

# Optimizacija parametara MIG zavarivanja sučeljenih spojeva Al-Mg legura

---

Jurlina, Vedran

Master's thesis / Diplomski rad

2022

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

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:432967>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-01-14**

*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **DIPLOMSKI RAD**

Vedran Jurlina

Zagreb, 2022.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# DIPLOMSKI RAD

Mentor:

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

Student:

Vedran Jurlina

Zagreb, 2022.

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

Zahvaljujem se svom mentoru, prof. dr. sc. Ivici Garašiću za stručnu pomoć i savjete za izradu ovog rada.

Zahvaljujem asistentima, mag. ing. Mislavu Štefoku te dr. sc. Maji Jurici na velikoj pomoći, sugestijama i strpljenju tijekom izrade rada.

Zahvaljujem djelatnicima Laboratorija za zavarivanje Fakulteta strojarstva i brodogradnje na pruženim savjetima i pomoći pri izradi eksperimentalnog dijela ovog rada.

Također se zahvaljujem obitelji i prijateljima na neiscrpoj podršci i povjerenju tijekom cijelog studija.

Vedran Jurlina



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
**FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE**



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

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum:	Prilog:
Klasa:	602-14/22-6/1
Ur. broj:	15-1703-22-

## DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **VEDRAN JURINA** Mat. br.: 0035212632

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Optimizacija parametara MIG zavarivanja sučeljenih spojeva Al-Mg legura**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Optimization of parameters at MIG welding of butt welds on Al-Mg alloys**

Opis zadatka:

U teorijskom dijelu proučiti i opisati moderne tehnologije za zavarivanje aluminija s posebnim naglaskom na MIG postupak. Obrazložiti koji su postupci alternative klasičnom pulsnom MIG zavarivanju i koje su prednosti tih modificiranih postupaka. Analizirati problematiku promjene svojstava u području zavara kod Al-Mg legura te specificirati moguće pripreme zavara kod izrade sučeljenih spojeva.


U eksperimentalnom dijelu provesti zavarivanje sučeljenih spojeva na osnovnom materijalu Al-Mg legura uz primjenu konvencionalne MIG pulsne tehnologije i modificirane AC MIG tehnologije. Za odgovarajuću debljinu materijala propisati pripremu i parametre zavarivanja. Na uzorcima provesti razorna i nerazorna ispitivanja te posebno analizirati područje zone utjecaja topline i metala zavara. Zaključno, u komparativnoj analizi kvantificirati utjecaj na pad čvrstoće kao i aspekte produktivnosti konvencionalne i modificirane MIG tehnologije.

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

Zadatak zadan:  
29. rujna 2022.

Rok predaje rada:  
1. prosinca 2022.

Predviđeni datum obrane:  
12. prosinca do 16. prosinca 2022.

Zadatak zadao:  
prof. dr. sc.  Ivica Garašić

Predsjednik Povjerenstva:  
prof. dr. sc.  Biserka Runje

**SADRŽAJ**

SADRŽAJ .....	I
POPIS SLIKA .....	II
POPIS TABLICA.....	IV
POPIS OZNAKA .....	V
POPIS KRATICA .....	VI
SAŽETAK.....	VII
SUMMARY .....	VIII
1. UVOD.....	1
2. ALUMINIJ .....	2
<b>2.1 Aluminijeve legure</b> .....	3
2.1.1. <i>Dijagrami stanja aluminij-magnezij</i> .....	3
2.1.2. <i>Dijagrami stanja aluminij-silicij</i> .....	4
2.1.3. <i>Dijagrami stanja aluminij-bakar</i> .....	5
2.2 Precipitacijsko očvršnuće aluminijevih legura.....	6
2.3 Gnječene aluminijeve legure .....	9
2.4 Zavarljivost 5. i 6. aluminijske legure .....	10
2.4.1 <i>Problem topljivosti vodika</i> .....	12
2.4.2 <i>Utjecaj zaostalih naprezanja</i> .....	16
3. MIG POSTUPAK ZAVARIVANJA.....	25
3.1 AC MIG .....	28
3.2 MIG zavarivanje s dvostrukim pulsom (DP-MIG).....	29
3.2.1 <i>Zavarivanje aluminija pete klase s DP-MIG</i> .....	30
3.2.2 <i>Zavarivanje aluminija šeste klase s DP-MIG</i> .....	34
4. RENDGESKA DIFRAKCIJA.....	38
5. EKSPERIMENTALNI DIO .....	44
5.1 Korišteni osnovni te dodatni materijal.....	44
5.2 Priprema uzorka, vizualna metoda kontrole te zavarivanje.....	45
5.4 Ispitivanje rendgenskom difrakcijom .....	52
5.5 Makroanaliza.....	63
5.6 Mjerenje tvrdoće te korelacija sa čvrstoćom.....	66
6. ZAKLJUČAK.....	69
LITERATURA.....	70

**POPIS SLIKA**

Slika 1.	Prikaz patenta: Pištolj za zavarivanje [1] .....	1
Slika 2.	Dijagram stanja Al-Mg [2] .....	4
Slika 3.	Dijagram stanja Al-Si [2] .....	5
Slika 4.	Dijagram stanja Al-Cu [2] .....	6
Slika 5.	Precipitacijsko očvršćivanje Al-Cu legure sa 4% Cu [2] .....	7
Slika 6.	Prikaz postupka precipitacijskog očvršćivanja za Al [2] .....	8
Slika 7.	Ovisnost temperature i vremena dozrijevanja o vlačnoj čvrstoći [2] .....	8
Slika 8.	Odnos između aluminijskih legura serije 5000 [3] .....	11
Slika 9.	Odnos aluminijskih legura serije 6000 [3] .....	12
Slika 10.	Topljivost vodika u nelegiranom aluminiju u funkciji vremena [4] .....	13
Slika 11.	Ovisnost legiranih elemenata i osjetljivost prema pukotinama [4] .....	14
Slika 12.	Poprečni presjek zavara kombinacije materijala: AA5083 (desno) i AA6060 (lijevo), dodatni materijal ER4043, debljina ploče 5 mm [4]. .....	14
Slika 13.	Profil tvrdoće materijala AA5083 i AA5754 [4] .....	15
Slika 14.	Profil tvrdoće materijala AA6060 i AA6082 [4] .....	16
Slika 15.	Krivulja zamora materijala na različitim vrstama spojeva [5] .....	18
Slika 16.	Nastajanje zaostalog napreznja na primjeru čeonog spoja [5] .....	19
Slika 17.	Detalji zavarenih dijelova aluminijskih legura sa označenim pukotinama [5] .....	19
Slika 18.	Uvjet penetracije zavara za inicijaciju pukotine kod kutnih zavara [5]. .....	22
Slika 19.	Prikaz distribucije napreznja kod preklopnog (gore) i križnog spoja (dolje) [5] .....	23
Slika 20.	Prikaz distribucije napreznja u kutnom zavaru uzdužno opterećenom [5] .....	24
Slika 21.	Princip MIG zavarivanja. 1. električni luk, 2. elektroda, 3. bubanj sa žicom, 4, pogonski kotačići, 5. savitljivo crijevo, 6. polikabel, 7. pištolj za zavarivanje, 8. izvor struje, 9. kontaktna elektroda, 10. zaštitni plin, 11. mlaznica, 12. bazen taline [7]. .....	26
Slika 22.	Prikaz distribucije voltaže u električnom luku [7] .....	27
Slika 23.	Prikaz stope depozicije za neke promjere žice [7] .....	28
Slika 24.	Utjecaj polariteta na penetraciju [7] .....	29
Slika 25.	Prikaz eksperimentalne pripreme za DP-MIG [7] .....	30
Slika 26.	Ilustracija izmjerenog DP signala povezanog s prijenosom metala i definiranim parametrima [7]. .....	31
Slika 27.	Učinak parametara DP-MIG na poroznost [7]. .....	32
Slika 28.	Wöhlerov graf usporedbe aluminijske klase zavarivan DP i DC MIG postupkom [7] .....	33
Slika 29.	Karakteristike električnog signala normalnog impulsnog načina i dvostrukog impulsnog moda [9] .....	35
Slika 30.	Vlačna čvrstoća i mjesto loma zavarenih spojeva za zavarivanje normalnim pulsom i .....	37
Slika 31.	Načelo difrakcije temelji se na odnosu između $\lambda$ , difrakcijskog kuta snopa, $2\theta$ , i $d'$ dovodi do Braggovog zakona, $n\lambda = 2d'\sin(\theta)$ [12]. .....	40
Slika 32.	Opis Braggovog kuta u odnosu na principe rendgenskih zraka za mjerenje .....	41
Slika 33.	a) Difraktogram odabranog kuta pri $\psi = 0$ (crno), smanjena krivulja (plavo) i pseudo-Voigtova aproksimacija od $\varphi = 0$ , $\varphi = 45$ i $\varphi = 90$ , b) $\text{Sin}^2\psi - \sigma$ graf $\varphi = 0$ , $\varphi = 45$ i $\varphi = 90$ [14] .....	43
Slika 34.	Prikaz Al-Mg ploča prije zavarivanja .....	45
Slika 35.	Prikaz aparata za zavarivanje .....	46
Slika 36.	Prikaz zavara dobivenog korištenjem DCP MIG tehnologije .....	47
Slika 37.	Prikaz zavara dobivenog korištenjem ACWP MIG tehnologije .....	48

Slika 38.	Rezultat ispitivanja penetrantima, uzorak 1 .....	49
Slika 39.	Rezultat ispitivanja penetrantima, uzorak 2 .....	50
Slika 40.	Rezultat ispitivanja penetrantima, uzorak 3 .....	50
Slika 41.	Rezultat ispitivanja penetrantima, uzorak 4 .....	51
Slika 42.	Prikaz stroja za elektrokemijsko poliranje sa svim nastavcima [18].....	52
Slika 43.	Prikaz mjesta nagrivanja.....	52
Slika 44.	Pulstec $\mu$ -X360s sa robotskom rukom marke Kuka .....	53
Slika 45.	Primjer lošeg očitavanja naprezanja na točki 1.4.1, longitudinalno DCP.....	57
Slika 46.	Prikaz lošeg očitavanja naprezanja na točki 1.5.2, longitudinalno DCP .....	58
Slika 47.	Prikaz dobrog očitavanja naprezanja na točki 1.8.2, longitudinalno DCP.....	59
Slika 48.	Usporedba $\sigma$ (x) naprezanja između prve i četvrte ploče .....	60
Slika 49.	Usporedba $\tau_{xy}$ naprezanja između prve i četvrte ploče.....	61
Slika 50.	Usporedba $\sigma$ (x) naprezanja na četvrtoj ploči.....	62



**POPIS TABLICA**

Tablica 1. Fizikalna i mehanička svojstva aluminija [2] .....	2
Tablica 2. Podjela i osnovne značajke gnječanih aluminijevih legura [2]. .....	9
Tablica 3. Temperatura likvidusa te koeficijent toplinske vodljivosti [4] .....	13
Tablica 4. Procesni parametri pokusa [7] .....	31
Tablica 5. Prikaz kemijskog sastava osnovnog i dodatnog materijala [9] .....	34
Tablica 6. Mehanička svojstva 6082-T6 [9].....	34
Tablica 7. Parametri zavarivanja za normalni pulsni i dvostruko pulsni MIG postupak [7] .	36
Tablica 8. Odnos između $2\theta$ kuta i njima pridruženih refleksijskih ravnina aluminija [11].	39
Tablica 9. Prikaz rezultata zaostalih naprezanja [14] .....	43
Tablica 10. Prikaz kemijskih i mehaničkih svojstava osnovnog i dodatnog materijala [15,16] .....	44
Tablica 11. Prikaz parametra zavarivanja .....	45
Tablica 12. Prikaz dobivenih rezultata zaostalih naprezanja za ploču 4, smjer mjerenja: longitudinalan .....	54
Tablica 13. Prikaz dobivenih rezultata zaostalih naprezanja za ploču 4, smjer mjerenja: transverzalan.....	54
Tablica 14. Prikaz dobivenih rezultata zaostalih naprezanja za ploču 1, smjer mjerenja: longitudinalan .....	55
Tablica 15. Prikaz dobivenih rezultata zaostalih naprezanja za ploču 1, smjer mjerenja: longitudinalan .....	56
Tablica 16. Dimenzije zavara uzoraka .....	65
Tablica 17. Iznos izmjerenih tvrdoća uzoraka.....	66
Tablica 18. Usporedba vlačne čvrstoće legura .....	67

**POPIS OZNAKA**

<b>Oznaka</b>	<b>Jedinica</b>	<b>Opis</b>
$f_d$	Hz	Frekvencija duplog pulsa
$G / \rho$	$\frac{\text{m}/\Omega\text{mm}^2}{\text{kg}/\text{m}^3}$	Specifična električna vodljivost- omjer električne vodljivosti i gustoće materijala
$R_m$	N/mm <sup>2</sup> ili MPa	Vlačna čvrstoća nekog materijala
$R_m / \rho$	MPa / (kg/m <sup>3</sup> )	Specifična gustoća- omjer vlačne čvrstoće i gustoće materijala
$R_{p0,2}$	N/mm <sup>2</sup> ili MPa	Konvencionalna granica razvlačenja kod 0,2% elongacije materijala
$S_i$	MPa	Opterećenje
$t$	°C	Temperatura u Celzijevim stupnjevima
$v_c$	cm/min	Brzina zavarivanja
$\sigma$	N/mm <sup>2</sup> ili MPa	naprezanje
$I$	A	Amper
$U$	V	Volt
$Q$	KJ/cm	Toplina

---

**POPIS KRATICA**

<b>Kratika</b>	<b>Opis</b>
ZUT	Zona utjecaja topline
ACDP	<i>Alternating current double pulse</i> , izmjenična struja dupli puls način rada
DCP	<i>Direct current pulse</i> , istosmjerna struja pulsni način rada
HCl	Klorovodična kiselina
HF	Fluorovodična kiselina
MIG/MAG	Metal inert gas/metal active gas
$n_i$	broj ciklusa na opterećenju $S_i$
$N_i$	Prosječan broj ciklusa do pojave pukotine na $k$ opterećenju
rpm	revolucija po minuti
TIG	<i>Tungsten inert gas</i> , proces zavarivanja volframovom elektrodom u zaštiti inertnog plina
W	Indeks za kvantifikaciju kvara.
$\alpha$	alfa
$\beta$	beta
$\Psi$	psi
$\eta$	korisnost sustava

---

**SAŽETAK**

U ovom radu opisane su moderne tehnologije zavarivanja aluminijskih legura s posebnim naglaskom na MIG postupak zavarivanja. Predložene su modificirane tehnologije s obzirom na postojeće impulsno MIG zavarivanje te njihove prednosti i nedostaci. Opisana su zaostala naprezanja koja se javljaju kao posljedica zavarivanja te je prikazan matematički model na kojem su bazirana mjerenja zaostalih naprezanja korištenjem rendgenske difrakcije.

U eksperimentalnom djelu rada sučeljeno su zavarene aluminijske legure pete klase u jednom prolazu te su naknadno provedena razorna i nerazorna ispitivanja. Od nerazornih ispitivanja provedeno je ispitivanje penetrantima te rendgenska difrakcija za ispitivanja zaostalih naprezanja dok su se razorna ispitivanja sastojala od makroanalize te mjerenja tvrdoće. U komparativnoj analizi kvantificiran je utjecaj parametra na pad čvrstoće kao i aspekte produktivnosti između konvencionalne i modificirane MIG tehnologije. Također je dana ovisnost između tvrdoće i čvrstoće u području zavara. Na posljepku zaključene su prednosti i nedostaci modificirane MIG tehnologije nad konvencionlnom.

Ključne riječi:; MIG zavarivanje; DP; DCP, ACDP, aluminijska legura serije 5000; rendgenska difrakcija

---

**SUMMARY**

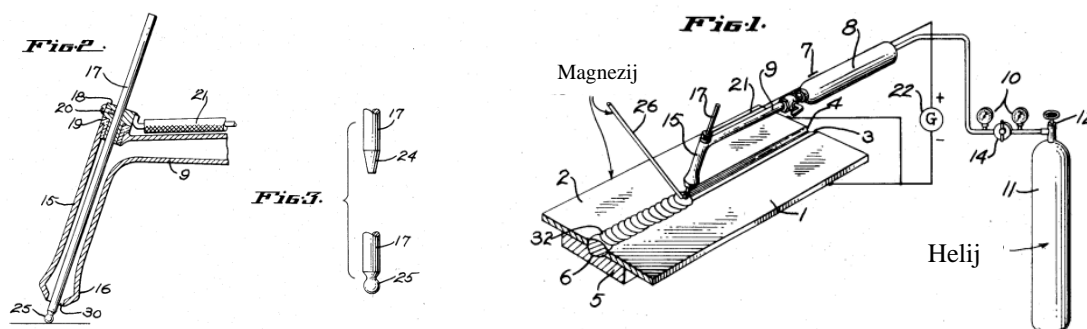
In this paper, modern welding technologies of aluminum alloys are described, with special emphasis on the MIG welding process. Advanced technologies are proposed with regard to existing pulsed MIG technology. Residual stress that occur after welding are described, and a model of how their measurements work is given..

In the experimental part of the paper, fifth grade aluminum alloys were butt-welded in one pass, and subsequently destructive and non-destructive tests were carried out. In the comparative analysis the influence of the parameter on the drop in hardness as well as aspects of productivity between conventional and modified MIG technology was quantified.

Keywords: welding; ACWP; DP; DCP, ACDP, series 5000 aluminum alloy; X-ray diffraction

## 1. UVOD

Aluminij kao konstrukcijski materijal ušao je u upotrebu početkom prošlog stoljeća te se njegovo spajanje odvijalo na različite načine. Najzastupljeniji način zavarivanja bio je putem plinskog zavarivanja s kombinacijom plinova kisik i acetilen ili kisik i vodik. Zbog velike zone utjecaja topline (ZUT), potrebe za naknadnim čišćenjem te primjenjivost postupka na malom broju legura aluminija došlo je do potrebe za novim postupkom spajanja aluminija i njegovih legura. Početkom četrdesetih godina prošlog stoljeća patentiran je postupak zavarivanja pod imenom „pištolj za zavarivanje“. U sklopu firme (Northrop zrakoplovi) proces je nazvan *Heliarc*. Northrop firma bavila se proizvodnjom zrakoplova te je težila upotrebi lakših metala kao i njihovih legura. Materijal koji se najviše koristio za izradu letjelica bio je magnezij te je bilo potrebno osmisliti bolji način spajanja magnezijских spojeva. *Heliarc* sustav sastojao se od izvora struje, zaštitnog plina, te pištolja za zavarivanje. Korišten je inertan plin helij te elektroda od volframa preko koje bi se uspostavljao električni luk. Posebno dizajnirani oblik vrha pištolja osiguravao je konstantno laminarno strujanje zaštitnog plina. U slučaju turbulentno strujanje zaštitnog plina prilikom izlazaka iz mlaznice može doći do uvlačenja okolnog zraka u smjesu i samim time kontaminirati zavar [1].



**Slika 1. Prikaz patenta: Pištolj za zavarivanje [1]**

Izum prikazan na slici 1 je preteča današnjeg TIG sustava zavarivanja, koji se koristi za zavarivanje različitih plemenitih metala i legura kao što su nehrđajući čelik, magnezij, visoko legirani čelik te aluminij s brojnim legirnim inačicama.

## 2. ALUMINIJ

Aluminij se u prirodi može pronaći kao rudača u obliku oksida ili smjesa oksida iz kojih se može izdvojiti vrlo skupim elektrolitičkim postupkom. Najčešći postupak dobivanja aluminija iz rudače je zagrijavanjem u prisutnošću jeftinog redukcijskog sredstva (ugljik ali u obliku koksa), dobiveni metal se daljnje rafinira kako bi se većina nečistoća izdvojila putem oksidacije. Zbog instantne reakcije aluminija s kisikom proces redukcije uobičajenim kemijskim putem nije moguć. Svi ostali elementi koji se nalaze u sirovini lakše reduciraju od aluminija te je bilo koje drugo redukcijsko sredstvo pre skupo za korištenje. Početak intenzivnijeg korištenja aluminija obilježili su C.M. Hall i P. Héroult 1886. godine kada su otkrili jeftiniji način dobivanja aluminija. Početni problem bio je u vrlo visokoj točki tališta glinice ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) što je riješeno dodavanjem kriolita ( $\text{Na}_3\text{AlF}_6$ ). Dobivena smjesa tali se na  $950\text{ }^\circ\text{C}$  te se potom provodi elektrolitička redukcija na katodnom dnu ili na samoj katodi. Kako bi se poboljšala mehanička svojstva uvedeno je precipitacijsko očvršćivanje [2]. U tablici 1 prikazanu su fizikalna i mehanička svojstva aluminija.

**Tablica 1. Fizikalna i mehanička svojstva aluminija [2]**

Gustoća	$\text{Kg/m}^3$	2700
Talište	$^\circ\text{C}$	660
Modul elastičnosti	$\text{N/mm}^2$ ili MPa	69000
Toplinska rastezljivost	$10^{-6}/\text{K}$	23,8
Električna vodljivost	$\text{m}/\Omega\text{mm}^2$	36-37,8
Granica razvlačenja	$\text{N/mm}^2$ ili MPa	20-120
Vlačna čvrstoća*	$\text{N/mm}^2$ ili MPa	40-180
Istezljivost*	%	50-4

\*ovisi o stanju

Aluminij sa svojim legurama ističe se zbog nekoliko povoljnih karakteristika kao što su povoljna specifična gustoća ( $R_m/\rho$ ), dobra mehanička svojstva, najpovoljniji iznos specifične električne vodljivost ( $G/\rho$ ) te značajna korozijska postojanost [2].

