

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

Patrik Klasić i Kristijan Nemeč

Eksperimentalni i numerički pristup  
karakterizaciji zaostalih naprezanja i  
deformacija pri AC MIG zavarivanju  
aluminija

Zagreb, 2022.

Ovaj rad izrađen je na Katedri za zavarene konstrukcije, Zavoda za zavarene konstrukcije pod vodstvom prof. dr. sc. Ivice Garašića i predan je na natječaj za dodjelu Rektorove nagrade u akademskoj godini 2021./2022.

## **POPIS KRATICA**

<b>Kratika</b>	<b>Opis</b>
AA	Anodising quality
AC MIG	Alternating current metal inert gas
DCEN	Direct Current Electrode Negative
DCEP	Direct Current Electrode Positive
D-S prsten	Debye-Scherrer-ov prsten
EPP	Elektrolučno zavarivanje pod zaštitom praška
GMAW	Gas Metal Arc Welding
HAZ	Heat Affected Zone
IIW	International Institute of Welding
ISO	International Organization for Standardization
MIG	Metal Inert Gas
MIG-P	Pulse Metal Inert Gas
PA	Vodoravni položaj zavarivanja
SAW	Submerged Arc Welding
SQ	Standard quality
TIG	Tungsten Inert Gas
ZUT	Zona Utjecaja Topline

## POPIS OZNAKA

Oznaka	Mjerna jedinica	Opis
d	m	Razmak ravnina kristalnih rešetki
E	Pa	Modul elastičnosti
I	A	Jakost struje
I <sub>B</sub>	A	Jakost bazne struje
I <sub>EN</sub>	A	Jakost negativne impulsne struje
I <sub>P</sub>	A	Jakost impulsne struje
k	-	Stupanj iskorištenja postupka zavarivanja
K <sub>1</sub>	-	Konstanta naprezanja
K <sub>2</sub>	-	Konstanta naprezanja
l	mm	Slobodni kraj žice
L <sub>m</sub>	mm	Udaljenost između uzorka i detektora
M <sub>1</sub>	-	Nagib pravca
M <sub>2</sub>	-	Nagib pravca
n	-	Redoslijed difrakcije
Q	kJ/cm	Unos topline u zavar
r <sub>0</sub>	mm	Radijus D-S prstena kada nema zaostalih naprezanja
r <sub>α</sub>	mm	Radijus D-S prstena pod kutom α
T <sub>B</sub>	s	Vrijeme baznog impulsa
T <sub>EN</sub>	s	Vrijeme negativnog impulsa
T <sub>P</sub>	s	Vrijeme pozitivnog impulsa
U	V	Napon zavarivanja
v <sub>z</sub>	mm/s	Brzina zavarivanja
W <sub>St</sub>	m/min	Brzina taljena žice
α	kg žice/ kg depozita	Koeficijent taljenja žice
β	m <sup>2</sup> K/W	Koeficijent toplinskog otpora
γ <sub>xy</sub>	mm/mm	Posmične deformacije
γ <sub>xz</sub>	mm/mm	Posmične deformacije
γ <sub>yx</sub>	mm/mm	Posmične deformacije
ε <sub>x</sub>	mm/mm	Normalne deformacije
ε <sub>y</sub>	mm/mm	Normalne deformacije
ε <sub>z</sub>	mm/mm	Normalne deformacije
ε <sub>φψ</sub>	mm/mm	Deformacija
θ	°	Kut difrakcije
λ	m	Dužina vala rendgenske zrake
ν	-	Poisson-ov koeficijent
σ <sub>1</sub>	N/mm <sup>2</sup>	Glavno naprezanje

---

$\sigma_2$	$\text{N/mm}^2$	Glavno naprezanje
$\sigma_3$	$\text{N/mm}^2$	Naprezanje okomito na površinu
$\sigma_x$	$\text{N/mm}^2$	Normalno naprezanje
$\sigma_y$	$\text{N/mm}^2$	Normalno naprezanje
$\sigma_z$	$\text{N/mm}^2$	Normalno naprezanje
$\tau_{xy}$	$\text{N/mm}^2$	Posmično naprezanje
$\tau_{yz}$	$\text{N/mm}^2$	Posmično naprezanje
$\tau_{zx}$	$\text{N/mm}^2$	Posmično naprezanje
$\varphi$	°	Kut rotacije
$\Psi$	°	Kut nagiba

**SADRŽAJ**

POPIS KRATICA .....	I
POPIS OZNAKA .....	II
SADRŽAJ .....	IV
POPIS SLIKA .....	VI
POPIS TABLICA.....	VIII
1. UVOD.....	1
2. MATERIJAL I METODE .....	3
2.1. MIG postupak zavarivanja .....	3
2.1.1. Prijenos metala u električnom luku.....	5
2.1.2. Zaštitni plinovi .....	7
2.1.2.1. Klasifikacija zaštitnih plinova.....	7
2.1.2.1.1. Argon .....	8
2.1.2.1.2. Helij.....	9
2.2. AC MIG postupak zavarivanja .....	9
2.2.1. Utjecaj polariteta na fenomen zavarivanja.....	9
2.2.2. Oblik struje AC MIG postupka zavarivanja .....	10
2.2.3. Fenomen taljenja žice.....	11
2.2.4. Utjecaj EN polariteta na koeficijent taljenja žice.....	12
2.2.5. Utjecaj EN polariteta na dubinu penetracije .....	14
2.2.6. Utjecaj polariteta na pripremu zavarenog spoja.....	16
2.2.7. Utjecaj polariteta na visokobrzinsko zavarivanje tankih limova .....	17
2.2.8. Utjecaj polariteta na zavarivačke deformacije .....	18
2.3. ALUMINIJ.....	19
2.3.1. Aluminijska legura 5754.....	19
2.3.2. Zavarljivost aluminijske legure 5754.....	21
2.3.3. Karakteristike aluminijskih legura .....	22
2.4. Zaostala naprezanja.....	25
2.4.1. Utjecajni parametri na zaostala naprezanja.....	25
2.4.2. Mjerenje i određivanje zaostalih naprezanja.....	25
2.4.3. Rendgenska difrakcijska metoda .....	26
2.4.3.1. Cos $\alpha$ metoda .....	28
3. OPĆI I SPECIFIČNI CILJEVI RADA .....	32
4. PLAN RADA .....	34
4.1. Priprema spoja.....	34
4.2. Postava i oprema za zavarivanje .....	35
4.3. Zavarivanje uzoraka .....	40
4.4. $\mu$ -X360s prijenosni rendgenski analizator zaostalih naprezanja.....	43

---

4.5. Cast – designer.....	49
5. REZULTATI RADA I RASPRAVA .....	51
5.1. Izgled zavara .....	51
5.1.1. Uzorak 1 nakon zavarivanja.....	51
5.1.2. Uzorak 2 nakon zavarivanja.....	53
5.1.3. Rasprava – izgled zavara.....	54
5.2. Deformacije ispitnih uzoraka .....	55
5.2.1. Uzorak 1 .....	56
5.2.2. Uzorak 2 .....	57
5.2.3. Rasprava - deformacije .....	58
5.3. Zaostala naprezanja u zavarenim uzorcima .....	59
5.3.1. Longitudinalna naprezanja.....	60
5.3.2. Transverzalna naprezanja.....	62
5.3.3. Rasprava – zaostala naprezanja.....	63
5.3.4. Dodatna mjerenja zaostalih naprezanja.....	65
5.4. Simulacija procesa zavarivanja .....	68
5.4.1. Simulacije MIG-P postupka zavarivanja .....	68
5.4.1.1. Rezultati simulacija deformacija.....	68
5.4.2. Simulacije AC MIG postupka zavarivanja .....	71
5.4.2.1. Rezultati simulacija deformacija.....	71
5.4.3. Dodatne simulacije.....	75
5.4.3.1. Rezultati simulacija zaostalih naprezanja .....	76
6. ZAKLJUČAK.....	78
ZAHVALA.....	81
LITERATURA.....	82
SAŽETAK.....	85
SUMMARY .....	86
ŽIVOTOPIS .....	87

**POPIS SLIKA**

Slika 1. MIG postupak zavarivanja[8] .....	4
Slika 2. Vrsta prijenosa metala u ovisnosti o naponu i struji [8] .....	6
Slika 3. Utjecaj polariteta na oblik zavarenog spoja [8] .....	10
Slika 4. Oblik struje AC MIG postupka zavarivanja [1].....	11
Slika 5. Prikaz fenomena taljenja žice za EN 40% [1].....	12
Slika 6. Odnos koeficijenta taljenja žice i EN omjera [1].....	13
Slika 7. Odnos EN omjera i brzine taljenja žice [1].....	14
Slika 8. Pad vrijednosti dubine penetracije povišenjem EN omjera kod konstante brzine dobave žice i brzine zavarivanja [5].....	14
Slika 9. Izgled navarenog spoja u ovisnosti o EN omjeru ( I=konst.)[5].....	15
Slika 10. Makrostruktura sučeonog zavara dobivena različitim EN omjerom (I=70A, v=50 cm/min) [13].....	15
Slika 11. Utjecaj EN omjera na toleranciju razmaka između tankih limova ( I=60A, U=20.5V, 1 m/min) [1].....	16
Slika 12. Usporedba maksimalne brzine zavarivanja između AC MIG i MIG-P postupka [8]17	
Slika 13. Ovisnost uzdužnih deformacija o EN omjer-u [5] .....	18
Slika 14. Zavarljivost [16].....	21
Slika 15. Mikrostruktura zavarenog aluminijskog spoja [17] .....	23
Slika 16. Vlačna čvrstoća ZUT-a u ovisnosti o vremenu [17] .....	23
Slika 17. Utjecaj vodika na poroznost [17] .....	24
Slika 18. Mjerenje elastične deformacije rendgenskim zračenjem [23] .....	27
Slika 19. Ravninski model naprezanja [24] .....	28
Slika 20. Deformacija u normalnom stanju u odnosu na x-y-z koordinate na uzorku [23] .....	29
Slika 21. Debye-Scherrer prsten dobiven jednokratnim zračenjem na dvodimenzionalnom detektoru [23] .....	30
Slika 22. Cos $\alpha$ i Sin $\alpha$ dijagrami za određivanje normalnih i posmičnih naprezanja [23].....	31
Slika 23. Priprema spoja.....	34
Slika 24. Pripojni zavari .....	35
Slika 25. Izgled postava za zavarivanje .....	36
Slika 26. PA položaj zavarivanja i fiksiranje .....	36
Slika 27. Stroj Welbee Inverter W400 .....	39
Slika 28. Sučelje stroja Welbee Inverter W400 .....	39
Slika 29. Natpisna pločica zavarivačkog stroja Welbee Inverter W400 .....	40
Slika 30. Dinamička karakteristika MIG-P postupka zavarivanja .....	41
Slika 31. Dinamička karakteristika AC MIG postupka zavarivanja .....	41
Slika 32. $\mu$ -X360s prijenosni rendgenski analizator s robotskim manipulatorom .....	44
Slika 33. Elektropoliranje mjernih točaka.....	45
Slika 34. Dubina mjernih točaka .....	46
Slika 35. Prikaz mjernih točaka.....	47
Slika 36. Mjerenje longitudinalnih naprezanja-uzorak2 .....	48



Slika 37. Mjerenje transverzalnih naprezanja-uzorak2 .....	48
Slika 38. Makroizbrusak uzorak 1 .....	51
Slika 39. Izgled lica zavara - uzorak 1 .....	52
Slika 40. Izgled donje ploče spoja - uzorak 1 .....	52
Slika 41. Makroizbrusak uzorak 2.....	53
Slika 42. Izgled lica zavara – uzorak2.....	54
Slika 43. Izgled donje ploče spoja – uzorak2.....	54
Slika 44. Usporedni prikaz deformacija MIG-P/AC MIG .....	55
Slika 45. Deformacije uzorak 1-1 .....	56
Slika 46. Deformacije uzorak 1-2 .....	56
Slika 47. Deformacije uzorak 2-1 .....	57
Slika 48. Deformacije uzorak 2-2 .....	58
Slika 49. Prikaz $\cos \alpha$ dijagrama i mjerenja dobivenog u točki 1-1.....	59
Slika 50. Prikaz D-B prstena u točki 1-1 .....	59
Slika 51. Grafički prikaz longitudinalnih naprezanja AC-DC .....	61
Slika 52. Grafički prikaz transverzalnih naprezanja AC-DC.....	63
Slika 53. Prikaz dodatnog mjernog područja .....	65
Slika 54. Prikaz $\cos \alpha$ dijagrama i mjerenja dobivenog u točki 9 .....	66
Slika 55. Prikaz D-B prstena u točki 9 .....	66
Slika 56. Deformacije modela s koeficijentom 0,7 (lijevo) i 0,8 (desno)_1 .....	68
Slika 57. Deformacije modela s koeficijentom 0,7 (lijevo) i 0,8 (desno)_2 .....	69
Slika 58. Iznos deformacija s koeficijentom 0,85 (lijevo) i 0,9 (desno)_1 .....	69
Slika 59. Iznos deformacija s koeficijentom 0.85 (lijevo) i 0.90 (desno)_2 .....	70
Slika 60. Iznos deformacija s koeficijentom 0,7 (lijevo) i 0,8 (desno)_1a .....	71
Slika 61. Iznos deformacija s koeficijentom 0,7 (lijevo) i 0,8 (desno)_2a .....	72
Slika 62. Iznos deformacija s koeficijentom 0.95 (lijevo) i 1 (desno)_1a .....	72
Slika 63. Iznos deformacija s koeficijentom 0.95 (lijevo) i 1 (desno)_2a .....	73
Slika 64. Iznos deformacija s koeficijentom 1.5 .....	75
Slika 65. Iznos zaostalih naprezanja u modelu s iznosom koeficijenta 0.95 .....	76

**POPIS TABLICA**

Tablica 1. Fizikalna svojstva Aluminijske legure 5754 H14/24 [15] .....	19
Tablica 2. Kemijski sastav aluminijske legure 5754 [15].....	20
Tablica 3. Mehanička svojstva aluminijske legure 5754 H14/24 [15] .....	20
Tablica 4. Karakteristike stroja za zavarivanje Welbee Inverter W400 [25, 26] .....	37
Tablica 5. Parametri zavarivanja.....	40
Tablica 6. Unos topline .....	42
Tablica 7. Karakteristike analizatora $\mu$ -X360s.....	43
Tablica 8. Longitudinalna naprezanja .....	60
Tablica 9. Transverzalna naprezanja.....	62
Tablica 10. Iznosi zaostalih naprezanja na dodatnom mjernom području .....	67

## 1. UVOD

Zadnjih se godina ulaže poseban trud u poboljšanje efikasnosti vozila u smislu potrošnje goriva razvojem lakših konstrukcija. Kao rješenje pokazalo se upotreba lakih korozijski postojanih aluminijskih legura. No, takav pristup nosi i brojne izazove zbog karakterističnih svojstava aluminijskih legura koje otežavaju stvaranje kvalitetnih zavara [1].

Osim automobilske industrije, prehrambena i medicinska industrija bilježe potrebu za zavarivanje toplinski osjetljivih materijala kao što su prevučeni i neprevučeni tanki limovi, nehrđajući čelik, aluminijske legure i spojevi različitih materijala [2].

Gotovo svi elektro-lučni postupci zavarivanja imaju visoki unos topline što za posljedicu nosi probleme kao što je progaranje, deformacije, poroznosti, savijanje, uvijanje i izvijanje zavarenih limova, pogrubljenje zrna, isparavanje legiranih elemenata, promjene u geometriji pripreme spoja, stvaranje previše zavarivačkih plinova sl. [3].

Otklanjanje ove problematike zahtjeva odabir primjerene tehnologije zavarivanja, procedure i tehnike. TIG (engl. *Tungsten Inert Gas*) zadovoljava dio zahtjeva, no brzina zavarivanja je iznimno niska. GMAW (engl. *Gas Metal Arc Welding*) su postupci koji nude visoku brzinu zavarivanja i iznimnu svestranost. U tu skupinu spada MIG (engl. *Metal Inert Gas*) te modificirani/kontrolirani postupci MIG zavarivanje impulsnom strujom (u daljnjem tekstu MIG-P, engl. *Pulse Metal Inert Gas*) i MIG zavarivanje izmjeničnom strujom (u daljnjem tekstu AC MIG, engl. *Alternating Current Metal Inert Gas*). Inovativne inačice predstavljaju modifikacije u prijenosu metala razvojem valnih oblika/dinamičkih karakteristika izvora struje za zavarivanje (engl. *Waveforms*) koje poboljšavaju kontrolu procesa.

Takve mogućnosti pojavile su se razvojem inovativne upravljačke elektronike, napredne programske podrške i računalnih sustava. Implementacijom navedenih u području elektro-lučnog zavarivanja rezultiralo je razvojem naprednih, svestranih i inteligentnih strujnih izvora [4].

Pojavila se potreba otklanjanja problema vezanih uz dosadašnji MIG-P i inačica TIG zavarivanja koje su pogodne za zavarivanje aluminijskih legura. Cilj razvoja je reducirati potrebu za preciznom pripremom spoja te otkloniti zavarivačke deformacije. Nadalje, potrebno je razvijati visokobrzinske tehnologije zavarivanja bez problema progaranja materijala [5]. Značajan trud se ulaže u razvoj modificiranih MIG postupaka zavarivanja kojima se teži postići mogućnost većeg depozita materijala s niskim unosom topline u osnovni materijal, osigurati kvalitetne

zavare uz minimalnu širinu zone utjecaja topline (u daljnjem tekstu ZUT, engl. *Heat Affected Zone*, HAZ) i reducirati prskanje na minimum. AC MIG nudi takve mogućnosti, no potrebna su istraživanja za bolje poznavanje ponašanja električnog luka i distribucije topline u zavar [6]. Zavod za zavarene konstrukcije na Fakultetu strojarstva i brodogradnje uspješno je pribavio uređaj s mogućnošću MIG-P i AC MIG zavarivanja što je temelj ovog rada. Naime, stroj za zavarivanje ovakvih mogućnosti veoma je rijedak u hrvatskoj industriji. Dok je MIG-P veoma raširen proces zavarivanja, AC MIG je veoma rijedak zbog ograničenog znanja o mogućnostima takve opreme.

Zaostala naprezanja neizbježna su posljedica procesa zavarivanja. Posljedica su brze i velike lokalne promjene temperature zavarenog predmeta. Nadalje, prisutni su problemi deformacija zavarenog komada, narušavanja mehaničkih svojstava i pojava pukotina. Zaostala naprezanja mogu se odrediti razornim i nerazornim metodama. Nerazorne metode su metode kod kojih ne dolazi do oštećenja materijala. U ovom radu koristit će se nerazorna metoda rendgenske difrakcije pomoću analizatora koji se pozicionira robotom. To je isto novonabavljena i suvremena oprema koja se nalazi na Zavodu za zavarene konstrukcije.

Numeričke simulacije postaju sve više integrirane u proces zavarivanja. Pošto je zavarivanje izrazito složen i kompliciran proces spajanja materijala, poželjno je odrediti približne parametre te vidjeti njihov utjecaj. Uz to, numeričke simulacije omogućavaju i uvid u probleme deformacija i zaostalih naprezanja koje su često neizbježna posljedica zavarivanja, posebice prilikom zavarivanja tankih aluminijskih limova. U ovom će se radu koristiti program pod nazivom *Cast-Designer* gdje će se optimizacijom koeficijenta unosa topline imitirati stvarno stanje deformacija i zaostalih naprezanja u zavarenim uzorcima.

## 2. MATERIJAL I METODE

U ovom dijelu približiti će se tehnologija zavarivanja čija je ideja korištena za izvođenje ovog rada. Vrlo je bitno napraviti pregled najbitnijih karakteristika u sferi MIG postupka, a posebice modificiranog AC MIG postupka jer je ono presudno za objašnjenje odabranih parametara, procedure i tehnike zavarivačkog procesa ovog rada. Na temelju izučene literature može se imati određena sigurnost prilikom izvođenja laboratorijskih ispitivanja, a s ciljem doprinosa tehnologiji koja ima enorman budući potencijal. Navesti će se najbitnije karakteristike aluminija s naglaskom na problematiku njegovog zavarivanja. Približiti će se zaostala naprezanja te metode detekcije istih.

### 2.1. MIG postupak zavarivanja

MIG postupak jedan je od GMAW postupaka zavarivanja. To su elektrolučni postupci zavarivanja koji omogućuju taljenje metala djelovanjem topline električnog luka uspostavljenog između neprekidno dobavljane elektrode u obliku žice i osnovnog materijala.

Iz samog nazivlja evidentno je korištenje zaštitnih plinova koji se dobavljaju iz vanjskog spremnika pod tlakom te se sapnicom usmjeruju na mjesto zavarivanja kako bi se osigurala zaštita taline, električnog luka, dodatnog i osnovnog materijala od atmosferskih uvjeta, a time osigurao kvalitetan zavar. MIG postupak podrazumijeva inertne plinove koji ne reagiraju s talinom tj. ne sudjeluju direktno u procesu, a to su argon (skraćeno Ar) i helij (skraćeno He) koji se koriste zasebno ili kao mješavine.

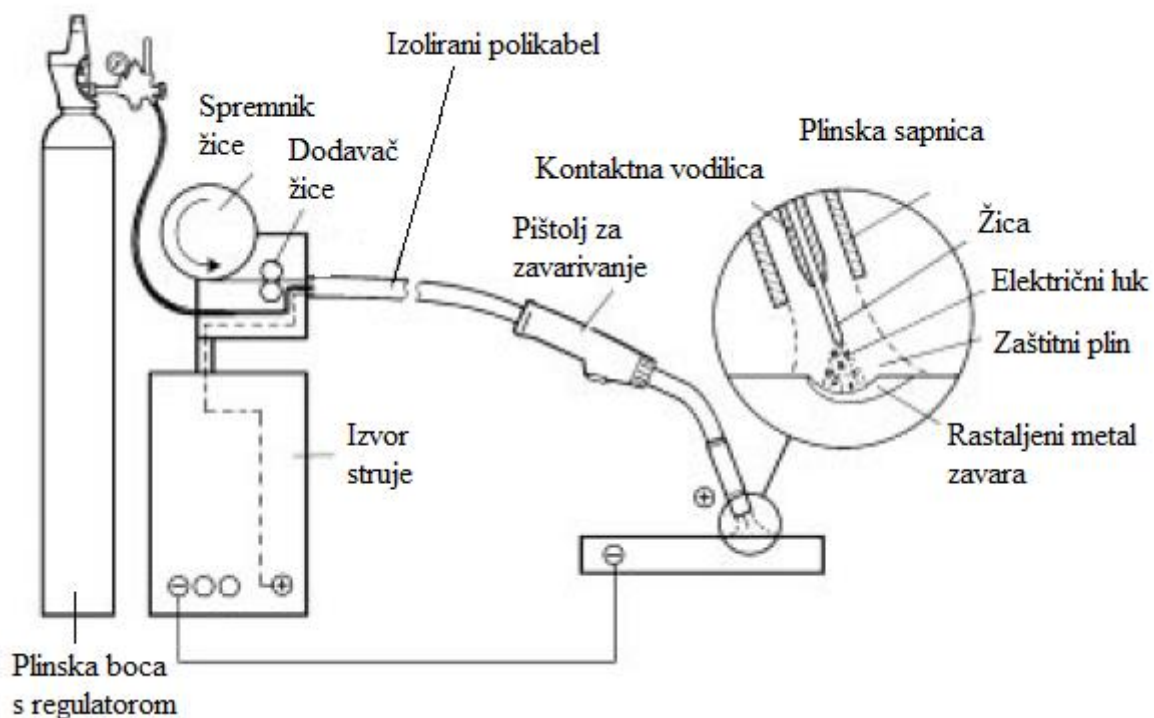
Dodatni materijal kontinuirano se automatski u obliku žice dovodi pogonskim valjcima putem cijevi kroz pištolj za zavarivanje. Žica je smještena unutar stroja za zavarivanje ili na vanjskom kalemu za dobavljanje. Osim što služi kao dodatan materijal, žicom se vrši uspostavljanje i održavanje električnog luka za zavarivanje [7]. Kako se žica dovodi automatski, a pištolj pomiče ručno MIG postupak zavarivanja spada u poluautomatske postupke. Mehanizacijom pomicanja pištolja postupak se jednostavno automatizira.

Struja se dovodi na žicu kontaktnom vodilicom na vrhu pištolja za zavarivanje, a uspostavom luka zatvara se strujni krug. Žica je obično spojena na pozitivan pol, dok je radni materijal spojen na minus pol [8].

Zadatak električnog luka je omogućiti dovoljno toplinu za taljenje dodatnog i osnovnog materijala te prijenos kapljica dodatnog materijala u talinu, a što ovisi o elektromagnetskim silama u luku i površinskoj napetosti [8].

Slika 1 prikazuje osnovne dijelove MIG-a, a to su [8]:

- izvor struje
- sustav za dovod žice (specijalni pogonski valjci, bubanj za namatanje, pogonski motor)
- plinska boca s pokazateljem tlaka i regulatorom protoka
- spremnik rashladnog sredstva
- pištolj za zavarivanje
- izolirani polikabel (cijev za dovod žice, bakreni vodič struje, cijev za zaštitni plin, cijev za rashladno sredstvo)



Slika 1. MIG postupak zavarivanja[8]

Karakteristike MIG postupka zavarivanja:

- visoka produktivnost, posebice automatizacijom postupka
- relativno nizak unos topline - zavarivanje tankih i debelih materijala

- potrebno je minimalno ili nije potrebno čišćenje međuprolaza
- moguće zavarivanje većine željeznih i neželjeznih materijala u svim položajima zavarivanja
- oprema je složenija u usporedbi s drugim čestim postupcima, ali je široko dostupna
- ograničena upotreba u vanjskoj okolini
- u određenim situacijama ograničena dostupnost pištolja za zavarivanje
- visoka iskoristivost dodatnog materijala; 93-98% [9]
- mogućnost adaptacije za visokobrzinske robotske, automatske i polu-automatske primjene [9]
- zavari odličnog izgleda i niskog udjela difundiranog vodika (<5mL/100 g zavara)

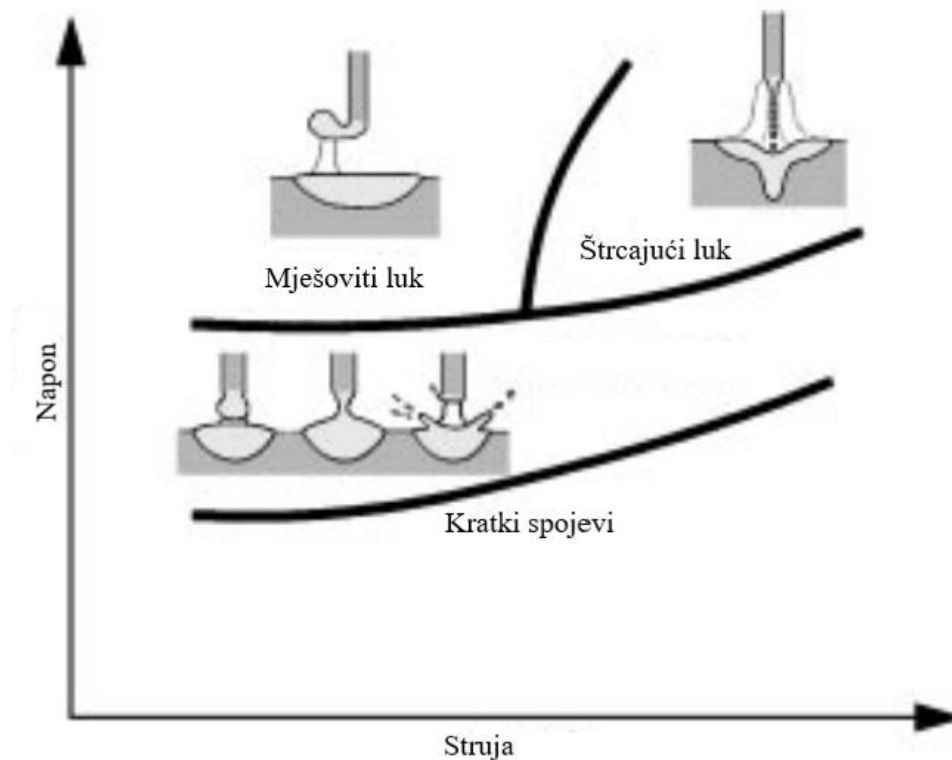
Prilikom svakog zavarivačkog procesa potreban je pravilan odabir parametara. Ovisno o zahtjevima, MIG zavarivanje podrazumijeva odabir debljine žice, napona, struje i brzine žice, brzine zavarivanja, induktiviteta, slobodnog kraja žice, zaštitnog plina i njegovog protoka, izbora sapnice i tehnike zavarivanja i dr.

