjera. Helij nema toliko izraženi utjecaj na geometriju navara kao EN

omjer, ali već sa malim udjelom helija se može utjecati na povećanje ili smanjenje raspona geometrije navara u kombinaciji s variranjem balansa polariteta. Kombinacijom udjela helija i balansa polariteta dobiven je veliki raspon nadvišenja (3,20 – 2,40 mm), penetracije (2,10 – 4,99 mm), širine (7,68 – 10,92 mm) i kuta (113,06 – 143,79 °) što pruža značajnu mogućnost postizanja zahtijevanog izgleda.

Unatoč mogućnostima prilagodbe procesa, poroznost se pokazuje kao konstantan izazov pri zavarivanju aluminijskih spojeva. U eksperimentu poroznost se pojavila skoro na svim makrostrukturama. Najveća poroznost se pojavila za EN = 0% pod zaštitom Ar + 15% He, a najmanja na EN = 50% pod zaštitom od 100% Ar. To ukazuje na potrebu za daljnjim istraživanjima kako bi se utvrdili točni uzroci poroznosti i pronašle učinkovite metode za njezino smanjenje ili eliminaciju, čime bi se poboljšala kvaliteta zavarenih spojeva aluminijskih spojeva.

Korištenjem kombinacije promjene balansa polariteta i udjela helija u zaštitnom plinu, moguće je prilagoditi proces zavarivanja tako da se dobiju specifične željene karakteristike zavarenog spoja.

Daljnja istraživanja bi obuhvaćala uzrok poroznosti kod zavarivanja aluminijskih spojeva kojim bi se obuhvatila analiza kvalitete i vrsta aluminijskih spojeva, eksperimentiranje s parametrima zavarivanja za pronalaženje optimalnih uvjeta, proučavanje utjecaja zaštitnih plinova, testiranje različitih metoda pripreme površine za smanjenje kontaminacije, istraživanje utjecaja vlage i kontaminacija, ispitivanje različitih tehnika zavarivanja, analizu plinova oslobođenih tijekom zavarivanja, mikroskopsko ispitivanje zavarenih spojeva za identifikaciju mikrostrukturnih faktora, razvoj simulacijskih modela za bolje razumijevanje procesa koji dovode do poroznosti. Ovim pristupom može se bolje razumjeti i riješiti problem poroznosti u zavarivanju aluminijskih spojeva.

LITERATURA

- [1] 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.
- [2] K. Weman, *Welding processes handbook*, Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 2012..
- [3] H. R. Ghazvinloo, A. Honarbakhsh-Raouf i N. Shadfar, Effect of arc voltage, welding current and welding speed on fatigue life, impact energy and bead penetration of AA6061 joints produced by robotic MIG welding, *Indian Journal of Science and Technology*, 2010.
- [4] 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.
- [5] G. Mathers, *The welding of aluminium and its alloys*, Cambridge: Woodhead Publishing, 2002.
- [6] S. Lathabai, *Joining of aluminium and its alloys*, Australia, woodhead, 2011, pp. 607-650.
- [7] P. Praveen i P. Yarlagadda, Meeting challenges in welding of aluminum alloys through pulse gas metal arc welding, *Journal of Materials Processing Technology*, pp. 1106-1112, 2005.
- [8] K. Weman i G. Linden, *MIG welding guide*, Cambridge: Woodhead, 2006.
- [9] W. R. Reichelt, J. Evancho i M. G. Hoy, *Effects of Shielding Gas on Gas Metal Arc Welding Aluminium*, New York, 1990.
- [10] L. Kolarik, M. Kolafikova, K. Kovanda i P. Vondrous, Influence of Shielding Gas on GMA Welding of Al Alloys, *Science Journal*, pp. 450-455, 2013.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] Arc Control of CO2 welding and AC MIG welding, u *Arc Welding Control*, pp. 180-231.
- [14] H. J. Park, D. C. Kim, M. J. Kang i S. Rhee, The arc phenomenon by the characteristic of EN ratio in AC pulse GMAW, *Int J. Adv. ManufTechnol*, br. 66, pp. 837-875, 2013.
- [15] K. Kim i H. Chung, Wire melting rate of alternating current gas metal arc welding, *Int J. Adv ManufTechnol*, br. 90, pp. 1253-1263, 2017.
- [16] O. DAIHEN, *Owner's Manual: Welbee Inverter W400*, Daihen Corporation, 2016.
- [17] H. Tong, T. Ueyama, S. Harada i M. Ushio, Quality and productivity improvement in aluminium alloy thin sheet welding using alternating current pulsed metal inert gas welding system, *Science and Technology of Welding and Joining*, svez. 6, br. 4, 2001.

- [18] 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.
- [19] H. z. z. norme, *Zavarivanje -- Smjernice za grupiranje metalnih materijala (ISO/TR 15608:2017; CEN ISO/TR 15608:2017)*, HZN e-Glasilo 10/2018, 2017.
- [20] AZO Materials, [Mrežno]. Available: <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=2804>.
- [21] MIGAL.CO, MA-6063 AlMg0,7SiTiB, [Mrežno]. Available: <https://www.migal.co/en/products/aluminium-welding-wire/ma-6063-almg07sitib>. [Pokušaj pristupa 6 Siječanj 2024].