## 2.1 Aluminijske legure

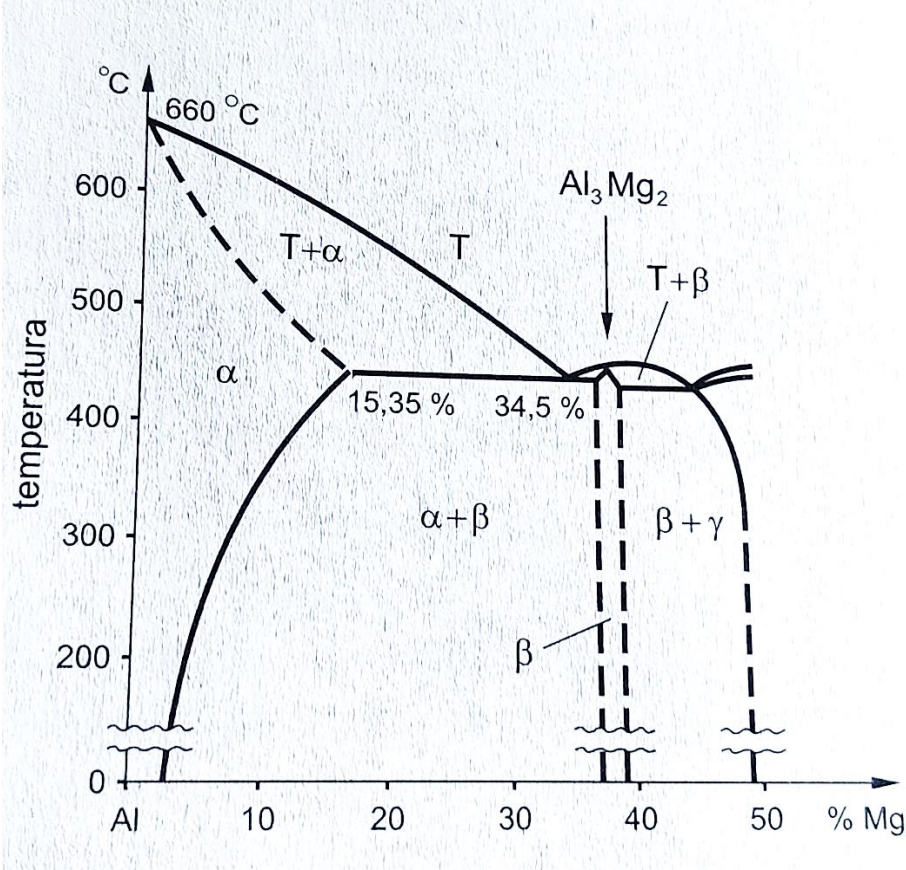
Legiranje čistog aluminijsa se provodi u svrhu poboljšanja mehaničkih svojstava, ponajviše vlačne čvrstoće i tvrdoće te nakon toga krutosti, istežljivosti te ponekada žilavosti i livljivosti. Najzastupljeniji legirni elementi su [2]: bakar (Cu), magnezij (Mg), silicij (Si), cink (Zn), mangan (Mn).

Prilikom postupka legiranja aluminijsa dolazi do nastanka kristala mješanca u graničnom području prema aluminijsu i u polju prijelaznih faza u području sa više legirnih elemenata. Dijagrami stanja pobliže opisuju relativni odnos značajki s obzirom na udio legirnog elementa [2].

### 2.1.1. Dijagrami stanja aluminijs-magnezij

Aluminijs i magnezij tvore intermetalni spoj  $Al_3Mg_2$  ( $\beta$ ) s udjelom 37,5 % Mg u smjesi. Ta faza je tvrda i time vrlo zahtjevna prilikom oblikovanja deformiranjem dok u prisustvu korozivnog medija  $\beta$  faza prva prelazi u otopinu zbog velikog udjela magnezija. Eutektičke legure sa 34,5 % Mg imaju vrlo nisku temperaturu skrućivanja u iznosu od 451 °C te nisu uporabljive za lijevanje jer sadrže skoro 80 % tvrde i krhke faze  $Al_3Mg_2$ . Zbog toga optimalan udio Mg u Al-Mg leguri je ispod 15% dok je u praksi i dosta manji. Maksimalna topivost magnezija u aluminijsu iznosi 15,3 % na eutektičkoj temperaturi te se zbog toga lijevane legure uzimaju ponajviše iz područja  $\alpha$ -faze. Pojava koja se javlja kod legura s više od 7 % Mg je ta da dolazi do nastajanja precipitata  $Al_3Mg_2$  na granicama zrna koje kao posljedicu ima nastajanje interkristalne korozije. Ovaj oblik korozije je moguće izbjeći ako se primjeni rastvorno žarenje te potom gašenje i ponovno žarenje na nižoj temperaturi kako bi se postiglo ravnomjerno izlučivanje  $\beta$ -faze u mikrostrukтури. Takva legura više nije podložna interkristalnoj koroziji [2]. Detaljniji prikaz stanja Al-Mg prikazan je na slici 2.

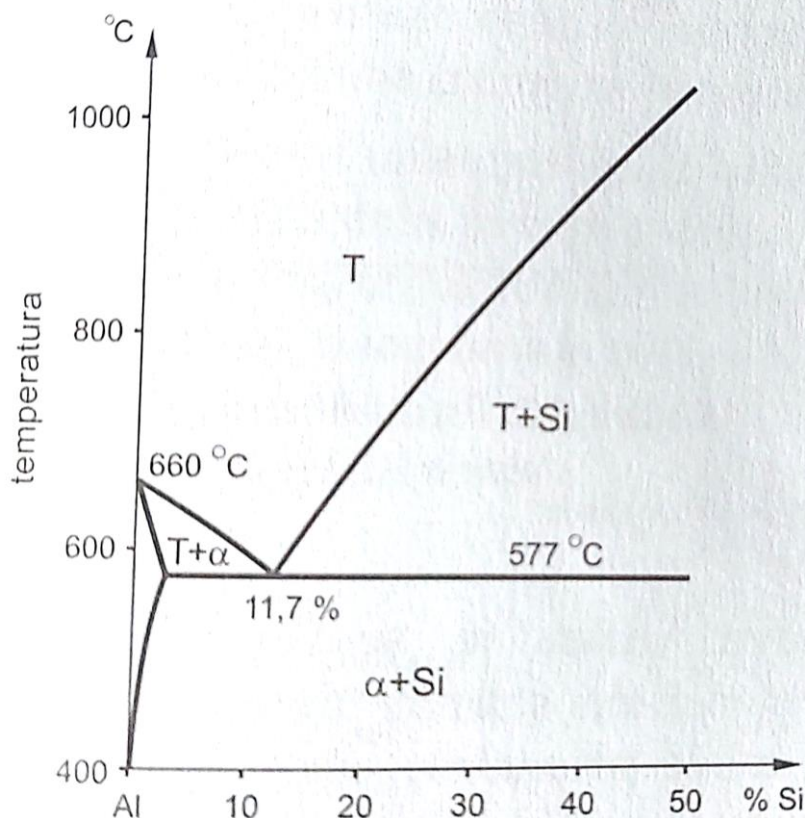




Slika 2. Dijagram stanja Al-Mg [2]

### 2.1.2. Dijagrami stanja aluminij-silicij

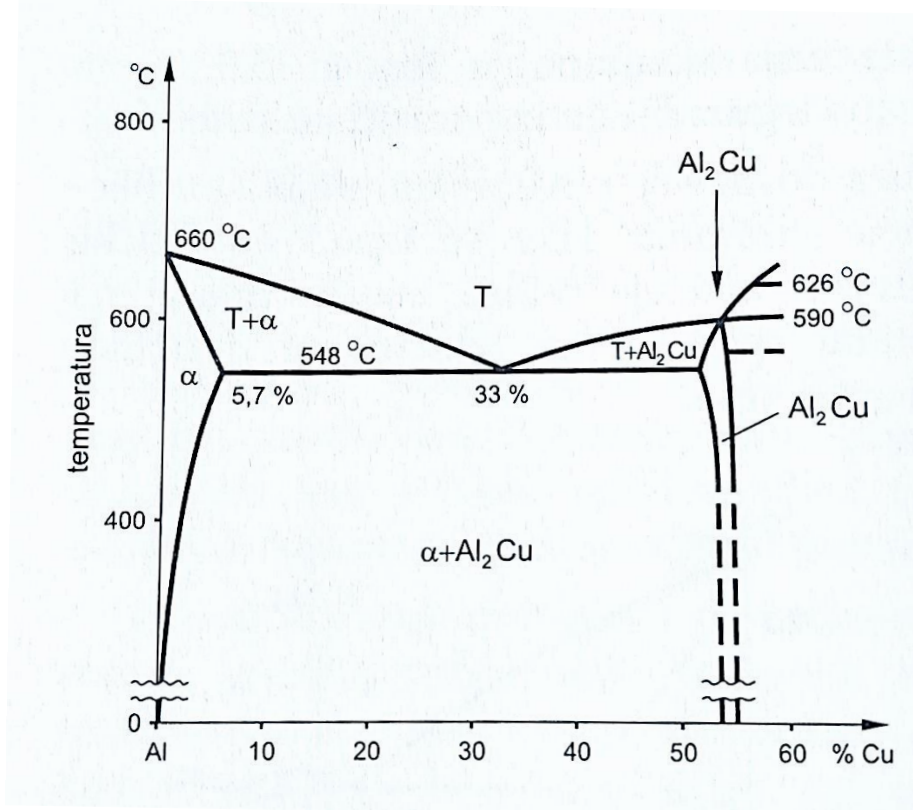
Na slici 3 vidljivo je da na temperaturi eutektika od 577 °C sa 11,7 % Si, na toj temperaturi je u kristalima mješancima ( $\alpha$ ) otapa 1,65 % Si. Na temperaturi od 300 °C je otopljeno svega 0,07 % Si iz toga se može zaključiti da je eutektik sastavljen 90 % od kristala mješanca aluminija a ostalo silicija. Svojstva pretežno ovise o žilavim mješancima aluminija, zbog toga ova legura je povoljna za lijevanje. Eutektička svojstva osiguravaju dobru livljivost te popunjavanje rupa u kalupu [2]. Detaljniji prikaz stanja Al-Si stanja prikazan je na slici 3.



Slika 3. Dijagram stanja Al-Si [2]

### 2.1.3. Dijagrami stanja aluminij-bakar

Prilikom legiranja aluminija s bakrom u iznosu od 54 % Cu dolazi do nastajanja intermetalnog spoja  $\text{Al}_2\text{Cu}$  te su takvi spojevi tvrdi, krhki te nepoželjni u tehničkim legurama. Kao što je vidljivo na slici 4 sve legure s više od 5,7 % Cu sadržavat će navedenu fazu. Zbog širokog polja skrućivanja, tehničke legure sadrže oko 4,5 % Cu u svojim legurama što je manje od maksimalnog topljivosti bakra u leguri u iznosu od 5,7 % Cu na eutektičkoj temperaturi. Bolja topivost se osigurava sniženjem temperature na 300 °C, bakar koji nije rastaljen precipitira u obliku spoja  $\text{Al}_2\text{Cu}$  te je to temelj za toplinsko očvršnuće aluminijevih legura. Najviša čvrstoća se postiže u sustavima koji imaju iste mogućnosti precipitacijskog očvršnuća. Tu su kombinacije aluminij-bakar-magnezij i aluminij-cink-magnezij kod kojeg se javlja intermetalni spoj  $\text{MgZn}_2$ , na bazi ova tri sustava razvijen je niz tehničkih precipitacijskih očvrstljivih legura. Detaljan prikaz dijagrama stanja nalazi se na slici 3 [2].



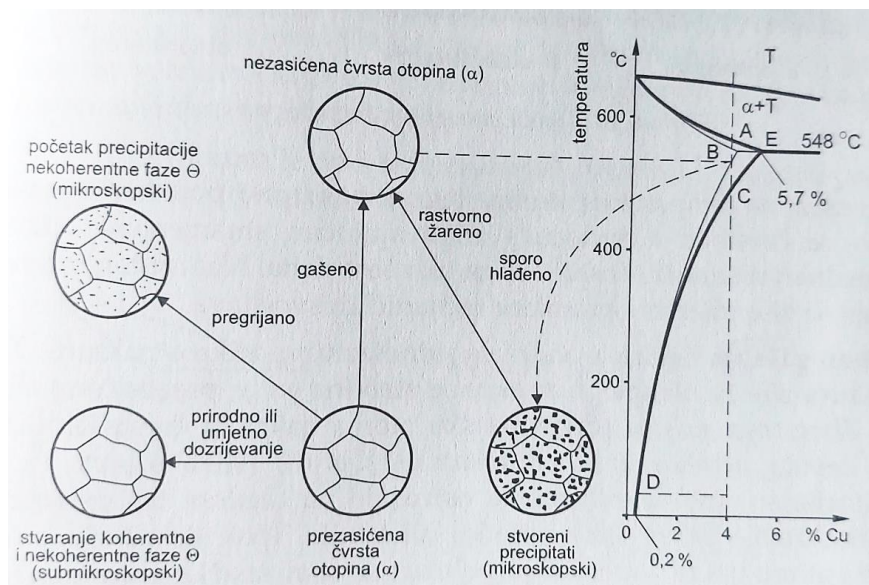
Slika 4. Dijagram stanja Al-Cu [2]

## 2.2 Precipitacijsko očvrnuće aluminijevih legura

Kada bi se AL - Cu legura gasila u vodi s temperature od 500 °C došlo bi do očvrnuća nakon stajanja na temperaturi okoline u vremenskom intervalu od jednog tjedna. Navedena metoda patentirana je pod nazivom „dural“ te prva veća upotreba bila je na konstrukcijske dijelove zračnog broda „Graf von Zeppelin“ [2].

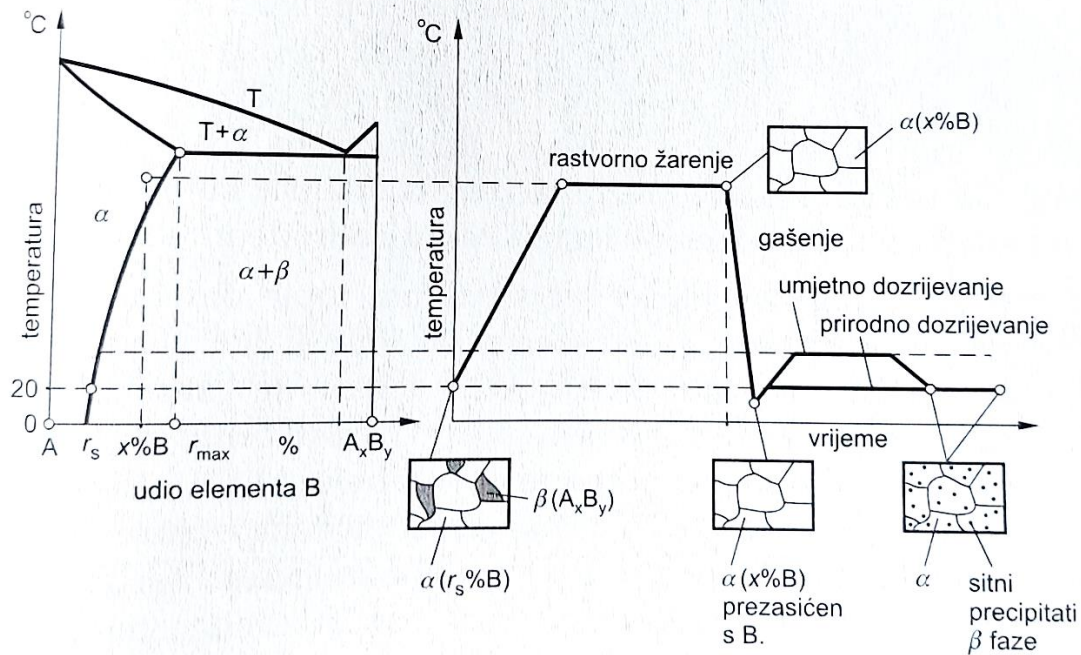
Postupak očvrnuća legure na sobnoj temperaturi naziva se prirodno dozrijevanje, postupak se može poboljšati u svrhu dobivanja većeg iznosa čvrstoće tako da se gašena legura zagrijava do temperature od 180 °C. Rezultat povećane tvrdoće i čvrstoće je povezan sa stvaranjem koherentnih precipitata unutar rešetke osnovnog kristala mješanca. Ova pojava se može pobliže opisati na primjeru Al-Cu legure s 4 %Cu. Na slici 5 prikazano je hlađenje taline ispod točke A (570 °C) te nastaje čvrsta otopina sastavljena od  $\alpha$  -kristala mješanca. Ako se leguru nastavi hladiti do temperature okoline doći će do nastajanja nekoherentnog precipitata Al<sub>2</sub>Cu ( $\Theta$ ). Navedeni precipitat započet će formiranje od točke C pa sve do toče D. Zbog velikih čestica Al<sub>2</sub>Cu na granicama zrna ovaj tip legure je vrlo krhak i loših mehaničkih svojstava. Ako

se navedena legura ponovno zagrijava do točke C precipitat se potpuno rastapa te se dolazi do homogene  $\alpha$  otopine. Ako se otopina gasi, bakar će se zadržati u otopini i time ona postaje prezasićena. Otopina je nešto tvrđa, čvršća i duktilnija zbog većeg postotka bakra u otopini bez krhkih precipitata  $\text{Al}_2\text{Cu}$  na granicama zrna. Graf precipitacijskog očvršćivanja prikazan je na slici 5 [2].



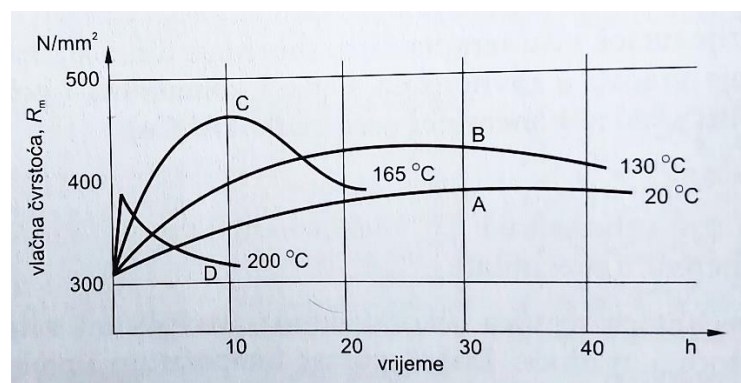
**Slika 5. Precipitacijsko očvršćivanje Al-Cu legure sa 4% Cu [2]**

Povećanje mehaničkih svojstva dobivenim prirodnim dozrijevanjem moguće je ostvariti zagrijavanjem legure na temperaturu oko 200 °C u kraćem vremenskom periodu te se takav postupak naziva umjetno dozrijevanje. Na slici prikazan je opći temperaturno vremenski dijagram postupka precipitacijskog očvršćivanja Al-legura [2].



**Slika 6. Prikaz postupka precipitacijskog očvršćivanja za Al [2]**

Kako bi se smanjilo ukupno vrijeme toplinske obrade Al legura, koristi se umjetno dozrijevanje. Na slici prikazan je odnos između vlačne čvrstoće i vremena. Ako je legura podvrgnuta prirodnom dozrijevanju vlačna čvrstoća raste vrlo sporo i doseže maksimum od 380 MPa nakon 100 sati (krivulja A). Optimalno vrijeme i temperatura koja daju najviše iznose vlačne čvrstoće su 10 sati na 165 °C te daje vlačnu čvrstoću u iznosu oko 470 MPa. Produljivanjem vremena, dolazi do pojave veće količine precipitata  $Al_2Cu$  te do smanjenja vrijednosti čvrstoće i tvrdoće (krivulja C). Obrada na 200 °C stvara precipitate pre brzo pa ne dolazi o povišenja tvrdoće (krivulja D). Graf prikazan na slici razlikovat će se od legure do legure ovisno o sastavu te mora biti kontroliran kako bi se postigle optimalne željene vrijednosti [2].



**Slika 7. Ovisnost temperature i vremena dozrijevanja o vlačnoj čvrstoći [2]**

### 2.3 Gnječene aluminijske legure

Tip aluminija koji je korišten u eksperimentalnom djelu ovog rada dobiven je putem gnječena. Glavna svojstva prema kojima se razlikuju aluminijske gnječene legure su mogućnost precipitacijskog očvršćivanja i kemijski sastav. Obje podjele prikazane su u tablici 2. Legure koje su podlegnute hladnim deformiranjem trebaju imati odgovarajuća mehanička svojstva kao što su čvrstoća i krutost u hladnom stanju. Otpornost na koroziju je također jedan od bitnih zahtjeva. Legure koje u svojem sastavu sadrže veću količinu magnezija odlikuju se odličnom postojanošću u morskoj atmosferi te se zbog toga koriste za brodsku nadgradnju. Krajnja željena mehanička svojstva se postižu blagim gnječanjem u konačnoj fazi oblikovanja deformiranjem. Iz toga im prolazi i glavna mana, nemogućnost mijenjanja mehaničkih svojstva materijala jednom kada je proizvod doveden na konačne dimenzije [2].

Kada se traži povoljan omjer čvrstoće i gustoće koriste se legure koje su očvrstnute precipitacijom legiranih elementima. Najzastupljeniji su bakar, magnezij, cink i silicij. Navedeni elementi s aluminijem stvaraju intermetalne spojeve zbog kojih dolazi do očvrstnuća legure, ovakvo poboljšanje legure je jače od samog deformiranja u hladnom stanju. Ostali kemijski elementi koji se također koriste u svrhu poboljšanja svojstva su: titan za sitniju strukturu zrna, olovo i bizmut poboljšavaju rezljivost te krom koji pospješuje proces precipitacijskog očvrstnuća [2]. Sumirana podjela gnječanih legura s odgovarajućim svojstvima prikazana je u tablici 2.

**Tablica 2. Podjela i osnovne značajke gnječanih aluminijskih legura [2].**

Vrsta legure	Način očvrstnuća	$R_m$ / MPa	Oznaka serije
1. Al-Mn	deformiranje u hladnom stanju	200...350	3xxx
2. Al-Mg			5xxx
3. Al-Mg-Mn			5xxx
4. Al-Mg-Si	precipitacijom	~ 330	6xxx
5. Al-Cu-Mg		~ 450	2xxx
6. Al-Zn-Mg		~ 400	7xxx
7. Al-Zn-Mg-Cu		~ 550	7xxx
8. Al-Li-Cu-Mg		~ 500	8xxx

**Al-Mg-Si** legura poznata pod imenom „antikorodal“ odlikuje se mehaničkim svojstvima  $R_m < 330$  MPa te  $R_{p0,2}$  oko 240 MPa dobiveno umjetnim dozrijevanjem ili oko 110 MPa prirodnim dozrijevanjem. Ove legure su otporne na koroziju, pogodne za zavarivanje anodizaciju te poliranje. Zbog velikog omjera čvrstoće i električne vodljivosti koristi se vodič [2].

**Al-Cu-Mg** legure poznate pod nazivom („dural“) postižu vrijednosti mehaničkih svojstva  $R_{p0,2}$  do 290 MPa te  $R_m$  do 450 MPa. Iznos mehaničkih karakteristika ovisi o načinu dozrijevanja nakon gašenja s temperature rastvornog žarenja. Legirni element magnezij ubrzava proces očvrnuća stvaranjem intermetalnih spojeva dok bakar blago snižava otpornost prema koroziji. Ta pojava se negira s provedbom procesa platiranja čistim aluminijem ili neke legure otpornim na koroziju [2].