### **2.1.1. Prijenos metala u električnom luku**

Prijenos metala u električnom luku posljedica je interakcije elektromagnetskih sila i površinske napetosti. U procesu sudjeluju i gravitacijska sila te sila pritiska plazme [8].

Prema Internacionalnom institutu za zavarivanje (engl. *International Institute of Welding –IIW*) postignut je dogovor o diskriminaciji prirodnog prijenosa metala i kontroliranog prijenosa metala. Napominje se da pojedini autori nerijetko proširuju klasifikaciju zbog sve veće upotrebe kontroliranih/modificiranih prijenosa metala.

Stabilnost električnog luka, izgled i kvaliteta zavara ovise o načinu prijenosa metala, a stabilan luk karakteriziran je konstantom veličinom kapljice, duljinom luka i niskom razinom prskanja. Sferne kapljice dodatnog materijala prenosi se u talinu kratkim spojem ili slobodnim letom. Ovisno o načinu transporta, definirala su se tri osnovna područja. To su područje kratkih spojeva, područje mješovitog luka i područje štrcajućeg luka prikazani na Slika 2. To su načini prijenosa metala koji spadaju u prirodan prijenos metala. MIG-P predstavlja izvedenicu štrcajućeg luka gdje se upotrebom visokih i niskih razina struja ostvaruje kontrolirani prijenos kapljica slobodnim letom.



Slika 2. Vrsta prijenosa metala u ovisnosti o naponu i struji [8]

Razlikuju se sljedeći prijenosi metala:

- Prijenos metala kratkim spojevima - predstavlja način prijenosa metala kod kojeg dolazi do deponiranja kontinuirano dobavljane žice kratkim spajanjem s rastaljenom kupkom. Dakle, dolazi do odvajanja kapljice dodatnog materijala uslijed fizičkog kontakta žice i rastaljene kupke.
- Prijenos metala prijelaznim (mješovitim) lukom - Predstavlja način prijenosa metala kod kojeg dolazi do deponiranja kontinuirano dobavljane žice kombinacijom kratkih spojeva i nepravilnog štrcajućeg luka. Nepravilno indicira neusmjeren slobodan let kapljice pod utjecajem gravitacije.
- Prijenos metala štrcajućim lukom - Predstavlja način prijenosa metala kod kojeg dolazi do deponiranja kontinuirano dobavljane žice aksijalnim slobodnim letom malih kapljica pravilnog oblika u električnom luku.

Shodno razvoju postupaka zavarivanja, zadnjih se godina ulaže trud u proširenje klasifikacije osnovnog prijenosa metala, odnosno proširenje osjetljivosti navedenih osnovnih područja ovisno o struji i naponu [10].



### **2.1.2. Zaštitni plinovi**

Kako bi se osigurao zavar zahtijevane kvalitete potrebno je otkloniti utjecaj zraka iz zavarivačkog okruženja. Zrak se u najvećem dijelu sastoji od kisika i dušika. Ti elementi će se otopiti u rastaljenoj kupki dodatnog i osnovnog materijala (u čvrstoj otopini) ili će tvoriti spojeve oksida i nitrida.

Također, elementi mogu uzrokovati oksidaciju površine dijela materijala koji je pod utjecajem procesa te potaknuti stvaranje pora.

Zaštita od oksidacije postiže se kombinacijom legiranih elemenata iz dodatnog materijala i zaštitnog plina [8].

Zaštitni plin ima dvije glavne uloge [8,9]:

- Zaštita električnog luka, taline, osnovnog i dodatnog materijala od zraka iz okruženja.
- Pozitivan utjecaj na stabilnost električnog luka, produktivnost, pouzdanost i kvalitetu.

Pravilan izbor zaštitnog plina utječe na [7,8]:

- stabilnost električnog luka
- uspostavu električnog luka
- količinu depozita
- kvašenje osnovnog materijala talinom
- razinu prskanja
- zagađenje okoline
- profil zavarenog spoja

#### **2.1.2.1. Klasifikacija zaštitnih plinova**

Zaštitna atmosfera se može sastojati od pojedinačnih plinova ili dvokomponentnih, trokomponentnih ili četverokomponentnih zaštitnih plinskih mješavina. Ovisno o kombinaciji dobit će se specifično djelovanje na proces zavarivanja. Presudno za kvalitetu zavara je visoka čistoća plina i nizak udio vlage.

Norma HRN EN ISO 14175 klasificira plinove i plinske mješavine ovisno o prisutnoj kemijskoj reakciji na:

- R – reducirajuće plinske mješavine
- I – inertni plinovi i plinske mješavine
- M – Oksidirajuće mješavine koje su kombinacija inertnih plinova i CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>.
- C – visokooksidirajući plinovi i plinske mješavine
- F – nereaktivni plinovi ili reducirajuće plinske mješavine za plazma zavarivanje i zaštitu korijena.

Prema normi HRN EN ISO 14175 plinovi koji se koriste u procesu zavarivanja su argon, helij, ugljikov dioksid, kisik, dušik i vodik. Ar i He su inertni plinovi. CO<sub>2</sub> i O<sub>2</sub> imaju oksidirajuće djelovanje. N<sub>2</sub> je na sobnoj temperaturi neaktivan. H<sub>2</sub> ima reducirajuće djelovanje.

Najbitnija fizikalna svojstva plinova su [9]:

- ionizacijski potencijal
- toplinska vodljivost
- kemijska reaktivnost zaštitnog plina i taline.

MIG postupci podrazumijevaju korištenje Ar i He te njihovih mješavina. Shodno tome, potrebno je približiti njihova svojstva i karakteristike.

#### 2.1.2.1.1. Argon

Argon je jednoatomni, najčešće korišteni kemijski inertan plin bez boje, mirisa, okusa, neotrovan je, nezapaljiv i netopiv u talini.

U usporedbi s helijem ima nisku toplinsku vodljivost, visoku gustoću i niski ionizacijski potencijal. Ionizacijski potencijal predstavlja energiju potrebnu da se plin ionizira tj. postane električki vodljiva plazma. Električni luk se lako uspostavlja i visoke je stabilnosti, a zbog velike gustoće struje koja je posljedica fizikalnih svojstva, dobiva se prstenasta penetracija. 100% čisti Ar koristi se za zavarivanje nikla, bakra, aluminijsa, titana, magnezija, cirkonija i njihovih legura odnosno željeznih i neželjeznih materijala [7,9]. Niska toplinska vodljivost može rezultirati greškama zbog manje gustoće topline u vanjskim područjima električnog luka.

Plinske mješavine koje sadrže visoki udio argona podržavaju sve prirodne načine prijenosa materijala u električnom luku. Zbog svoje cijene u odnosu na helij, najčešći je inertni plin u elektrolučnim procesima zavarivanja.

#### 2.1.2.1.2. Helij

Helij je jednoatomni kemijski inertan plin male atomske mase i niske gustoće. U atmosferi se nalazi u malom postotku, a zbog procesa dobivanja je skup. Upotrebljava se u plinskim mješavinama za zavarivanje nehrđajućih čelika te kod zavarivanja aluminijskih i magnezijevih. Visoke je toplinske vodljivosti što rezultira plićim i širim penetracijskim profilom [7,9].

Zbog visokog ionizacijskog potencijala struja i napon zavarivanja su veći u usporedbi s argonom. Uspostava električnog luka je teža. Rezultat navedenog je visoka raspoloživa toplinska energija tj. visoki unos topline. Zbog visoke stabilnosti električnog luka značajno doprinosi količini deponiranog materijala prilikom zavarivanja visokim gustoćama struje.

## 2.2. AC MIG postupak zavarivanja

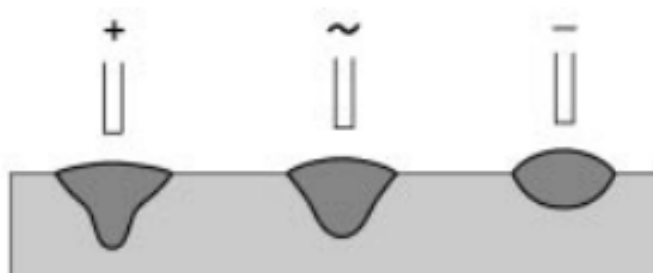
Elektrolučno zavarivanje izmjeničnom strujom razvijeni je koncept u poznatim TIG i SAW (engl. *Submerged Arc Welding*) postupcima, ovaj potonji poznatiji je pod nazivom elektrolučno zavarivanje pod zaštitnim praškom (Skraćeno EPP).

Potrebom zavarivanja modernijih materijala s ciljem što manje mase konstrukcija, primjerice visokočvrstih čelika i aluminijskih legura, pojavili su se određeni problemi koji su dosadašnjim konceptima neizvedivi ili neisplativi. Česti problemi u zavarivanju navedenih materijala su progaranje i nemogućnost kvalitetnog staljivanja materijala s velikim razmakom u pripremi zavarenog spoja [11]. AC MIG postupak zavarivanja predstavlja potencijal u otklanjanju navedenih ograničenja, a u sljedećim će se poglavljima približiti karakteristike koje ga razlikuju od sličnih postupaka.

### 2.2.1. Utjecaj polariteta na fenomen zavarivanja

Uobičajeno za konvencionalni MIG postupak istosmjernom strujom je spajanje dodatnog materijala na + tj. anodu, a osnovni materijal na – pol tj. katodu (engl. *Direct Current Electrode Positive* - DCEP). Karakteristike DCEP polariteta su duboka penetracija, stabilan električni luk i efekt čišćenja aluminijskih oksida (engl. *Cathodic cleaning*) [1].

Spajanjem materijala na pozitivan, a žice na negativan pol (engl. *Direct Current Electrode Negative* - DCEN) dobiti će se plića penetracija, veća količina taline, ali i nestabilan električni luk, prikazano na slici 3 [1].



Slika 3. Utjecaj polariteta na oblik zavarenog spoja [8]

AC MIG postupak omogućuje korištenje pozitivnih karakteristika DCEP i DCEN postavki u isto vrijeme. Bitne karakteristike AC MIG-a su visoki koeficijent taljenja dodatnog materijala i kontrola dubine i oblika penetracije. Kod potrošnih elektroda dolazi do većeg pada napona na katodi od anode što kod ove tehnologije uzrokuje porast toplinske energije te porast koeficijenta taljenja žice. Sa svrhom temeljitog shvaćanja zašto dolazi do rasta navedenog koeficijenta, svrsishodno je uložiti napore u pojašnjavanje toplinskog fenomena na vrhu žice [5].

### 2.2.2. Oblik struje AC MIG postupka zavarivanja

Na Slika 4 simbolično je prikazan tijek struje u vremenu za AC MIG koji se izražava preko EN omjera iliti balansa negativnog i pozitivnog polariteta. EN omjer predstavlja omjer struja negativnog polariteta i ukupne struje u području jednog ciklusa izmjenične struje, prema jednadžbi [1]:

$$EN \text{ omjer} = \frac{I_{EN} * T_{EN}}{I_P * T_P + I_B * T_B + I_{EN} * T_{EN}} * 100\%$$

Navedene oznake predstavljaju:

$I_P$  – jakost impulsne struje, A

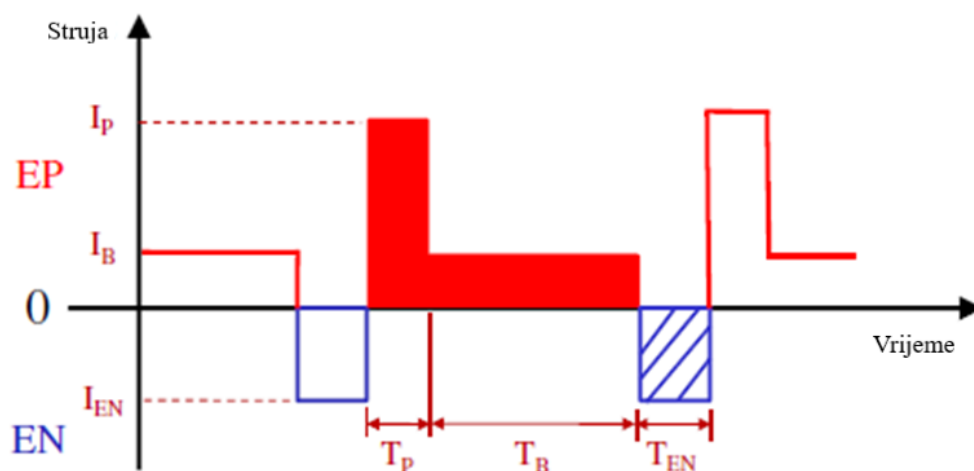
$I_B$  – jakost bazne struje, A

$I_{EN}$  – jakost negativne impulsne struje, A

$T_P$  – vrijeme pozitivnog impulsa, s

$T_B$  – vrijeme baznog impulsa, s

$T_{EN}$  – vrijeme negativnog impulsa, s



Slika 4. Oblik struje AC MIG postupka zavarivanja [1]

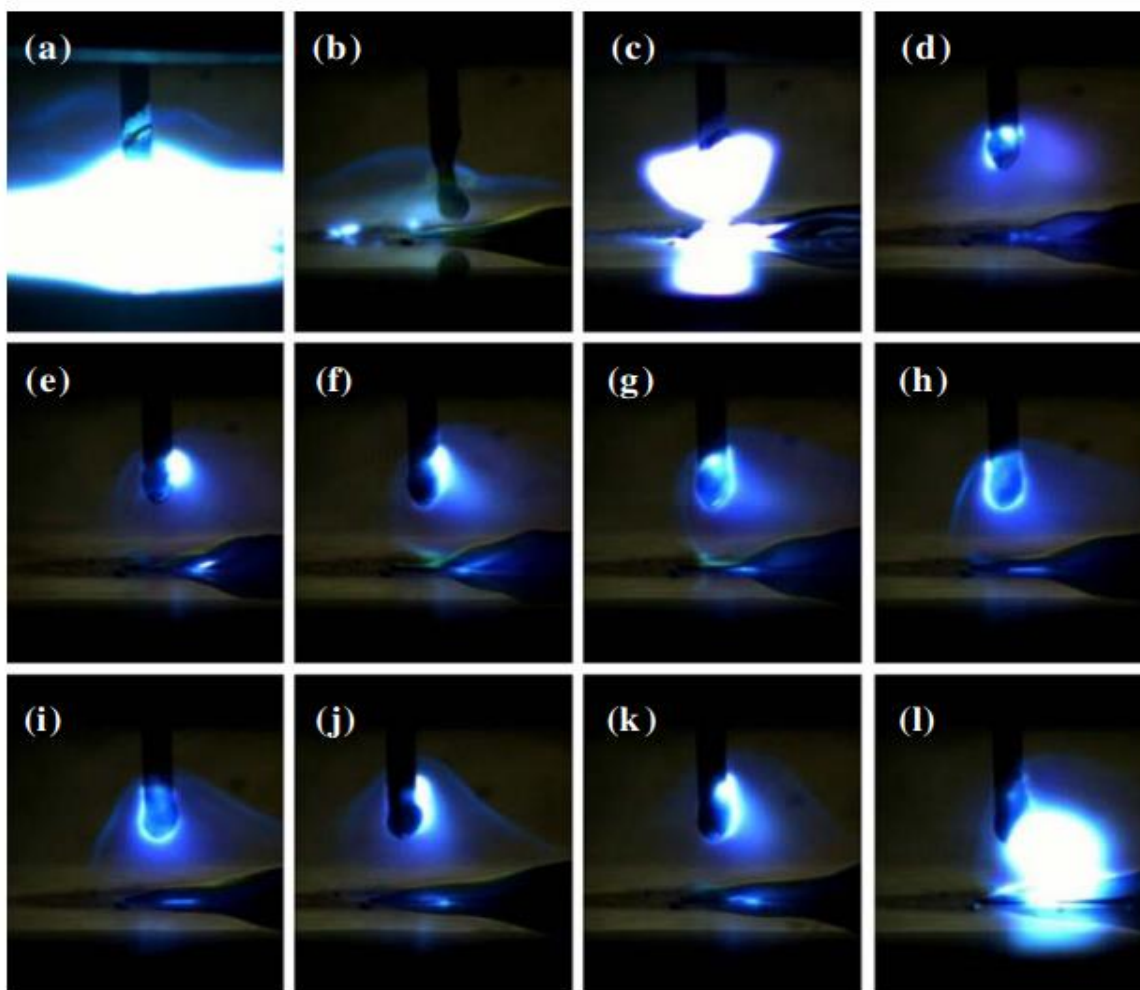
Oblici struja i napona nisu strogo određeni. Proizvođači opreme predstavljaju svoje postavke, dok se laboratorijska ispitivanja često rade improviziranim postavkama pa je slika samo prikaz jednog od mogućih oblika.

### 2.2.3. Fenomen taljenja žice

Kada je žica na negativnom polu katodna će se mjesta formirati na površinskim oksidima te će se, uslijed fizikalnih pojava, penjati na još ne zagrijanu površinu iznad kapljice na vrhu žice (engl. *arc climbing*). Tako se električni luk distribuira na veću površinu i zagrijava više dodatnog materijala. Navedeni mehanizam rezultira povećanjem koeficijenta taljenja žice [5].

Kada je žica na pozitivnom polu električni luk se koncentrira na površini materijala [1,12]. Tako se zagrijava samo vršna površina kapljice što za posljedicu ima pregrijavanje kapljice i visok unos topline. Navedeni mehanizmi vidljivi su na Slika 5.

Zadatak pozitivnog visokostrujnog impulsa je oblikovanje i prijenos kapljice dodatnog materijala kroz električni luk u rastaljenu kupku, a negativnog kontrola dubine penetracije smanjenjem unosa topline [2].



Slika 5. Prikaz fenomena taljenja žice za EN 40% [1]

#### 2.2.4. Utjecaj EN polariteta na koeficijent taljenja žice

Kod elektro-lučnog zavarivanja elektroda se tali pod utjecajem topline koja je posljedica prolaska struje i topline električnog luka. Shodno tome brzina taljenja žice može se opisati sljedećih izrazom:

$$W_{St} = \alpha I + \beta I^2$$

gdje je:

$W_{St}$  - brzina taljenja žice, m/min

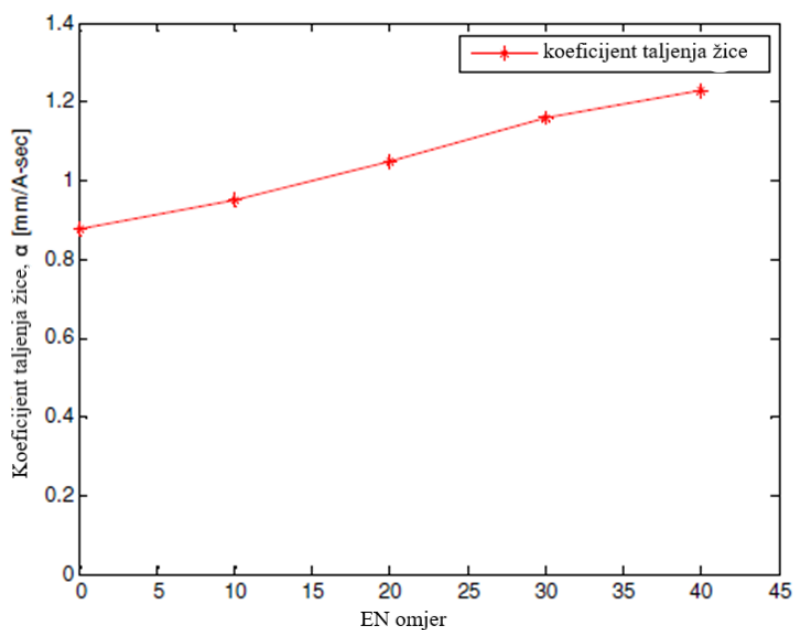
$\alpha$  – koeficijent taljenja žice, kg žice/kg depozita

$\beta$  – koeficijent toplinskog otpora, m<sup>2</sup>K/W

$l$  – slobodni kraj žice, mm

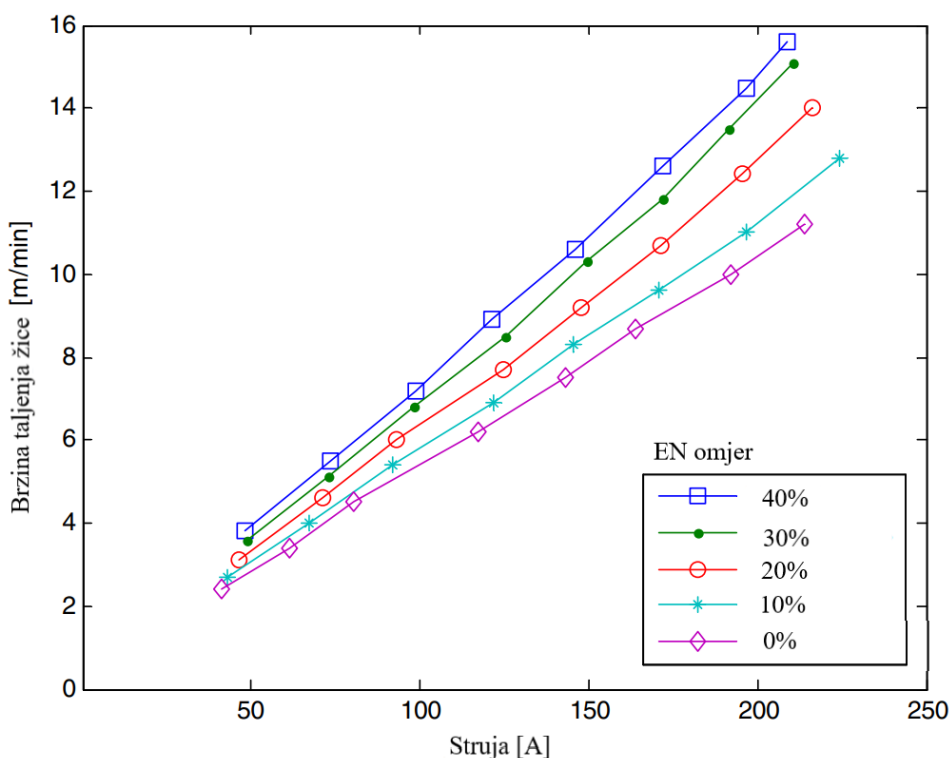
$I$  – jakost struje, A

Zbog visoke toplinske vodljivosti aluminija, zanemaruje se drugi dio jednadžbe koja zatim postaje linearna. Na Slika 6 vidljiva je ta linearna ovisnost struje zavarivanja i EN omjera te povećanje koeficijenta taljenja u slučaju povećanja EN omjera [1].



Slika 6. Odnos koeficijenta taljenja žice i EN omjera [1]



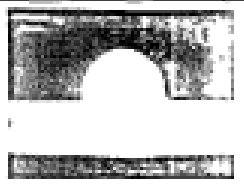

Na Slika 7 vidljivo je da uz istu brzinu taljenja žice povećanjem EN omjera potrebna je značajno manja srednja struja zavarivanja. Objašnjenje zašto dolazi do povećanja brzine taljenja je da, ukoliko povećavamo EN omjer produžujemo i vrijeme trajanja negativnog impulsa. Time se žica dulje grije i tako se povećava količina rastaljenog materijala.



Slika 7. Odnos EN omjera i brzine taljenja žice [1]

### 2.2.5. Utjecaj EN polariteta na dubinu penetracije





Promjenom EN omjera utječe se na dubinu i oblik penetracije. Prema [5] najutjecajnijim parametrima na unos toplote su srednja struja zavarivanja i polaritet žice. Slika 8 prikazuje kako povišenjem EN omjera kod konstantne brzine dobave žice dolazi do smanjenja srednje struje i napona, a time i značajnog pada dubine penetracije.

EN%=0%	EN%=10%	EN%=20%	EN%=40%
$I_a = 98 \text{ A}$ $V_a = 17.6 \text{ V}$	$I_a = 88 \text{ A}$ $V_a = 16.2 \text{ V}$	$I_a = 83 \text{ V}$ $V_a = 15.6 \text{ V}$	$I_a = 65 \text{ A}$ $V_a = 15.6 \text{ V}$
			

Slika 8. Pad vrijednosti dubine penetracije povišenjem EN omjera kod konstantne brzine dobave žice i brzine zavarivanja [5]

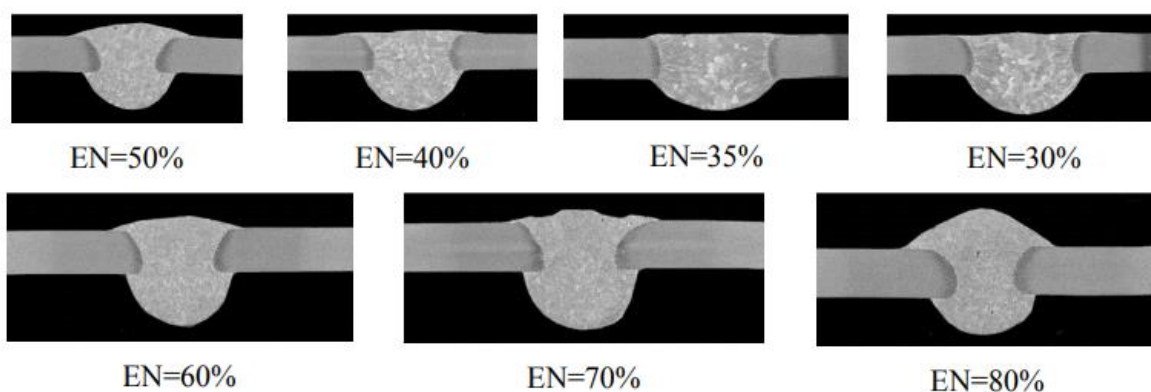


Slika 9 prikazuje utjecaj EN omjera na penetraciju u slučaju jednake srednje struje zavarivanja. Da bi se održala jednaka struja u slučaju povećanja EN omjera, potrebno je povisiti brzinu dobave žice. Pošto je vrijednost struje konstantna nije došlo do značajne promjene u dubini penetracije, no vidljivo je povećanje visine i smanjenje širine zavara.