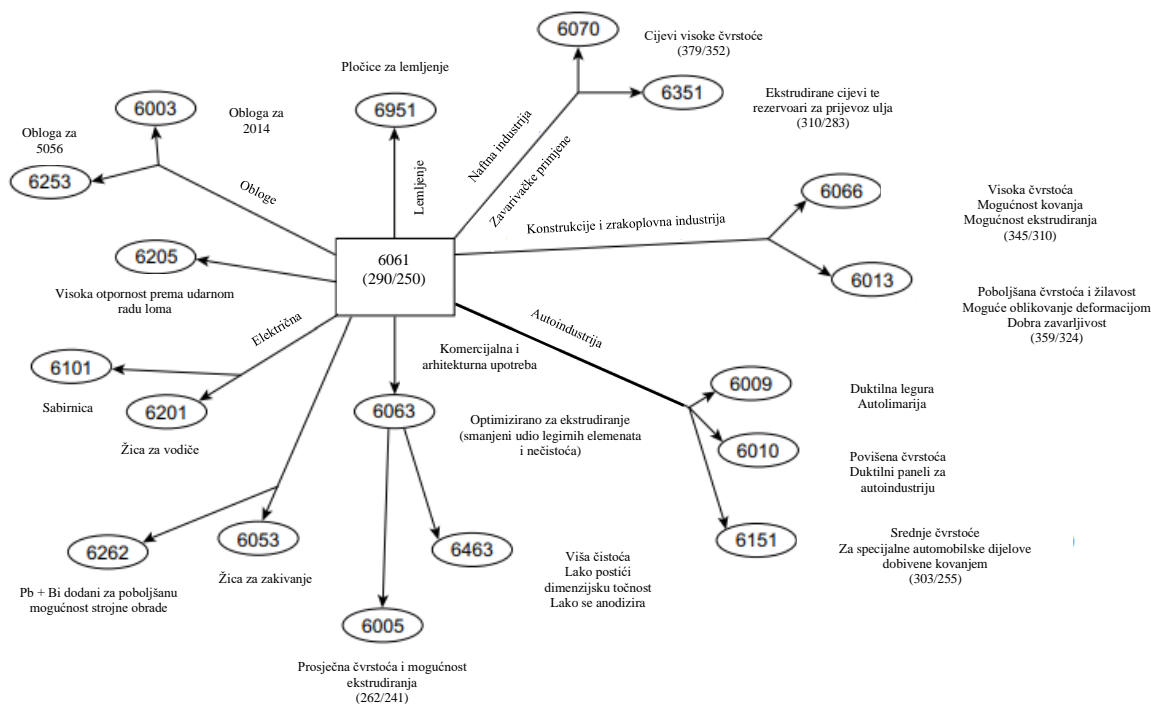
**Al-Zn-Mg** ako se razmatraju sa strane mehaničkih karakteristika ne dosežu ista svojstva kao i legure 5. klase ali su znatno otporniji na kemijske utjecaje. Uz dobru zavarljivost predstavljaju dobar omjer otpornosti prema pojavi korozije te mehaničkih karakteristika. Najčešće korištena legura u industriji je AlZn4Mg1 [2].

## 2.4 Zavarljivost 5. i 6. aluminijske legure

Peta kategorija aluminija odlikuje se sa srednje jakim mehaničkim svojstvima sa mogućnosti podvrgavanja postupku kaljenja. Glavni legirni element je magnezij te je mnogo efektivniji od mangana kao očvršćivač, 0,8% Mg jednako je 1,25 % Mn. Potrebno je postaviti granicu korištenja za legure sa oko 3,5% Mg na temperaturama iznad 65 °C kako bi se izbjegla mogućnost nastajanja pukotine usred eksploatacije [3]. Na slici 7 prikazan je odnos legura pete klase.







Slika 9. Odnos aluminijevih legura serije 6000 [3]

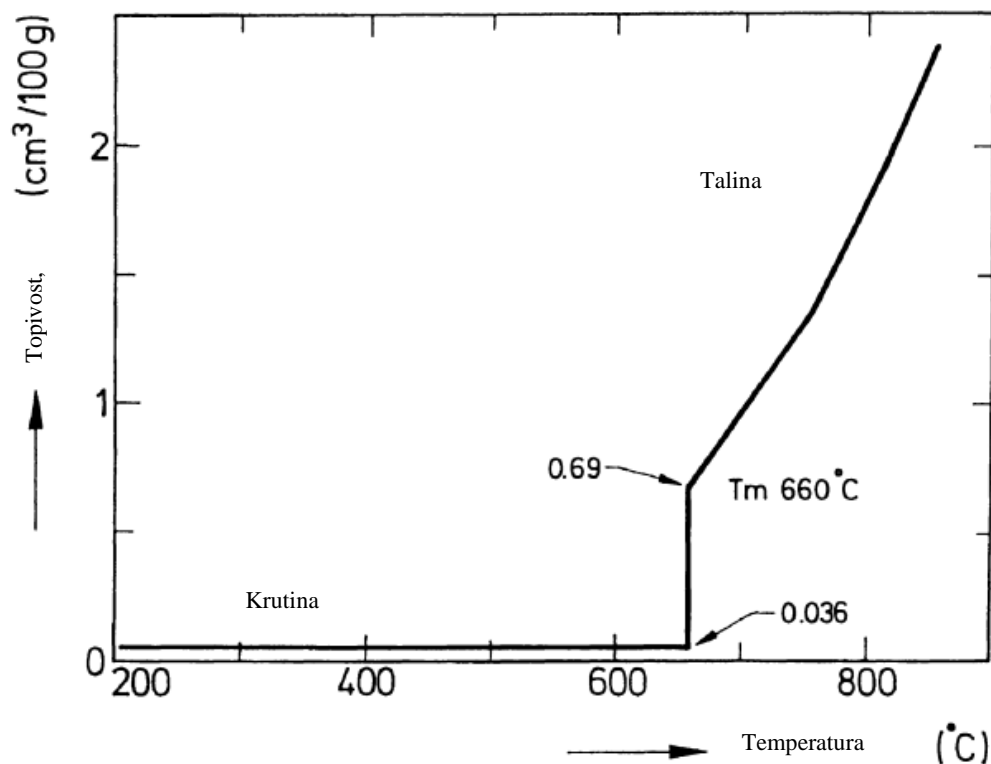
Na slici 9. brojevi u zagradi označuju vrijednost ( $R_m/R_c$ ) u MPa

Zbog legiranih elemenata silicija i magnezija legure aluminija šeste serije moguće je podvrgnuti ekstrudiranju. Takve legure je moguće kupiti na tržištu u različitim oblicima. Njihova upotreba prikazana je na slici 9 legura 6061 je jedna od najrasprostranjenijih legura šeste serije sa dobrom oblikovljivošću te zavarljivošću [3].

#### 2.4.1 Problem topljivosti vodika

Jedan od većih problema prilikom zavarivanja aluminijevih legura je poroznost prilikom solidifikacije uzrokovano vodikovim uključcima. Poroznost je uzrokovana zbog velike razlike topivost vodika u skrućenom aluminiju s obzirom na talinu. Ovisnost je pobliže prikazana na slici 10. Poroznost će doći do izražaja kada rastopljeni vodik ne može pobjeći iz zavara tijekom solidifikacije. Povećanjem posmične brzine zavarivanja povećava se ovaj efekt. Što se tiče ostalih legura razlika u topivosti vodika je mala pa zavarivanje različitih legura daje iste probleme kao i zavarivanje istovrsnih. Na slici 10 prikazan je graf ovisnosti topivosti vodika u

čistom aluminiju dok je u tablici 3 dan prikaz aluminijevih legura pete i šeste serije sa pripadajućim temperaturama likvidusa kao i koeficijentom toplinske vodljivost [4].



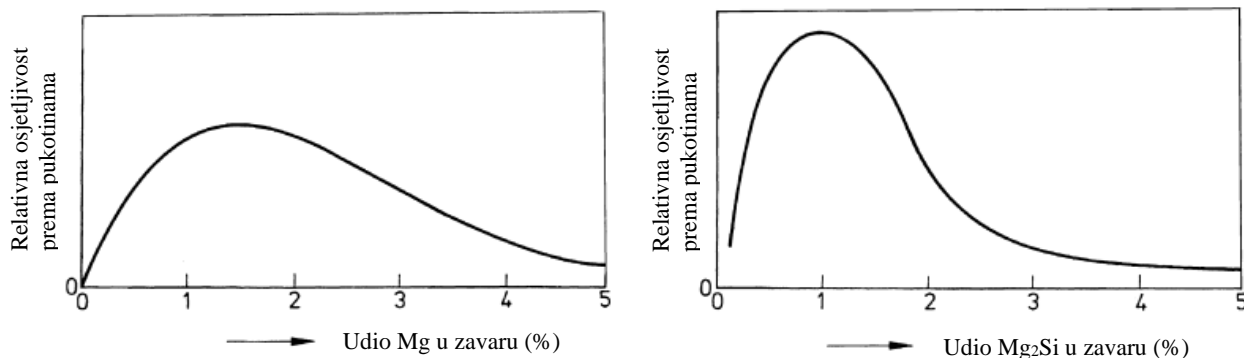
Slika 10. Topljivost vodika u nelegiranom aluminiju u funkciji vremena [4]

Tablica 3. Temperatura likvidusa te koeficijent toplinske vodljivosti [4]

Kemijski sastav legure	Temperatura likvidusa (°C)	Koeficijent toplinske vodljivosti, W/(m × k)
AA5083 O (AlMg4.5Mn)	638	105-120
AA5754 H32 (AlMg3)	645	130-140
AA6082 T6(AlMgSi1)	649	150-170
AA6060 T6(AlMgSi0.5)	652	180

Brojne legure aluminija podložne su toplim pukotinama u području ZUT-a i u području zavara. Sklonost pukotinama najviše ovisi o kemijskom sastavu. Legure šeste klase su manje podložne pukotinama nego legure pete klase, ta ovisnost prikazana je na slici 11. Pravilan odabir dodatnog materijala može smanjiti vjerojatnost nastanka pukotina te zbog toga Al-Mg

legure su redovito zavarivane sa dodatnim materijalom ER5356 (ALMg5). Prilikom zavarivanja različitih legura potrebno je voditi brigu o toplim pukotinama [4]. Slika 11 prikazuje usporedbu dodanog legirnog elementa i tendenciju tople pukotine.



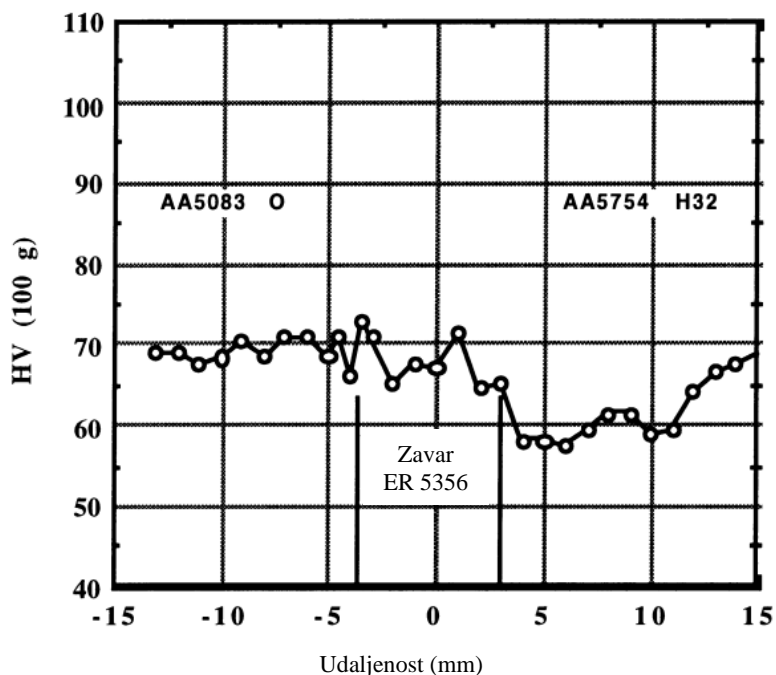
**Slika 11. Ovisnost legirnih elemenata i osjetljivost prema pukotinama [4]**

Primjer poroznosti može se primijetiti na primjeru zavarivanja dviju različitih aluminijskih legura. Zbog različitog iznosa koeficijenta toplinske vodljivosti taljenje obje strane zavara je otežano. Slika 12 prikazuje presjek zavara materijala AA5083-AA6060 sa dodatnim materijalom ER4043. Zbog različitog koeficijenta toplinske vodljivosti legura AA6060 se vrlo sporo talila s obzirom na ostale dijelove zavara [4]. Također se mogu primijetiti pore u korijenu zavara kao i po njegovoj središnjici.



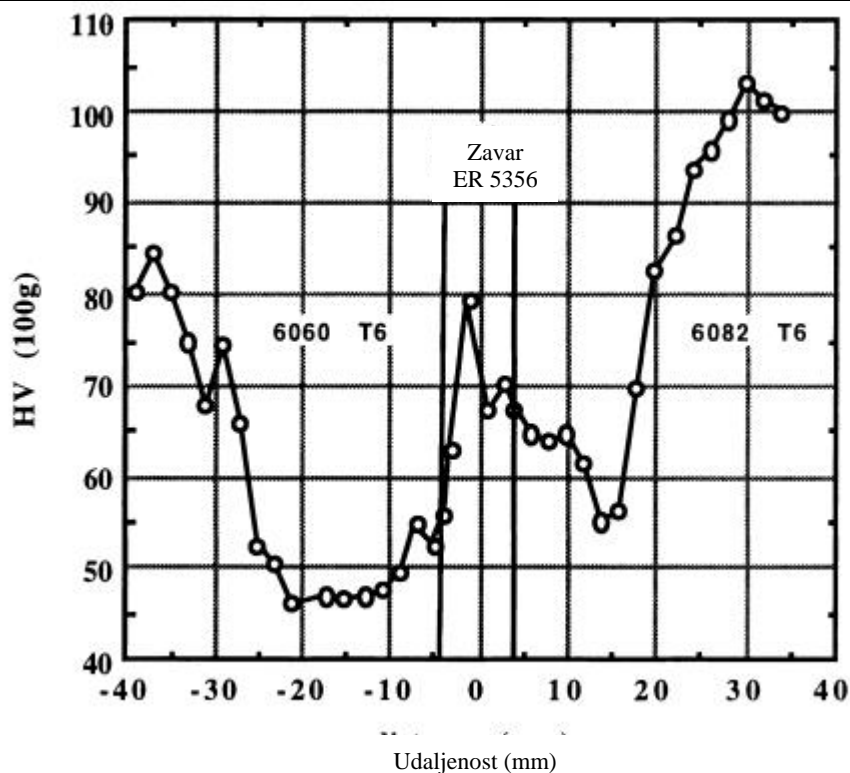
**Slika 12. Poprečni presjek zavara kombinacije materijala: AA5083 (desno) i AA6060 (lijevo), dodatni materijal ER4043. debljina ploče 5 mm [4].**

Navedene gnječene legure nakon postupka zavarivanja gube na mehaničkim svojstvima u području zavara. Aluminijske legure podvrgnute temperaturi od 350 °C na nekoliko sekundi gube svoja mehanička svojstva prethodno dobivena mehaničkim očvrnućem. Pad tvrdoće može se primijetiti na primjeru zavarivanja legura AA5083 i AA5754 H32 na limovima debljine 3mm [4].



Slika 13. Profil tvrdoće materijala AA5083 i AA5754 [4]

Na slici 13 prikazan je pad tvrdoće u području ZUT-a 5 mm od središnjice zavara. Dodatni materijal koji je korišten je legura ER 5356 s udjelom Mg 5%. Zbog visokog udjela magnezija u dodatnom materijalu tvrdoća zavara ostaje relativno ista kao i osnovni materijal AA5083. Kod legure koje su precipitacijski očvrsnute također se može zamijetiti pad mehaničkih karakteristika u području ZUT-a. Kao primjer se može uzeti legure AA6082 T6 i AA6060 T6. Do pada u čvrstoći će doći u području ZUT-a zbog pretjeranog starenja materijala tj. pre visokog unosa topline u tom području [4] Na slici 14 prikazan je značajan pad tvrdoće na području ZUT-a legure šeste serije.



Slika 14. Profil tvrdoće materijala AA6060 i AA6082 [4]

Smanjenje čvrstoće u području ZUT-a gnječene legura pete serije iznosi  $< 10\%$  dok smanjenje čvrstoće šeste serije iznosi  $> 25\%$ . Legure šeste kategorije koje su prijašnje bile podvrgnute procesu prirodnog dozrijevanja manje su zahvaćane smanjenjem čvrstoće nego iste legure podvrgnute umjetnim dozrijevanjem [4].

#### 2.4.2 Utjecaj zaostalih naprezanja

Prilikom procesa zavarivanja dolazi do unosa značajne količine topline u područje zavara kako bi se osiguralo taljenje osnovnog i dodatnog materijala i time formiralo homogeno područje. Generalno zavari koji su kvalitetno zavareni pokazuju veću otpornost prema udarnom radu loma u odnosu na osnovni materijal. Ako postoji pukotina uzrokovana zamorom materijala ona će se propagirati samo kroz osnovni materijal. Međutim, pukotina može biti inicirana u zavaru na mjestu najvećeg koncentracijskog naprezanja uzrokovano dinamičkim opterećenjima i statičkim zaostalim naprezanjima koja se javljaju nakon procesa zavarivanja. Slika 15 prikazuje Wöhlerov dijagram s različitim izvedbama zavara aluminijskih legura. Najčešće metode utvrđivanja predviđenog vijeka trajanja su kombinacija Wöhlerov-ih

dijagrama te Minerovog pravila koje stavlja u omjer sumu ciklusa pomnoženom s iznosom opterećenja s indeksom oštećenja [5].

$$\sum_{i=1}^k \frac{n_i \times S_i}{N_i \times S_i} = C \Rightarrow \frac{\sum_{i=1}^k n_i \times S_i}{W_{kvar}} = C \quad (1)$$

Kada vrijednost faktora  $C$  dođe do iznosa 1, dolazi do predviđenog kvara. Značenje pojedinih faktora u jednadžbi (1) je detaljnije objašnjeno u [6]:

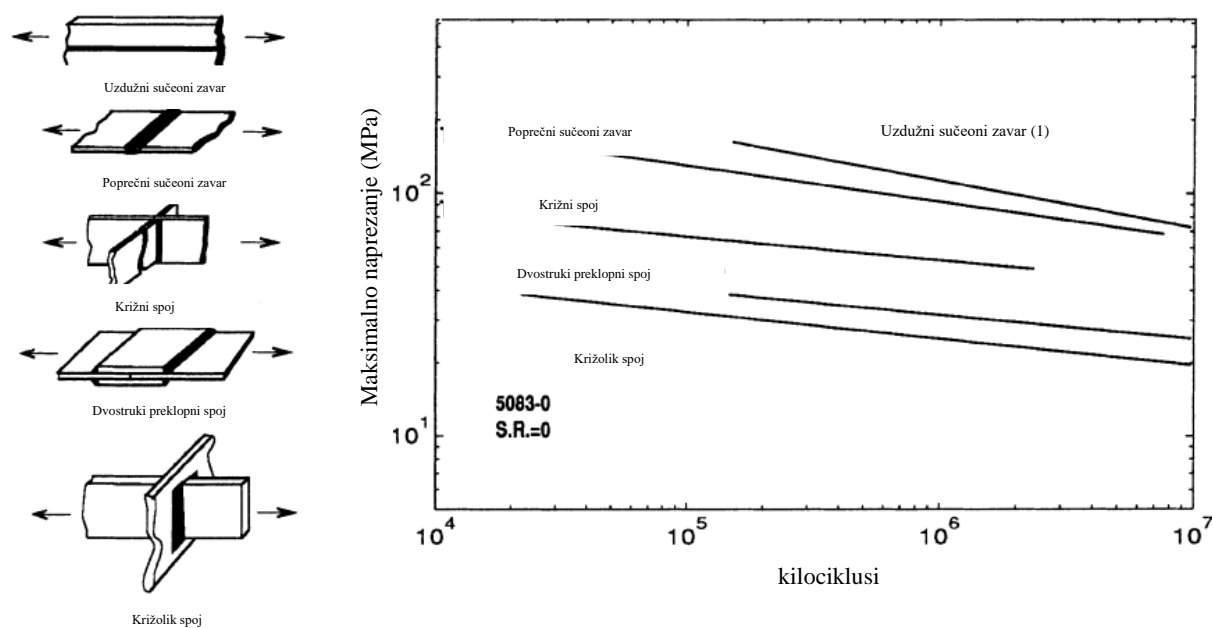
$n_i$  - broj ciklusa na opterećenju  $S_i$

$S_i$  - opterećenje

$N_i$  - prosječan broj ciklusa do pojave pukotine na  $k$  opterećenju

$W$  - indeks za kvantifikaciju kvara.

Predloženi način pronalaska trajanja životnog vijeka konstrukcija pokazao se neučinkovitim zbog predviđenog životnog vijeka zamora od 0,02 do 0,1 promatranog životnog vijeka, dok je stvarni životni vijek bio od 10 do 50 puta duži. Neujednačenost u inicijaciji pukotine određenog zavara može se pripisati varijaciji u procesu zavarivanja. Zbog toga dolazi do različitih iznosa naprezanja na određenim mjestima te nije moguće koristiti procjene vijeka trajanja zavara prije pojave pukotina [5].

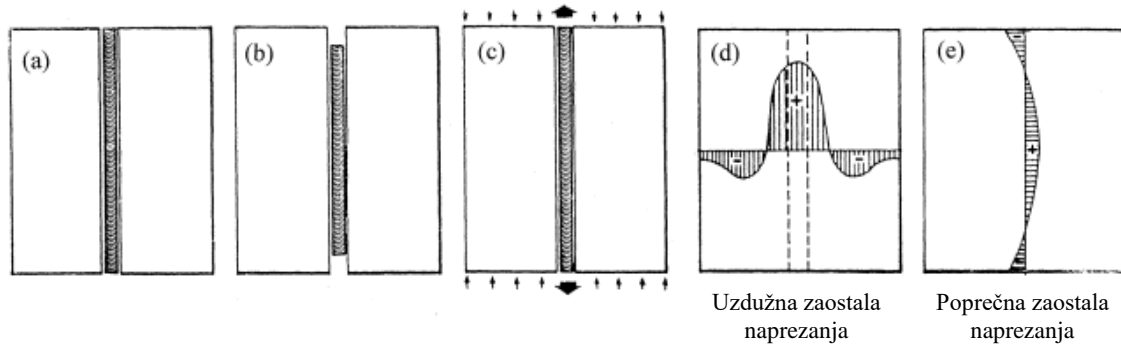


**Slika 15. Krivulja zamora materijala na različitim vrstama spojeva [5]**

U knjizi autora Gurney-a (T. R. Gurney (1979) *Fatigue of Welded Structures*, 2nd edn. Cambridge University Press, Cambridge) obuhvaćeno je preko 25 konstrukcijskih detalja zavora aluminijskih legura. Ova knjiga je indikator za razumijevanje mehanizma razaranja te nastanka pukotina u zavaru aluminijskih legura. Svaki zavareni detalj se treba uzeti kao individualni empirijski uzorak. Razlika u ponašanju materijala na umor s obzirom na različite vrste zavarenih spojeva kao što se može vidjeti na slici 15 doprinose karakteristikama zaostalog naprežanja u kombinaciji s cikličkim naprežanjem [5].

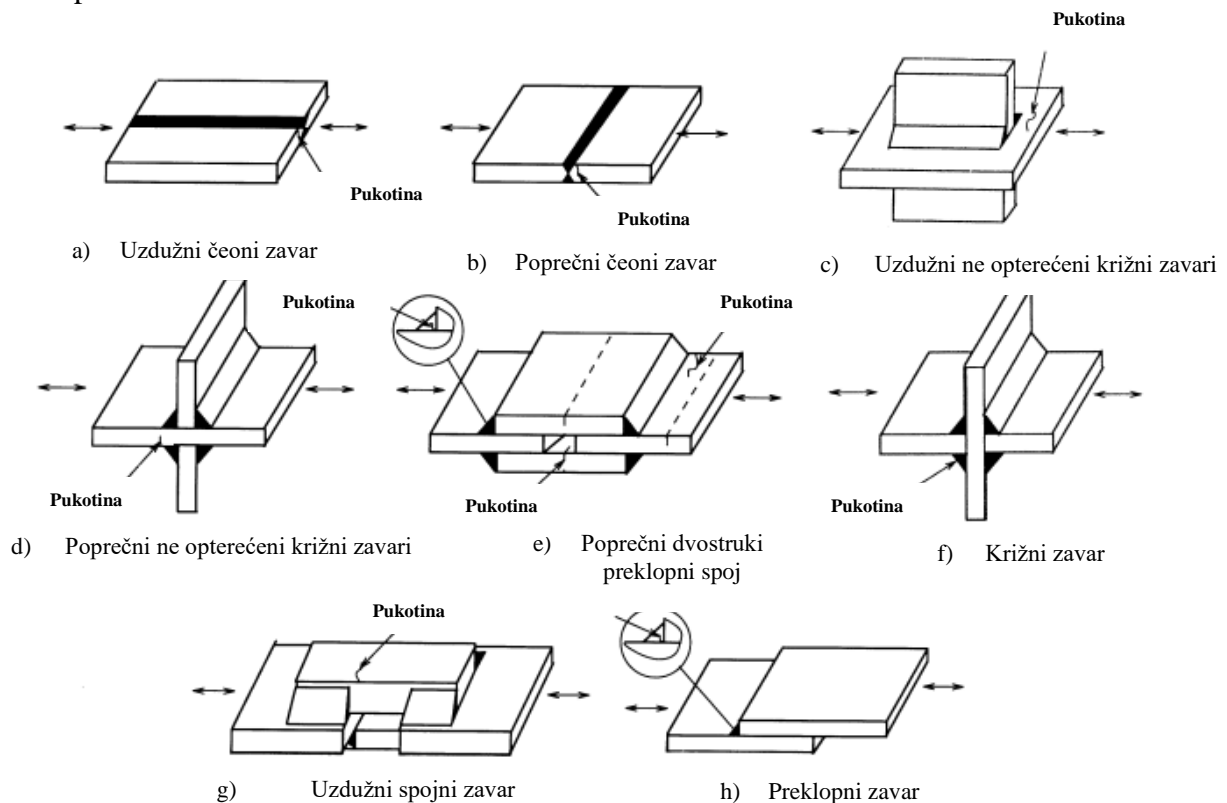
Poznato je da se značajna zaostala naprežanja razvijaju tijekom solidifikacije kontinuiranog zavora. Primjer se može pojasniti na sučeonom zavaru prikazanom na slici 16. Prilikom solidifikacije, zavar je spriječen da se kontrahira po duljini (slika 16. b) zbog ukrute susjednog materijala. Zbog toga dodatni materijal kao i ZUT dolaze pod tlačnu silu (slika 16. c). Naprežanja u paralelnom smjeru zavora dostižu vrijednost granice tečenja (slika 16. d) dok je paralelno naprežanje u ZUT u plastičnom području. U okomitom smjeru na zavar vrijednost maksimalnog naprežanja ovisi o postupku zavarivanja. Ako je jedna strana osnovnog materijala nije ukliještena, zavar se može slobodno kontrahirati u okomitom smjeru s obzirom na zavar. Naprežanja okomita na zavar uzrokovana kontrakcijom neće dodatno uzrokovati zaostala naprežanja. U većini slučajeva ploče osnovnog materijala su ukružene s obje strane pa se

zaostala naprezanja znatno povećavaju. Ukupno naprezanje u smjeru okomitom na zavar iznosi između 0,3 i 0,5 granice tečenja [5].



**Slika 16. Nastajanje zaostalog naprezanja na primjeru čeonog spoja [5]**

Utjecaj zaostalog naprezanja doprinosi procesu umora materijala i time nastanku pukotina u području zavara. Na slici 17 prikazani su najčešći oblici spajanja aluminijskih legura i najčešćih oblika pukotina.



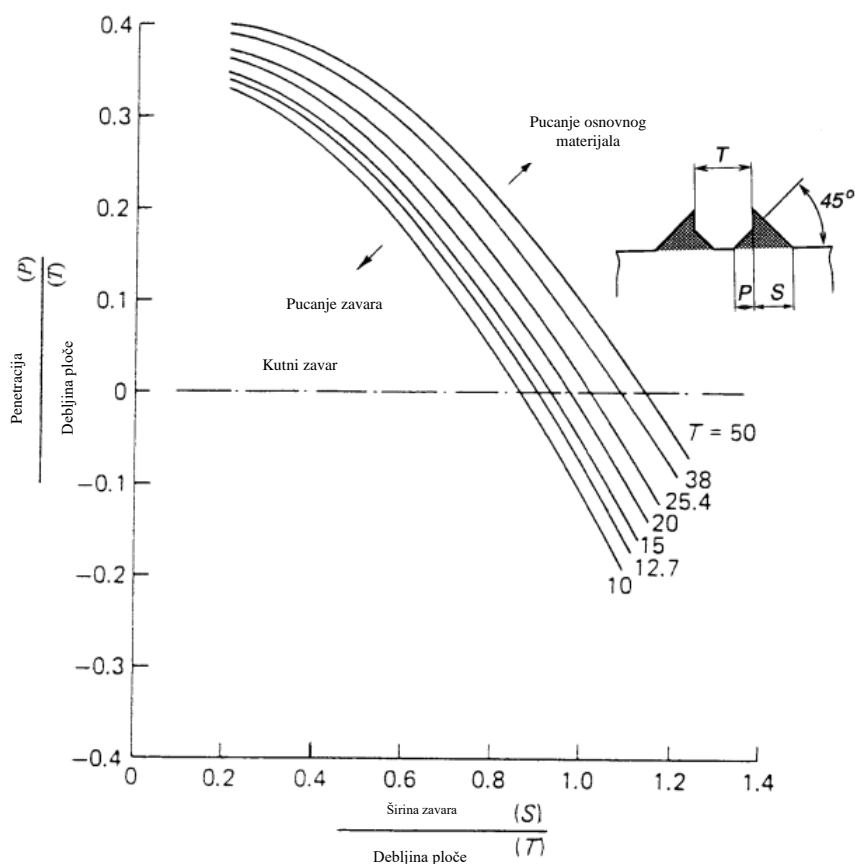
**Slika 17. Detalji zavarenih dijelova aluminijskih legure sa označenim pukotinama [5]**



Uzdužni čeonni zavar, kada je opterećen kao što je prikazano na slici 17 (a) te zbog velikog unosa topline dolazi do pada tvrdoće zavara i područja ZUT-a dok okolina ostaje elastična. Situacija u kojoj su dva materijala znatno različitih krutosti opterećeni na vlak dolazi do elongacije krućeg materijala (zbog veće površine u poprečnom presjeku) prema Hookovom zakonu. Kada je zavarena konstrukcija opterećena u smjeru paralelnom sa zavarom, deformacija inducirana u području zavara jednaka je elastičnoj deformaciji koja se razvija u osnovnom materijalu. Budući da područja zavara i ZUT-a nose zaostala naprezanja po iznosu jednakom granici tečenja, dodatna naprezanja u tim područjima su plastična. Cikličko ponavljanje plastične deformacije uzrokuje relaksaciju srednjih naprezanja. Što je veće cikličko opterećenje, srednje naprezanje se brže smanjuje. Cikličko opterećenje u ovoj strukturi uglavnom se prenosi na matičnu ploču s obje strane zavara. Izvan zone zavarivanja ploča osnovnog materijala je u velikoj mjeri pod tlačnim zaostalim naprežanjem, što mu produljuje vijek trajanja. Pukotina inducirana zamorom započeti će na vrhu plastično naprežnutog zavara i početi napredovati u osnovni materijal. Ukupni vijek trajanja konstrukcije opterećene paralelno s osi čeonog zavara vrlo je sličan s onom od nezavarene ploče [5]. Uzdužni ne opterećeni križni zavari, slika 17(c), u konstrukciji opterećenoj paralelno sa zavarom, najbliži mehanizam deformacije opisan je u poglavlju: „uzdužni čeonni zavar“. Proces zavarivanja prouzrokuje visoko zaostalo naprežanje, u iznosu granice tečenja. U ovom slučaju pod velikim amplitudama naprežanja model je isti kao i za čeonni zavar, područje zavara je plastično deformirano i iznos zaostalog naprežanja se brzo opušta na nulu. Kao rezultat toga otpornost na zamor niskog ciklusa je relativno visoka. Pod nižom amplitudom cikličkog naprežanja, opuštanje zaostalog naprežanja događa se sporijom brzinom [5].

Poprečni čeonni zavar prikazan je na slici 17(b). U ovom slučaju, osnovni materijal i područje ZUT-a nose puno opterećenje, te su stoga najslabije područje u strukturi. Toplinska kontrakcija u smjeru opterećenja dovodi do naprežanja čija vrijednost ovisi o primijenjenom postupku. Ako su obje ploče stegnute prilikom zavarivanja zaostalo naprežanje može doseći iznos granice tečenja poprečno na osi zavara. Općenito, poprečno zaostalo naprežanje bit će manje od onog u uzdužnom smjeru čeonog zavara, tako da će zaostalo naprežanje ostati kao srednje vlačno naprežanje tijekom cijelog životnog vijeka komada. Vijek trajanja zamora poprečno opterećenog čeonog zavara je obično manji nego kod istog zavara opterećenog duž uzdužne osi [5].

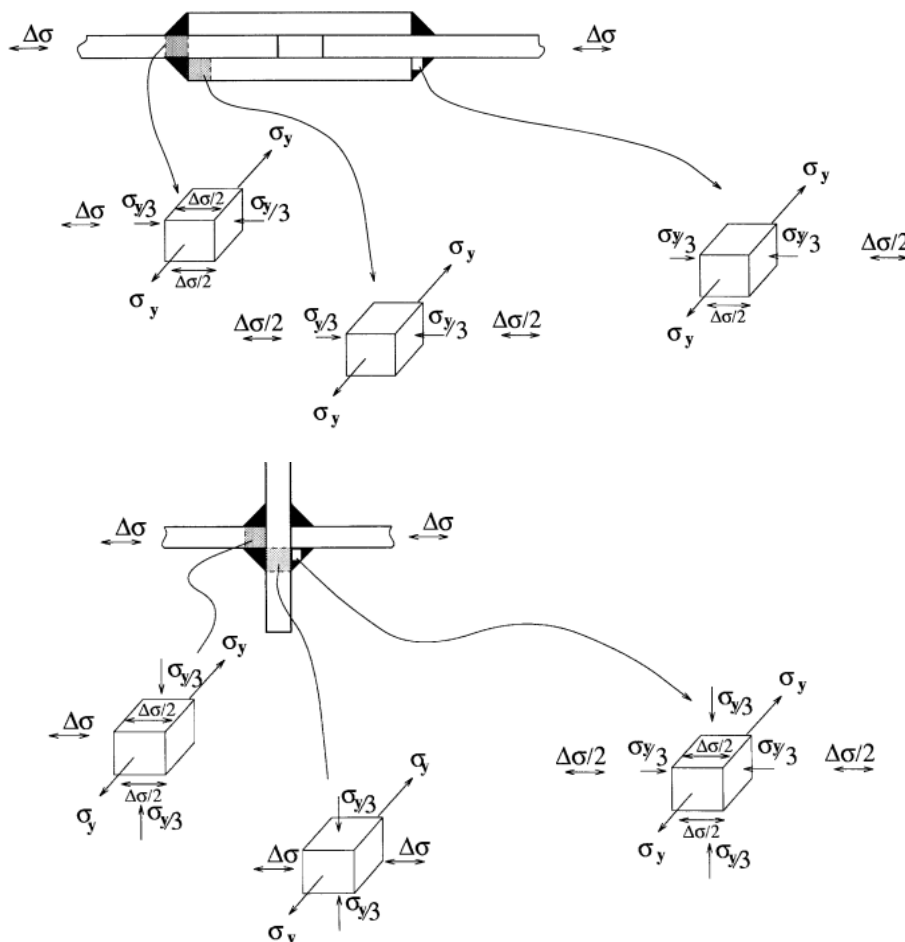
Kutni zavari razlikuju se u odnosu na čeone zavare s obzirom na način podnošenja zamora. Razlika u putevima prijenosa opterećenja kao i geometrija kutnih zavara svojstveni su izvor zamora i pukotina. Tipični kutni zavari na slici 17 simbolično su prikazani kao trokutasti presjek. U praksi takvi zavari imaju jako konveksnu površinu te obično ostaju ostavljeni nepobrušeni. Što je veći kut formiran između vrha zavara i ploče, to je veće lokalno naprezanje. Drugi mogući izvor pucanja uslijed zamora u kutnim zavarima je na dodirnim površinama ploča međusobno zavarenim. Površine ploča između dva zavara tvore pukotinu. Hoće li se ili ne ova pukotina širiti pod opterećenjem, ovisi o širini preostalog ruba ploče između rubova. Ako je penetracija zavara takva da je preostali slobodni rub ploče nedovoljan za rast pukotine, pukotina inicirana zamorom umjesto toga će započeti na vrhu zavara i širiti kroz ploču kako je već opisano. Stoga pravilan dizajn spoja i postupka zavarivanja sprječavaju nastajanje pukotine na rubu koji se zavaruje. Gurney je istraživao kritičnu dubinu penetracije za poprečne kutne zavare koji nose opterećenje čelika, koristeći principe mehanike loma. Njegovi rezultati prikazani su na slici 18. Temelje se na empirijskim svojstvima materijala i vrsti kutnog zavara koji se koristi. Takve izračune potrebno je provesti za tipične geometrije zavara aluminijskih legura serija 5000 i 6000. Rezultati izračuna trebali bi, međutim, provjeriti odgovarajućim testovima zamora [5].



**Slika 18.** Uvjet penetracije zavara za inicijaciju pukotine kod kutnih zavara [5].

Poprečni kutni zavari na slici 17(d) – (f) skicirana su s tri tipa poprečnih kutnih zavara. Na slici 2(d), zavari ne nose opterećenja, dok se na slici 17(e) i (f) opterećenje se prenosi kroz zavare. Kao u slučaju poprečnog čeonog zavara (slika 17b), raspodjela zaostalog naprezanja u poprečnom kutnom zavaru daje maksimalan iznos zaostalog naprezanje od približno jedne trećine granice tečenja u smjeru opterećenja okomito na njega. Budući da je glavno zaostalo naprezanje, vlačna granica tečenja te je usmjereno pod pravim kutom u odnosu na smjer širenja pukotine kroz debljinu ploče. Ovo naprezanje nastoji zatvoriti svaku pukotinu koja bi se mogla inicirati i time spriječiti njezin rast. Zbog koncentracije naprezanja na vrhu svakog od četiri zavara koji čine spoj, velika je vjerojatnost da će mala pukotina uslijed zamora započeti na rubu ploče kraj vrha jednog od zavara. Otpornost na zamor poprečnog kutnog zavara stoga će uvijek biti manja od čeonog zavara sa slike 17(b). U spoju na slici 17(d) vertikalna ukrućenja ne sudjeluju u nošenju vanjskog opterećenja.

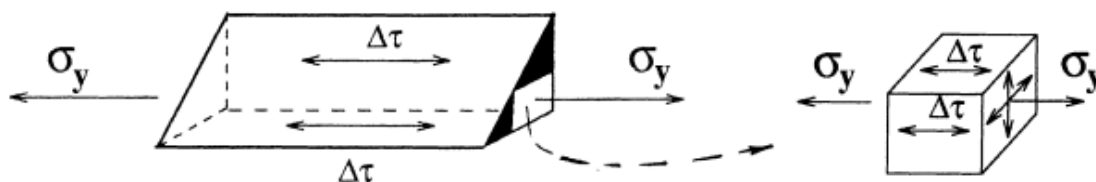
Međutim, zbog zavarenih spojeva, kutni zavarci se ciklički opterećuju elastičnom deformacijom opterećene ploče između zavara. Do oštećenja uslijed umora dolazi u ovoj strukturi u glavnoj opterećenoj ploči. S druge strane, u spoju na slici 17(e) i u križnom spoju na slici 17(f), opterećenje se prenosi kroz zavare, tako da su zavarci opterećeni u smicanju duž zatezne ploče, s nejednolikom napetosti na spojnoj ploči i poprečnoj ploči. Nejednolika napetost rezultira savijanjem, koje se prenosi simetrično na suprotnom zavaru. Unatoč takvim sličnostima, uobičajena mjesta početnih pukotina iniciranim zamorom u križnim zavarima značajno se razlikuju. Zaostalo naprezanje sastoji se od vlačnog naprezanja okomito na glavno naprezanje i mnogo manjeg naprezanja paralelno s njim. Zaostalo naprezanje je tlačno na rubu spoja, gdje pukotine uslijed zamora obično počinju, vlačna blizu sredine širine. Stoga su ciklička naprezanja relativno niska u spojnoj ploči. Raspodjela naprezanja u glavnoj, opterećenoj ploči je slično, s tim da je opterećenje preneseno s ploče na zavar smicanjem. [5]



Slika 19. Prikaz distribucije naprezanja kod preklopnog (gore) i križnog spoja (dolje) [5]

Iako je cikličko naprezanje neravnomjerno raspoređen po debljini, a koncentracija naprezanja postoji na vrhu zavora, ZUT u opterećenoj ploči nije osobito osjetljiva na pucanje uslijed zamora. S druge strane, pukotina inicirana zamorom može nastati u korijenu samog zavora. Raspodjela naprezanja u blizini zavora u križnom spoju na slici 17(f), prikazana je na slici 19 (dolje). Poprečna ploča manje je osjetljiva na pucanje inicirano zamorom jer je nominalno naprezanje ravnomjernije raspoređeno po ZUT-u i zaostalo tlačno naprezanje je duž ploče, a ne u smjeru širenja pukotine. Situacija unutar zavora također je manje kritična. Ovdje su tlačna zaostala naprezanja postavljena u oba smjera okomito na os zavora. Jedan od ovih naprezanja djeluje kao srednje opterećenje smanjujući maksimalno [5].

Uzdužni opterećeni kutni zavari, slika 17(g), prijenos opterećenja se postiže pomoću smicanja. Kao što se može vidjeti na slici 20, ova vrsta zavora podložna je sustavu kombiniranog opterećenja, čije su deformacijske osi međusobno okomite. Međutim, u ovom slučaju primijenjeno cikličko naprezanje pojavljuje se kao posmično naprezanje okomito na preostalo naprezanje tečenja duž osi zavora. Stoga se može očekivati da će uzdužni spoj pokazati bolji otpor na zamor. Zapravo, pukotina inicirana zamorom počinje u spojnoj ploči na kraju zavarenog spoja, vjerojatno pojačana tlačnim zaostalim naprezanjem u ploči [5].



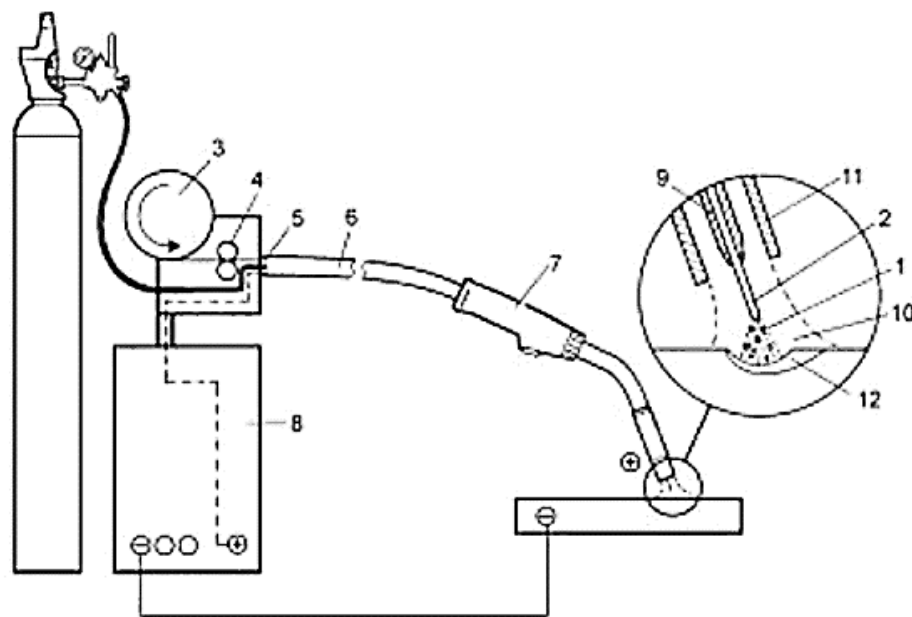
**Slika 20.** Prikaz distribucije naprezanja u kutnom zavaru uzdužno opterećenom [5]

Preklopni zavari izrađuju se zavarenim rubom sa svake strane pričvršćene ploče. Ponekad spoj je zavaren samo s jedne strane, slika 17(h). Kada se takvi spojevi ciklički opterećuju dolazi do značajnih naprezanja zbog savijanja što rezultira vrlo maloj otpornošću na zamor. Takve spojeve treba izbjegavati u konstrukcijama koje su dinamički opterećene [5].