EN% = 0%	EN% = 10%	EN% = 20%	EN% = 40%
Vf = 600 cm/min Ia = 98 A Va = 17.6 V	Vf = 650 cm/min Ia = 99 A Va = 16.8 V	Vf = 704 cm/min Ia = 97 A Va = 16.4 V	Vf = 1000 cm/min Ia = 101 A Va = 16.3 V
			

Slika 9. Izgled navarenog spoja u ovisnosti o EN omjeru ( I=konst.)[5]

Povećanje EN omjera ima pozitivan utjecaj na kvalitetu spoja. Visina zavara se povećava, širina smanjuje, a smanjenjem penetracije uklanja se nadvišenje u korijenu zavara. No, pretjerano povećanje može rezultirati nepravilnim oblikom zavara što je prikazano na Slika 10.







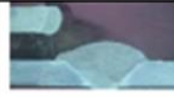




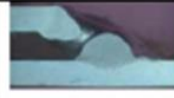















Slika 10. Makrostruktura sučeonog zavara dobivena različitim EN omjerom (I=70A, v=50 cm/min) [13]

### 2.2.6. Utjecaj polariteta na pripremu zavarenog spoja

Prilikom zavarivanja tankih limova česta je upotreba preklopnih zavara, no nerijetko dolazi do progaranja materijala, lošeg spajanja i nestabilnosti luka uslijed niskih razina parametara kojima se nastoje otkloniti greške. Tehnologijom oblikovanja deformiranjem teško se ostvaruju precizne tolerancije razmaka između tankih limova, a moguća je i pogreška montaže. Rezultat je odstupanje razmaka između limova na različitim mjestima [5]. Potrebno je osigurati tehnologiju koja će popuniti razmak, ali bez negativnih posljedica. Da bi se kod MIG-P postupka zavarivanja ostvarilo dovoljno depozita potrebno je povećavati struju i brzinu dobave žice što će rezultirati progaranjem.

Prema [1] povećanjem EN omjera kod AC MIG-a pri jednakoj srednjoj struji zavarivanja povećava se veličina kapljice. U [13] su prikazani slični rezultati, povišenjem trajanja negativnog impulsa za jednaku struju povećava se promjer kapljice. Shodno navedenom, povećanjem EN omjera kod jednake srednje struje povećava se koeficijent taljenja žice i time brzina taljenja žice tj. nastali depozit. Na taj način se bez negativnih posljedica popunjavaju veliki razmaci između tankih limova.

Na Slika 11 vidljivo je kako je pri EN 0% (MIG-P) maksimalan razmak 0,5 mm, dok je već za EN 5% nastalim većim depozitom popunjen razmak od 1,5 mm [1].

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

Slika 11. Utjecaj EN omjera na toleranciju razmaka između tankih limova (  $I=60A$ ,  $U=20.5V$ ,  $1\text{ m/min}$ ) [1]

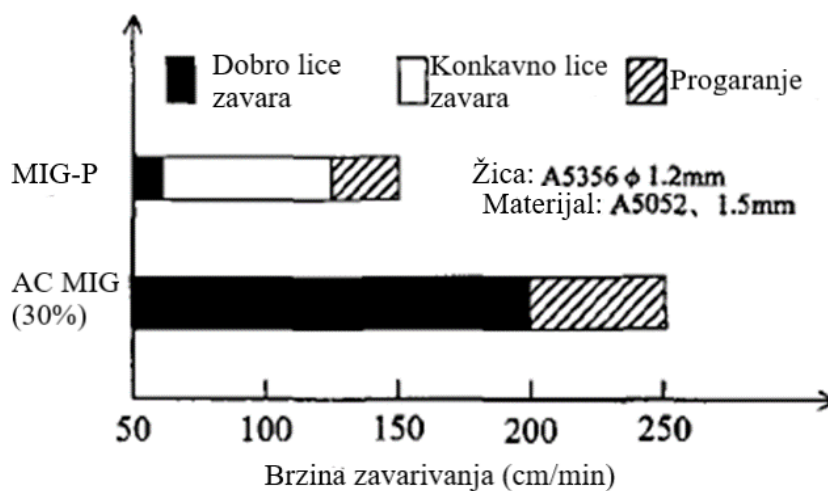
### 2.2.7. Utjecaj polariteta na visokobrzinsko zavarivanje tankih limova

Glavni zahtjevi za zavarivanje tankih limova su brzina zavarivanja, izbjegavanje progaranja materijala i niske deformacije. Kod MIG-P postupka povišenje brzine zavarivanja zahtjeva povišenje struje zavarivanja čime dolazi do povećanja penetracije. Ograničavanjem struje smanjuje se produktivnost procesa zavarivanja.

S druge strane, smanjenjem struje i napona smanjuje se duljina električnog luka i njegova stabilnost. Rezultat je kratko spajanje žice i osnovnog materijala što rezultira prskanjem [1].

Kod AC MIG-a promjenom EN omjera može se postići niži unos topline, veći depozit i, esencijalno za zavarivanje tankih aluminijskih limova, plitka penetracija i povećana brzina zavarivanja.

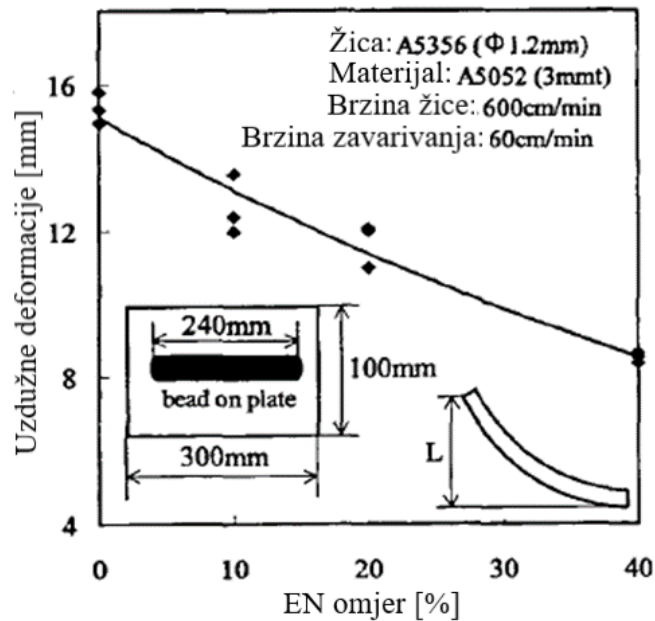
U odnosu na MIG-P zavarivanje, AC MIG-om mogu se zavarivati limovi tanji od 2 mm bez nastupanja progaranja materijala. Na slici 12 je vidljivo kako je za prikazani sustav maksimalna brzina zavarivanja AC MIG-a oko 3 puta veća od MIG-P [5].



Slika 12. Usporedba maksimalne brzine zavarivanja između AC MIG i MIG-P postupka [8]

### 2.2.8. Utjecaj polariteta na zavarivačke deformacije

AC MIG postupak zavarivanja omogućuje povišenje EN omjera, a u isto vrijeme nizak unos topline i visoku produktivnost zbog iste ili povišene brzine dobave žice. Niži unos topline znači i niže postignute maksimalne temperature. Na slici 13 vidljivo je smanjenje nastalih uzdužnih deformacija povišenjem EN omjera [5].



Slika 13. Ovisnost uzdužnih deformacija o EN omjer-u [5]

## 2.3. ALUMINIJ

Aluminij je po količini drugi najčešći metalni element na Zemlji. Otkriven je 1825. godine, no njegovo korištenje u strojarstvu počelo je 1886. godine. Iste je godine počela industrijska proizvodnja aluminija iz rude boksita. Svojstva čistog aluminija su praktički neuporabiva u strojarskoj praksi zbog čega se u čistom stanju gotovo pa i ne koristi. Kako bi se poboljšala svojstva dodaju se legirni elementi od kojih su najčešći mangan (Mn), magnezij (Mg), cink (Zn), silicij (Si) i bakar (Cu). Otkrićem precipitacijskog očvršnuća ostvaren je veliki iskorak u proizvodnji i uporabi aluminija. Precipitacijsko očvršnuće omogućava visoku čvrstoću aluminijskih legura slična čvrstoći pojedinih ugljičnih čelika pri samo trećini mase [14]. Pojavom aluminija stvorila se potreba za razvoj elektrolučnih postupaka zavarivanja. AC MIG je primjer koji predstavlja ogroman potencijal i slijedi razvoj moderne proizvodne industrije.

### 2.3.1. Aluminijska legura 5754

Legura 5754 iz serije 5xxx legirana je magnezijem, kemijskog sastava prema Tablica 2. U seriji 5xxx udio magnezija je maksimalno 5%. Od svih toplinski neobrađivih serija, serija 5xxx ima najveću čvrstoću zbog čega se koriste u velikom broju područja poput brodogradnje, izrade mostova, tlačnih spremnika i dr. Legure koje sadrže iznad 3% magnezija ne preporučuju se za korištenje na temperaturama iznad 65°C zbog potencijalne senzibilizacije i napetosne korozije. Uz dobra mehanička svojstva (Tablica 3), serija 5xxx ima odlična korozijska svojstva. Važno je napomenuti kako je oblikovljivost dobra, ali opada s porastom magnezija. Fizikalna su svojstva prikazana u Tablica 1.

Zbog svojih izuzetnih svojstava poput visoke čvrstoće, visoke korozijske otpornosti, relativno dobre zavarljivosti i deformabilnosti, aluminijska legura 5754 najčešće se koristi u automobilske industriji za izradu karoserije i vrata automobila [15].

**Tablica 1. Fizikalna svojstva Aluminijske legure 5754 H14/24 [15]**

Svojstvo	Vrijednost
Gustoća	2660 kg/cm <sup>3</sup>
Talište	600°C
Modul elastičnosti	68 GPa
Toplinska vodljivost	147 W/m K
Toplinsko istežanje	24 x 10 <sup>-6</sup> /K

Električna otpornost	$0,049 \times 10^{-6} \Omega \text{ m}$
----------------------	---

Izuzetna korozijska postojanost omogućava mu korištenje u morskoj i onečišćenoj okolini.

Postoje dvije kvalitete aluminija 5754:

- AA – *anodising quality* (eloksirani ili anodizirani)
- SQ – *standard quality* (standardna kvaliteta)

Aluminij anodizirane kvalitete ima čišću i kvalitetniju površinu. Površina je u potpunosti očišćena od nepravilnosti poput naljepljivanja i nepravilnosti koje su posljedica lijevanja, čime se produžuje životni vijek aluminija.

**Tablica 2. Kemijski sastav aluminija 5754 [15]**

Kemijski sastav aluminija						
Si %	Fe %	Cu %	Mn %	Mg %	Cr %	Zn %
0,40	0,40	0,20	0,50	2,6 – 3,2	0,1	0,25

**Tablica 3. Mehanička svojstva aluminija 5754 H14/24 [15]**

Svojstvo	Vrijednost
Granica razvlačenja	80 MPa
Vlačna čvrstoća	190 – 260 MPa
Istezanje	12 %

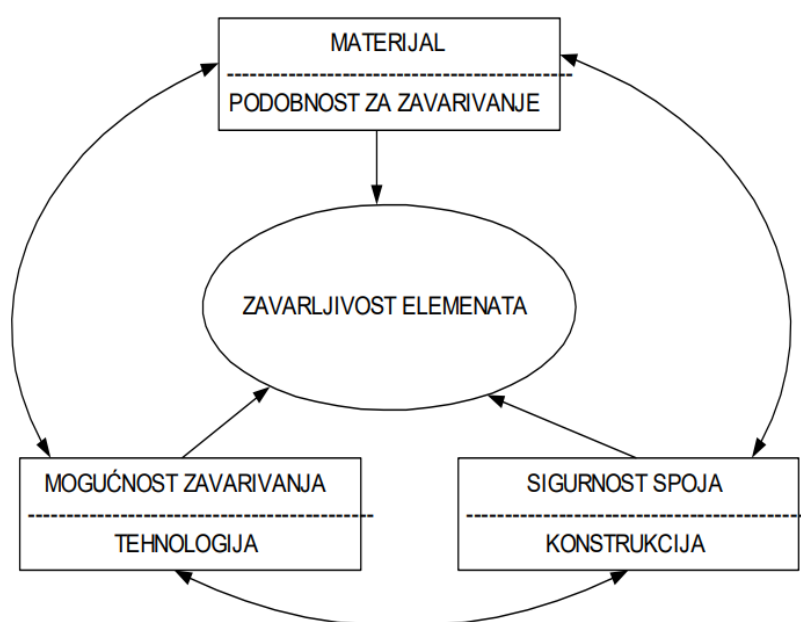
Osim u automobilskoj industriji, aluminij 5754 koristi se u:

- Građevini
- Cestovnim znakovima
- Namještaju
- Stolariji
- Mostovima

Aluminij 5754 najčešće se isporučuje u obliku ploča i koluta.

### 2.3.2. Zavarljivost aluminijske legure 5754

Definicija zavarljivosti prema Međunarodnoj organizaciji za standardizaciju (eng. *International organization for standardization* - ISO) glasi: „Metalni materijal smatra se zavarljivim u određenom stupnju, utvrđenim postupkom zavarivanja i za određenu primjenu, ako se kontinuitet materijala ostvaruje zavarenim spojem izvedenim pod uvjetima predviđenim za ostvarivanje tog stupnja zavarljivosti. Zavareni spoj mora u potpunosti odgovarati prihvaćenim kriterijima kako svojim lokalnim karakteristikama, tako i utjecajem na konstrukciju koje je sastavni dio.“ [16]. Slika 14 simbolično prikazuje definiciju.



Slika 14. Zavarljivost [16]

Faktori koji utječu na zavarljivost, a spadaju pod skupinu materijal su kemijska, metalurška i mehanička svojstva materijala. Pod sigurnost zavarenog spoja spadaju okolna atmosfera, temperatura, debljina elemenata te vrsta i veličina naprezanja koja se javljaju. Mogućnost zavarivanja je grupa koja obuhvaća elemente poput pripreme za zavarivanje, odnosno određivanje temperature predgrijavanja i međuslojne temperature, čišćenje i postavljanje elemenata u pravilan položaj te naknadna toplinska obrada. U mogućnost zavarivanja isto tako spada i postupak zavarivanja kao i parametri za taj postupak [16].

Aluminij 5754 ima vrlo dobru zavarljivost zbog razvitka postupaka kojim se spaja te je potrebno uzeti u obzir posebnosti aluminija i greške koje mogu nastati.

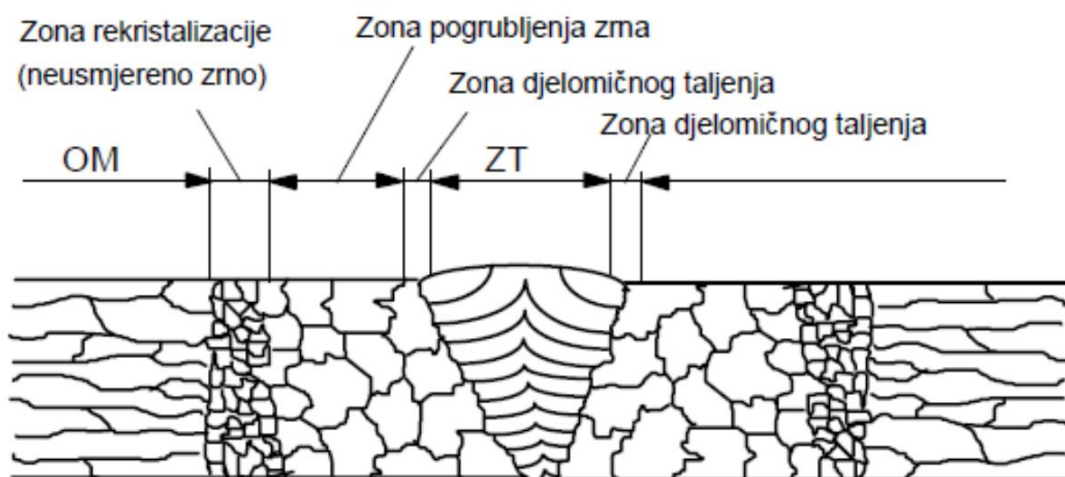
### **2.3.3. Karakteristike aluminijских legura**

Karakteristika koja aluminiju omogućava izrazito dobru korozivnu postojanost, s druge strane otežava postupak zavarivanja. Naime, na površini dolazi do stvaranja tankog sloja aluminijevog oksida ( $Al_2O_3$ ) čija debljina iznosi svega 0,01 mm na hladnom materijalu. Problem pri zavarivanju nastaje zbog visoke temperature taljenja oksidnog sloja koja iznosi oko 2050 °C, dok je talište aluminija oko 600 °C. Ukoliko se oksidni sloj ne ukloni doći će do taljenja materijala ispod oksidnog sloja što će rezultirati lošim ili nikakvim zavarivanjem. Nadalje, ukoliko oksidni sloj nije u potpunosti i pravilno otklonjen postoji opasnost od njegovog miješanja s talinom čime će on ostati zarobljen unutar materijala što će rezultirati smanjenjem mehaničkih svojstava i povećanjem mogućnosti nastajanja pukotina. Iz razloga što oksidni sloj nastaje trenutno, potrebno je osigurati njegovo uklanjanje tijekom zavarivanja kao i zaustavljanje dotoka kisika na površinu aluminija. To se osigurava spajanjem elektrode na „+“ pol, dok se dotok kisika onemogućava korištenjem zaštitne atmosfere inertnog plina [17].

Aluminij ima vrlo visoku toplinsku vodljivost. Shodno tome, toplina će se brzo širiti po cijelom volumenu što će otežati lokalno taljenje materijala. Iako aluminij i aluminijeve legure imaju relativno nisko talište, svejedno je potreban snažan i koncentriran električni luk kao i visok unos topline kako bi zavarivanje bilo moguće. Ukoliko se zavaruje sa slabim električnim lukom nastat će vrlo široka zona utjecaja topline što će rezultirati mikrostrukturnim promjenama koje će negativno utjecati na mehanička svojstva [18].

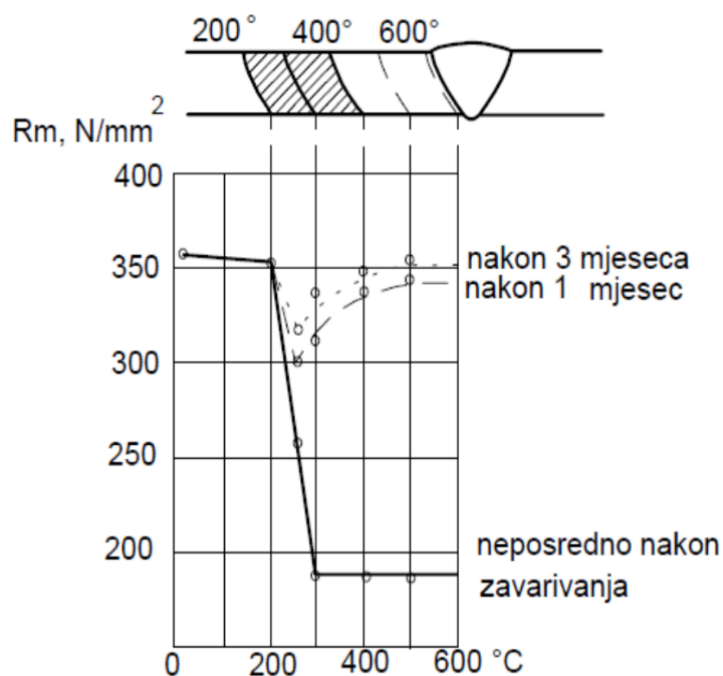
Na Slika 15 vidljivo je kako se ponaša mikrostruktura zavarenog spoja i ZUT-a. Evidentno je kako mikrostruktura direktno utječe na mehanička svojstva (Slika 16). Zavarivanje aluminijских materijala za uzrok ima neželjeno smanjenje mehaničkih svojstava. Mehanička svojstva najniža su odmah nakon zavarivanja, ali ona se mogu poboljšati starenjem materijala odnosno dozrijevanjem.





Slika 15. Mikrostruktura zavarenog aluminija [17]

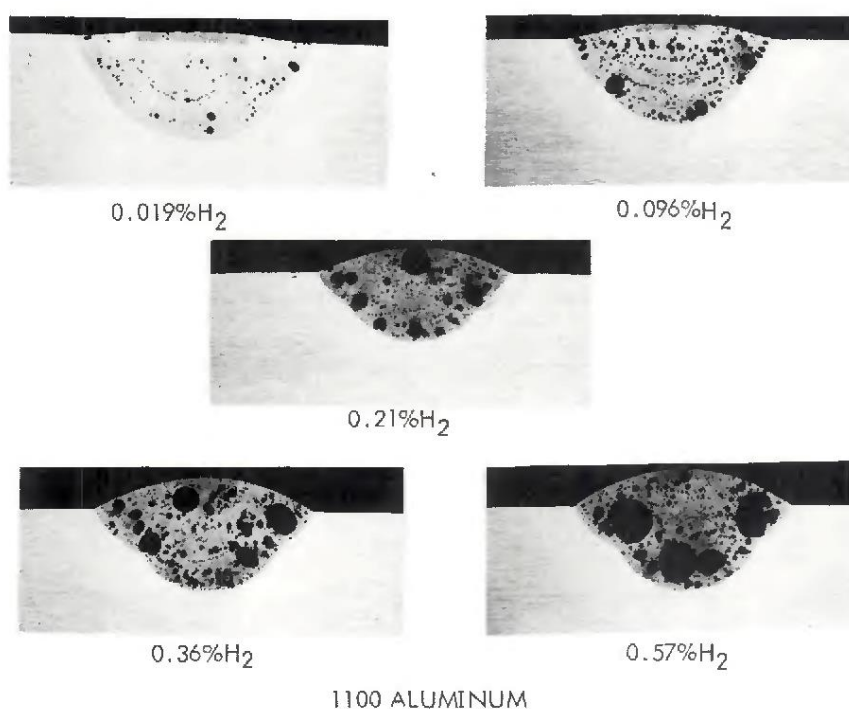
Na Slika 16 je vidljivo kako se nakon tri mjeseca čvrstoća zavara vratila gotovo na nazivnu vrijednost prije zavarivanja, dok je čvrstoća u zoni rekristalizacije ( $200\text{ }^{\circ}\text{C} - 400\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) bitno manja od nazivne [17].



Slika 16. Vlačna čvrstoća ZUT-a u ovisnosti o vremenu [17]

Aluminij ima visoki koeficijent toplinskog istezanja zbog kojeg se stvaraju velike deformacije materijala. Zbog toga što je zavarivanje proces karakteriziran velikim temperaturnim promjenama, javit će se sile unutar materijala koje će ga deformirati ili uzrokovati pukotine u zavarenom spoju i/ili ZUT-u.

Nadalje, nepoželjna pojava prilikom zavarivanja aluminija je izvrsna topivost vodika u rastaljenom stanju. U rastaljenom stanju topivost vodika je i do 20 puta veća nego u krutom stanju. Zbog toga će tijekom kristalizacije materijala topivost vodika naglo pasti čime će on ostati zarobljen unutar materijala. Zarobljeni vodik izazvat će poroznost unutar zavara [18].



**Slika 17. Utjecaj vodika na poroznost [17]**

Za razliku od čelika, aluminij ne mijenja svoju boju zagrijavanjem. Svojstvo promjene boje omogućava procjenu trenutne temperature čelika, što nije moguće kod aluminija [17].

## 2.4. Zaostala naprežanja

Zaostala naprežanja neizbježna su posljedica procesa zavarivanja. Primarno nastaju radi brze i velike lokalne promjene temperature zavarenog predmeta. Iako se proces zavarivanja razvio i postavio kao jedan od glavnih postupaka spajanja, problem zaostalih naprežanja ostao je neriješen zbog svoje kompleksnosti. Zaostala naprežanja mogu rezultirati raznosmjernim deformacijama zavarenog komada, degradacijom svojstava i pukotinama.

### 2.4.1. Utjecajni parametri na zaostala naprežanja

Zaostala naprežanja su kompleksan troosni problem na koji utječe ogroman broj parametara koji se mogu svrstati u tri glavne kategorije, a to su [19,20]:

- Mehanička i toplinska svojstva materijala
  - koeficijent toplinske vodljivosti
  - specifični toplinski kapacitet
  - temperatura tališta
  - gustoća materijala
  - granica tečenja materijala
  - modul elastičnosti
- Postupak zavarivanja
  - odabrani postupak zavarivanja
  - parametri procesa zavarivanja
  - priprema spoja
  - redoslijed zavarivanja
- Stezanje

### 2.4.2. Mjerenje i određivanje zaostalih naprežanja

Razvijene su razne tehnike određivanja i mjerenja zaostalih naprežanja. To je ključan korak u njihovom razumijevanju i smanjenju negativnih utjecaja.

Mjerenje zaostalih naprežanja može se podijeliti u dvije glavne skupine [21]:

- Nerazorne metode
- Razorne metode

Razorne metode su metode kod kojih dolazi do oslobađanja zaostalih naprezanja. Oslobađanje zaostalih naprezanja posljedica je odvajanja materijala čime nastupaju deformacije iz kojih je moguće odrediti iznos zaostalih naprezanja. Mjerenje razornim metodama moguće je provesti samo jednom jer dolazi do uništenja materijala. Neke od razornih metoda su [21]:

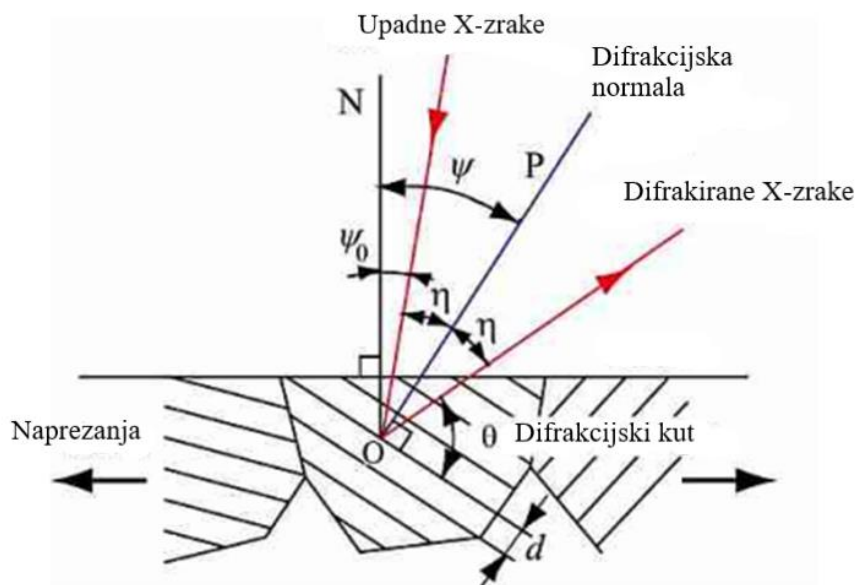
- Metoda provrta
- Metoda sekcioniranja
- Metoda uklanjanja slojeva

Nerazorne metode su metode kod kojih ne dolazi do oštećenja materijala. Do iznosa zaostalih naprezanja nerazornim metodama dolazi se pomoću određivanja vrijednosti nekog svojstva povezanog sa zaostalim naprezanjima. Nerazorne metodu su [21]:

- Rendgenska difrakcijska metoda
- Neutronska difrakcijska metoda
- Barkhausen metoda
- Ultrazvučna metoda

#### **2.4.3. Rendgenska difrakcijska metoda**

Rendgenska metoda spada u kategoriju nerazornih difrakcijskih metoda. Difrakcijskim metodama određuje se elastična deformacija koja je rezultat promjene razmaka rešetki kristalnih ravnina. Ako dođe do promjene razmaka između kristalnih ravnina doći će i do promjene difrakcijskog kuta, dok je valna duljina zraka konstantna. Definira se Bragg-ovim zakonom i prikazano je na Slika 18 [21,22,23].