### 3. MIG POSTUPAK ZAVARIVANJA

*Gas metal arc welding* (GMAW) zavarivanje električnim lukom i žicom u prisustvu zaštitnog plina ili *MIG metal inert gas* ako je plin koji se koristi plemeniti plin te *MAG metal active gas* ako se koristi aktivan plin kao na primjer CO<sub>2</sub>. Ova tehnologija je vrlo rasprostranjena i primjenjiva u širokom spektru upotreba zbog lakog započinjanja i završetka vođenja procesa. MIG tehnologija se najčešće primjenjuje na limovima manjih debljina. MIG/MAG tehnologija bazirana je na principu gdje se metalna žica gura kroz pištolj za zavarivanje te se tali zbog električnog luka koji je uspostavljen preko nje. Električna energija koja je potrebna za uspostavljanje električnog luka dobivena je preko izvora energije. Električni luk i bazen taline zaštićen je zaštitnim plinom, u ovom kontekstu proučavat će se inertni plin (argon, helij). Kako bi se postigli optimalni rezultati potrebno je voditi brigu o parametrima zavarivanja kao što su: napon i struja zavarivanja, posmična brzina te brzina strujanja zaštitnog plina [7].

Slika 21. prikazuje princip MIG zavarivanja. Električni luk je uspostavljen između materijala žice koja je kontinuirano dostavljena putem pogonskih kotačića kako bi se nadoknadio dio rastaljene žice. Žica je dobavljena u pištolj za zavarivanje kroz polikabel uz pomoć kotačića sustava za dovod žice. Električna energija je također dobavljena kroz polikabel te se preko bakrene kontaktne vodilice prenosi na žicu. Elektroda je uglavnom spojen na pozitivan pol izvora dok je radni komad spojen na negativni. Mali promjer žice uglavnom oko 1 mm guran je kroz polikabel brzinom od nekoliko metara po minuti. Duljina električnog luka automatski je regulirana ovisno o postavljenim uvjetima voltaže na aparatu. Zaštitni plin također struji kroz polikabel u zasebnom crijevu te štiti elektrodu, električni luk, kontaktnu elektrodu te zavar. Plin može biti aktivan i inertan. Ako je plin inertan on ne sudjeluje u reakciji tijekom zavarivanja. Tijekom postupka zavarivanja pištolj za zavarivanje može se pomicati ručno te se tada to naziva polu-automatizirana metoda. Zbog lagane metode automatizacije putem robota na način pomicanja pištolja za zavarivanje ili pomicanjem radnog komada ovakva inačica tehnologija ima značajan doprinos u autoindustriji [7].



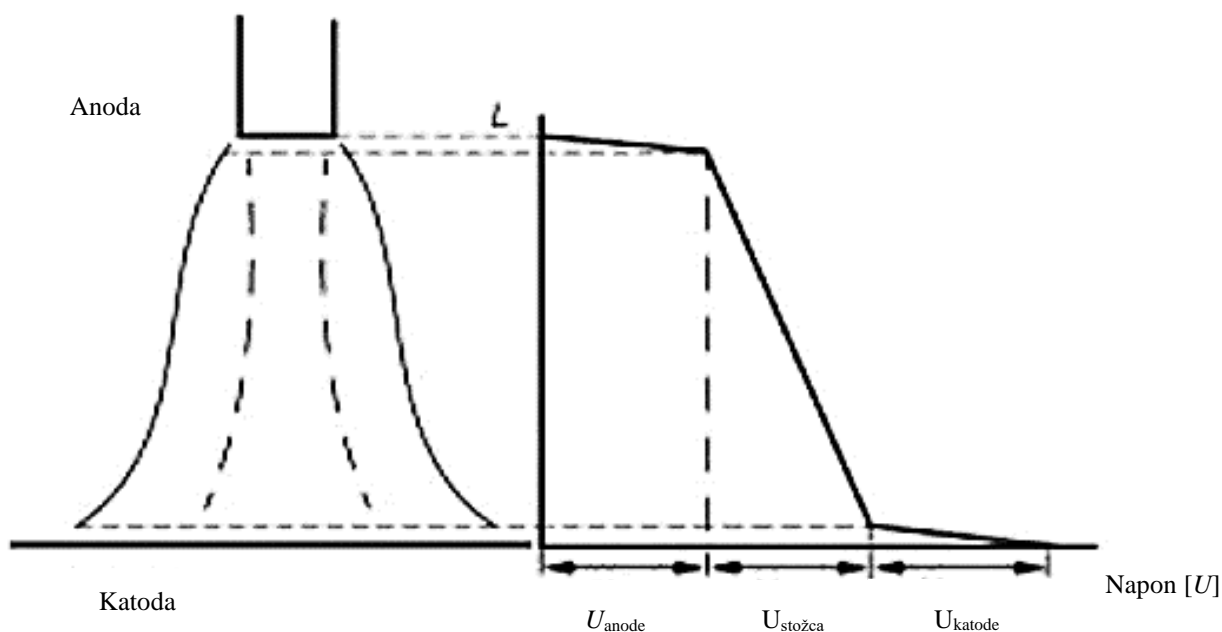
**Slika 21. Princip MIG zavarivanja. 1. električni luk, 2. elektroda, 3. bubanj sa žicom, 4, pogonski kotačići, 5. savitljivo crijevo, 6. polikabel, 7. pištolj za zavarivanje, 8. izvor struje, 9. kontaktna elektroda, 10. zaštitni plin, 11. mlaznica, 12. bazen taline [7].**

Visoka produktivnost i relativno mali unos topline u radni komad jedni su od značajnijih karakteristika MIG procesa. Osim velike fleksibilnosti procesa ova metoda ističe se u velikom broju primjena [7]:

- Debljina lima od 0,5 mm pa na više. Mali unos topline osigurava lako zavarivanje tankih limova sprječavajući vitoperenje i deformaciju. Prilikom zavarivanja debljih materijala moguće je primijeniti istu metodu u više prolaza, to rezultira u većoj produktivnosti.
- Mogućnost zavarivanja svih često upotrijebljenih konstrukcijskih materijala kao što su nisko, srednje legirani, nehrđajući čelici, aluminij sa svojim legurama, te ostali metali koji ne sadrže željezo u sebi.
- Metali sa metalnim premazom na površini (pocinčani čelik).
- Zavarivanje u svim pozicijama.

MIG tehnologija ne zahtijeva nikakve velike vještine ako je potrebno zavariti dva komada lima zajedno. Ako postoje zahtjevi kao što su potpuna penetracija zavora, dimenzijska točnost, vrlo malo pora cijeli postupak znatno se komplicira [7].

U električnom luku dolazi do značajnih gubitaka topline, toplinska kondukcija ima najveću utjecaj prijenosa topline u zonama tik do elektrode te tik do radnog materijala. Ta područja anode i katode imaju značajne padove u voltaži bez obzira na njihovu malu udaljenost, preko pola od ukupne vrijednost napona padne na ovim dijelovima. Kao što je prikazano na slici 22, termalni ekvilibrijum uspostavljen je zbog topline koja je provedena kroz elektrodu i radni komad zamijenjen je električnom energijom [7].

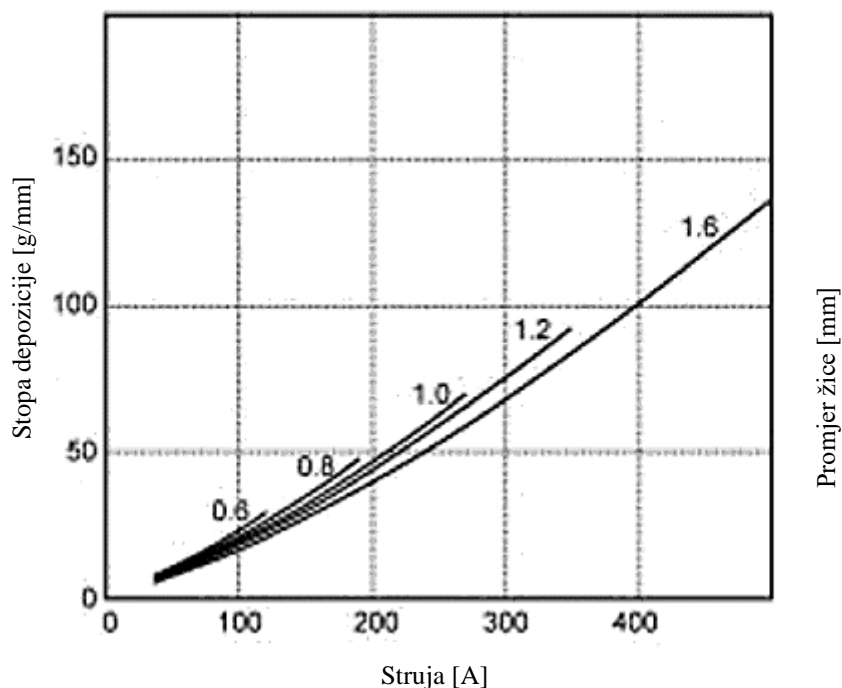


Slika 22. Prikaz distribucije voltaže u električnom luku [7]

Električni luk može se podijeliti u područje anode, katode te stožac luka. Uglavnom anoda je elektroda te je pozitivnog pola dok je katoda radni komad negativnog pola. Toplina generirana u području anode tali žicu te zagrijava taljenu kapljicu metala. Generirana toplina u području katode zagrijava i tali područje zavara [7].

Pad napona na anodi može se smatrati kao značajan pad napona, utjecaj topline proporcionalan je struji zavarivanja. Stopa taljenja je također proporcionalna struji zavarivanja i time u teoriji neovisna o naponu zavarivanja. Slika 23 prikazuje stopu depozicije materijala kao funkciju struje zavarivanja. Odstupanje od ravne crte ovisi o grijanju slobodnog kraja žice što je proporcionalnu kvadratu struje zavarivanja [7].

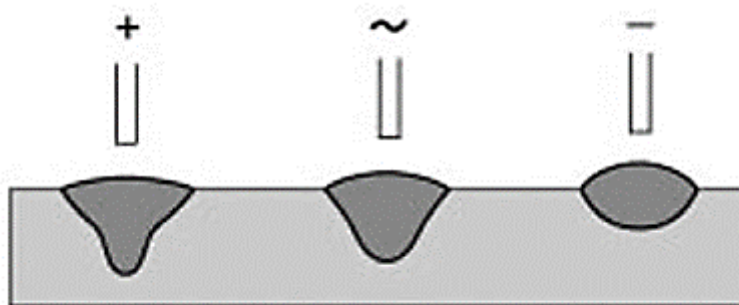




Slika 23. Prikaz stope depozicije za neke promjere žice [7]

### 3.1 AC MIG

U procesu MIG zavarivanja uglavnom se koristi istosmjerna struja DC, te je elektroda spojena na plus pol, negativni pol na elektrodi se rijetko koristi zbog loše stabilnosti električnog luka. Generiranje topline je veće na strani anode nego na strani katode i razlog tome je unos energije emisije elektrona. Bez obzira na to najveća penetracija ostvarena je na plus polu ali ne i najveća stopa depozicije, kao što je vidljivo na slici 24. Razlog tome je dio toplinske energije razvijen na anodi pregrijava kapljice već tekućeg metala umjesto daljnjeg taljenja žice. Kapljice metala koje su pregrijane prenose toplinu na radni komad. Koristeći pozitivan pol tijekom zavarivanja zbog svoje stabilnosti i najpovoljnijeg rezultata zavarivanja, postao je optimalni pol za zavarivanje. Drugi polovi se rabe kada se žele ostvariti drugačija svojstva i izgled zavara. DC negativan pol bi se koristio kod vrlo tankih limova zbog male penetracije i velikog uzvišenja dok AC se koristi za zavarivanje aluminija i njegovih legura [7].



Slika 24. Utjecaj polariteta na penetraciju [7]

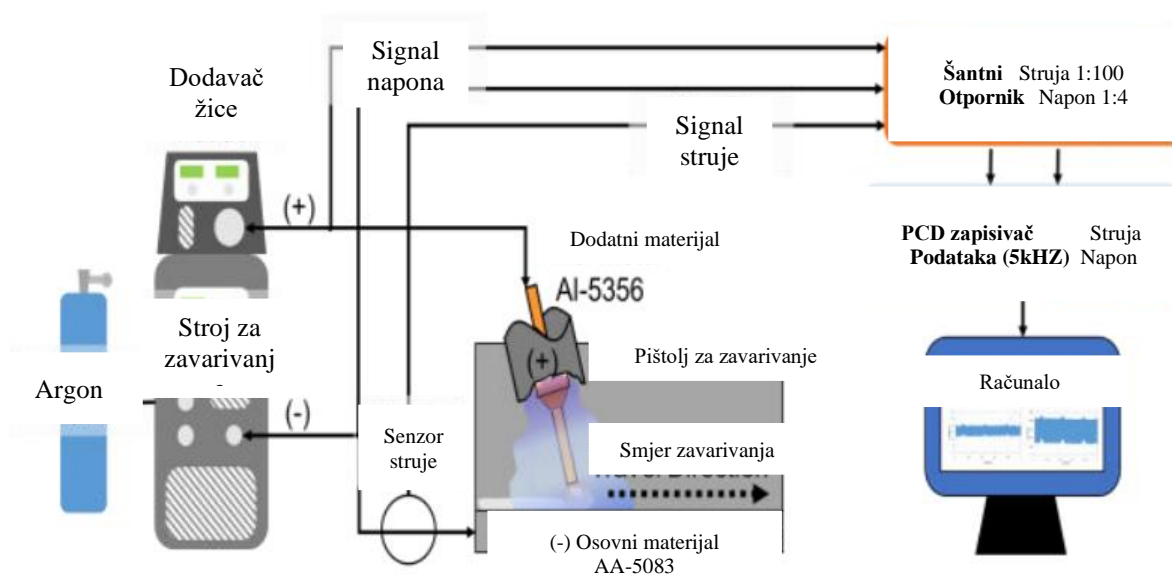
### 3.2 MIG zavarivanje s dvostrukim pulsom (DP-MIG)

Aluminijske legure široko su korištene kao metal za lagane konstrukcije. Neki od primjera su električno vozilo (EV), kemijski spremnici, zrakoplovi itd. MIG se obično koristi kao tehnologija za automatski proces zavarivanja u pametnim tvornicama. Zavarivanje aluminija i njegovih legura sa sobom nose brojne poteškoće. Potpuna penetracija, zavari bez poroznosti, pravilan unos topline itd. Kod zavarivanja ploče debljine veće od 10 milimetara postoji šansa nedostatka fuzije. Primjena visoke struje zavarivanja može naići na problem nedostatka fuzije, ali i nekoliko oblika poroznosti u zavaru te rasta zrna u ZUT. Višestrukim prolazima s malom strujom zavarivanja i niskom depozicijom materijala su rezultati dobiveni TIG postupkom zavarivanja, postupkom niske produktivnosti. MIG (P-GMAW) proces s jednim impulsom je razvijen za poboljšanje sposobnosti procesa. Međutim, proces je ograničen na depozit materijala od jedne kapljicom po impulsu. P-GMAW obično radi na niskoj frekvenciji za generiranje impulsa te je praćen s nestabilnim lukom s čestom pojavom raspada dodatnog materijala i nedostatka fuzije. Zbog tog je razvijena tehnologija dvostrukog pulsog zavarivanja metala inertnim plinom. DP-MIG tehnologija je razvijena za poboljšanje procesa zavarivanja aluminija. Važni parametri DP-MIG su visoka frekvencija, brzina dodavanja žice i radni ciklus. Visoka frekvencija je korištena kako bi se osigurao jedna kapljica depozita po puls. Brzina dodavanja žice mijenja veličina kapljica. U fazi pulsa veličina kapljice mogu se podesiti promjenom perioda radnog ciklusa za dobivanje optimalnog izgleda kapljice u pulsnom i prijenosnom načinu zavarivanja. DP-MIG odlikuje se uspješnim zavarivanjem na tankoj ploči od aluminijske legure. Zavarivanje aluminija na debeloj ploči nije još dovoljno istraženo pošto

parametri utječu na stvaranje poroznosti [8]. Prikaz zavarivanja pete i šeste klase aluminija prikazat će se na konkretnim primjerima u sljedećim poglavljima.

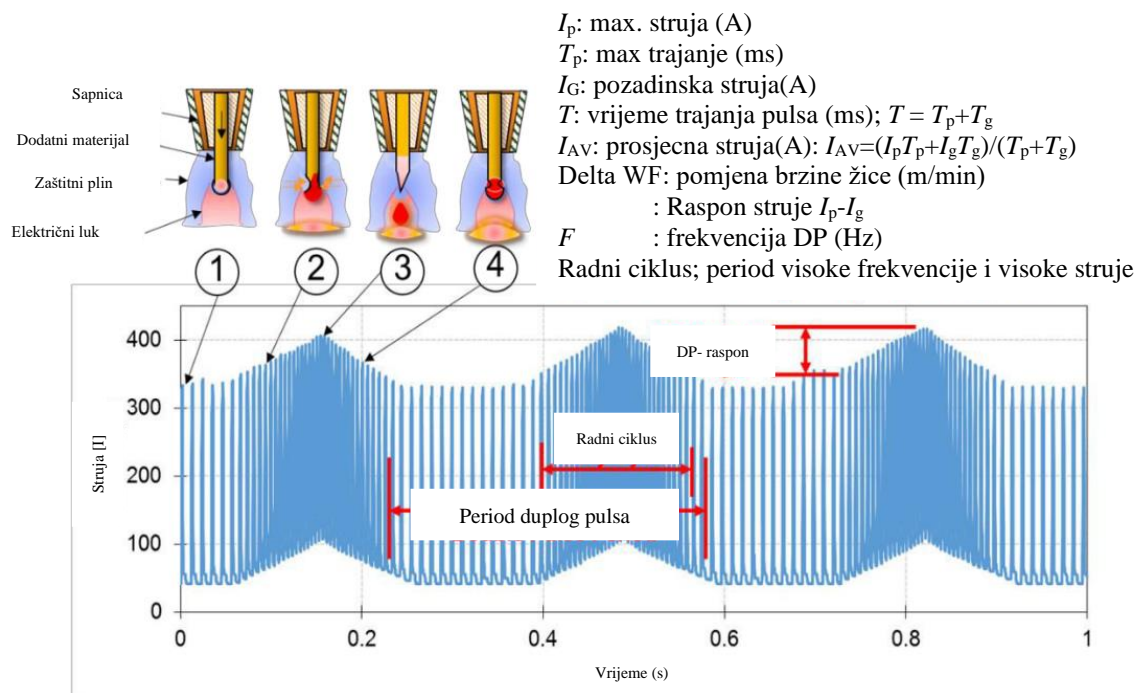
### 3.2.1 Zavarivanje aluminija pete klase s DP-MIG

Zavarivanje aluminija pete klase konkretnije legure 5083 na ploči debljine 10 mm provedeno je sa procesom DP-MIG. Dodatni materijal je legura klase 5356 s promjerom 1,2 mm te argonom kao zaštitnim plinom. Korišten je aparat za zavarivanje Fronius TPS 500i u kombinaciji s robotskom rukom Fanuc arc mate 100ib. konkretnija shema postave prikaza je na slici 25. Da jasno razumijemo uzrok i posljedicu DP-strujni signal tijekom procesa spojeni su na uređaj kako bi se dobila stvarna razina DP uzorka. Očitavanje je vršeno s Hallovim senzorom spojenim na digitalno-analogni pretvarač s brzinom uzorkovanja od 5000 uzoraka po sekundi. Izmjereni DP strujni signal jasno prikazan na slici 26. Parametri zavarivanja prikazani su u tablici 4 [7].



Slika 25. Prikaz eksperimentalne pripreme za DP-MIG [7]

Odabrani parametri prikazani na slici 26 su: Raspon DP struje je od 5 do 80 A, DP frekvencija 0,5 do 3 Hz i DP radni ciklus 10 do 90 %.



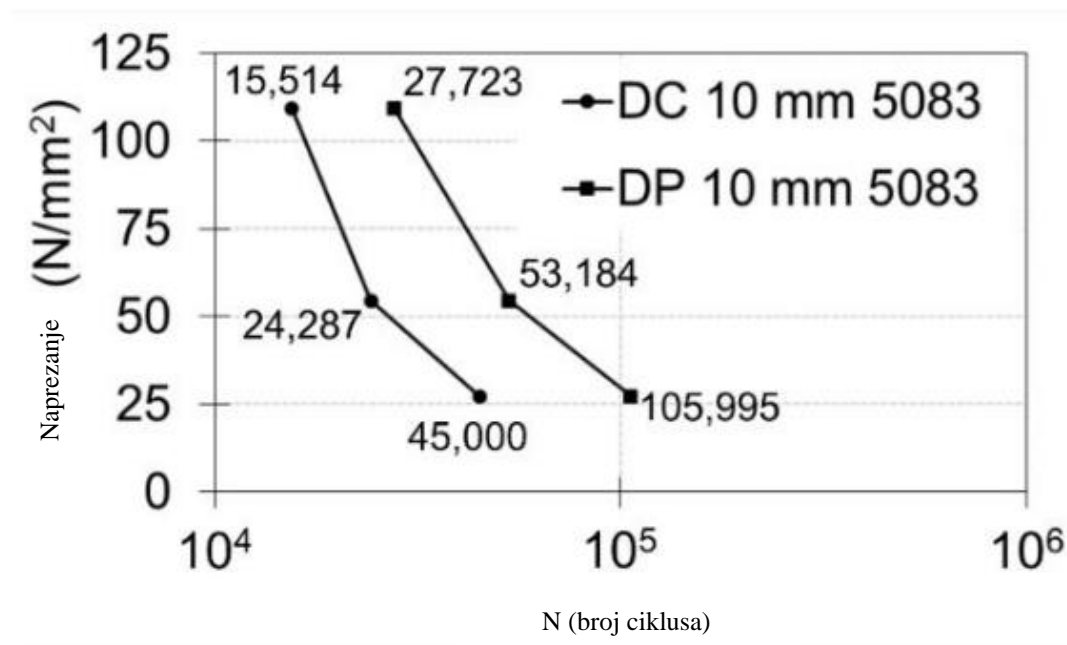
Slika 26. Ilustracija izmjerenog DP signala povezanog s prijenosom metala i definiranim parametrima [7].

Tablica 4. Procesni parametri pokusa [7]

Broj eksperimenta	Brzina žice m/min	Delta brzine žice m/min	DP raspon struje A	Frekvencija Hz	Radni ciklus %
1	11	0,1	5	3	30
2	11	0,8	20	3	30
3	11	3	55	3	30
4	11	4,8	70	3	30
5	11	6	80	3	30
6	14,9	0,4	20	0,5	50
7	14,9	0,4	20	3	50
8	15	0,4	20	3	10
9	15	0,4	20	3	30
10	15	0,4	20	3	50
11	15	0,4	20	3	90



Povećanjem raspona DP struje s 5 A na 80 A može se uočiti povećanje stvaranja poroznosti zbog visoke toplinske energije unesene u zavar. Međutim, nedostatak fuzije u korijenu zavara pronađen je vizualnim pregledom iz pokusa broj 1 koji je zavaren na 5 A (delta brzina dodavanja žice 0,1 m/min). Za druge raspone DP struje nije otkriven nedostatak fuzije. Ovo je dokaz da raspon DP struje utječe na sposobnost taljenja. Povećanje raspona DP struje ili povećanjem delta brzine dodavanja žice povećava se penetracija zavara. Međutim, to je poticaj za formiranja poroznosti. Veće povećanje DP-struje kao 20 A (delta dovod žice brzina 0,8 m/min) može osigurati minimalnu poroznost formiranje s potpunim stapanjem na zavarenom spoju. Optimizirani parametri DP-MIG dobiveni su raspon DP struje od 20 A (delta brzina dodavanja žice 0,8 m/min), radni ciklus od 30 % i frekvencija od 5 Hz. Uzorak je testiran u ispitivanju zamora. Dvostruki kutni zavar ispitan je u potpunom cikličkom opterećenju. Kao usporedba dvostruki kutni zavar koji je spojen pomoću DC-MIG je također testiran. DC MIG korišteni parametri su struja zavarivanja 262 A i 26.2 V. Slika 28, rezultat ispitivanja zamora pokazuje da je DP MIG spoj ima bolju čvrstoću u istim uvjetima ciklusa rada nego DC MIG. Vijeka trajanja zavara na cikličko opterećenje DP MIG-a otprilike je 2 puta duže nego onog zavarenog s DC MIG [7].



Slika 28. Wöhlerov graf usporedbe aluminijske pete klase zavarivan DP i DC MIG postupkom [7]

### 3.2.2 Zavarivanje aluminija šeste klase s DP-MIG

Zavarivanje aluminijeve legure šeste serije oznake 6082-T6 u kombinaciji sa dodatnim materijalom ER5356 promjera 1,2 mm. Kemijski sastav osnovnog i dodatnog materijala prikazan je u tablicama 5 i 6 [9].

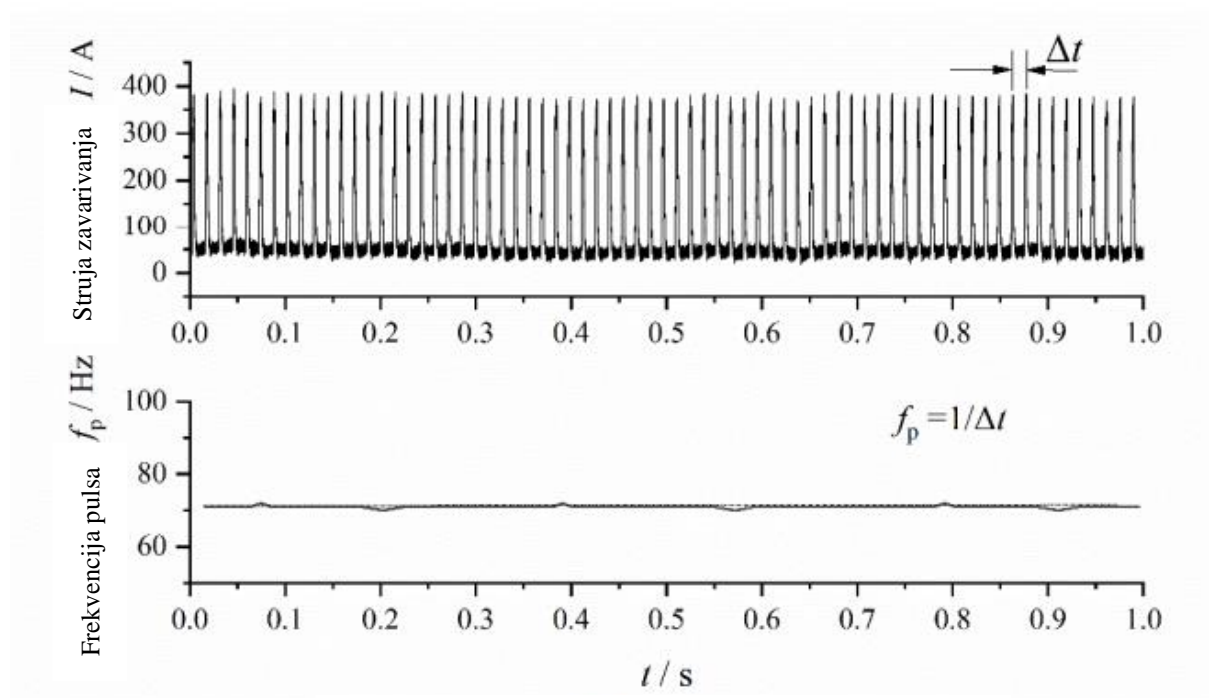
**Tablica 5. Prikaz kemijskog sastava osnovnog i dodatnog materijala [9]**

Aluminijeva legura	Mg	Si	Mn	Fe	Cu	Cr	Zn	Ti	Al
6082-T6	0.83	0.82	0.62	0.24	0.027	0.086	0.024	0.011	ostalo
ER5356	4.5–5.5	0.25	0.05–0.2	0.4	0.1	0.05–0.20	0.01	0.06–0.2	ostalo

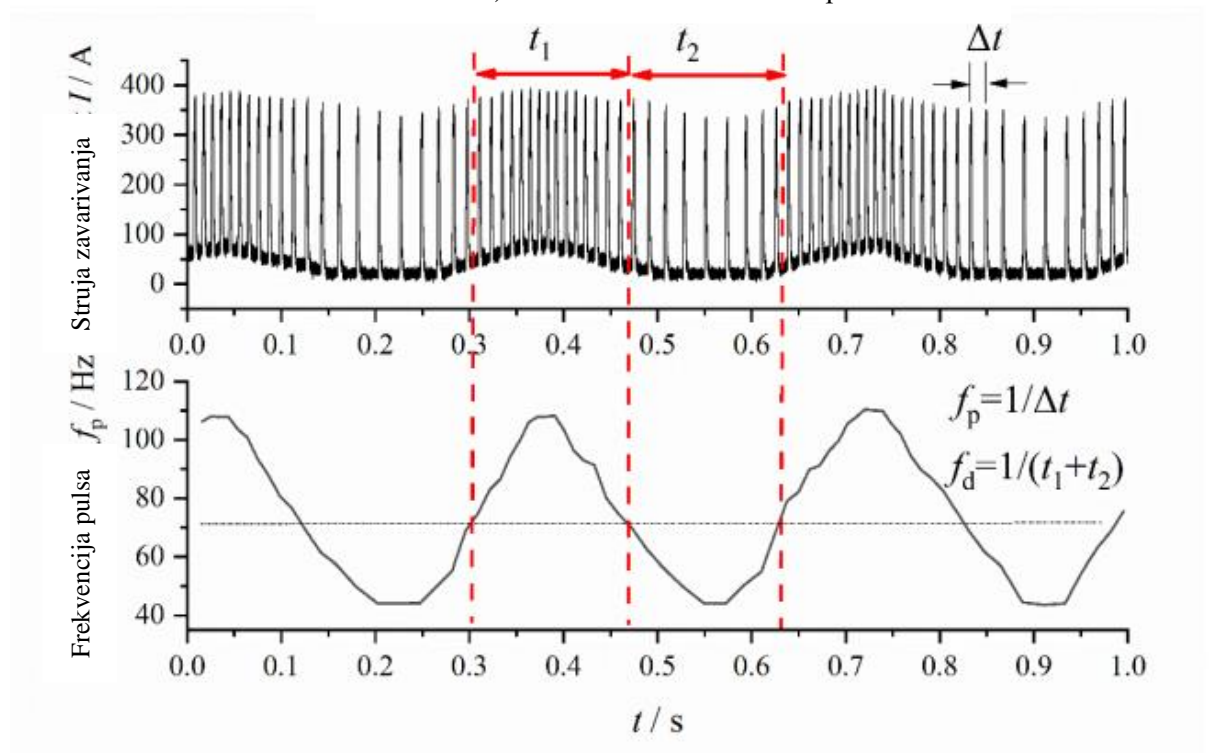
**Tablica 6. Mehanička svojstva 6082-T6 [9]**

Vlačna čvrstoća/(MPa)	Granica razvlačenja/(MPa)	Elongacija /(%)
308–315	262–274	10.6–12.2

U ovom radu također je korištena DP struja te ilustraciju njegovih karakteristika može se vidjeti na slici 29. Uz to prikazana je usporedba električnih signala za normalni pulsni način rada i dvostruki pulsni način rada. Na slici 29, frekvencija impulsa  $f_p$  je inverzna vrijednost perioda impulsa  $\Delta t$ . U normalnom pulsnom radu, frekvencija pulsa bila je gotovo nepromijenjena, dok se periodički mijenjala u dvostrukom pulsnom načinu rada. Razdoblje dvostrukog pulsa može se podijeliti u dvije faze: grupa jakog pulsa ( $t_1$  period) i skupina slabog pulsa ( $t_2$  period). Frekvencija dvostrukog impulsa  $f_d$  je inverzna frekvencija perioda dvostrukog pulsa ( $t_1 + t_2$ ). Frekvencija pulsa u skupini s jakim pulsom bila je veća nego u skupini sa slabim pulsom. Vršna vrijednost pulsa kao i njegova najmanja vrijednost u skupini s jačim iznosom pulsa bili su nešto većeg iznosa [9].



a) Normalni način rada pulsa



b) Način rada s duplim pulsom

**Slika 29.** Karakteristike električnog signala normalnog impulsnog načina i dvostrukog impulsnog moda [9]

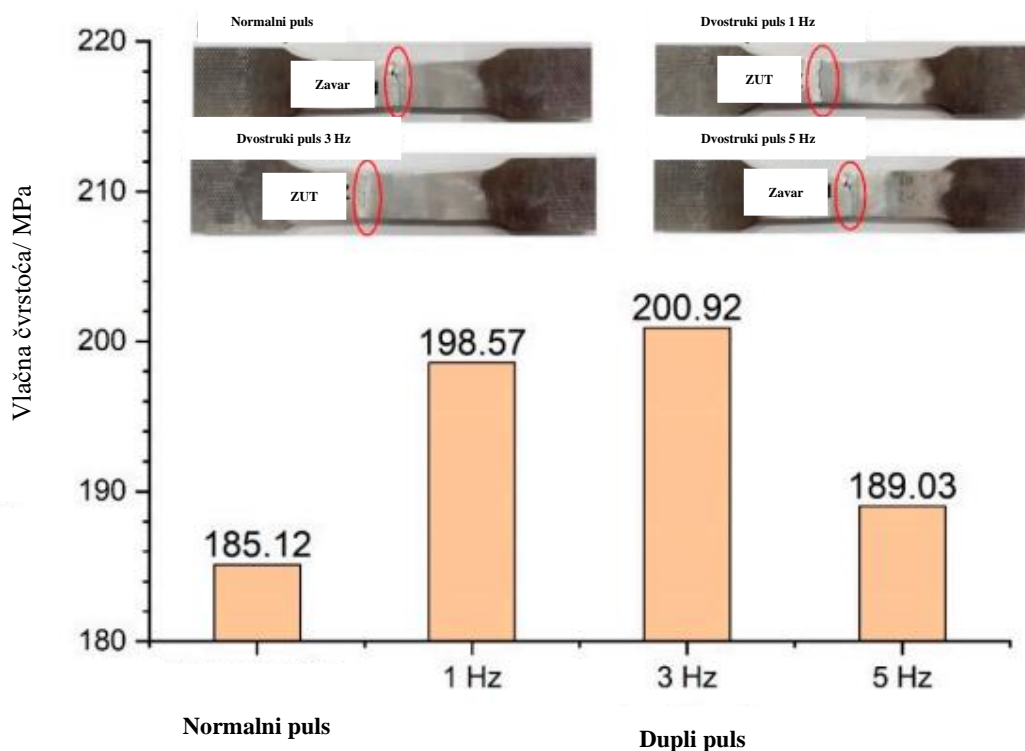


Uspoređeno je zavarivanje žicom s različitim frekvencijama dvostrukog pulsa s zavarivanjem u normalnom pulsnom načinu rada. Parametri zavarivanja prikazani su u tablici 7. Zaštitni plin bio je argon čistoće 99,99 % [9].

**Tablica 7. Parametri zavarivanja za normalni pulsni i dvostruko pulsni MIG postupak [7]**

Način rada	Postavljeni napon (V)	Postavljena struja (A)	Frekvencija duplog pulsa (Hz)	Brzina zavarivanja (mm/s)	Protok plina (L/min)
Normalni puls	18	110	-	8	40
Dupli puls	18	110	1	8	40
	18	110	3	8	40
	18	110	5	8	40

Nakon zavarivanja provedena su ispitivanja te slika 29 prikazuje vlačnu čvrstoću i mjesto loma zavarenih spojeva za normalno pulsno zavarivanje i dvostruko pulsno zavarivanje ( $f_d = 1, 3, 5$  Hz). Vlačne čvrstoće uzoraka iznose 198,57 MPa, 200,92 MPa i 189,03 MPa za 1 Hz, 3 Hz i 5 Hz. Te su vrijednosti bile veće od vrijednosti od 185,12 MPa kod normalno-pulsnog zavarivanja. Uzorci su pucali u području zavara za normalno pulsno zavarivanje i dvopulsno zavarivanje od 5 Hz, dok su u području ZUT-a pucali na frekvenciji od 1 Hz i 3 Hz dvostruko pulsno zavarivanje. Za normalno pulsno zavarivanje, postoji mnogo pora u zavarivanju. Postojanje pora slabi čvrstoću zavara, uzrokujući pukotine zavara umjesto u području ZUT-a. Za dvopulsno zavarivanje, odgovarajući dvopulsna frekvencija od 3 Hz može učinkovito smanjiti poroznost zavara, a njegov lom je duktilni lom koji se javlja u ZUT. Njegova vlačna čvrstoća (200,92 MPa) može doseći 64% vlačne čvrstoće osnovnog materijala (308–315 MPa), koja može zadovoljiti opće zahtjeve [9].



**Slika 30.** Vlačna čvrstoća i mjesto loma zavarenih spojeva za zavarivanje normalnim pulsom i dvopulsno zavarivanje ( $f_d = 1, 3, 5$  Hz) [9]

Prilikom usporedbe MIG s normalnim pulsničkim načinom rada i MIG zavarivanjem dvostrukom žicom, trožičnom MIG zavarivanjem s odgovarajućom frekvencijom dvostrukog pulsa (npr. 3 Hz u ovom slučaju) mogu se dobiti dobre procesne karakteristike i performanse spojeva za zavarivanje 6082-T6 aluminijske legure. Tijekom testiranja zavara došlo je do loma u ZUT-u koji se može pripisati plastičnom lomu. Vlačna čvrstoća spoja može doseći 64% vlačne čvrstoće osnovnog materijala. Zbog svoje ukupne učinkovitosti, ova metoda ima veliki potencijal u zavarivanju aluminijskih legura. Uz rastuće probleme nedostatka radne snage i prijenos inženjerskih kvalifikacija na nekvalificiranu radnu snagu, budući zadatak je razviti zavarivač na kojem laik može jednostavno postaviti odgovarajuće uvjete zavarivanja u kontekstu uštede resursa kroz robotizaciju postupaka zavarivanja. Prije zavarivanja aluminijskih legura u obliku čeonih spojeva potrebno je pripremiti osnovni materijal prije samog procesa. Ukoliko je debljina osnovnog materijala 8 mm ili više potrebno je napraviti pripremu u obliku U ili V pripreme te se također preporuča korištenje bakrene ploče sa utorom kako bi se korijen zavara lakše formirao [9,10].

## 4. RENDGESKA DIFRAKCIJA

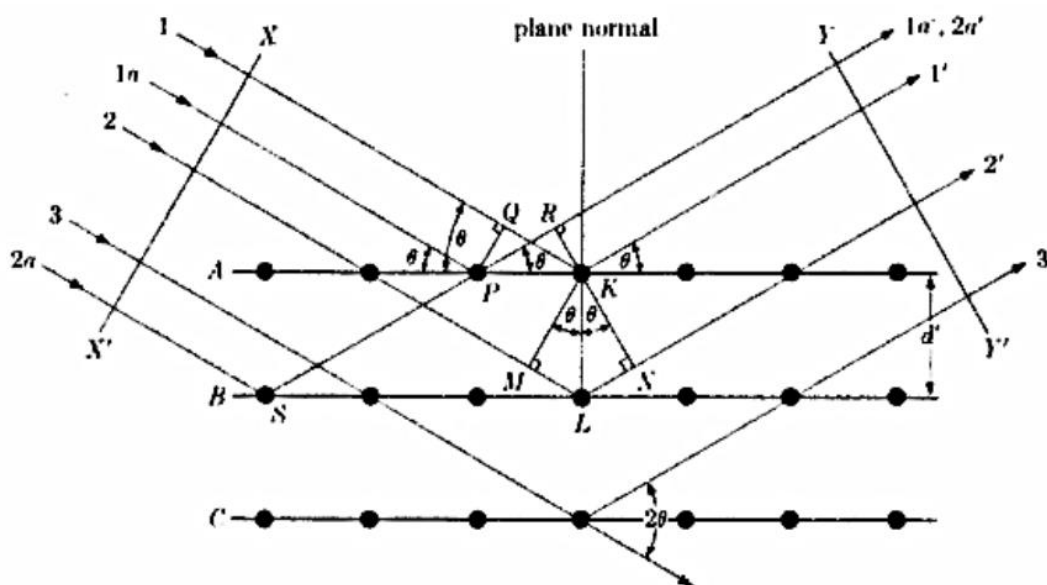
Rendgenska difrakcija je jedna od standardnih metoda za mjerenje zaostalog naprezanja. Izraz "mjerenje naprezanja" donekle dovodi u zabludu jer je naprezanje vanjsko svojstvo i to se ne može mjeriti izravno, ali ono što se može izmjeriti su deformacije. Mjere rendgenske difrakcije naprezanja ili promjene u naprezanju, iz neopterećenom stanja mogu se dobiti mjerenjem pomaka u difrakcijskom vrhu zbog vanjskog ili zaostalog naprezanja. Izmjerena naprezanja su tada pretvorena u naprezanja pomoću Hookeovog zakona. Izračuni pretpostavljaju linearnu elastičnu deformaciju materijala. Prevey navodi da su određena zaostala naprezanja pomoću difrakcije x-zraka pretpostavljeni kao aritmetički prosjek naprezanja u volumenu materijala koji je ozračen. Ovaj volumen može varirati od kvadratnih milimetara do kvadratnih centimetara i temelji se na dubini prodiranja rendgenske zrake koja je regulirana linearnim koeficijentom apsorpcije materijala na temelju vrste korištenog zračenja. U legurama na bazi aluminijske, više od 70% difrakcijskog zračenja dolazi iz prvih 100 mikrona materijala. Zbog ove male dubine prodora, prostorna rezolucija zaostalih naprezanja bit će otprilike 10 do 100 puta veća od ostalih metoda određivanja naprezanja kao što su razorne metode, ultrazvuk i magnetska metoda. Dubina prodiranja ovisi o vrsti zračenja te u praksi postoje ograničene vrste korisnog zračenja. Na primjer, Cu-K $\alpha$  zračenje, Co-K $\alpha$  zračenje i Cr-K $\alpha$  zračenje neke su od uobičajenih vrsta zračenja koje se koriste u laboratorijskim uvjetima. Ograničen izbor laboratorijskih rendgenskih cijevi dovodi do ograničenog izbora kristalografskih ravnina koje se mogu koristiti za mjerenje zaostalih naprezanja. Tablica 8 prikazuje moguće  $\{hkl\}$  ravnine refleksije dostupne za aluminij, koristeći ove različite vrste zračenja gdje su  $\{111\}$ ,  $\{200\}$ , itd. Millerovi indeksi ravnine refleksije za materijal,  $2\theta$  je Braggov kut, a Cu, Co i Cr su vrste rendgenskih cijevi. [11].

**Tablica 8. Odnos između  $2\theta$  kuta i njima pridruženih refleksijskih ravnina aluminija [11].**

$d(hkl)$	$2\theta$	$2\theta$	$2\theta$
	Cu	Co	Cr
$\{111\}$	38,5	45,02	58,67
$\{200\}$	44,76	52,47	68,9
$\{220\}$	65,15	77,39	106,27
$\{311\}$	78,3	94,29	139,48
$\{222\}$	82,51	99,94	156,96
$\{400\}$	99,19	124,29	-
$\{331\}$	112,15	148,93	-
$\{420\}$	116,71	162,61	-
$\{422\}$	137,68	-	-
$\{333\},\{511\}$	163,11	-	-

Oznaka „-“, u tablici znači da odgovarajući  $2\theta$  kut refleksije za tu valnu duljinu zračenja iznosi iznad 180 stupnjeva.

Mjerenje naprezanja u materijalu rendgenskom difrakcijom počinje korištenjem Braggovog zakona. Braggov zakon koristi geometriju sa slike 31 i povezuje kut  $2\theta$  s vrijednost  $d_0$ . Ovaj odnos dolazi iz fizike difrakcije. Cullity opisuje difrakcije kao jedan snop energije sastavljen od zraka koje se međusobno pojačavaju (tj. koji imaju istu fazu i valnu duljinu) što je rezultat efekta raspršenja, kada je atom pogođen rendgenskim zrakama [12]. Na slici 31, upadna zraka zadane valne duljine,  $\lambda$ , ulazi s lijeva (1, 1a, 2, itd.) i pogađa atome rešetke. Upadna zraka se raspršuje u svim smjerovima od strane atoma u svakoj ravnini u koju upadne zraka. Javljuju se i konstruktivne i destruktivne smetnje koje rezultiraju difrakcijskim zrakama, kojima je smjer u desno od smjera zraka 1', 1a', 2', itd. Neke difrakcijske zrake bit će usmjerene u istom smjeru i imat će istu fazu, što rezultira u difrakcijskim zrakama jačeg intenziteta [12].



Slika 31. Načelo difrakcije temelji se na odnosu između  $\lambda$ , difrakcijskog kuta snopa,  $2\theta$ , i  $d'$  dovodi do Braggovog zakona,  $n\lambda = 2d'\sin(\theta)$  [12].

Odnos između valne duljine  $\lambda$ , kuta difraktirane zrake  $2\theta$ , interplanarna udaljenost rešetke  $d'$ , dovodi do Braggovog zakona (jednadžba 2) gdje je  $n$

red difrakcije.