Slika 18. Mjerenje elastične deformacije rendgenskim zračenjem [23]

Bragg – ov zakon definiran je formulom:

$$n \lambda = 2 d \sin (\theta)$$

gdje je:

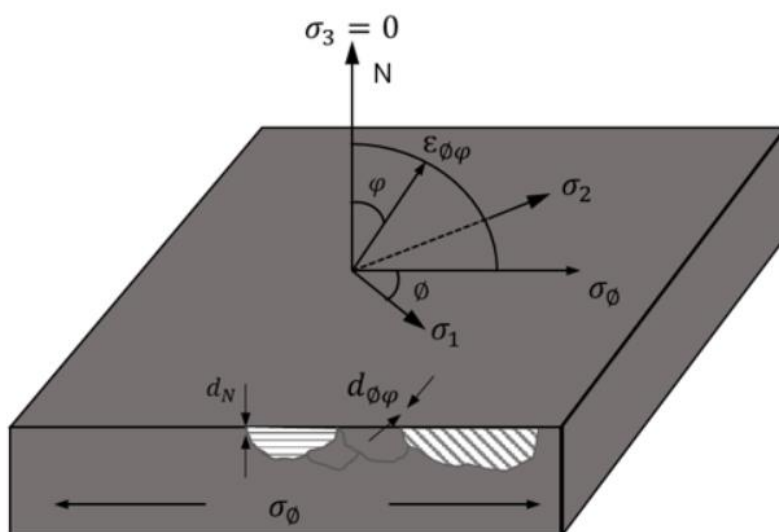
- $n$  - redoslijed difrakcije
- $\lambda$  - dužina vala rendgenske zrake, m
- $d$  -razmak ravnina kristalnih rešetki, m
- $\theta$  -kut difrakcije, °

Kada do difrakcije dolazi od mnogo zrna sa slučajnom kristalnom orijentacijom, deformacija rešetke izmjerena difrakcijom rendgenskih zraka odgovara makroskopskoj elastičnoj deformaciji koja je povezana s naprežanjem preko izotropne elastičnosti [23].

Rendgenskom metodom moguće je mjerenje zaostalih naprežanja u svim materijalima koji imaju sitnozrnatu uređenu kristalnu mikrostrukturu te koji imaju dovoljno dobar difrakcijski maksimum (engl. *peak*). Nadalje, materijal mora moći propustiti rendgenske zrake za bilo koju orijentaciju uzorka jer inače mjerenje ne bi bilo moguće provesti. Materijali koji su najčešće podvrgnuti rendgenskoj difrakciji su metali i keramike [21].

Mjerenje plastičnih deformacija nije moguće zbog toga što prilikom plastične deformacije dolazi do pomaka i poremećaja mikrostrukture materijala čime će doći do pomicanja kristalnih rešetki [21].

Važno je naglasiti kako rendgenskom difrakcijskom metodom dobivamo uvid u srednju vrijednost zaostalih napreznja na mjernom volumenu. Mjerni volumen se sastoji od površine na koju udaraju zrake (može iznositi manje od  $1 \text{ mm}^2$  pa do nekoliko  $\text{cm}^2$ ) i dubine penetracije zraka. Razina penetracije različita je za svaki materijal te ona ovisi o linearnom koeficijentu upijanja zraka. Materijali koji su od iznimne važnosti za strojarsku praksu, poput čelika i aluminijskih legura, imaju razinu prodiranja koja približno iznosi  $0,005 \text{ mm}$ . Zbog relativno niske razine prodiranja, rendgenskom difrakcijskom metodom određuje se ravninski model napreznja prikazano na Slika 19. U ravninskom modelu napreznja određuju se glavna napreznja  $\sigma_1$  i  $\sigma_2$ , dok se napreznje okomito na površinu  $\sigma_3$  zanemaruje [21]. Nadalje, pretpostavlja se da je materijal izotropan te da ima uniformna napreznja po cijeloj dubini penetracije zraka [23].

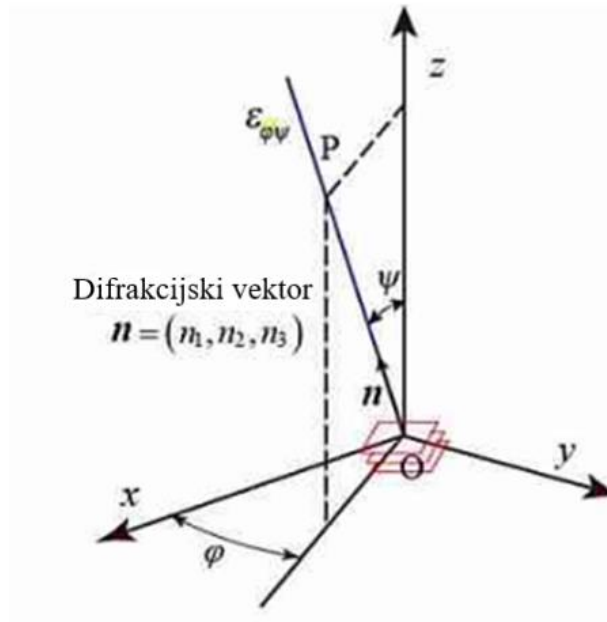


Slika 19. Ravninski model napreznja [24]

#### 2.4.3.1. Cos $\alpha$ metoda

Uređaj kojim ćemo mjeriti zaostala napreznja radi na principu cos  $\alpha$  metode. Metoda koristi cijeli Debye-Scherrerov prsten (skraćeno D-S prsten) snimljen dvodimenzionalnim detektorom jednokratnim izlaganjem rendgenskim zrakama. Normalna i posmična napreznja dobivaju se istovremeno [23].

Slika 20 prikazuje smjer (dužina OP) deformacije u normalnom stanju izmjerene difrakcijom X-zraka u koordinatama x-y-z gdje su koordinate x-y na površini uzorka, a os z je normala površine uzorka.



**Slika 20. Deformacija u normalnom stanju u odnosu na x-y-z koordinate na uzorku [23]**

Difrakcijski vektor  $\mathbf{n} = (n_1, n_2, n_3)$  normale ravnine za slučaj kuta nagiba  $\psi$  i kuta rotacije  $\varphi$  može se zapisati:

$$n_1 = \sin \psi \cos \varphi,$$

$$n_2 = \sin \psi \sin \varphi,$$

$$n_3 = \cos \psi$$

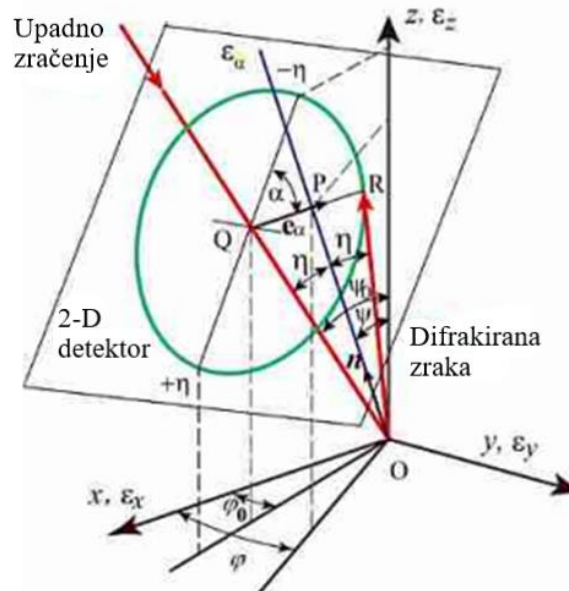
Deformacija  $\varepsilon_{\varphi\psi}$  je povezana s komponentama deformacija u smjeru triju osi prema:

$$\varepsilon_{\varphi\psi} = \varepsilon_x n_1^2 + \varepsilon_y n_2^2 + \varepsilon_z n_3^2 + \gamma_{yz} n_2 n_3 + \gamma_{zx} n_3 n_1 + \gamma_{xy} n_1 n_2$$

gdje su  $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$  normalne deformacije, a  $\gamma_{yz}, \gamma_{zx}, \gamma_{xy}$  posmične deformacije. Uz Hook-ov zakon izotropne elastičnosti normalna naprezanja  $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$  i posmična naprezanja  $\tau_{yz}, \tau_{zx}, \tau_{xy}$  povezuju se s navedenim deformacijama prema:

$$\varepsilon_{\varphi\psi} = \frac{1+\nu}{E} (\sigma_x n_1^2 + \sigma_y n_2^2 + \sigma_z n_3^2 + 2\tau_{yz} n_2 n_3 + 2\tau_{zx} n_3 n_1 + 2\tau_{xy} n_1 n_2) - \frac{\nu}{E} (\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z)$$

Gdje je  $E$  modul elastičnosti, a  $\nu$  Poissonov koeficijent. Navedeni izraz je temelj  $\cos \alpha$  metode i vrlo česte  $\sin^2 \psi$  metode. U  $\cos \alpha$  metodi se koriste dvodimenzionalni detektori za detekciju difrakcije rendgenskih zraka. Slika 21 prikazuje snimanje D-S prstena kada rendgenska zraka pada na površinu uzorka pod kutom nagiba  $\psi_0$  i rotacijskim kutom  $\varphi_0$  [23]. U ovom je slučaju difrakcijski vektor normale ravnine, za azimutalni kut  $\alpha$ , uzet u smjeru kazaljke na satu od  $-\eta$  smjera D-S prstena na detektoru. Izrazi za ovaj slučaj su kompliciraniji od gore navedenog vektora normale te se daljnja analiza neće provoditi.



**Slika 21. Debye-Scherrer prsten dobiven jednokratnim zračenjem na dvodimenzionalnom detektoru [23]**

U  $\cos \alpha$  metodi deformacija  $\varepsilon_{\varphi\psi}$  izražena je preko  $\varepsilon_\alpha$  jer kut  $\alpha$  određuje smjer mjerene deformacije. Deformacija  $\varepsilon_\alpha$  određuje se preko radijusa D-S prstena prema izrazu:

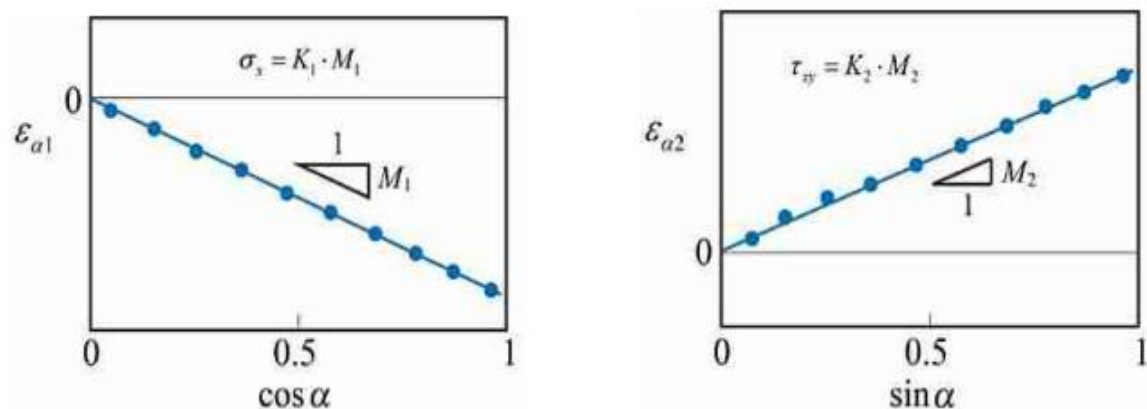
$$\varepsilon_\alpha = \frac{\sin^2 2\theta_0}{2L_m \tan \theta_0} (r_\alpha - r_0)$$

Gdje je  $\theta_0$  difrakcijski kut,  $L_m$  udaljenost između uzorka i detektora,  $r_\alpha$  radijus D-S prstena pod kutom  $\alpha$ , a  $r_0$  radijus D-S prstena kada zaostala naprezanja ne postoje.



Za određivanje zaostalih naprezanja preko  $\cos \alpha$  metode nije potrebno znati točnu vrijednost difrakcijskog kuta kada nema zaostalih naprezanja. Potrebno je odrediti relativnu razliku između radijusa D-S prstena [23].

Navedena jednačba koristi se za određivanje dvodimenzionalnog naprezanja, a naprezanja se mogu odrediti preko  $\cos \alpha$  i  $\sin \alpha$  dijagrama prema Slika 22 [23]. Takvi će se dijagrami dobiti mjerenjima na uređaju.



Slika 22.  $\cos \alpha$  i  $\sin \alpha$  dijagrami za određivanje normalnih i posmičnih naprezanja [23]

$K_1$  i  $K_2$  predstavljaju konstantne naprezanja, a  $M_1$  i  $M_2$  nagibe pravaca. Konstante u sebi sadrže kuteve, duljine i konstante elastičnosti bitne za određivanje zaostalih naprezanja. Primjerice, za normalna vlačna naprezanja  $M_1$  će biti negativan, za pozitivna posmična naprezanja nagib  $M_2$  će biti pozitivan. Odstupanja od regresijskog pravca mogu poslužiti kao indikator pouzdanosti mjerenja [23].

Ponekad je teško dobiti kontinuirane D-S prstene u slučaju grubozrnatih materijala koje su česte u zavarivanju, a razlog tome je nedovoljan broj ozračenih zrna zbog veličine zrna i male zračene površine.

### 3. OPĆI I SPECIFIČNI CILJEVI RADA

Zavarivanje tankih aluminijskih legura predstavlja brojne izazove. AC MIG omogućuje rješavanje problematike, no zbog cijene opreme i skeptičnosti hrvatske industrije ka istraživanju upotreba je rijetka. Katedra za zavarene konstrukcije uspješno je pribavila suvremeni MIG aparat i opremu, analizator za mjerenje zaostalih naprezanja pomoću rendgenske difrakcije te programski paket za simulacije. Ovaj rad ima sljedeće ciljeve:

1. Usporediti konvencionalni MIG-P i AC MIG postupak te proučiti utjecaj na:
  - izgled zavara
  - zavarivačke deformacije
  - zaostala naprezanja
2. Implementirati suvremeni analizator za mjerenje zaostalih naprezanja.
3. Izučiti i optimizirati upotrebu programa za izradu simulacija u zavarivanju.

Presudno je minimizirati navedene pojave jer one znače otklanjanje nepoželjne naknadne obrade i škart što donosi značajno veću produktivnost i manje troškove.

Simulacije omogućuju predviđanje pojava koje bi se mogle desiti u aspektu prakse. Inženjerstvo teži što većoj upotrebi simulacija, a što manjoj količini laboratorijskih ispitivanja. Dakako, zavarivanje je specifično zbog izrazito velikog broja utjecajnih parametara. U radu će biti uspoređene simulacije i stvarnost. Prikazat će se koji su to parametri u digitalnoj sferi (s naglaskom na koeficijent unosa topline), koji utječu i rezultiraju zadovoljavajućom podudarnošću sa zavarivanjem u praksi.

Na temelju specifičnih ciljeva, navode se sljedeće hipoteze:

1. Implementiranjem negativnog pola izmjenične struje AC MIG postupka može se utjecati na penetraciju i unos topline. Time će se:
  - otkloniti progaranje i protaljivanje materijala,
  - ostvariti bolji izgled zavara
  - smanjiti će se deformacije
  - smanjiti će se zaostala naprezanja
  - povećati će se brzina zavarivanja, a time i produktivnost

Drugim riječima, AC MIG-om mogu se otkloniti nedostatke MIG-P.

2. Moguće je ostvariti povezanost između laboratorijskog zavarivanja, simulacijskog programa i analizatora za mjerenje zaostalih napreznja.

Time bi se program za simulacije i analizator za mjerenje zaostalih napreznja mogao vjernije koristiti u daljnjim projektima i istraživanjima.

## 4. PLAN RADA

Prvi korak u provođenju usporedbe jest zavarivanje ispitnih uzoraka. Zavarivanje je provedeno u laboratoriju katedre za zavarivanje. Uzorci su zavareni upotrebom suvremenog stroja za zavarivanje koji ima mogućnost odabira već predodređenih parametara (tzv. sinergijske krivulje) ovisno o materijalu koji se zavaruje. Za prvi uzorak (uzorak 1) odabrana je postavka za MIG-P zavarivanje, dok je za drugi uzorak (uzorak 2) odabrana postavka za AC MIG zavarivanje.

Usporedba dva postupka izvest će se pomoću tri glavna kriterija:

- izgled zavara ispitnih uzoraka
- deformacije ispitnih uzoraka
- zaostala naprezanja u ispitnim uzorcima.

### 4.1. Priprema spoja

Prije samog procesa zavarivanja potrebno je pripremiti ploče za zavarivanje. Priprema je izvedena na način da su se ploče pripojile kratkim zavarima na nekoliko mjesta kako bi zadržale poziciju tijekom procesa zavarivanja. Nakon toga ploče su očišćene i odmašćene, Na Slika 23 prikazana je priprema spoja, a na Slika 24 pripojni zavari. Dimenzije ploča su 300x150x2 [mm].



Slika 23. Priprema spoja



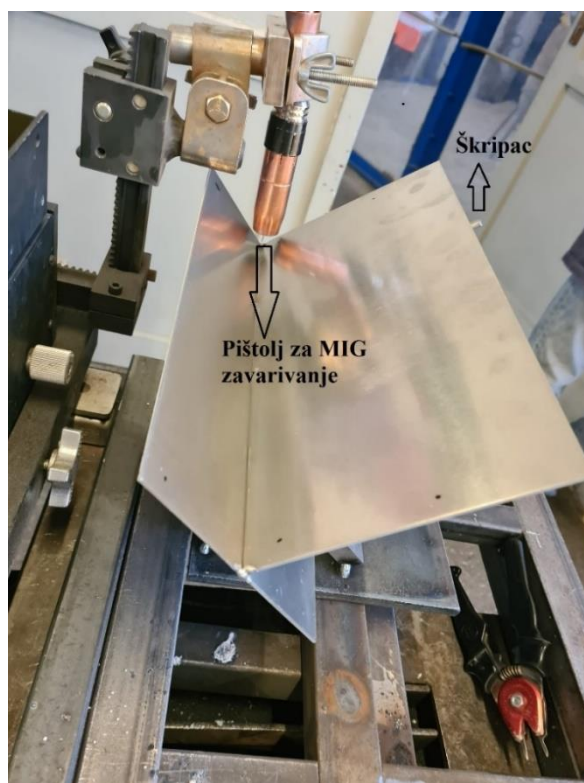
**Slika 24. Pripojni zavari**

#### **4.2. Postava i oprema za zavarivanje**

Zavarivanje je izvedeno na postavi prikazanoj na Slika 25 i Slika 26. Postava se sastoji od stroja za zavarivanje čiji je pištolj za zavarivanje spojen na traktor. Traktor je korišten kako bi se eliminirala ljudska pogreška. Njime se omogućava konstantna brzina zavarivanja i konstantna udaljenost pištolja od uzorka. Brzine zavarivanja su višestruko veće od brzine koju čovjek može ostvariti. Zavarivanje je izvedeno u PA položaju gdje je donja ploča pričvršćena u jednoj točki pomoću škripca.



Slika 25. Izgled postava za zavarivanje



Slika 26. PA položaj zavarivanja i fiksiranje

Korišten je suvremeni uređaj za zavarivanje Welbee Inverter W400 prikazan na Slika 27, Slika 28 i Slika 29. Prikazani uređaj predstavlja izvor struje za zavarivanje s dvostrukim inverterom i omogućava izrazito preciznu kontrolu unosa topline u zavar. Zbog izrazito precizne kontrole moguće je lako zavariti tanke ploče aluminija ili nehrđajućeg čelika koristeći izmjeničnu struju. Stroj nudi širok spektar različitih postupaka zavarivanja [25, 26]:

- AC impulsno
- DC impulsno
- AC *wave* impulsno
- DC *wave* impulsno
- DC
- DC TIG
- *Stick* DC

Fleksibilnost stroja omogućava odabir nekoliko različitih postupaka zavarivanja te se postavlja kao izrazito dobra investicija koja će se koristiti u zavarivanju izrazito velikog broja različitih materijala. Uz navedeno, na stroju je moguće memorirati do 100 različitih programa. Na taj način se unesenim parametrima omogućava brz odabir postavki bez namještanja parametara ručno što omogućava poluautomatsko korištenje. [25, 26]

Karakteristike izvora napajanja moguće je vidjeti u Tablica 4.

**Tablica 4. Karakteristike stroja za zavarivanje Welbee Inverter W400 [25, 26]**

Model	Welbee Inverter W400
Model	WB-W400
Broj faza	Tri faze
Frekvencija	50/60 Hz
Nazivni ulazni napon	400 V
Ulazni raspon napona	400 V ± 15 %
Nazivna snaga	21,4 kVA, 17,0 kW
Nazivna ulazna struja	31 A
Nazivna izlazna struja	400 A / 350 A

Nazivni radni napon	34 V / 31,5 V
Nazivni raspon izlazne struje	30 – 400 A
Nazivni raspon izlaznog napona	12 – 35 V
Maksimalni napon praznog hoda	92 V
Nazivni radni ciklus	40% / 100%
Broj programa rada	100
Operativni raspon temperature	-10 – 40 °C
Operativni raspon vlage	Do 50% na 40 °C, do 90% na 20 °C
Temperaturni raspon u skladišnom prostoru	-20 °C do 55 °C
Raspon vlage u skladišnom prostoru	Do 50% na 40 °C, do 90% na 20 °C
Dimenzije (Š×D×V)	395 mm × 710 mm × 762 mm
Masa	86 kg
Karakteristika stroja	Karakteristika konstantnog napona





Slika 27. Stroj Welbee Inverter W400



Slika 28. Sučelje stroja Welbee Inverter W400



Slika 29. Natpisna pločica zavarivačkog stroja Welbee Inverter W400

#### 4.3. Zavarivanje uzoraka

Oba uzorka zavarena su jednim prolazom s parametrima prikazanim u Tablica 5.

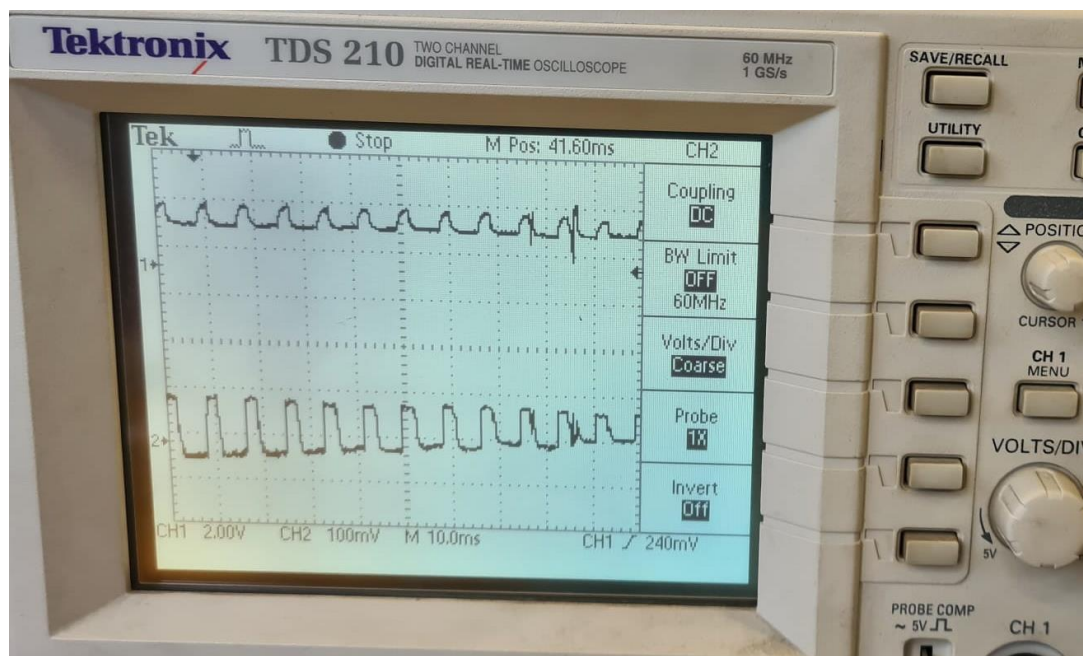
Tablica 5. Parametri zavarivanja

Parametri zavarivanja		
	DC	AC
Struja [A]	120	120
Napon [V]	20	20
Protok plina	-	-
Brzina zavarivanja [cm/min]	82,61	100
Omjer balansa [%]	0	50

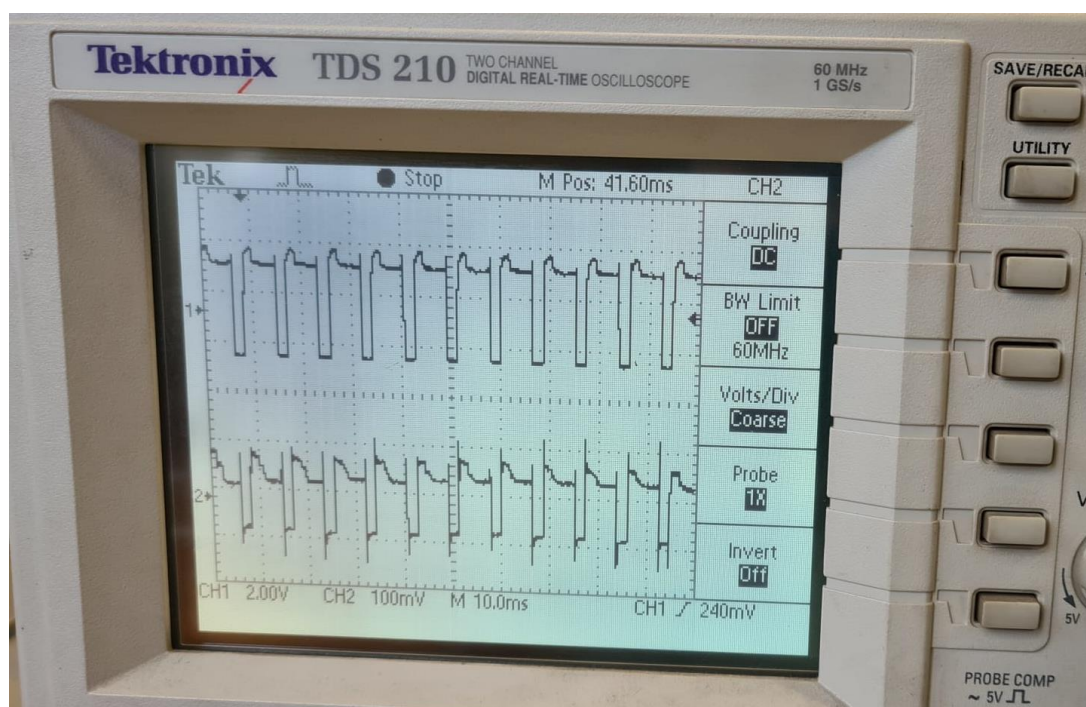
Iznosi struje i napona navedeni u Tablica 5 prikazuju srednju vrijednost, a dinamička karakteristika navedenih parametara prikazana je na Slika 30, Slika 31.

U ovome eksperimentalnom radu koristio se dvokanalni osciloskop Tektronix TDS 210 gdje je jedan kanal bio spojen sa strujnim kliještima te je mjerio struju zavarivanja, a drugi kanal je bio

spojen na polikabel uređaja za zavarivanja i mjerio je napon. Pomoću osciloskopa i računala moguće je dobiti zapis od 2500 točaka u vremenu za vrijednosti struje i 2500 točaka za vrijednosti napona u vremenskom intervalu od 0,1 sekunde.