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

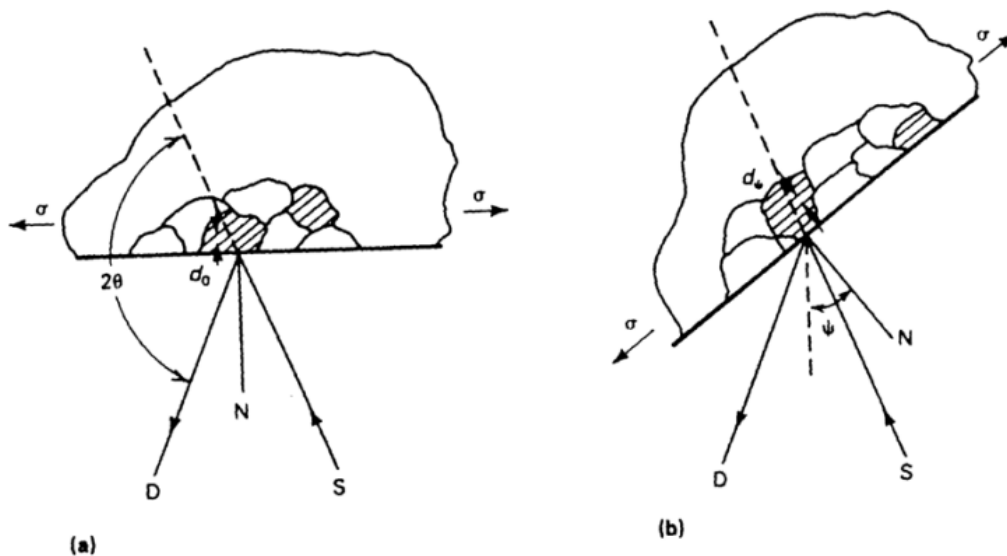
Na temelju činjenice da  $\sin\theta$  ne može biti veći od jedinice, ograničenja člana  $\lambda$  (ne može biti prevelik ili premalen) i koristeći refleksiju prvog reda (tj.  $n=1$ ) Jednadžba 2 postaje jednadžba 3 [12]

$$\lambda = 2d\sin\theta \quad (3)$$

Poznavajući valnu duljinu upadnog zračenja  $\lambda$ , i vrijednost  $2\theta$  iz središta profila difrakcijskog vrha, interplanarni razmak rešetke (tj.  $d$  razmak), može biti izračunati. Iz razmaka  $d$  za danu refleksiju  $\{hkl\}$  parametar jedinične ćelije  $a$  za kubični materijali mogu se izračunati pomoću jednadžbe 4: [12]

$$d = \frac{a}{\sqrt{h^2+k^2+l^2}} \quad (4)$$

Izbor difrakcijskog vrha  $2\theta$ , uvelike utječe na preciznost mjerenje napreznja. Što je veći Braggov kut ( $2\theta$  kut) to je veća osjetljivost rendgenskog mjerenja zaostale deformacije i veća preciznost. Općenito treba koristiti najveći Braggov kut za određeno zračenje. U praksi  $2\theta$  bi trebao biti veći od 120 stupnjeva. Braggov kut kako je opisan na slici 32 dolazi od činjenice da je upadna zraka  $S$  okomita na reflektirajuću ravninu  $N$ , difrakcijska zraka  $D$  uvijek su komplanarne, a kut između difrakcijske zrake i propuštene zrake je uvijek  $2\theta$ . Vrijednost  $d_0$  na slika 32 je interplanarni razmak rešetke, također poznat kao  $d$  razmak, kada je  $\psi=0$  stupnjeva. Napreznja  $\sigma$ , je primijenjeno ili zaostalo napreznja koje djeluje na rešetku. Pojam  $d_{\psi}$  na slici 32 (b) je interplanarni razmak rešetke kada se uzorak rotira za neki  $\psi$  kut izvan normale uzorka. Ako postoji promjena u  $d$  razmaku od rešetke, tada će doći do promjene u vrijednosti  $2\theta$  kako se uzorak rotira od  $\psi=0$ , slika 32 (a) do  $\psi = \psi$  na slici 32 (b). Mjerenje ove promjene u razmaku  $d$  je osnovni princip prema kojem se napreznja mjeri difrakcijom x-zraka. Pomaci u vrijednostima  $2\theta$  rezultiraju promjenom izmjenjenog  $d$  razmaka, koji se koristi za određivanje deformacije materijala [12]



**Slika 32. Opis Braggovog kuta u odnosu na principe rendgenskih zraka za mjerenje napreznja (a)  $\psi = 0$  (b)  $\psi = \psi$ . [12]**

Nakon što se izmjeri  $d$  od težišta kuta  $2\theta$  može se odrediti izmjenjeno napreznja. Koristeći poznatu vrijednost  $d_0$  (nenapregnuta rešetka razmaka) i izmjenjeni  $d_{\psi}$  ( $d$  razmak za dani  $\psi$  i  $\phi$  kut), napreznja u smjeru upadnog snopa,  $\epsilon'_{33}$ , može se dobiti pomoću jednadžbe 5 [13].

$$(\epsilon'_{33})_{\psi} = (d_{\psi} - d_0) / d_0 \quad (5)$$

Kako bi se došlo do konačnog rješenja potrebno je provesti još mnogo koraka koji neće biti pokriveni u ovom radu. Zbog kompleksnosti proračuna predložena je  $\cos \alpha$  metoda. Navedena metoda proučava longitudinalne i transverzalne komponente naprezanja te je bazirana na osnovama teorije elastičnosti deformacije tijela u proizvoljnim smjerovima [14].

$$\varepsilon_{\varphi\psi} = \frac{1}{2}S_2 (\sigma_{11}\cos 2\varphi + \sigma_{22}\sin 2\varphi + \sigma_{12}\sin 2\varphi - \sigma_{33}) \sin 2\psi + \frac{1}{2}S_2 (\sigma_{13}\cos \varphi + \sigma_{23}\sin \varphi) \sin 2\psi + S_1 (\sigma_{11} + \sigma_{22}) + (\frac{1}{2}S_2 + S_1) \sigma_{33} \quad (6)$$

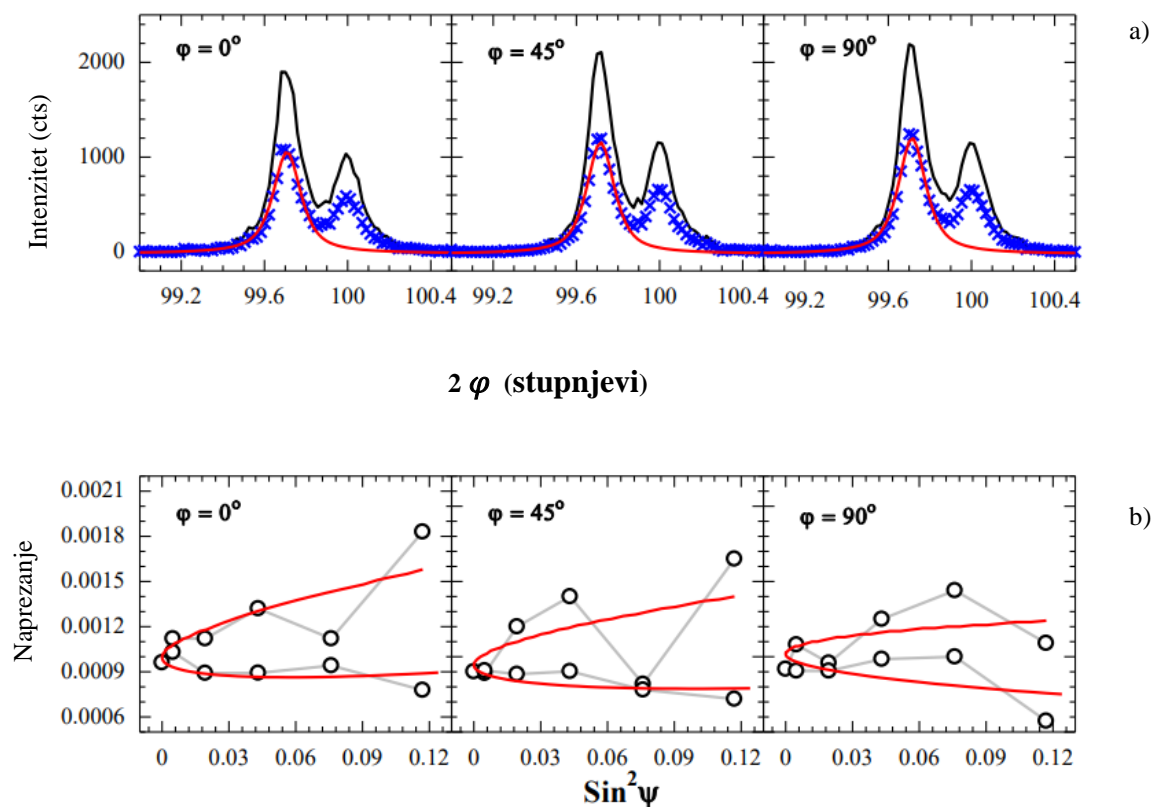
gdje je  $\varepsilon_{\varphi\psi}$  izmjerena deformacija u smjeru normale ravnine  $n_{\varphi\psi}$  od  $(hkl)$  mrežnih ravnina,  $\frac{1}{2}S_2$  i  $S_1$  je konstanta elastičnosti ovisna o materijalu i  $(hkl)$  (također ovisna o teksturi, ako postoji),  $\sigma_{ik}$  je naprezanje normalne ( $i = k$ ) i posmične ( $i \neq k$ ) komponente naprezanja tenzora naprezanja,  $\varphi$  je kut rotacije uzorka paralelno s načinom prijenosa difraktometra i  $\psi$  je kut nagiba normalan na površinu uzorka. Generalizirani model preferirane sferne harmonije korišten je za istraživanje tekstura. Mjerenje teksture tehnikom difrakcije X-zraka temelji se na generaliziranoj jednadžbi osi ovisno o simetriji kristala koja se istražuje [14]:

$$O_p(\varphi, \beta, \psi, \gamma) = 1 + \sum_{l=1}^L \left( \frac{4\pi}{2l+1} \right) \sum_{n_1=-1}^{+1} \sum_{n=-1}^{+1} (C_l^{mn} K_l^m(\varphi, \beta) K_l^n(\psi, \gamma)) \quad (7)$$

$O_p(\varphi, \beta, \psi, \gamma)$  gdje su opće distribucijske osi  $K_l^m(\varphi, \beta)$  te  $K_l^n(\psi, \gamma)$ . Koordinate refleksije  $(\varphi, \beta)$  određene su izborom indeksa refleksije  $(hkl)$  i koordinata uzorka  $(\psi, \gamma)$ .

Iz literature [14] zavarivana je ploča od aluminijske legure 6082T. Slika 33 prikazuje smanjenje uzorka podataka i prilagođavanje krivulje što pokazuje dobro slaganje između smanjenih podataka (plavo) i pseudo-Voigt (crveno). Također jasno pokazuje da se intenzitet povećava od  $\varphi = 0^\circ$ ,  $45^\circ$  odnosno  $90^\circ$ . Ukupno jedanaest podataka svakog azimutnog kuta ( $\varphi$ ) je smanjeno te je postavljena i procijenjena  $\sin 2\psi - \sigma$  dijagramom kao što je prikazano na slici 33(b). Sve krivulje pokazuju vlačno naprezanje (pozitivno nagib), smično naprezanje (eliptična funkcija) i teksturu (valovita krivulja). Kompletan rezultat je prikazano u tablici 9. Najveće vlačno naprezanje je duž smjera kotrljanja RD (*rolling direction*) ( $\varphi = 0^\circ$ ) i smanjeno na nula kao se približava poprečnom smjeru TD (*transverse direction*) ( $\varphi = 90^\circ$ ). Dok je posmično naprezanje prisutno u svim smjerovima iako je njegova vrijednost smanjena prateći trend vlačnog naprezanja. Neželjeno vlačno naprezanje od 109,3 MPa, što je ~50% njegove krajnje vlačne čvrstoće i smicanja naprezanje od 28,7 MPa što je 20% njegove čvrstoće na smicanje na  $\varphi = 0^\circ$

zaključuje se da će glavni uzrok loma biti vlačno naprezanje, dok će pri  $\varphi = 90^\circ$  smično naprezanje nadvladati uzrok loma zbog vlačnog naprezanja [14].



Slika 33. a) Difraktogram odabranog kuta pri  $\psi = 0$  (crno), smanjena krivulja (plavo) i pseudo-Voigtova aproksimacija od  $\varphi = 0$ ,  $\varphi = 45$  i  $\varphi = 90$ , b)  $\sin^2\psi - \sigma$  graf  $\varphi = 0$ ,  $\varphi = 45$  i  $\varphi = 90$  [14].

Tablica 9. Prikaz rezultata zaostalih naprezanja [14]

$\varphi$ ( $^\circ$ )	Normalno naprezanje (MPa)	Smično naprezanje (MPa)
0	$109,3 \pm 21,2$	$-28,7 \pm 6,1$
45	$68,9 \pm 19,4$	$25,6 \pm 8,5$
90	$-9,9 \pm 9,4$	$-20 \pm 8,5$



## 5. EKSPERIMENTALNI DIO

U eksperimentalnom djelu ovog rada provedeno je zavarivanje aluminijskih ploča serije 5000 (Al-Mg legure) u obliku sučeljenog spoja. Korištena je konvencionalna MIG pulsna tehnologija (DCP) te modificirana AC *wave pulse* MIG tehnologija (ACWP). Na dobivenim uzorcima provedena su razorna (makroanaliza, mjerenje tvrdoće) te nerazorna ispitivanja (vizualna metoda, ispitivanje penetrantima, rendgenska difrakcija). U komparativnoj analizi prikazani su utjecaji parametara zavarivanja obju metoda na mehanička svojstva zavara te je dana usporedba konvencionalne i modificirane MIG tehnologije. Eksperimentalni dio rada proveden je u Laboratoriju za zavarivanje Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu.

### 5.1 Korišteni osnovni te dodatni materijal

U eksperimentu kao osnovni materijal korištena je aluminijska legure petog razreda te dodatni materijal 5356. Prikaz njihovih mehaničkih i kemijskih svojstava prikazan je u tablici 10.

**Tablica 10. Prikaz kemijskih i mehaničkih svojstava osnovnog i dodatnog materijala [15,16]**

Legura		5356	5xxx
Udio legirnog elementa	%Si	0,05	0,30max
	%Fe	0,09	0,07 max
	%Cu	0,03	0,20 max
	%Mn	0,12	0,20 max
	%Mg	4,9	0,50 – 1.10
	%Cr	0.08	0,10 max
	%Zn	< 0,01	0,25 max
	%Ti	0,15	-
	%Be	0.0002	-
$R_{p0,2}$ , MPa		110	95
$R_m$ , MPa		240	125 – 165

## 5.2 Priprema uzorka, vizualna metoda kontrole te zavarivanje

Za eksperiment korišteni su četiri seta ploča debljine 8 mm. Prije zavarivanja sa ploča je maknut sloj oksida te su očišćene acetilenom. Za postojeću debljinu nije provedena nikakva priprema prije zavarivanja. Ploče prije zavarivanja prikazane su na slici 34.



Slika 34. Prikaz Al-Mg ploča prije zavarivanja

Uzorak 1 zavaren je standardnim postupkom DCP MIG dok su ostala tri zavarena sa ACWP MIG postupkom. Korišten je stroj za zavarivanje marke Daihen Varstroj WB-W400 AC MIG prikazan na slici 35, zaštitni plin korišten je Argon klase 5.0 te žica debljine 1,2 mm. Korišteni parametri zavarivanja prikazani su u tablici 11.

Tablica 11. Prikaz parametra zavarivanja

Uzorak	1	2	3	4
Tehnologija	DCP	ACWP	ACWP	ACWP
Duljina zavora, mm	300	300	300	300
Jakost struje, A	230	244	230	246
Napon zavarivanja, V	24,9	24,6	25,8	24,5
Frekvencija, wave pulsa, Hz	-	3	3	3
Brzina zavarivanja, cm/min	60	56	56	46
Brzina žice, m/min	15	15	16,1	16,1
Protok plina, l/h	22,5	22,5	22,5	22,5
Broj prolaza	1	1	1	1
Unos topline, KJ/cm	4,58	5,14	5,09	6,29

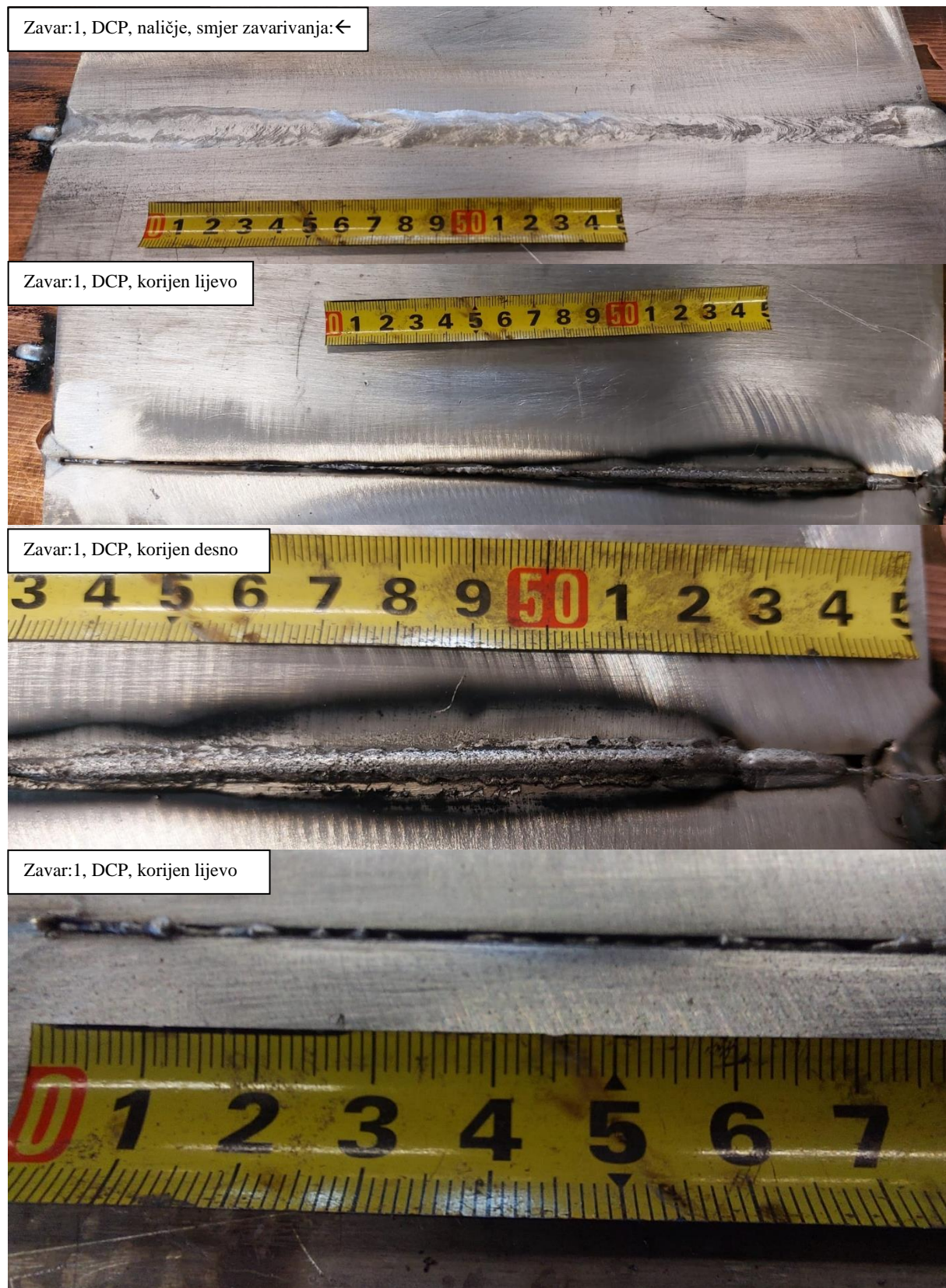
Unos topline prikazan u tablici 11 računat je prema formuli 8, korisnost sustava ( $\eta$ ) za MIG proces zavarivanja iznosi od 0,8.

$$Q = \frac{U \cdot I}{v_c} \cdot \eta \cdot \frac{60}{1000} \quad (8)$$

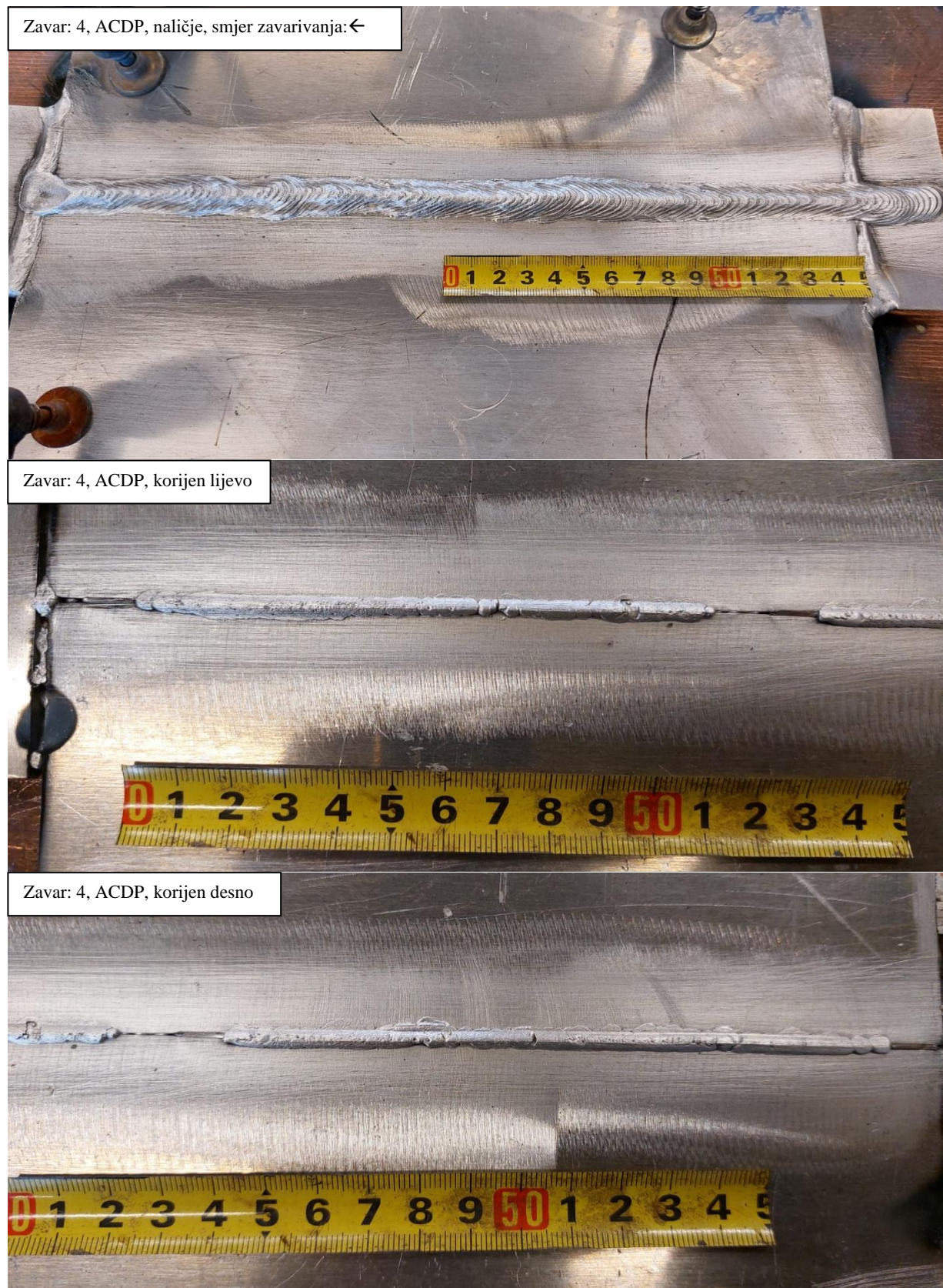


Slika 35. Prikaz aparata za zavarivanje

Prije provedbe zavarivanja ploče su pričvršćene za radni stol, bakrena ploča sa utorom za formiranje korijena bila je postavljena ispod radnih komada. Razmak između ploča iznosio je 1mm. Zavarivanje na svim pločama bilo je provedeno u jednom prolazu sa istom tehnikom rada i sličnom brzinom zavarivanja. Zbog velike svjetlost praćenje formiranja taline bilo je otežano. Na slikama 36 i 37 prikazani su samo reprezentativni uzorci navedenih tehnologija, konkretnije samo prvi i četvrti uzorak. Razlog izbacivanja drugog i trećeg uzorka iz daljnje analize je nepotpuno formiranja korijena kao što se može primijetiti u poglavlju ispitivanje penetrantima. Na slici 36 može se primijetiti da prilikom zavarivanja sa DCP MIG (zavar 1) tehnologijom oblik nadvišena zavara nije jednak kroz cijelu duljinu zavara. U prvih 10 cm zavar je u ravnini sa osnovnim materijalom te nakon prve trećine zavara poprima konkavan oblik. Također se može primijetiti da je nedovoljan unos topline u prvom djelu zavara rezultirao sa neprovarenim korijenom. Ostali uzorci su zavarivani sa ACWP MIG tehnologijom. Prije zavarivanja četvrte ploče na tri mjesta su postavljeni metalni limovi debljine 1 mm kako bi udaljenost između dviju ploča bila konstantna prilikom zavarivanja. Može se primijetiti na korijenu zavara četvrte ploče da nije došlo do provarivanja zbog umetnutih limova.