Slika 30. Dinamička karakteristika MIG-P postupka zavarivanja



Slika 31. Dinamička karakteristika AC MIG postupka zavarivanja

Formula za izračun unosa topline glasi:

$$Q = k \times \frac{U \times I}{v_z} \times \frac{60}{1000} \text{ [kJ/cm]}$$

Gdje je:

$Q$  – unos topline, kJ/cm

$k$  – stupanj iskorištenja postupka zavarivanja (Za MIG/MAG postupak iznosi  $\approx 0,8$ )

$U$  – napon zavarivanja, V

$I$  – jakost struje zavarivanja, A

$v_z$  – brzina zavarivanja, cm/min

Prema navedenim parametrima odredili su se unosi topline navedeni u Tablica 6.

**Tablica 6. Unos topline**

Unesena toplina, kJ/cm	
DC	AC
1,39	1,15

Nakon zavarivanja uzorci su pušteni da se ohlade na sobnu temperaturu prije nego je škripac popušten. Zatim su oba uzorka i referentni komad koji ima izvršenu samo pripremu spoja poslani na 3D skeniranje kako bi se dobile točne informacije o iznosu i smjeru deformacija. Uzorci su poslani u vanjsku tvrtku na 3D skeniranje imena „Metalska jezgra Čakovec“. Skenovi uzoraka i referentnog komada pregledani su i uspoređeni u programu naziva „GOM Inspect Professional“. 3D skeniranje odrađeno je na mjernom sustavu za 3D optičko mjerenje „ATOS 5 12M XL“. Mjerni sustav sastoji se od:

- Dvije kamere rezolucije 12 megapiksela
- Projektora s plavim LED svjetlom i heterodinskom projekcijskom metodom
- Laserskog pokazivača za namještanje mjerne udaljenosti
- Projekcijske tehnologije s „Blue Light Equalizer“ za najvišu razinu kvalitete rezultata

- „GOM Touch Probe“ optički praćeno mjerno ticalo
- Rotacijski stol GOM ROT 640 mm / 100 kg
- Fotogrametrijska nadogradnja za ATOS – za potrebe mjerenja velikih objekata i 3D mjerenja pomaka i deformacija u diskretnim toćkama

Mjerna podrućja:

- 700×520 mm<sup>2</sup>
- 320×240 mm<sup>2</sup>

#### 4.4. $\mu$ -X360s prijenosni rendgenski analizator zaostalih naprezanja

Za mjerenje zaostalih naprezanja korišten je uređaj koji radi na principu "cos alfa metode" montiran na robotskog manipulatora prikazan na Slika 32.  $\mu$ -X360s je prvi komercijalno dostupan uređaj za mjerenje zaostalih naprezanja koristeći navedenu metodu.  $\mu$ -X360s je uređaj za mjerenje zaostalih naprezanja koji je kompaktan i lagan. Time se omogućava mjerenje zaostalih naprezanja i izvan laboratorija. Velike je brzine mjerenja, preciznosti te je široko primjenjiv za velik broj razlićitih materijala. Osim mjerenja zaostalih naprezanja, ovaj uređaj moće dati uvid i u udio zaostalog austenita. Tako se moće priblićiti mikrostruktura u materijalu bez razaranja materijala. Uz mjerenje zaostalih naprezanja i određivanje zaostalog austenita, moguće je određiti velićinu i orijentaciju zrna u mikrostrukturi. Jednostavan za postavljanje i korištenje. [27]

Implementira se u razlićitim industrijama kao što su autoindustrija, brodogradnja, traćnice, zrakoplovstvo, lećajevi, površinska obrada, obrada odvajanjem ćestica, toplinska obrada, kontrola kvalitete, širok spektar laboratorijskih istraćivanja i dr. [27]

U tablici 7 je moguće vidjeti neke karakteristike uređaja [28]

**Tablica 7. Karakteristike analizatora  $\mu$ -X360s**

Metoda mjerenja	Cos alfa metoda
Mogućnosti mjerenja	Zaostala naprezanja
	Zaostali austenit
	Velićina i orijentacija zrna
Dimenzije senzora (Š×D×V)	213×114×107

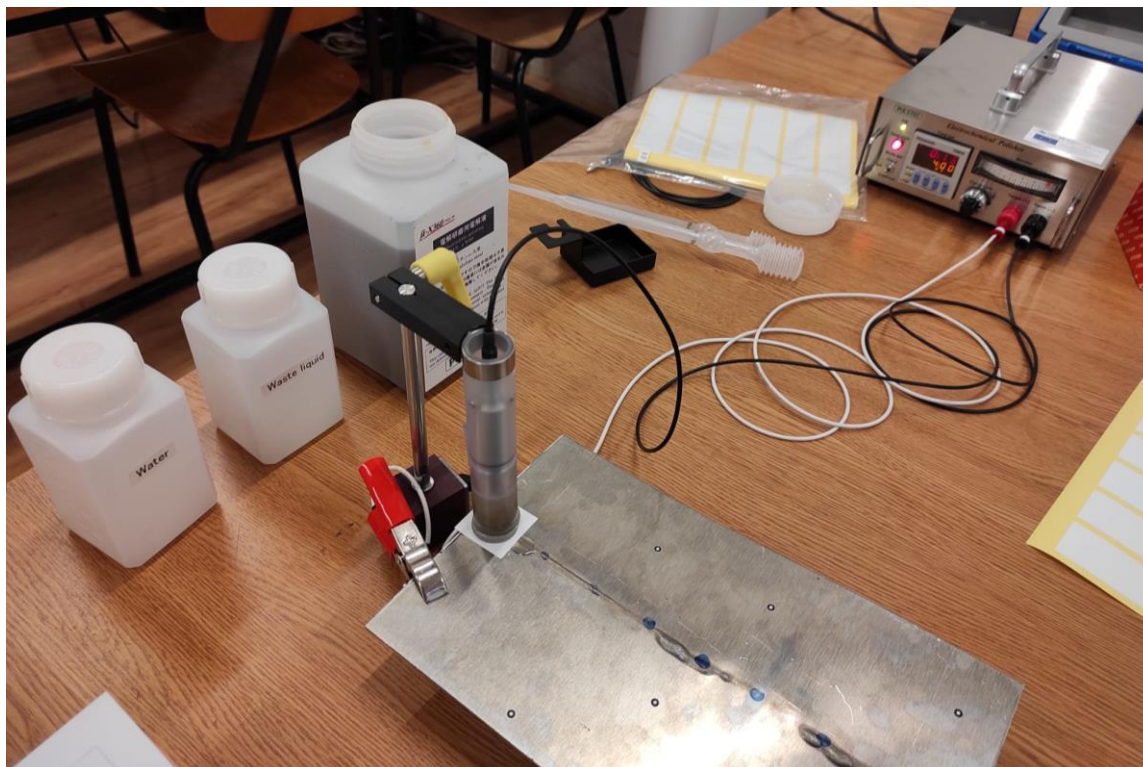
Masa senzora	2,4 kg
Dimenzije napajanja (Š×D×V)	289×159×235
Masa napajanja	6,2 kg
Rendgenska cijev i snaga	Cr, V, Mo, Cu ili Co – zamjenjivo
	Hlađenje zrakom
	30kV, 1,5 mA maksimum
Veličina kolimatora	Ø1mm
Napajanje	AC100 do 240V, 50/60Hz, 130W

Uređaj se koristi u državama s velikim i jakim industrijama poput: Njemačke, Sjedinjenih Američkih Država, Japana, Kine, Ujedinjenog Kraljevstva, Južne Koreje, a sada i u Hrvatskoj.



**Slika 32.  $\mu$ -X360s prijenosni rendgenski analizator s robotskim manipulatorom**

Prije mjerenja provedena je priprema površine elektropoliranjem prikazano na Slika 33. Potrebno je otkloniti nepravilnosti, nečistoće i dobiti što nižu razinu hrapavosti površine.



**Slika 33. Elektropoliranje mjernih točaka**

Dubina mjernih točaka iznosila je 150  $\mu\text{m}$  i prikazana je na Slika 34.



**Slika 34. Dubina mjernih točaka**

Na uzorcima je pripremljeno 15 mjernih točaka koje su raspoređene u 5 grupa prema Slika 35. Točke su odabrane na mjestima što veće ravnosti kako bi se osiguralo što preciznije mjerenje. Točke su na približno jednakim mjestima na oba uzorka.





**Slika 35. Prikaz mjernih točaka**

Zatim su se na pripremljenim uzorcima mjerila longitudinalna i transverzalna naprezanja prema Slika 36 i Slika 37. Pozicioniranje analizatora s naglaskom na kuteve i udaljenost izvedeno je prema programski dostupnim postavkama. Udaljenost je iznosila 39 mm, a kut  $25^\circ$  u odnosu na uzorak.



Slika 36. Mjerenje longitudinalnih naprezanja-uzorak2



Slika 37. Mjerenje transverzalnih naprezanja-uzorak2

#### 4.5. *Cast – designer*

Numeričke simulacije postaju sve više integrirane u proces zavarivanja zbog pomoći u optimiziranju parametara zavarivanja. Iz razloga što je zavarivanje izrazito složen i kompliciran proces spajanja materijala, prikladno je odrediti približne parametre te vidjeti njihov utjecaj u simulacijama. Shodno tome, često se izrađuje velik broj eksperimenata s različitim parametrima kako bi se procijenilo koji bi parametri odgovarali u stvarnom svijetu. Glavna prednost numeričkih simulacija jest smanjivanje broja laboratorijskih eksperimenata, a u nekim slučajevima i potpunog izbacivanja istih. Uz to, numeričke simulacije omogućavaju i uvid u probleme deformacija i zaostalih naprezanja koje su često neizbježna posljedica zavarivanja, posebice prilikom zavarivanja tankih aluminijskih limova. No, uz navedene pozitivne strane potrebno je dosta vremena i novaca kako bi se program nabavio, a zatim adekvatno iskoristio.

Analizom simulacija moguće je vidjeti približan utjecaj parametara na dobiveni zavar te kako različiti parametri utječu na deformacije i zaostala naprezanja. Nakon analize odabire se simulacija s najboljim parametrima te se onda s tim parametrima zavaruje stvarni uzorak.

Numeričke simulacije procesa zavarivanja u današnje vrijeme proširile su se u značajan broj industrija poput zrakoplovne industrije, brodske industrije, automobilske industrije, energetike itd.

Neki od poznatijih programskih paketa za numeričko simuliranje zavarivanja su:

- *Cast – Designer*
- *Sysweld*
- *ABAQUS*
- *SORPAS*

U ovom radu numerička simulacija provedena je u programskom paketu *Cast – Designer*. Programski paket razvijen je od strane *C3P Engineering Software International Co., LTD* sa sjedištem u Hong Kong – u. Programski paket prvenstveno je razvijen kao softver za lijevanje, no nakon izrazito uspješnog poslovanja s industrijom proširili su se i na područje zavarivanja. Tijekom pedesetogodišnjeg iskustva programski paket se razvio u ozbiljan program koji omogućuje termalnu i mehaničku analizu modela. Uz to, programski paket može predvidjeti i razne greške koje bi se mogle dogoditi u modelu poput uključaka, poroznosti, deformacija i

zaostalih naprezanja. Korištenjem programskog paketa *Cast – Designer* tvrtke mogu ostvariti značajne uštede na vremenu čime je omogućena kompetitivnost na tržištu. [29]

Pošto je to novonabavljeni program na Zavodu za zavarene konstrukcije sam pristup je bio obrnut. Prvo su se uzorci zavarili, a zatim su provedene simulacije u kojima je aproksimirano realno stanje uzoraka nakon zavarivanja.

Parametar koji se nastojao optimizirati i aproksimirati je koeficijent unosa toplina. Koeficijent unosa topline ili koeficijent iskorištenja postupka zavarivanja označava koliki udio energije električnog luka odlazi na proces zavarivanja. Kod konvencionalnog MIG postupka zavarivanja on iznosi približno 0,8.

Trajanje simulacija iznosilo je 3-4 dana. Vrijeme ponajviše ovisi o odabranim parametrima i metodama te o snazi računala. Pošto je postojao određeni vremenski okvir, za svaki proces izvedene su 4 simulacije. Za generiranje mreže konačnih elemenata korištena je funkcija „*Fast mesh*“

Parametri srednje struje i napona, brzine zavarivanja, položaj i udaljenost sapnice bili su identični kao i u laboratoriju. No, zbog ograničenja simulacijskog programa nije se mogla implementirati dinamika tijeka struje, a to je ono što razlikuje modificirane, od običnog MIG procesa zavarivanja. Shodno tome, simulacije su pokretane na principu „*trial and error*“, odnosno aproksimacijom kako bi se iznos deformacija i zaostalih naprezanja u simulaciji približio stvarnim deformacijama i zaostalim naprezanjima.

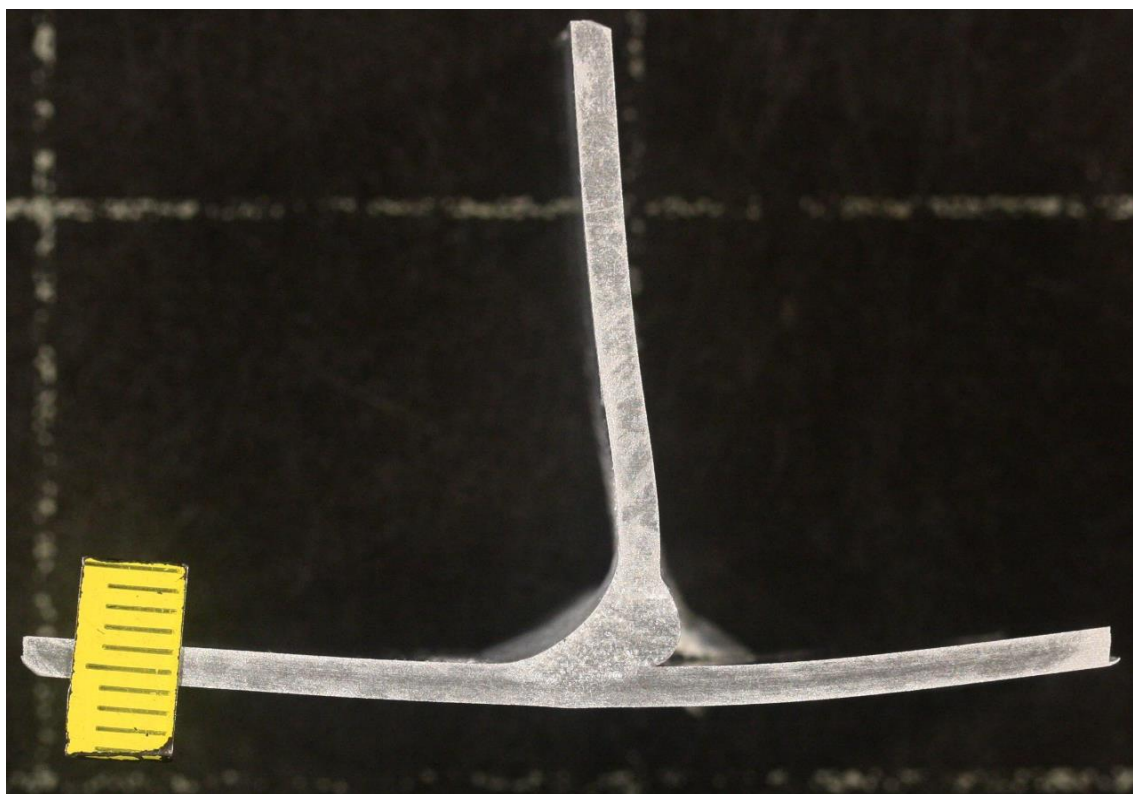
## 5. REZULTATI RADA I RASPRAVA

### 5.1. Izgled zavara

Prvi kriterij koji je razmotren prilikom usporedbe jest izgled zavara. Ovaj kriterij je moguće provesti odmah nakon zavarivanja kvalitetnim vizualnim pregledom.

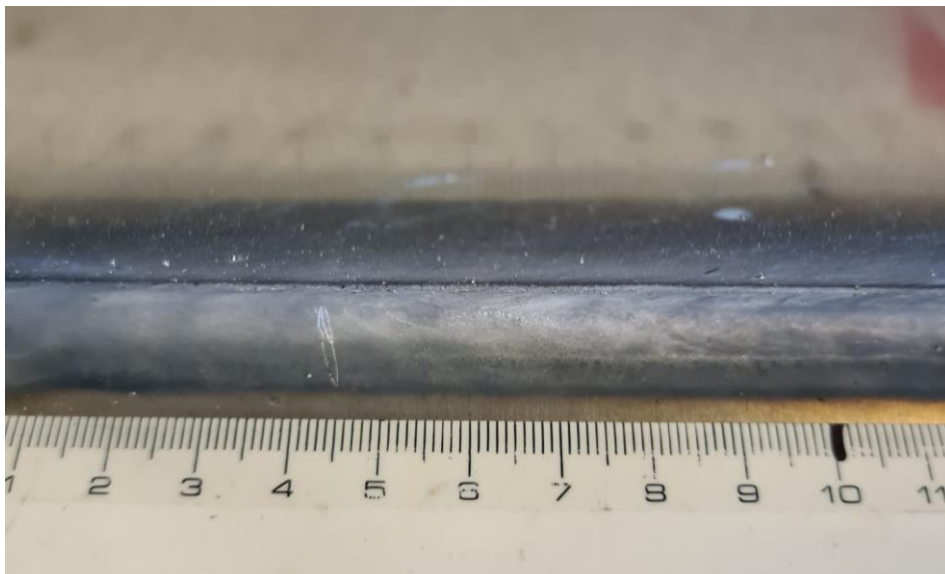
#### 5.1.1. *Uzorak 1 nakon zavarivanja*

Nakon što se uzorak 1 ohladio i otpustio iz škripca, zavar je očišćen te se pristupilo vizualnom pregledu. Na Slika 38 prikazan je makroizbrusak.



Slika 38. Makroizbrusak uzorak 1

Na Slika 39 može se vidjeti izgled lica zavara.



**Slika 39. Izgled lica zavara - uzorak 1**

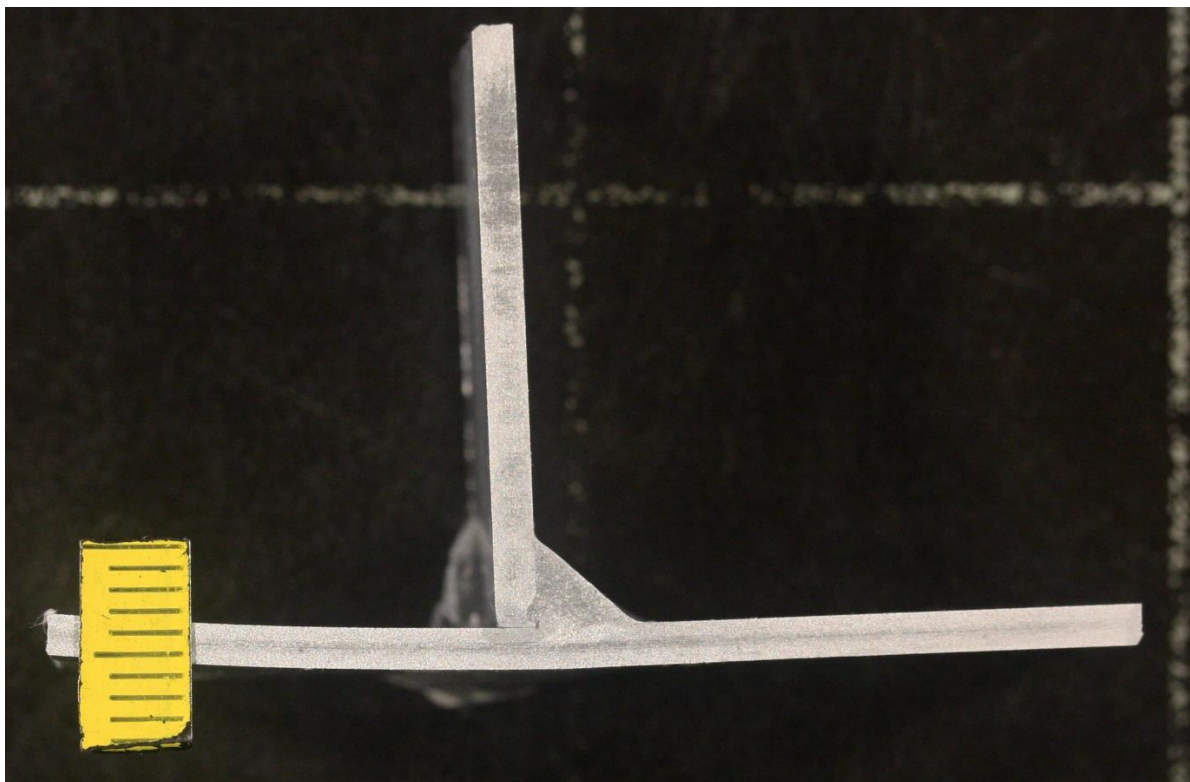
Na Slika 40 prikazan je izgled donje ploče spoja dobiven MIG-P postupkom.



**Slika 40. Izgled donje ploče spoja - uzorak 1**

### 5.1.2. Uzorak 2 nakon zavarivanja

Poput uzorka 1, uzorak 2 je očišćen i zabilježene su promjene koje su nastupile. Na Slika 41 prikazan je profil zavara, a na Slika 42 može se vidjeti izgled lica zavara.



Slika 41. Makroizbrusak uzorak 2



**Slika 42. Izgled lica zavara – uzorak2**

Uz vrlo dobar integritet i izgled zavara, vidljivo je postojanje crnih pjega koje su posljedica isparavanja magnezija te spajanja s oksidima. Na Slika 43 može se vidjeti izgled donje ploče spoja zavara.

**Slika 43. Izgled donje ploče spoja – uzorak2****5.1.3. Rasprava – izgled zavara**

Oba su uzorka zavarena vrlo visokom strujom u iznosu od 120 A što je relativno visoka struja za odabrane dimenzije limova. No, takvi su parametri odabrani da se prouči može li se uz jednaku struju zavarivanja, a upotrebom izmjeničnog tijeka struje u AC MIG postupku zavarivanja, dobiti kvalitetan zavareni spoj. Dakle, iskustveno je odabrana gornja krajnost parametara zbog procjene da bi se na taj način moglo doći do bitnih zaključaka.



MIG-P postupak predstavlja najčešći postupak zavarivanja aluminijskih legura, ali postoje problemi prilikom zavarivanja tankih limova. Gotovo uvijek dolazi do progaranja i protaljivanja materijala (i donje i gornje ploče) što je vidljivo na Slika 40. Makroizbrusak na Slika 38 prikazuje veoma agresivnu penetraciju, a vidljivo je protaljivanje obje ploče. Nadalje, lice zavara je konkavno što ne predstavlja karakteristike dobrog zavara. Vidljive su i značajne deformacije.

Da bi se održala jednaka struja zavarivanja AC MIG-om, morala se povisiti brzina zavarivanja za 21%. Time se smanjio unos topline. To je zato jer fenomen taljenja žice s naglaskom na brzinu taljenja žice poprima drugačiji karakter na negativnoj periodu struje. Fenomen je objašnjen u teorijskom dijelu rada. Upotrebom 50% negativne periode dobiven je u potpunosti izveden zavar s vrlo dobrim licem zavara (Slika 39), bez progaranja i protaljivanja donje ploče što je priželjkivani rezultat vidljiv na Slika 43. Makroizbrusak na Slika 41 prikazuje lagano nadvišenje u licu zavara, zadovoljavajuću penetraciju te dobar integritet zavara. Na zavarima su vidljive crne pjege koje su posljedica isparavanja magnezija te formiranja spojeva oksida. Ta pojava se može izbjeći ispravkom tehnike rada.

Dakle, upotreba AC MIG-a rezultirala je visokobrzinskim zavarivanjem aluminijskih legura s odličnim izgledom zavara što se nije moglo postići s MIG-P postupkom.

## 5.2. Deformacije ispitnih uzoraka

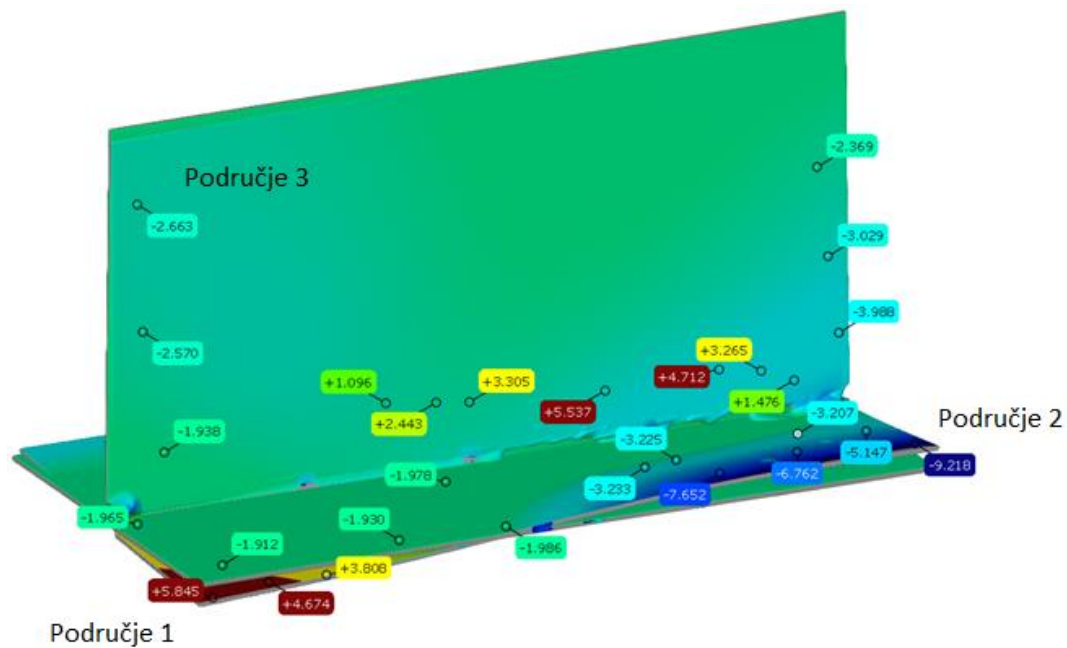
Prilikom provođenja procjene izgleda zavara jasno se moglo primijetiti postojanje bitno različitih deformacija koje su nastupile na ispitnim uzorcima. Uzorak 1, zavaren MIG-P postupkom, imao je vidno veće deformacije od uzorka 2 koji je zavaren AC MIG postupkom što je prikazano na Slika 44.



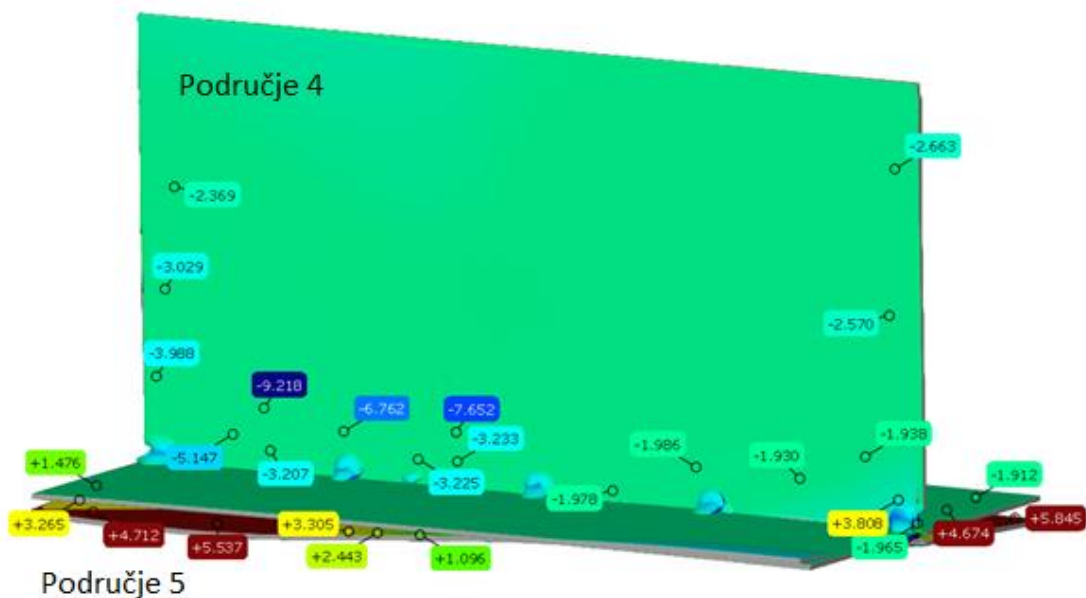
Slika 44. Usporedni prikaz deformacija MIG-P/AC MIG

### 5.2.1. Uzorak 1

Obradom podataka i modela u programu, dobivene su sljedeće deformacije prikazane na Slika 45, Slika 46.



Slika 45. Deformacije uzorak 1-1

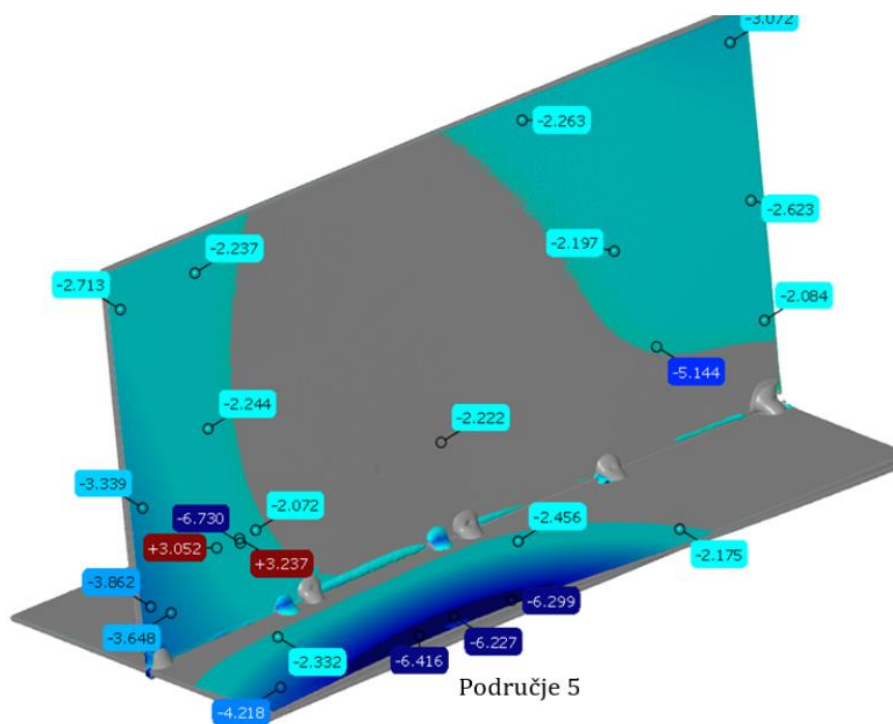


Slika 46. Deformacije uzorak 1-2

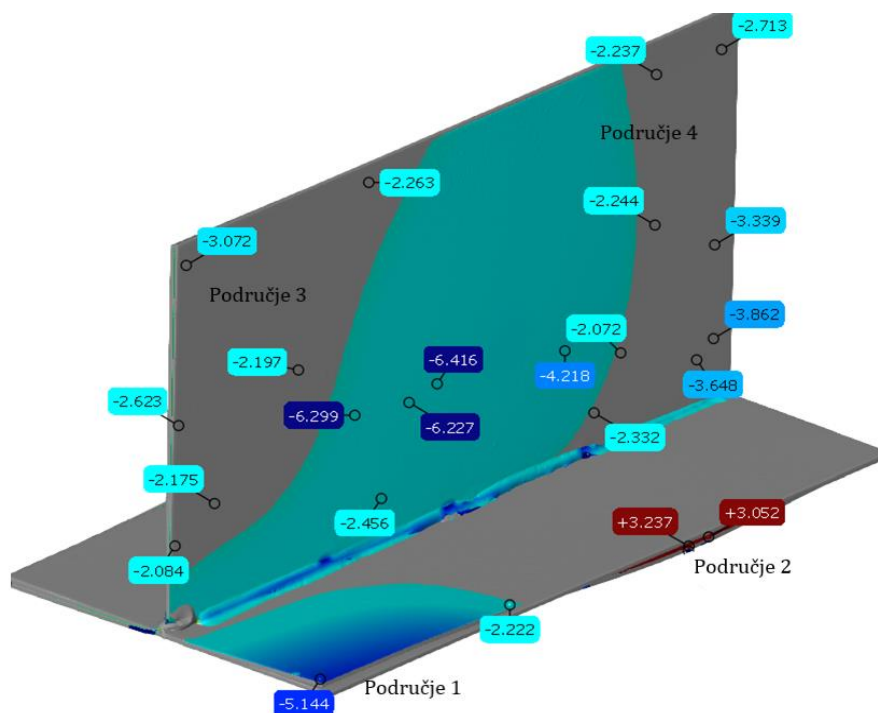
Iz slika je vidljivo kako uzorak 1 u gotovo svim točkama odstupa od referentnog komada. U nekim točkama odstupanje iznosi čak -9,218 milimetara. Okomita ploča uzorka 1 ne poklapa se niti u jednoj točki s referentnom pločom.

### 5.2.2. Uzorak 2

Nakon uzorka 1, uspoređeni su modeli uzorka 2 i referentnog komada. Deformacije koje su nastupile vidljive su na Slika 47, Slika 48.



Slika 47. Deformacije uzorak 2-1



Slika 48. Deformacije uzorak 2-2

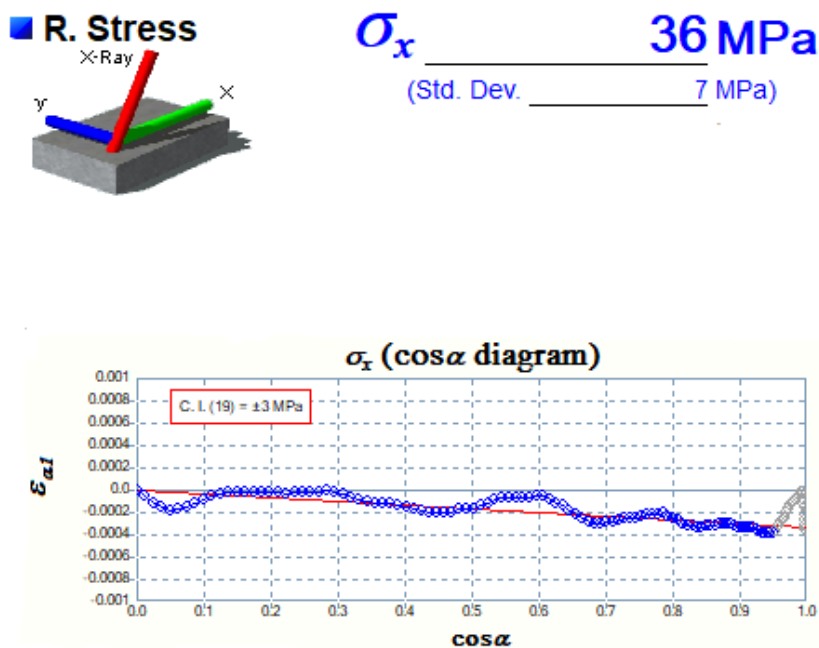
### 5.2.3. Rasprava - deformacije

Na uzorku 2 postoje površine koje se poklapaju s referentnim uzorkom. Moguće je uočiti kako maksimalna deformacija iznosi 6,730 milimetra što je za otprilike 3 milimetra manje od maksimalne deformacije na uzorku 1. Vidljivo je da su u svim označenim područjima deformacije veće na uzorku 1, osim u području 5 uzorka 2 gdje maksimalna deformacija iznosi 6.416 mm.

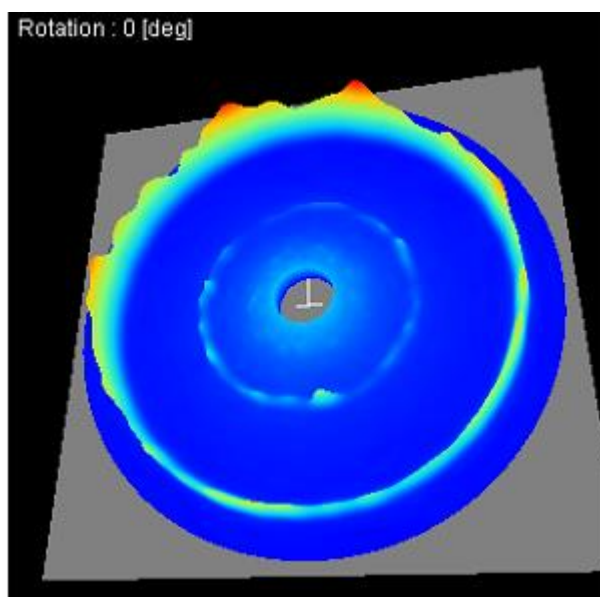
Evidentno je da su za oba odabrana procesa zavarivanja deformacije poprilično velike, a to se opravdava izborom visoke struje zavarivanja te visokim unosom topline. Uzorak 2 ima manje izražene deformacije. To je prikazano kroz manje deformirane površine i manji kvantitativni iznos deformacija. Dijelom je to rezultat nižeg unosa topline. Među ostalim, niži unos topline prednost je AC MIG tehnologije. Usporedbom 3D modela uzorka 1 i uzorka 2 s referentnim uzorkom potvrđeno je prvotno zapažanje odmah nakon zavarivanja, a to je da su deformacije uzorka 1 veće i izraženije.

### 5.3. Zaostala napreznja u zavarenim uzorcima

Prikaz mjerenih rezultata ostvaruje se kroz  $\cos \alpha$  dijagram prikazan na Slika 49 te D-B prsten prikazan na Slika 50. Točnost i pouzdanost rezultata ovisi o odstupanju u odnosu na regresijski pravac te o neprekidnosti prstena.



Slika 49. Prikaz  $\cos \alpha$  dijagrama i mjerenja dobivenog u točki 1-1



Slika 50. Prikaz D-B prstena u točki 1-1

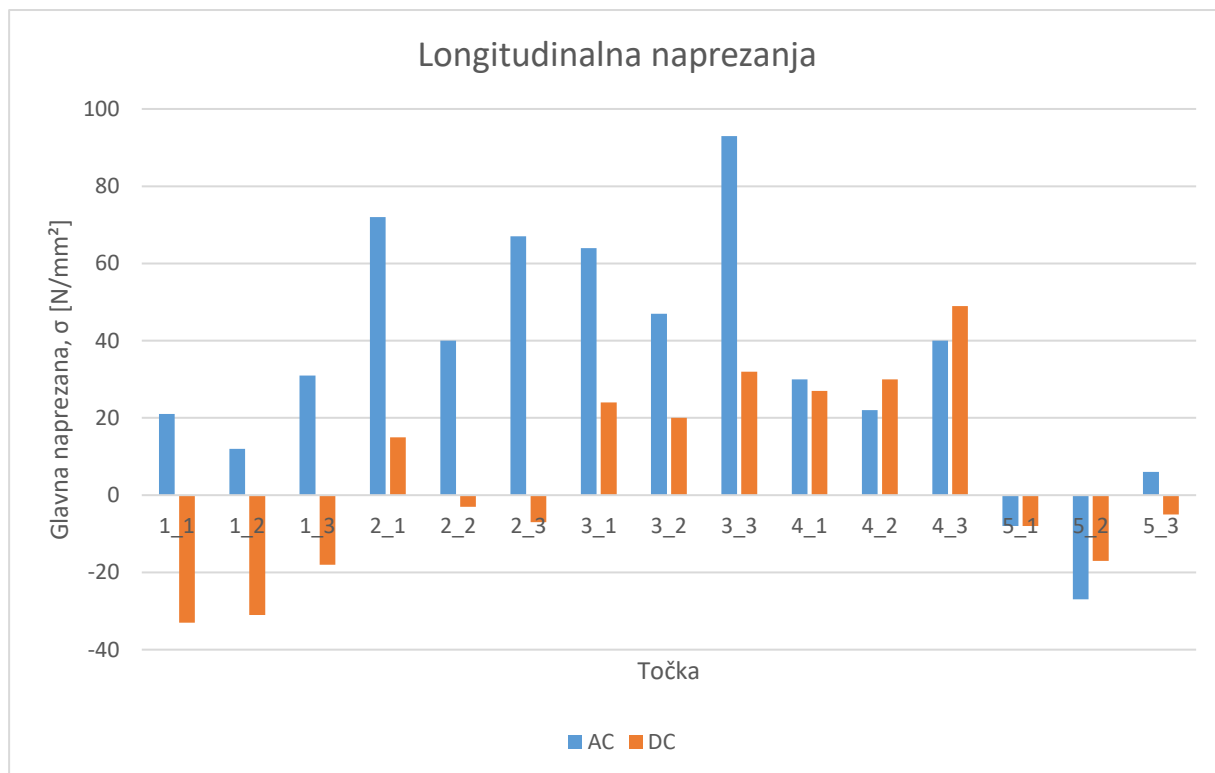
### 5.3.1. Longitudinalna naprezanja

Rezultati mjerenja longitudinalnih naprezanja prikazani su u Tablica 8.

**Tablica 8. Longitudinalna naprezanja**

	AC	DC
	$\sigma_x$ [MPa]	$\sigma_x$ [MPa]
1-1	21	-33
1-2	12	-31
1-3	31	-18
2-1	72	15
2-2	40	-3
2-3	67	-7
3-1	64	24
3-2	47	20
3-3	93	32
4-1	30	27
4-2	22	30
4-3	40	49
5-1	-8	-8
5-2	-27	-17
5-3	6	-5
5-3	6	-5

Usporedni graf rezultata prikazan je na Slika 51.



Slika 51. Grafički prikaz longitudinalnih naprežanja AC-DC

### 5.3.2. Transverzalna naprezanja

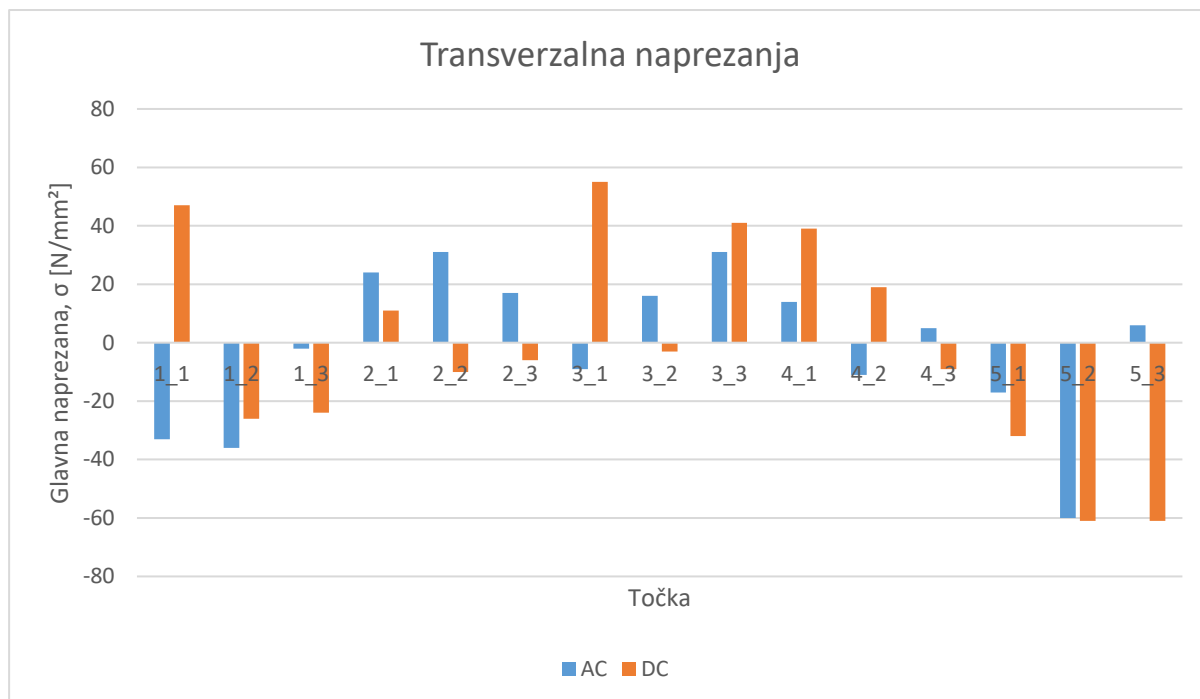
Rezultati mjerenja longitudinalnih naprezanja prikazani su u Tablica 9.

**Tablica 9. Transverzalna naprezanja**

	AC	DC
	$\sigma_x$ [MPa]	$\sigma_x$ [MPa]
1-1	-33	47
1-2	-36	-26
1-3	-2	-24
2-1	24	11
2-2	31	-10
2-3	17	-6
3-1	-9	55
3-2	16	-3
3-3	31	41
4-1	14	39
4-2	-11	19
4-3	5	-9
5-1	-17	-32
5-2	-60	-61
5-3	6	-61

Usporedni graf rezultata prikazan je na Slika 52.





Slika 52. Grafički prikaz transverzalnih napreznja AC-DC

### 5.3.3. Rasprava – zaostala napreznja

Za većinu mjernih točaka na uzorku 2 (AC MIG) vidljivo je postojanje vlačnih longitudinalnih zaostalih napreznja osim u točki 5-1 i 5-2 na kraju zavora. Na uzorku 1 (MIG-P) vidljivo je postojanje tlačnih zaostalih napreznja na početku i kraju zavora, dok su u ostalim točkama (osim 2-2, 2-3) vlačna zaostala napreznja. Na uzorku 2 vidljivo je postojanje tlačnih transverzalnih zaostalih napreznja na početku i kraju zavora (osim u točki 5-3), a isto vrijedi i za uzorak 1 (osim u točki 1-1).

Prema rezultatima mjerenja vidljivo je kako su longitudinalna zaostala napreznja uzorka 2 zavarenog AC metodom u prosjeku veća od dobivenih na uzorku 1 zavarenog MIG-P metodom, dok za transverzalna zaostala napreznja vrijedi obrnuto.

S obzirom na različiti unos topline uzorci su bili podvrgnuti različitim toplinsko-vremenskim ciklusima. Temeljem toga, materijal ima različita zaostala napreznja na mjernim točkama koje se nalaze na približno jednakim mjestima. Činjenica je da je uslijed visoke struje zavarivanja došlo do značajnih mikrostrukturnih promjena. Za analizu zaostalih napreznja je, uz pravilno namještenu udaljenost detektora i kut u odnosu na uzorak, krajnje bitno stanje mikrostrukture materijala i stanje površine na kojoj se određuju zaostala napreznja. Kod oba

je uzorka zabilježeno standardno odstupanje rezultata u prosječnom iznosu od 10-30%, s time da je veće odstupanje karakteristično za zavare zavarene s MIG-P. To je očekivano jer je unos topline veći za 21% u odnosu na AC MIG, a time je i pojava pogrubljenja zrna veća.

Dakle, za oba je uzorka mjerenje bilo otežano zbog pogrubljenja zrna mikrostrukture. Kod uzorka 1 je bilo izraženije pošto se na to superponira i neravnost površine što je rezultat protaljivanja i progaranja. Neravnost površine značajno otežava mjerenje, a često i u potpunosti onemogućuje.

Shodno navedenim opažanjima i ograničenjima metode, ne može se provesti kvalitetna usporedba rezultata i zaključiti koja će metoda rezultirati nižim zaostalim napreznjima. No, iako su iznosi karakterizirani značajnim odstupanjem, poslužiti će za određivanje rasporeda zaostalih napreznja duž uzorka te će odgovoriti na pitanje je li se simulacijama približilo stvarnom rasporedu zaostalih napreznja.

### 5.3.4. Dodatna mjerenja zaostalih naprezanja

S ciljem jasnijeg određivanja rasporeda zaostalih naprezanja u zavarenim uzorcima, izvršena su dodatna mjerenja. Odabran je uzorak 2 pošto je fokus ovog rada AC MIG. Odabrane su točke koje bi mogle pomoći u određivanju:

- Utjecaja veličine kristalnog zrna na rezultate mjerenja rendgenskom difrakcijom
- Povezanosti stvarnih mjerenja i simulacija.

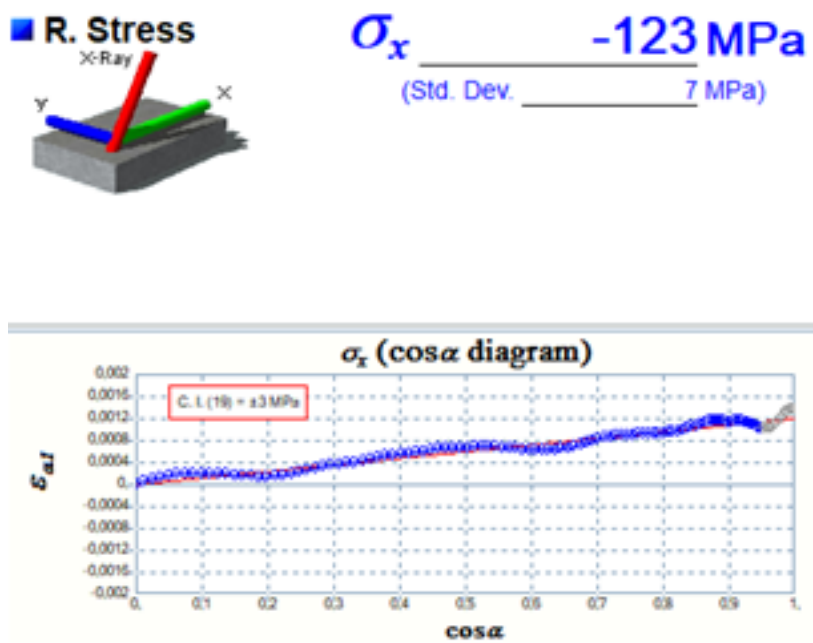
Mjerno područje prikazano je na Slika 53. Odabrane su točke udaljenije od ZUT-a kako bi se analizirala vrsta naprezanja ovisno o blizini izvora topline prilikom zavarivanja.



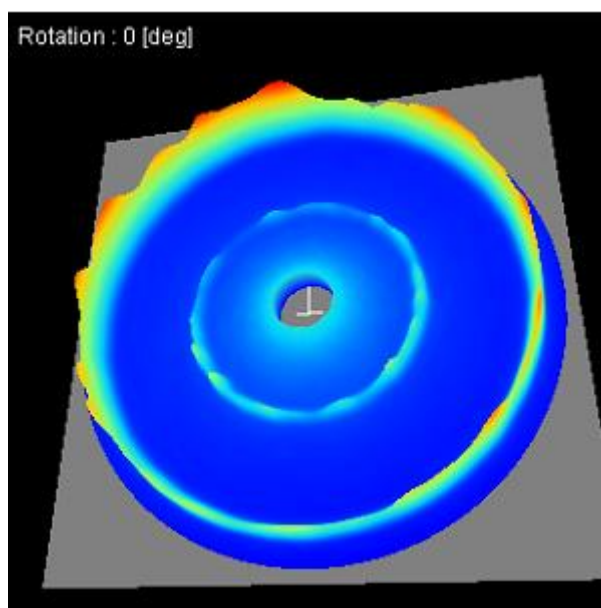
**Slika 53. Prikaz dodatnog mjernog područja**

Mjerenja su se provela na 10 točaka, a rezultati su prikazani u Tablica 10. Primjer  $\cos \alpha$  dijagrama je prikazan na Slika 54. Bitno je primijetiti kako su odstupanja od regresijskog pravca manja u odnosu na mjerenja provedena u ZUT-u i zavaru. To indicira kako su mjerenja točnija

i pouzdanija. Razlog je što su dodatne mjerne točke bile udaljenije od izvora topline pa su prošle kroz slabije toplinsko-vremenske cikluse. Posljedica je manja promjena mikrostrukture tj. manje povećanje veličine zrna. Rezultat je izraženiji D-B prsten prikazan na Slika 55.



Slika 54. Prikaz  $\cos \alpha$  dijagrama i mjerenja dobivenog u točki 9



Slika 55. Prikaz D-B prstena u točki 9

**Tablica 10. Iznosi zaostalih naprezanja na dodatnom mjernom području**

	Longitudinalna naprezanja [MPa]	Transverzalna naprezanja [MPa]
1	-113	6
2	-103	17
3	-40	17
4	-49	-26
5	-59	-22
6	-49	-38
7	-72	36
8	-86	-11
9	-123	-23
10	-71	-50

Iz Tablica 10 može se vidjeti kako se u dodatnom mjernom području nalaze pretežno tlačna zaostala naprezanja. Usporedba sa simulacijama prikazana je u 5.4.3.1.

## 5.4. Simulacija procesa zavarivanja

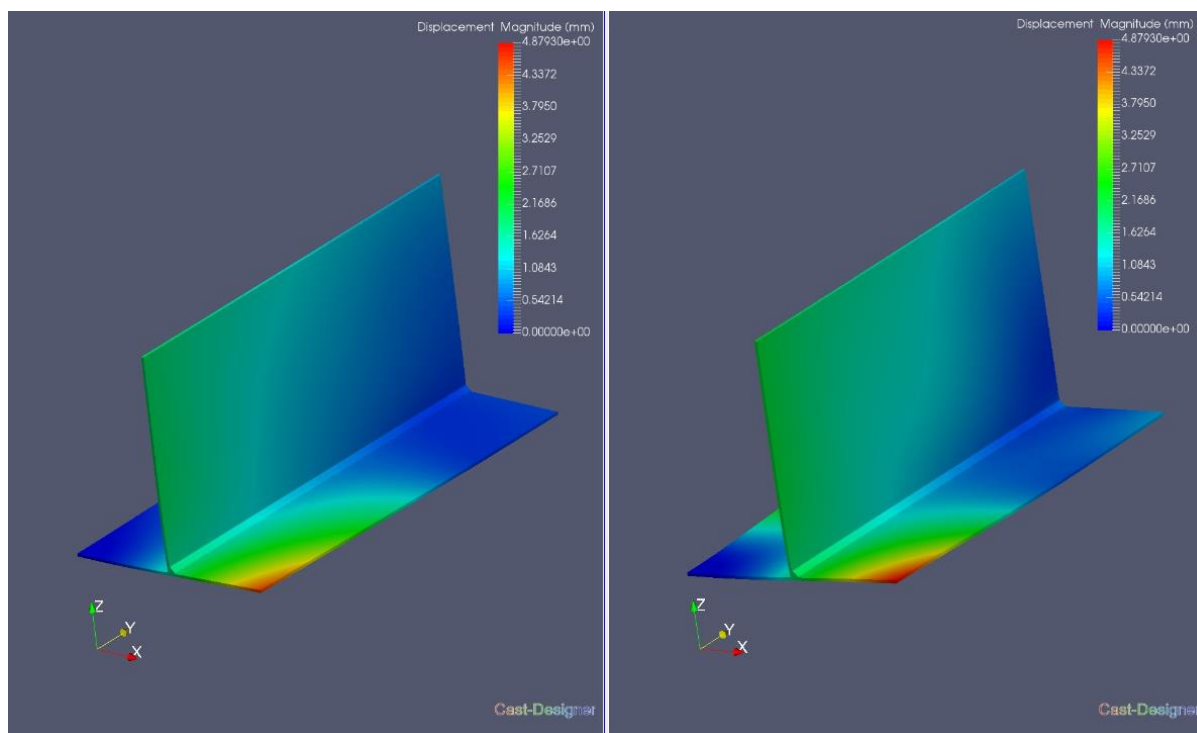
Kako bi se ostvarili što realniji uvjeti, u simulacijama su se koristili parametri zavarivanja iz laboratorija, no program ne nudi mogućnost implementiranja dinamičkih karakteristika. Tako se jedan vrlo bitan dio stvarnog stanja morao zanemariti što je i normalno jer je vrlo teško matematički opisati navedene pojave. No, ako bi se simulacijama ostvarilo poklapanje u određenim područjima i iznosima to bi bio značajan iskorak za daljnja istraživanja i implementaciju u projektima.

Razlika između simulacija za MIG-P i AC MIG postupak je bila u brzini zavarivanja, a koeficijenti unosa toplina su određivani iskustveno kada je utvrđeno na koji način, određena vrijednost, utječe na model.

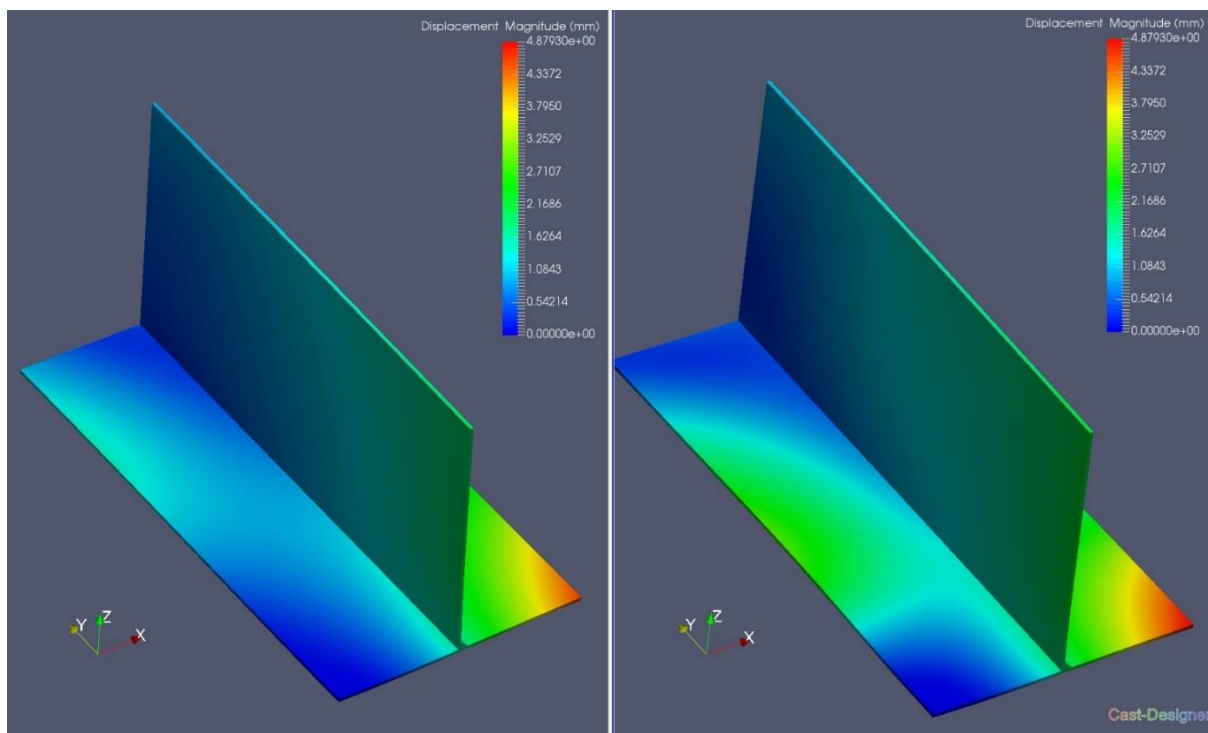
### 5.4.1. Simulacije MIG-P postupka zavarivanja

#### 5.4.1.1. Rezultati simulacija deformacija

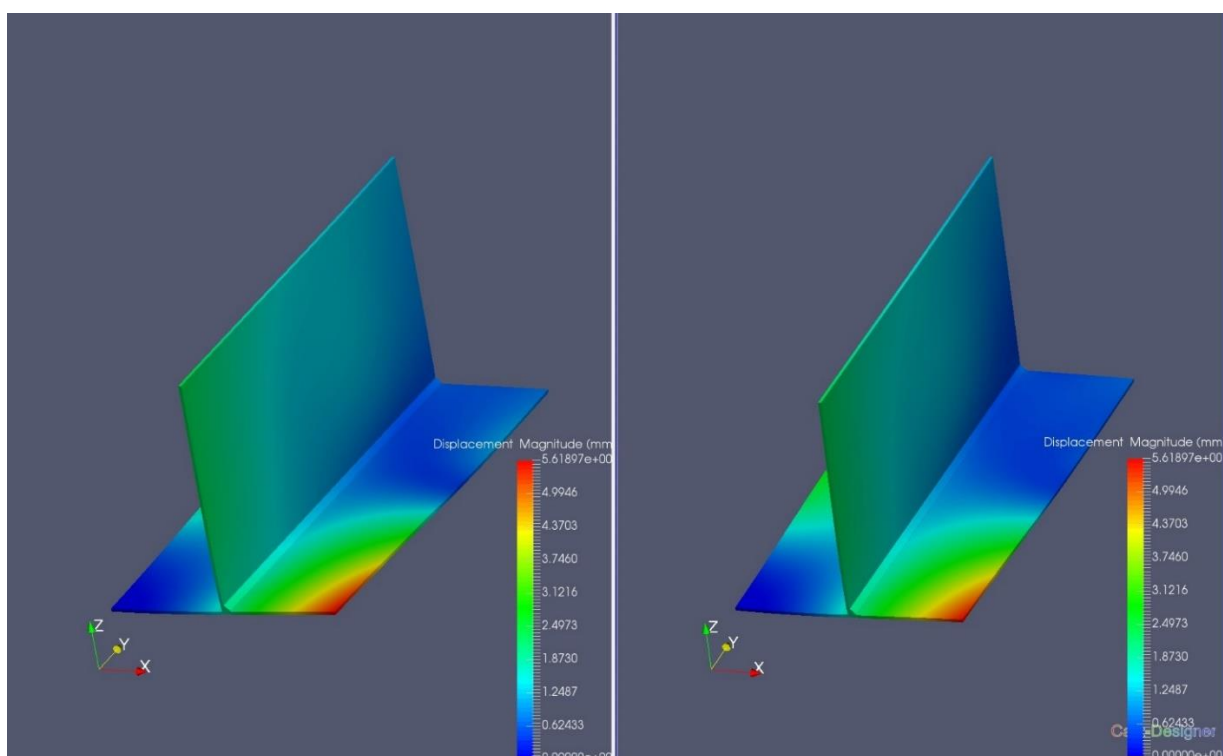
Iznosi koeficijenta unosa topline bili su redom 0.7, 0.80, 0.85 i 0.90. Rezultati su prikazani na Slika 56, Slika 57, Slika 58, Slika 59.



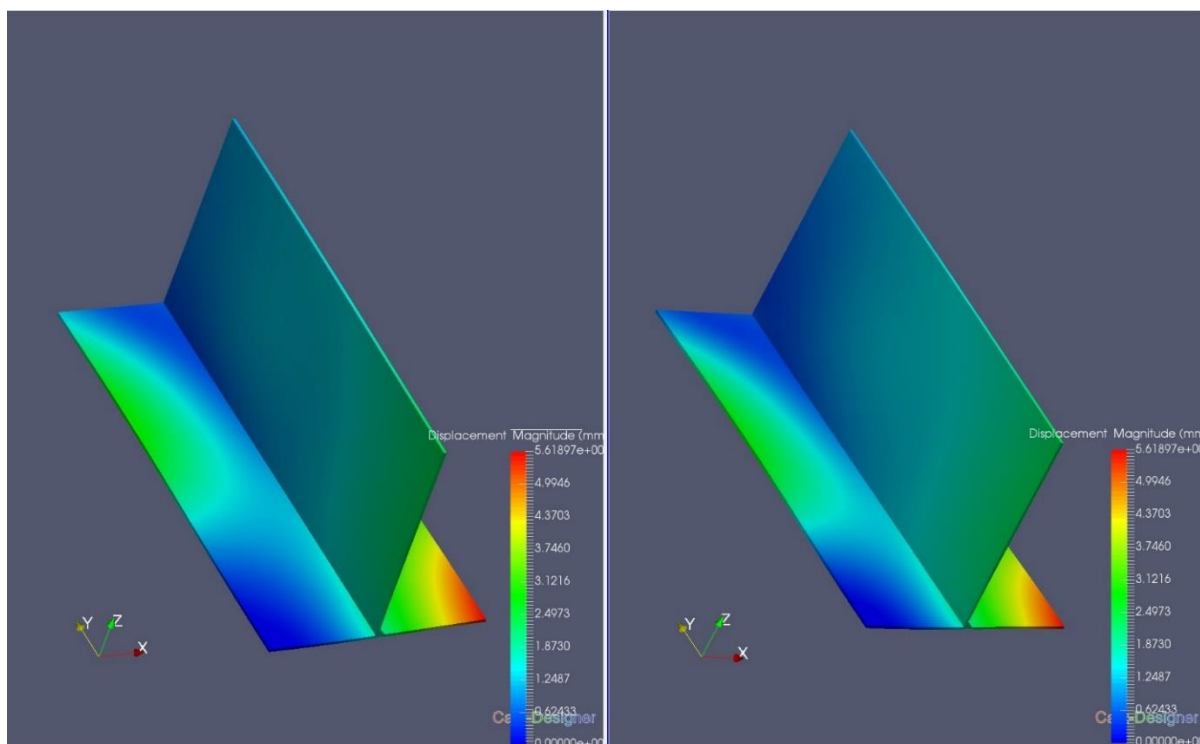
Slika 56. Deformacije modela s koeficijentom 0,7 (lijevo) i 0,8 (desno)\_1



Slika 57. Deformacije modela s koeficijentom 0,7 (lijevo) i 0,8 (desno)\_2



Slika 58. Iznos deformacija s koeficijentom 0,85 (lijevo) i 0,9 (desno)\_1



**Slika 59. Iznos deformacija s koeficijentom 0.85 (lijevo) i 0.90 (desno)\_2**

Može se vidjeti kako je iznos maksimalne deformacije zabilježen kod uzoraka s koeficijentom unosa topline 0.85 i 0.9. Nadalje, povećanje koeficijenta unosa topline dovodi do povećanih makroskopskih deformacija na većem broju lokacija na uzorku. Područja koja će se komentirati označena su na Slika 45, Slika 46., a usporediti će se sa simulacijom s iznosom koeficijenta 0.9. Maksimalni iznos deformacija na donjoj ploči iznosi 5.62 mm. Na tom dijelu ploče je u stvarnosti zabilježena deformacija u iznosu 5.845 mm, a deformirana površina je slične veličine (Područje 1). Područja na gornjoj ploči (područje 3 i 4) djelomično se poklapaju s dobivenim simulacijama. Vidljivo je da simulacija prikazuje iznose deformacija od približno 1.25 mm do 3.70 mm te se može primijetiti kako je za područje 3 iznos sličan. Za područje 4 iznosi nisu slični pošto su u stvarnosti deformacije i do 4 mm približavanjem prema donjoj ploči. U području 5 deformacije su u stvarnosti iznosile od 1.096 mm do 5.537 mm dok se na simulaciji u tom području dobio iznos od 1 mm do 3.7 mm te je evidentno poklapanje u određenim točkama. Isto tako dobivena veličina površine je slična. Za područje 5 ne postoji poklapanje.

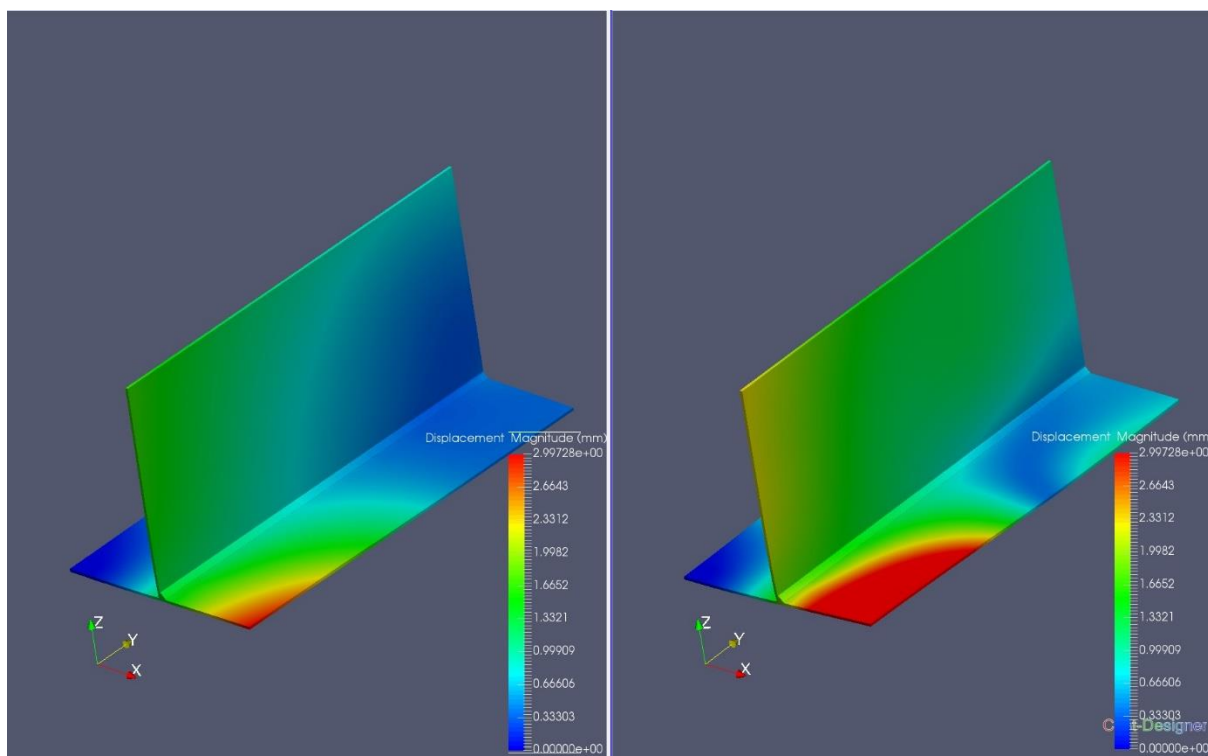


Temeljem navedenog, najbliže rezultate za MIG-P postupak dobilo se s koeficijentom unosa topline 0.90, a to je vidljivo na makroskopskoj razini ako se pogledaju područja 1, 3, 4 i 5.

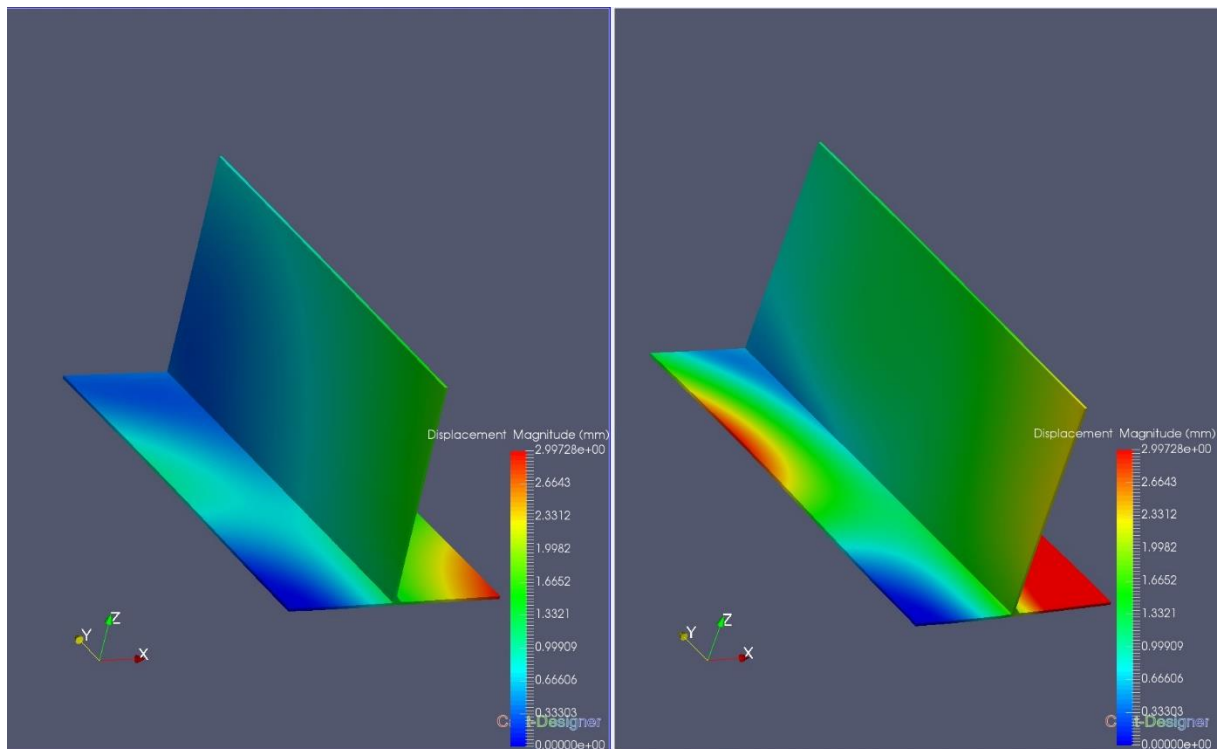
#### 5.4.2. Simulacije AC MIG postupka zavarivanja

Iznosi koeficijenta unosa topline bili su redom 0.7, 0.80, 0.95 i 1. Prve dvije simulacije pokrenute su s istim koeficijentima kao i kod MIG-P postupka zavarivanja. Preostale 2 simulacije pokrenute su s većih iznosa temeljem iskustva iz prijašnjih simulacija. Napominje se kako je cilj odrediti koeficijent koji najbliže opisuje stvarno stanje zavarenih spojeva.

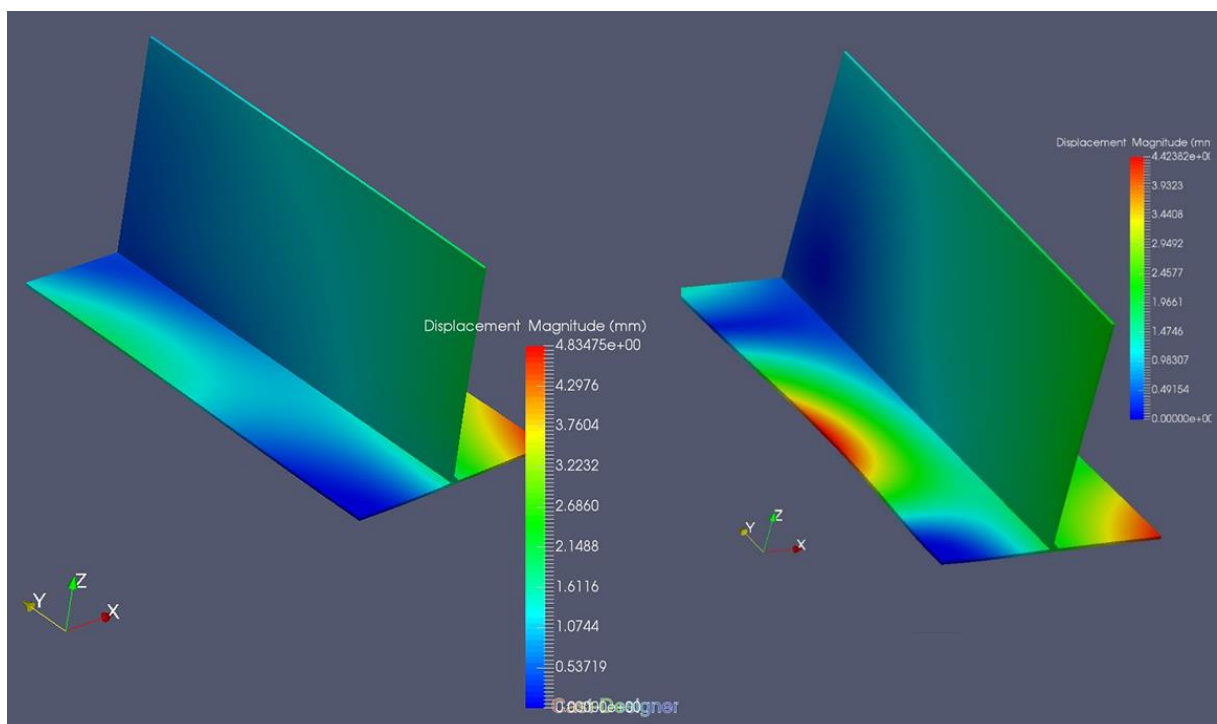
##### 5.4.2.1. Rezultati simulacija deformacija



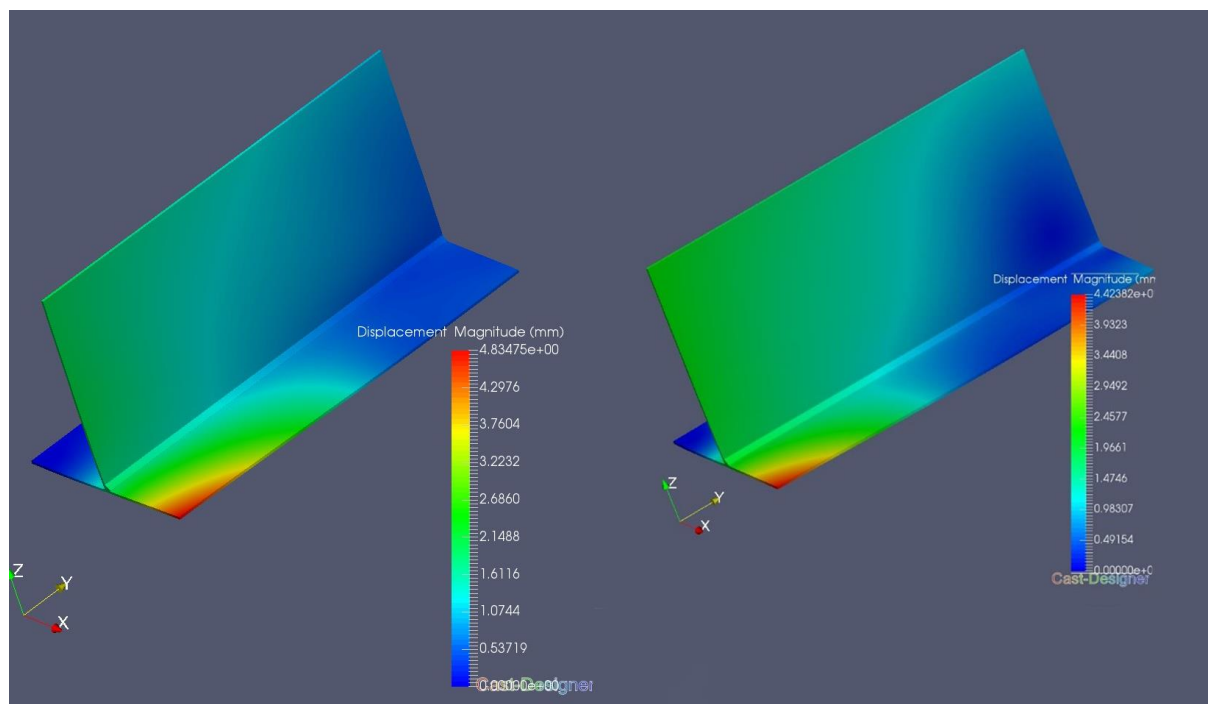
Slika 60. Iznos deformacija s koeficijentom 0,7 (lijevo) i 0,8 (desno)\_1a



Slika 61. Iznos deformacija s koeficijentom 0,7 (lijevo) i 0,8 (desno)\_2a



Slika 62. Iznos deformacija s koeficijentom 0.95 (lijevo) i 1 (desno)\_1a



**Slika 63. Iznos deformacija s koeficijentom 0.95 (lijevo) i 1 (desno)\_2a**

Može se primijetiti kako je iznos i raspored deformacija manji u odnosu na DC model za iste iznose koeficijenta unosa topline, što se podudara sa stvarnim stanjem uzroka 1 i uzorka 2. Povećanje brzine zavarivanja rezultirati će sa smanjenjem unosa topline što objašnjava smanjenje deformacija.

Usporediti će se stvarni rezultati sa simulacijama s iznosom koeficijenta unosa topline 0.95 jer je vidljivo kako se tu ostvaruje najveća podudarnost. Područja koja će se komentirati označena su na Slika 47 i Slika 48.

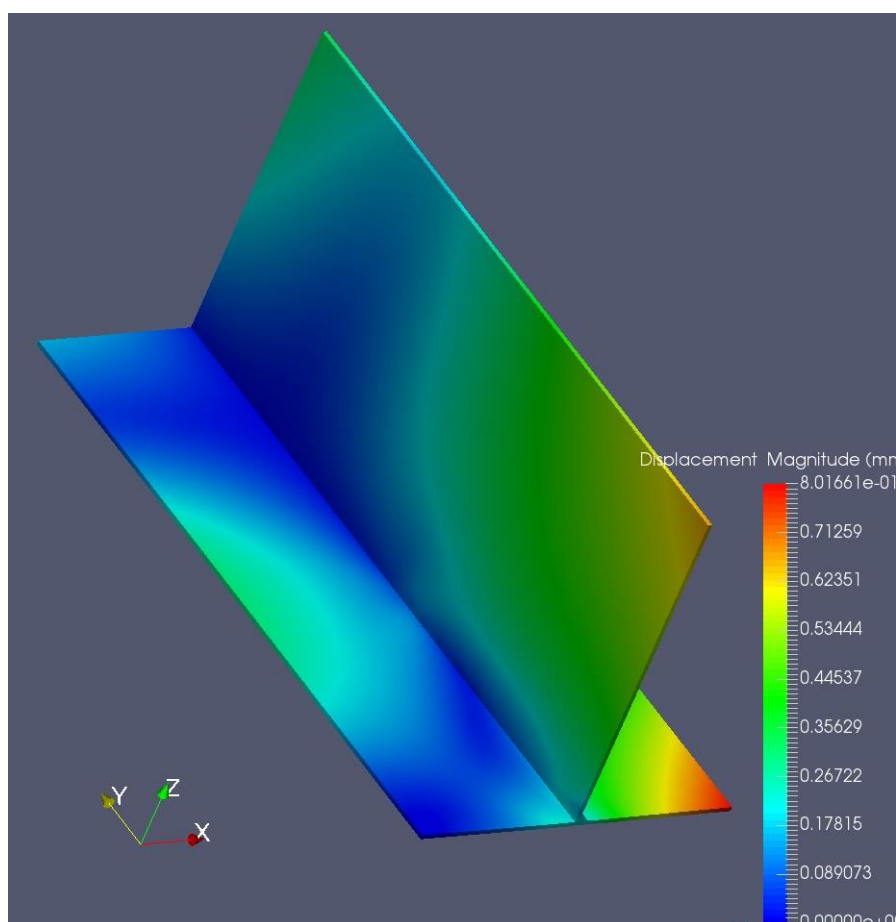
U stvarnosti maksimalna deformacija je u području 1 iznosi 5.144 mm dok je u simulacijama dobiven iznos od 4.83 mm. Veličina deformirane površine je gotovo jednaka te su iznosi deformacija veoma slični. Područje 2 nije karakterizirano poklapanjem rezultata, iako je na simulaciji s koeficijentom 0.8 zabilježena deformacija u tom području (Slika 60). Zadovoljavajuće poklapanje ostvareno je u području 3 gdje su deformacije u stvarnosti iznosile od 2.084 do 3.072 mm, a na simulaciji je vidljivo kako su iznosi u tom području u rasponu od 2 do 3.5 mm. Veličina deformirane površine je približno jednaka. U području 4 djelomično poklapanje ostvareno je samo na vrhu ploče, dok se približavanjem donjoj ploči deformacije značajno razlikuju. U području 5 u stvarnosti su iznosi maksimalnih deformacija iznosili 6.416

mm, a na simulaciji približno 3.5 mm. No, udaljavanjem od tog područja prema unutrašnjosti dobiva se poklapanje deformacija u iznosima od 2-3 mm. Iako postoji određena razlika, sama veličina deformirane površine je zadovoljavajuća.

Temeljem navedenog, najbliži su se rezultati za AC MIG postupak dobili s koeficijentom unosa topline 0.95, a to je vidljivo na makroskopskoj razini ako se pogledaju područja 1, 3 i 5.

### 5.4.3. Dodatne simulacije

Rezultati simulacija prikazuju djelomično, ali prihvatljivo poklapanje rezultata sa stvarnim stanjem zavarenih uzoraka. U stvarnosti su brojke većih iznosa. Općenito, MIG postupak ima koeficijent unosa topline 0.8. Postavlja se pitanje imaju li modificirani MIG postupci isti iznos. Takvim se razmišljanjem može pristupiti simulacijama sa stajališta neostvarivog u stvarnosti, a to je povećanje koeficijenta unosa topline iznad 1. Provela se testna simulacija, a rezultati su vidljivi na Slika 64.

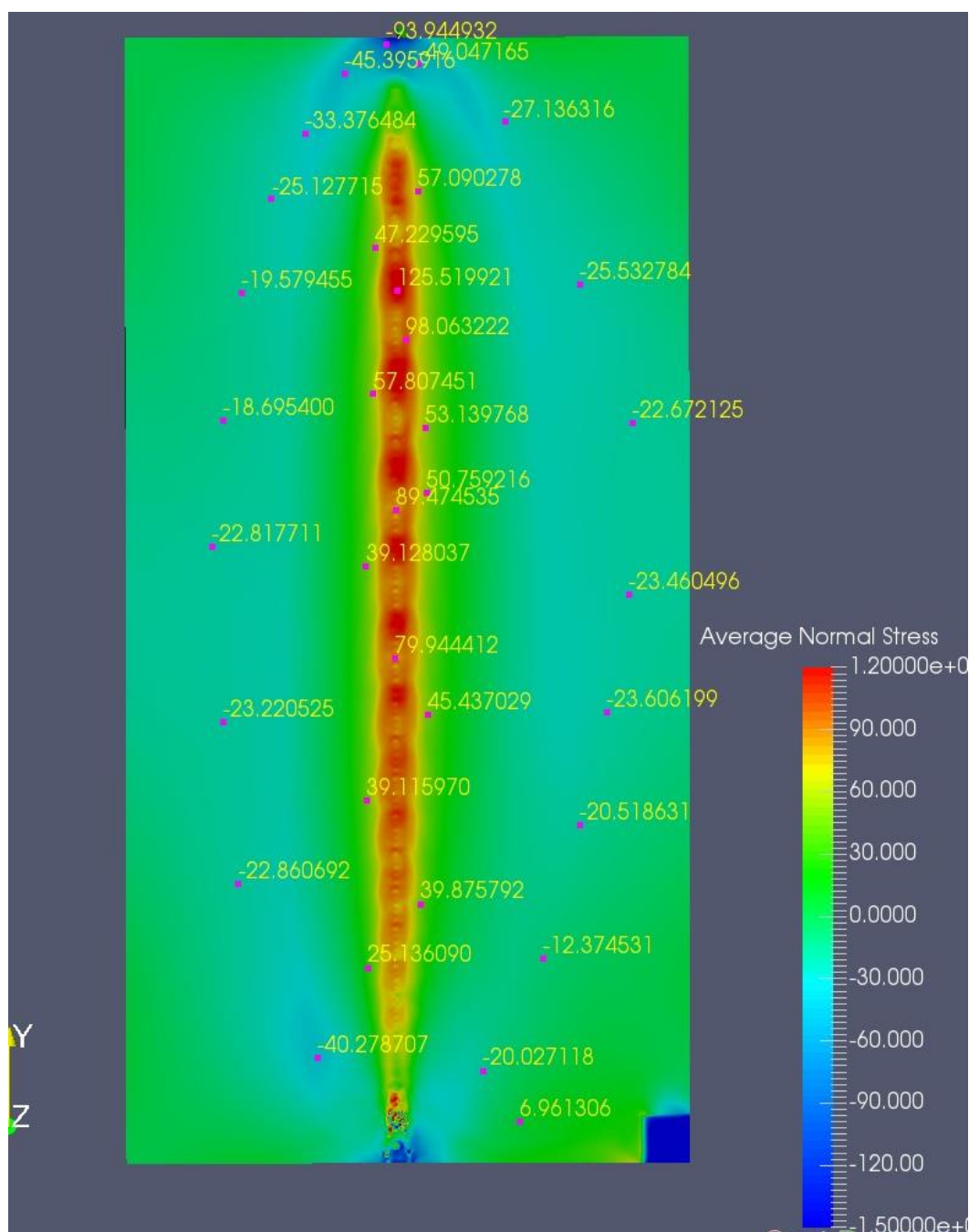


**Slika 64. Iznos deformacija s koeficijentom 1.5**

Time se otvara prostor za buduća istraživanja gdje bi se daljnjim odabirom koeficijenta nastojalo imitirati stvarno stanje zavarenih uzoraka. Vidljivo je kako je došlo do značajnog povećanja iznosa deformacija (8mm). To je brojka bliža stvarnim vrijednostima.

#### 5.4.3.1. Rezultati simulacija zaostalih napreznja

U 5.3.4. prikazana su dodatna mjerenja na uzorku 2 koji je zavaren koristeći AC MIG proces zavarivanja. Zbog razloga navedenih u 5.3.2. neće se provesti brojčana usporedba već će proanalizirati ovisnost vrste napreznja o lokaciji. Na Slika 65 je prikazan raspored zaostalih napreznja.



Slika 65. Iznos zaostalih napreznja u modelu s iznosom koeficijenta 0.95

Na početku i kraju zavara vidljivo je postojanje tlačnih zaostalih naprezanja. Tlačna naprezanja (plavo obojana) prisutna su uzduž uzorka na mjestima udaljenima od ZUT-a. Isti raspored naprezanja vidljiv je u eksperimentalnom dijelu ispitivanja u dodatnom mjernom području.

U poglavljima 5.3.1, 5.3.2 prikazana su longitudinalna i transverzalna zaostala naprezanja. Na uzorku 1 na početku i kraja zavara prevladavaju tlačna zaostala naprezanja. Za uzorak 2 na kojem je fokus rada, mjerenja nisu prikazala poklapanje jedino u slučaju longitudinalnih zaostalih naprezanja u točkama 1-n. No, objašnjenje za to je što to nije područje jednako onom na simulacijama. Na simulacijama je vidljivo da bi se na toj udaljenosti od početka zavara trebala nalaziti vlačna zaostala naprezanja. Razlog zašto se mjerenja nisu provela na istom mjestu početka zavara je što je na početku zavara došlo do izvjesnog progaranja donje ploče.

Simulacije prikazuju postojanje vlačnih zaostalih naprezanja duž cijelog zavara i ZUT-a. Eksperimentalnim mjerenjima pretežito su dobivena vlačna zaostala naprezanja u točkama 2-n, 3-n, 4-n koje se nalaze na području udaljenom od krajeva.

Temeljem navedenih zapažanja, može se zaključiti kako su simulacije uspješno prikazale raspored naprezanja na uzorku 2.

## 6. ZAKLJUČAK

Doba je transformacije industrije na onu održivu, isplativu i neopasnu. Razvijaju se suvremeni materijali, a s ciljem da se dobije jednaka ili povišena otpornost na vanjska opterećenja i time manje dimenzije proizvoda. To predstavlja temelj za proizvode manje mase, manjih troškova i povećane isplativosti.

Pitanje je kako će se ti materijali spajati. U ovom radu navedena je problematika zavarivanja tankih aluminijskih legura te ograničenost u upotrebi procesa zavarivanja. Svakako, postoje načini spajanja navedenog materijala. No, u slučaju TIG-a potrebna je vrlo precizna priprema spoja, a sam postupak ima visok unos topline te vrlo nisku produktivnost što s ekonomske strane postaje neprihvatljivo. Inačice MIG postupka, posebice impulsno MIG zavarivanje prihvatljiv je postupak za zavarivanje aluminijskih legura, no za manje precizne pripreme i male dimenzije postoje problemi progaranja i protaljivanja, neizotropnih deformacija i općenito ostvarivanja kvalitetnog spoja. Ulaganjem u suvremene strojeve za zavarivanje moguće je zavarivanje izmjeničnom strujom MIG postupkom. Time se otvorio prostor za istraživanje vezano uz rješavanje dosadašnjih problema prilikom zavarivanja navedenog materijala.

Prvi zadatak bio je proučiti može li se korištenjem izmjenične struje, s naglaskom na negativnu periodu strujnog signala (omjer balansa, EN omjer) ostvariti kvalitetniji izgled zavara. Odabrana je struja od 120 A te je time odabrana gornja krajnost, no iskustvom je procijenjeno kako se tako mogu najbolje dokazati teorijske pretpostavke. Na prvom uzorku (uzorak 1) vidljiv je očit problem progaranja i protaljivanja, izrazito agresivna penetracija te konkavno lice zavara. Kako bi se zadržala jednaka struja kod AC MIG-a, povišila se brzina zavarivanja za 21%. Tako se smanjio unos topline. Povišenje brzine posljedica je fenomena taljenja žice s naglaskom na brzinu taljenja žice koja poprima drugačiji karakter na negativnoj periodu struje. Upotrebom 50% negativne periode (omjera balansa 50%) dobio se u potpunosti izveden zavar s vrlo dobrim licem zavara i bez progaranja i protaljivanja. Nadalje, ostvarila se odlična penetracija i dobar profil zavara. Dakle, dobiven je visokobrzinski, visokoproduktivan i visokopouzdan postupak zavarivanja aluminijskih legura zadovoljavajućeg izgleda i integriteta zavara.

Zatim su razmotrene deformacije ispitnih uzoraka. Odmah se primijetilo da su deformacije značajno veće kod uzorka zavarenog s MIG-P postupkom. Nakon što su uzorci poslani na 3D skeniranje proveda se analiza. Zaključilo se da uzorak 1 odstupa od referentnog komada u



gotovo svim točkama, dok između uzorka 2 i referentne ploče postoje određena poklapanja. Na oba su uzorka deformacije velike. To se i očekivalo izborom visoke struje zavarivanja te visokim unosom topline. No, na uzorku 2 zabilježeni su manji iznosi deformacija, manje deformirane površine i manji broj značajnih deformacija. Dakle, i u uvjetima visokog unosa topline, implementacija AC MIG-a rezultirala je bržim zavarivanjem i manjim deformacijama. Dio numeričke analize su deformacije zavarenih uzoraka. Simulacije MIG-P postupka zavarivanja izvedene su s koeficijentom unosa topline 0.70, 0.80, 0.85, 0.90. Provedenom analizom, zaključilo se da se najbliži rezultat dobiva s koeficijentom unosa topline 0.90, a to je vidljivo na makroskopskoj razini ako se pogledaju područja 1, 3, 4 i 5. Simulacije AC MIG postupka izvedene su s koeficijentom unosa topline 0.70, 0.80, 0.95 i 1. Može se primijetiti kako je iznos i raspored deformacija manji u odnosu na DC model za iste iznose koeficijenta unosa topline, što se podudara sa stvarnim stanjem uzorka 1 i uzorka 2. Zaključilo se kako se najbliži rezultati za AC MIG postupak dobivaju s koeficijentom unosa topline 0.95, a to se indicira na makroskopskoj razini ako se pogledaju područja 1, 3 i 5. Činjenica je da simulacija ne može pokriti sve pojave u stvarnosti i tu se generiraju evidentne razlike. No, ovim su se saznanjima stvorili preduvjeti za daljnja istraživanja s naglaskom na povišenje koeficijenta unosa topline iznad 1 što je fizikalno nemoguće, ali je u području numeričkih simulacija ostvarivo. Provela se dodatna simulacija s koeficijentom unosa topline 1.5, a na taj su se način dobile veće deformacije. Time se stvara mogućnost za daljnje približavanje stvarnim iznosima deformacija. U stvarnosti električni luk nema idealnu putanju tj. dešava se krivudanje električnog luka što predstavlja jedan od uzroka razlika. U simulaciji nije bilo moguće odabrati dotičan aluminijski materijal te je simulacija izvedena na najbližem sličnom. Shodno tome, daljnja istraživanja usmjeriti će se u smjeru otklanjanja navedenih problema.

Za određivanje zaostalih naprezanja implementiran je suvremeni analizator koji radi na principu  $\cos \alpha$  metode. Provedena su mjerenja longitudinalnih i transverzalnih zaostalih naprezanja u zavaru, ZUT-u te u dodatnom mjernom području zanimljivog za usporedbu sa simulacijama. Prema rezultatima mjerenja vidljivo je kako su longitudinalna zaostala naprezanja uzorka 2 zavarenog AC metodom u prosjeku veća od onih na uzorku 1 zavarenog MIG-P metodom, dok za transverzalna zaostala naprezanja vrijedi obrnuto. No, zaključilo se kako je visoki unos topline inducirao značajne mikrostrukturne promjene u zavaru i ZUT-u s naglaskom na povećanje veličine zrna. Uz pravilno namještanje udaljenosti i kuta detektora krucijalno je osigurati sitnozrnatu mikrostrukturu materijala. Bitno je osigurati i što ravniju površinu. Zbog

pogrubljenja kristalnog zrna mjerenja su imala značajno standardno odstupanje u iznosima 10-30%, a gornja granica je u većoj mjeri pripisana MIG-P tehnologiji zavarivanja. To je očekivano jer je unos topline veći za 21% u odnosu na AC MIG, a time je i pojava pogrubljenja zrna veća. Na uzorku 1 bila je izražena neravnost površine što je rezultat protaljivanja i progaranja. Temeljem navedenih ograničenja metode, ne može se provesti kvalitetna usporedba rezultata i zaključiti koja bi metoda rezultirala nižim zaostalim naprezanjima. Provedena je analiza rasporeda zaostalih naprezanja te usporedba sa simulacijama. Bitno je napomenuti da su dodatna mjerenja provedena u području koje je bilo podvrgnuto manjem utjecaju topline te su time izbjegnute negativne pojave vezane uz pogrubljenje zrna, a mjerenja su imale manje standardno odstupanje.

Simulacije prikazuju postojanje vlačnih zaostalih naprezanja duž cijelog zavara i ZUT-a, a tlačnih na početku i kraju zavara te uzduž uzorka na mjestima udaljenima od ZUT-a. Eksperimentalnim mjerenjima pretežito su dobivena vlačna zaostala naprezanja u točkama 2-n, 3-n, 4-n koje se nalaze na području udaljenom od krajeva, dok su na početku i kraju zavara prevladavala tlačna zaostala naprezanja. Tlačna zaostala naprezanja su u potpunosti prisutna uzduž uzorka na mjestima udaljenima od ZUT-a. Zaključilo se kako su simulacije uspješno prikazale raspored naprezanja na uzorku 2.

U ovom radu velikim je dijelom dokazano kako je AC MIG tehnologija superiornija za zavarivanje tankih aluminijskih legura. AC MIG je visokobrzinski, visokoproduktivan i visokopouzdan postupak zavarivanja aluminijskih legura. Ostvaren je kvalitetniji izgled zavara boljeg integriteta bez problema protaljivanja i progaranja. Ostvarene su manje deformacije. Iznosi zaostalih naprezanja nisu uspoređivani zbog navedene problematike koja je pokazala vrlo bitne činjenice za buduća istraživanja. Moguće je ostvariti kvalitetna mjerenja na aluminijskim legurama, no potrebno je osigurati što manje mikrostrukturne promjene tj. pogrubljenje kristalnog zrna. Potrebno je osigurati što manju zakrivljenost mjerne površine. Ostvarila se značajna podudarnost stvarnog zavarivanja i simulacija. Otvara se prostor za buduća istraživanja koja bi se daljnjim optimiziranjem koeficijenta unosa topline mogla u još većoj mjeri približiti stvarnim mjerenjima.

Temeljem svih navedenih zapažanja, ovim radom ostvareni su svi ciljevi te su se velikim dijelom potvrdile obje hipoteze.

## **ZAHVALA**

Zahvaljujemo se našem mentoru prof. dr. sc. Ivici Garašiću na vremenu, suradnji i povjerenju tijekom izrade ovog rada. Također, zahvaljujemo se na pruženoj slobodi u radu s veoma naprednim i rijetkim tehnologijama. Na kraju, zahvaljujemo se na pruženoj šansi da obogatimo svoje znanje te da napravimo bitan korak u našim karijerama.

Zahvaljujemo se dr.sc. Maji Remenar na savjetima i uputama prilikom izrade rada te Mislavu Štefoku, mag. ing. mech. prilikom izrade makroizbrusaka i snimanja dinamičkih karakteristika.

## **LITERATURA**

- [1] Park HJ, Kim DC, Kang MJ, Rhee S. The arc phenomenon by the characteristic of EN ratio in AC pulse GMAW. Springer. The international Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2012.
- [2] Kah P, Suoranta R, Martikainen J. Advanced gas metal arc welding processes. Springer. The international Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2012.
- [3] Kumar R, Dilthey U, Dwivedi DK, Ghosh PK. Thin sheet welding of Al 6082 alloy by AC pulse-GMA and AC wave pulse-GMA welding. Elsevier. Materials and Design. 2009;30:306-313.
- [4] Dutra JC, Gonçalves e Silva RH, Savi BM, Marques C, Alarcon OE. New methodology for AC-pulsed GMAW parameterization applied to aluminum shipbuilding. Springer. The Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering. 2015.
- [5] Tong H, Ueyama T, Ushio M. Improvement of aluminium alloy sheet metal welding quality and productivity with AC pulsed MIG welding system (Report 2). Taylor & Francis. Welding International. 2002;16:104-109.
- [6] Kah P, Latifi H, Suoranta R, Martikainen J, Pirinen M. Usability of arc types in industrial welding. Springer. International Journal of Mechanical and Materials Engineering. 2014.
- [7] Singh R. Arc Welding Processes Handbook. Hoboken; Beverly: Wiley; Scrivener Publishing. 2021.
- [8] Weman K, Linden G. MIG welding guide. Cambridge: Woodhead Publishing Limited- Maney Publishing Limited- CRC press. 2006.
- [9] Nadzam J, Armao F, Byall L, Kotecki D, Miller D. Gas Metal Arc Welding Guidelines. Cleveland. Lincoln Global. 2014.
- [10] Lordachescu D, Quintino L. Steps toward a new classification of metal transfer in gas metal arc welding. Elsevier. Journal of Materials Processing Technology. 2008;202:391-397.
- [11] Arif N, Chung H. Alternating current-gas metal arc welding for application to thin sheets. Elsevier. Journal of Materials Processing Technology. 2014.
- [12] Park HJ, Rhee S, Kang MJ, Kim DC. Joining of Steel to Aluminum Alloy by AC Pulse MIG Welding. The Japan Institute of Metal. Materials Transactions. 2009;9:2314-2317.
- [13] Adamiec J, Pfeifer T. Welding of Aluminium Alloy Thin Sheets Using Variable Polarity MIG Method. Switzerland. Trans Tech Publications. Solid State Phenomena. 2014;211:15-22.

- [14] Mathers G. The welding of aluminium and its alloys. Cambridge. Woodhead Publishing Limited - CRC press. 2002.
- [15] aluminium\_5754: [https://grupoandalucia.org/pdf/aluminium\\_5754.pdf](https://grupoandalucia.org/pdf/aluminium_5754.pdf), Pristupljeno: 3. ožujka 2022.
- [16] ISO-TR-581-2005: <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/40507/3276ae191ae14b04a5d365de03029b17/ISO-TR-581-2005.pdf>, Pristupljeno: 7. ožujka 2022.
- [17] Pek N. Optimizacija robotskog postupka zavarivanja tankih ploča od aluminija EN AW 5754. Zagreb. Fakultet strojarstva i brodogradnje. 2018.
- [18] Deekhunthod R. Weld Quality in Aluminium Alloys. Uppsala. Teknisk-naturvetenskaplig fakultet. 2014.
- [19] Radaj D. Heat Effects of Welding Temperature Field, Residual Stress, Distortion. Berlin. Springer-Verlag. 1992.
- [20] Colegrove P. Ikeagu C. Thistlethwaite A. Williams S. Nagy T. Suder W. Steuwer A. Pirling T. The welding process impact on residual stress and distortion. Science of Technology of Welding & Joining. 2009;14(8):717-725.
- [21] Rossini NS. Dassisti M. Benyounis KY. Olabi AG. Methods of measuring residual stresses in components. Dublin City University. School of Mechanical and Manufacturing Engineering. 2011.
- [22] Prevéy PS. Current applications of x-ray diffraction residual stress measurement Lambda Technologies. 1996.
- [23] Tanaka K. The  $\cos \alpha$  method for X-ray residual stress measurement using two dimensional detector. Nagoya Industrial Science Research Institute. Mechanical Engineering Reviews. 2019;6(1):1-13.
- [24] XRD-practice: <https://www.stressmap.co.uk/wp-content/uploads/2018/08/XRD-practice.png>, Pristupljeno: 16. ožujka 2022.
- [25] <https://www.otc-daihen.de/index.php?id=3047>, Pristupljeno: 24.06.2022.
- [26] <https://www.daihen-usa.com/product/wb-w400/>, Pristupljeno: 24.06.2022.
- [27] <https://www.pulstec.co.jp/en/product/x-ray/>, Pristupljeno: 24.06. 2022.
- [28] [https://www.pulstec.net/wp-content/uploads/2022/03/Flier-micro-X360s\\_rev3.pdf](https://www.pulstec.net/wp-content/uploads/2022/03/Flier-micro-X360s_rev3.pdf), Pristupljeno: 24. 06. 2022.

[29] <https://www.cast-designer.com/casting-solutions/cast-designer-overview.html>,

Pristupljeno: 24. 06. 2022.

## **SAŽETAK**

Prva poglavlja ovog rada prikazuju teoretsku pozadinu MIG tehnologija zavarivanja gdje su se istaknule najbitnije karakteristike modificiranih postupaka zavarivanja s naglaskom na AC MIG postupka zavarivanja. Prikazana je dosadašnja problematika zavarivanja aluminijskih limova te ograničenja MIG-P postupka zavarivanja koja je najčešća tehnologija zavarivanja debljih aluminijskih limova.

U eksperimentalnom su dijelu implementirane 4 napredne tehnologije vezane uz područje zavarivanja. To je suvremeni MIG stroj za zavarivanje, robotski sustav s analizatorom koji radi na principu nerazorne rendgenske difrakcije, mjerni sustav za 3D optičko mjerenje te programski paket za simulacije.

Provedena je eksperimentalna i numerička analiza i usporedba zavarenih uzoraka dobivenih AC MIG i MIG-P postupkom zavarivanja s naglaskom na izgled zavara, deformacije i zaostala naprezanja. Istražila se mogućnost povezivanja rezultata stvarnih zavara i rezultata simulacija. Na temelju ovog vrlo minucioznog istraživanja velikim su dijelom postignuti ciljevi i hipoteze. Temeljem zaključaka otvorio se prostor za daljnja istraživanja.

Ključne riječi: AC MIG, MIG-P, aluminij, rendgenska difrakcija, 3D optičko mjerenje, simulacije, izgled zavara, deformacije, zaostala naprezanja.

## **SUMMARY**

The theoretical foundation of MIG welding technologies is discussed in the initial chapters of this paper, which also emphasize the key characteristics of modified welding methods with a focus on the AC MIG welding process. The challenge with welding aluminum is discussed, as well as the limitations of the MIG-P welding procedure, which is the most popular welding method for thicker aluminum sheets.

Four cutting-edge technologies in the welding field were used in the experimental section. It consists of a contemporary MIG machine, a robotic system with an analyzer based on the non-destructive X-ray diffraction method, a measuring system for 3D optical measurement, and a simulation software program.

With an emphasis on the weld appearance, deformations, and residual stresses, welded samples obtained by the AC MIG and MIG-P welding processes were compared and analyzed experimentally and numerically. Investigations were done to see if it was possible to connect the outcomes of simulations with those of actual welds. Goals and hypotheses were largely met based on this incredibly meticulous study. Based on the findings, there is room for additional investigation.

**Key words:** AC MIG, MIG-P, aluminium, non-destructive X-ray diffraction method, 3D optical measurement, simulations, weld appearance, deformations, residual stresses.



## ŽIVOTOPIS

Patrik Klasić rođen je 9. ožujka 1999. u Zagrebu. Odrastao je u općini Đurmanec gdje je i završio osnovnu školu. Srednju školu pohađao je u gradu Krapini gdje je uspješnom obranom završnog rada temeljenog na razvoju i proizvodnji dvokanalnog audio pojačala završio smjer Tehničar za računalstvo. Tijekom trajanja srednje škole proaktivno je sudjelovao u sportskim događanjima. Po završetku srednje škole, upisao je Fakultet strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. Na drugoj godini preddiplomskog studija dobio je nagradu „Davorin Bazjanac“ za odličan uspjeh. Na trećoj je godini obavljao ulogu demonstratora iz kolegija Termodinamika materijala i Toplinska obrada. Preddiplomski studij završava s odličnim uspjehom, za što ostvaruje pravo na akademsku titulu Prvostupnik s najvećom pohvalom (lat. *Summa cum laude baccalareus*). Dobitnik je i medalje fakulteta. Trenutačno je student diplomskog studija na smjeru Proizvodno inženjerstvo, Zavarene konstrukcije. Isto tako, u Laboratoriju za mehatroniku transportnih sustava, financiranog od strane industrijskog partnera (FORD), bavi se ispitivanjem materijala suhih tarnih spojki. Na Katedri za tjelesnu i zdravstvenu kulturu obavlja funkciju demonstratora.

Kristijan Nemeć rođen je 26.10.1998. u Vinkovcima. Odrastao u općini Jarmini gdje je završio osnovnu školu. Nakon osnovne škole upisuje srednju tehničku školu gdje završava smjer tehnička gimnazija, usmjerenje mehatronika s odličnim uspjehom. Završetkom srednje škole upisuje Fakultet strojarstva i brodogradnje kao jedan od bolje plasiranih studenata. Za smjer na fakultetu odabire Proizvodno inženjerstvo, usmjerenje Zavarene konstrukcije. Diplomski studij nastavio je na istom usmjerenju.