Slika 36. Prikaz zavara dobivenog korištenjem DCP MIG tehnologije



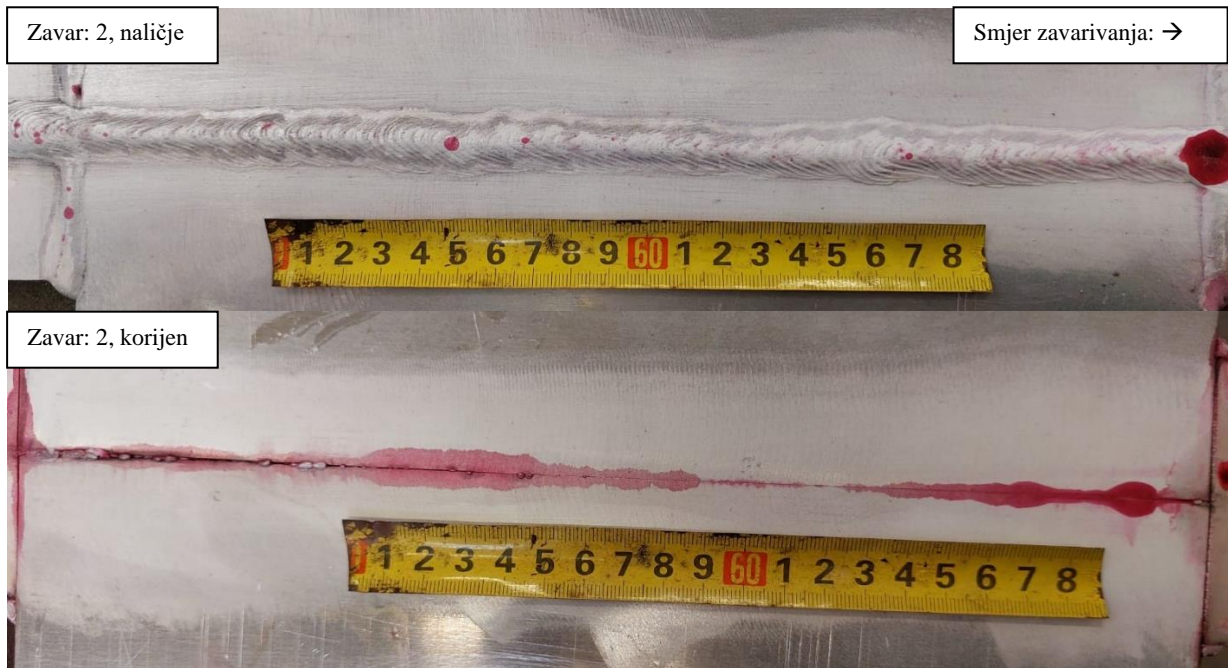
Slika 37. Prikaz zavora dobivenog korištenjem ACWP MIG tehnologije

### 5.3 Ispitivanje penetrantima

Nakon provedbe zavarivanja uzorci su ostavljeni da se ohlade te je potom provedeno nerazorno ispitivanje koristeći penetrante marke Magnaflux. Korišteni su čistač, penetrant te razvijlač u spreju. Uzorci su prvo bili očišćeni od oksida i produkata zavarivanja te potom detaljnije očišćeni sa SKC-S čistačem, na uzorke je nanesen sloj SKL-WP2 penetranta te prema normi EN-ISO-3452-2-2000 ostavljen deset minuta da se suši. Nakon deset minuta vodom je ispran crveni penetrant te su uzorci ponovno ostavljeni da se suše. Na kraju je nanesen razvijlač SKD-S2 te su uzorci ostavljeni da se osuše. Vidljivi rezultati prikazani su na slikama 38 - 41.



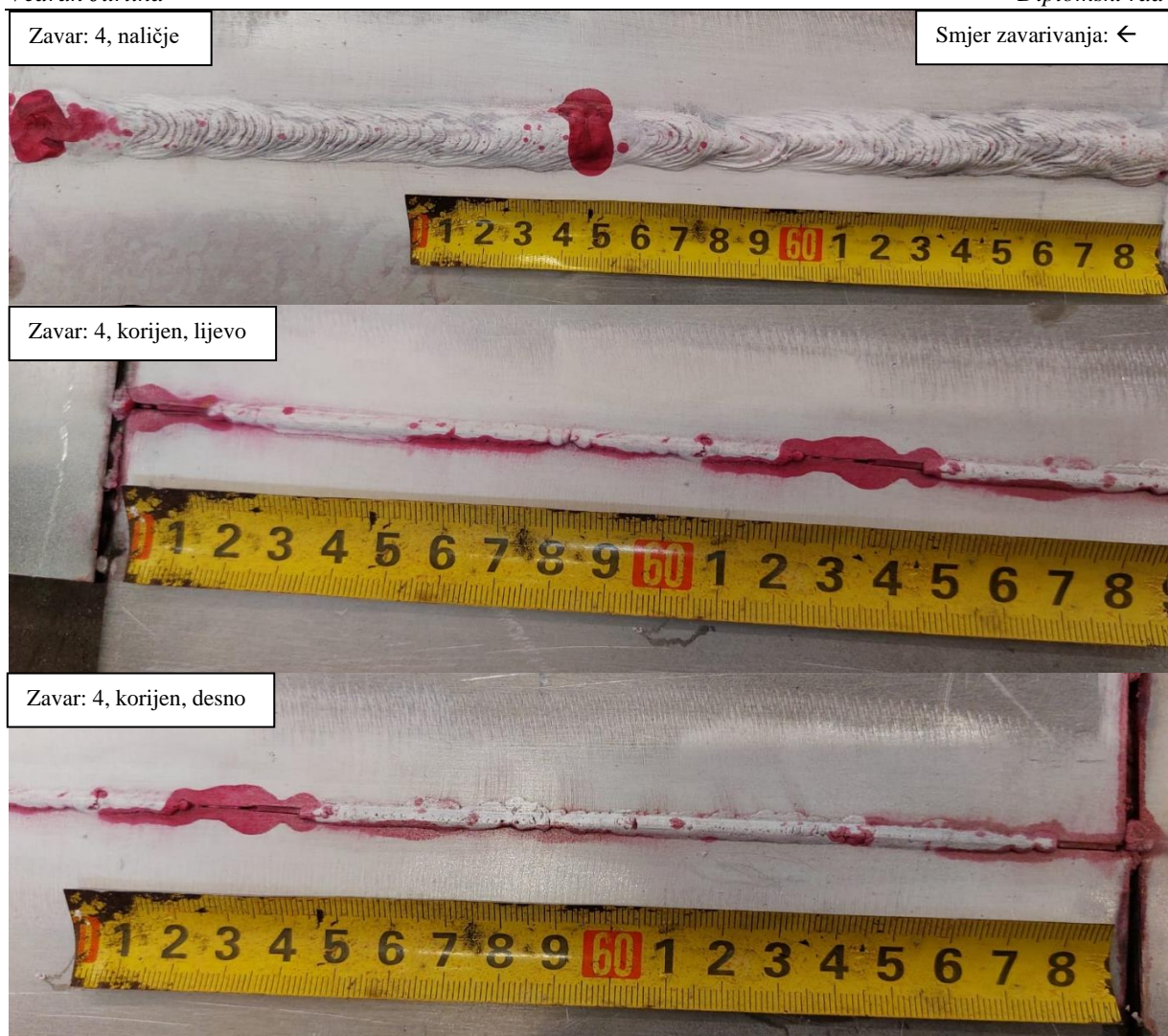
Slika 38. Rezultat ispitivanja penetrantima, uzorak 1



Slika 39. Rezultat ispitivanja penetrantima, uzorak 2



Slika 40. Rezultat ispitivanja penetrantima, uzorak 3



Slika 41. Rezultat ispitivanja penetrantima, uzorak 4

Svi zavari posjeduju pore do 3 mm u promjeru te loše formirani korijen. Prva i četvrta ploča uzete su za daljnje ispitivanje kao mjerni uzorci dok su druga i treća odbačene. Kako bi se spriječilo nepravilno formiranje korijena ili ne formiranje korijena uopće potrebno je posebno posvetiti pažnju parametrima prije zavarivanja. Kako bi ispitivanje penetrantima ukazalo na potencijalne pojave pukotina pittinga ili ostalih površinskih nepravilnosti potrebno je dobro isprati penetrant sa uzoraka kako bi pri daljnjem procesu izbjegli pojavu *false positive*. To je scenarij gdje dobivamo nepravilnu naznaku da se pojavila nepravilnost na određenom mjestu. Na slici 41 na strani korijena vidljivo je da na mjestima između umetnutih limova došlo je do uniformnijeg formiranja korijena nego na uzorcima dva i tri te je zbog toga odlučena da će se uzorak četiri predstavljati ACWP metodu u daljnjem ispitivanju. Na svim zavarima je vidljivo nastajanje pittinga na samom početku i kraju zavara te je zbog toga potrebno uvesti dodatan materijal kako bi se električni luk uspio stabilizirati.



## 5.4 Ispitivanje rendgenskom difrakcijom

Nakon ispitivanja penetrantima odabrani uzorci su očišćeni te potom pripremljeni za elektropoliranje kako bi se skinuo sloj oksida i time lakše proveo proces rendgenske difrakcije. Uređaj korišten za elektropoliranje marke Pulstech pod imenom elektrokemijski poliranja prikazan je na slici 42.



Slika 42. Prikaz stroja za elektrokemijsko poliranje sa svim nastavcima [18]

Za elektrokemijsko nagrizanje korištene su komponente: 1, 3, 4, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 13 prikazane na slici 42. Duljina trajanja procesa u vremenu 60 sekundi rezultira je dubinom od 30  $\mu\text{m}$ . Na pločama označenim sa jedan i četiri odabrana su mjesta na kojima je izvršeno nagrizanje kako bi se površinska naprezanja mogla točnije očitati pomoću rendgenske difrakcije.



Slika 43. Prikaz mjesta nagrizanja

Na slici 43 prikazano je nagrizanje četvrte ploče u svrhu micanja oksidnog sloja kako bi prilikom provođenja rendgenske difrakcije ostvarili točnije rezultate.

Ispitivanje rendgenske difrakcije provedeno je na uređaju marke Pulstec  $\mu$ -X360s. Uređaj je vođen sa robotskom rukom marke Kuka. Robotska ruka posjeduje šest stupnjeva slobode gibanja te olakšava pozicioniranje uređaja za ispitivanje rendgenske difrakcije. Uređaj za rendgensku difrakciju prikazan je na slici 44.



**Slika 44. Pulstec  $\mu$ -X360s sa robotskom rukom marke Kuka**

Na zavarenim pločama 1 i 4 provedeno je elektrokemijsko nagrizanje, konkretnije 24 točke na ploči broj 4 te 8 točaka na ploči broj 1. Na ploči broj 4 provedeno je jedno ispitivanje na svakoj točki dok na ploči 1 provedeno je 3 ispitivanja naprezanja u svakoj točki nagrizanja. Provedeno je ispitivanje u svim točkama na dva načina: paralelno sa zavarom te okomito na zavar. Dobiveni rezultati prikazani su u tablicama 12 i 13. U tablicama su prikazani iznosi glavnih naprezanja  $\sigma$  (X), poprečnih naprezanja, tangencijalnih naprezanja  $\tau_{xy}$  te puna širina na pola maksimuma (FWHM). U distribuciji, puna širina na pola maksimuma (FWHM) je razlika između dviju vrijednosti nezavisne varijable pri kojoj je zavisna varijabla jednaka polovici svoje najveće vrijednosti.

**Tablica 12. Prikaz dobivenih rezultata zaostalih naprezanja za ploču 4, smjer mjerenja: longitudinalan**

Longitudinalno_ACWP			
Točka	$\sigma(x)$ , MPa	$\tau_{xy}$ , MPa	FWHM, °
1,1	-112	0	1,75
1,2	-94	5	1,75
1,3	-89	4	1,74
1,4	29	-8	1,7
1,5	-24	19	1,71
1,6	-130	28	1,81
1,7	-150	29	1,88
1,8	-139	22	1,82
2,1	-103	33	1,8
2,2	-73	39	1,75
2,3	-72	29	1,78
2,4	115	19	1,7
2,5	30	1	1,79
2,6	-133	13	1,86
2,7	-117	14	1,87
2,8	-84	0	1,79
3,1	-104	34	1,75
3,2	-96	36	1,8
3,3	39	62	1,8
3,4	61	20	1,74
3,5	9	12	1,8
3,6	-123	20	1,83
3,7	-93	2	1,84
3,8	-61	-1	1,8

**Tablica 13. Prikaz dobivenih rezultata zaostalih naprezanja za ploču 4, smjer mjerenja: transverzalan**

Transverzalno_AC_DP			
Točka	$\sigma(x)$ , MPa	$\tau_{xy}$ , MPa	FWHM, °
1,1	-146	17	1,85
1,2	-87	30	1,84
1,3	-155	13	1,91
1,4	-14	34	1,74
1,5	-47	5	1,73
1,6	-117	9	1,83
1,7	-125	2	1,87
1,8	-89	13	1,83
2,1	-38	13	1,78
2,2	-81	4	1,86
2,3	-24	3	1,78

2,4	30	22	1,71
2,5	-38	20	1,78
2,6	-96	16	1,8
2,7	-57	16	1,77
2,8	-33	26	1,77
3,1	-31	2	1,79
3,2	-22	-13	1,76
3,3	-40	-4	1,81
3,4	-22	12	1,74
3,5	-9	16	1,74
3,6	-85	24	1,8
3,7	-31	27	1,73
3,8	-35	26	1,75

Isti postupak je proveden sa pločom broj jedan sa jedinom razlikom u povećanju broja ispitivanja u svakoj točki. Dobiveni rezultati zaostalih napreznja prikazani su u tablicama 14 i 15.

**Tablica 14. Prikaz dobivenih rezultata zaostalih napreznja za ploču 1, smjer mjerenja: longitudinalan**

Longitudinalno_DCP			
točka	$\sigma(x)$ , MPa	$\tau_{xy}$ , MPa	FWHM, °
1,1	-82	53	1,8
	-70	42	1,73
	-34	52	1,73
1,2	-98	52	1,76
	-102	41	1,76
	-91	40	1,84
1,3	-77	45	1,78
	-100	42	1,77
	-84	44	1,78
1,4	-35	17	1,67
	5	17	1,75
	54	17	1,74
1,5	94	-5	1,73
	48	6	1,68
	98	0	1,73
1,6	-70	-24	1,74
	-62	-20	1,74
	-72	-16	1,79
1,7	-58	-17	1,73
	-56	-27	1,72

	-70	-13	1,79
	-47	-13	1,75
	-44	-20	1,73
1,8	-53	-15	1,76

**Tablica 15. Prikaz dobivenih rezultata zaostalih naprezanja za ploču 1, smjer mjerenja: longitudinalan**

Transverzalno_DC_P			
točka	$\sigma(x)$ , MPa	$\tau_{xy}$ , MPa	FWHM, °
	-31	-19	1,73
	-30	-22	1,72
1,1	-117	-11	1,85
	-54	-19	1,74
	-72	-21	1,75
1,2	-75	-16	1,77
	-82	-13	1,85
	-60	-21	1,72
1,3	-76	-12	1,81
	-23	5	1,75
	-30	8	1,73
1,4	-67	-4	1,75
	-22	21	1,7
	-23	33	1,72
1,5	4	39	1,73
	-27	43	1,75
	-5	45	1,74
1,6	-36	41	1,76
	-21	53	1,72
	-47	33	1,76
1,7	-35	45	1,76
	-23	41	1,74
	-34	44	1,74
1,8	-65	39	1,81

U tablicama 14 i 15 može se zamijeti da su određene točke označene sa crvenom bojom što ukazuje da su izbačene iz konačne analize zbog ne sukladnih iznosa i oblika Debayeve kružnice. Primjer lošeg očitavanja prikazan je na slikama 45 i 46 na primjeru longitudinalnog očitana točki 1.4.1 i 1.5.2 te dobrog očitavanja točke: 1.8.2 prikazanog na slici 47.

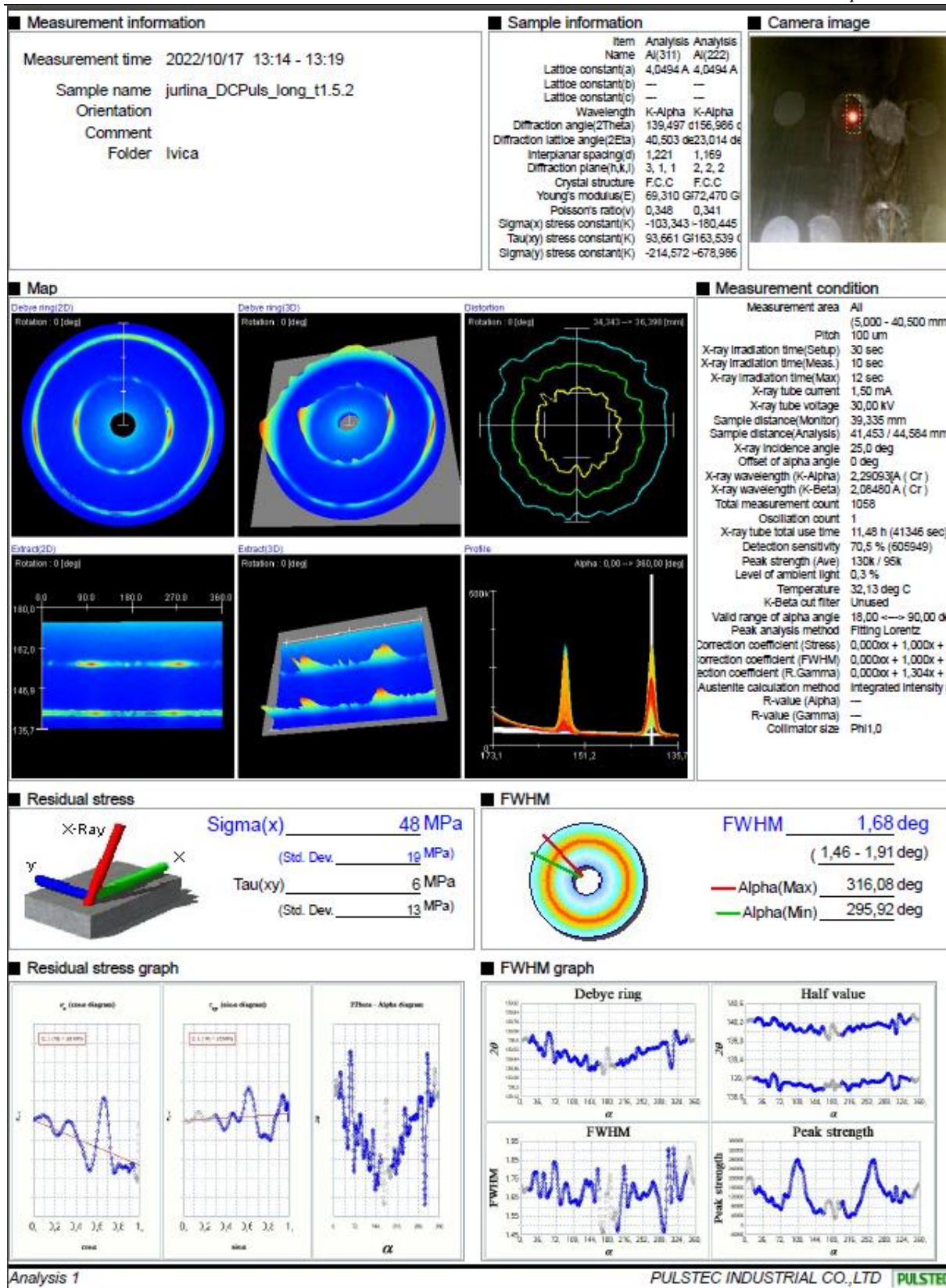
<b>Measurement information</b> Measurement time 2022/10/17 13:01 - 13:04 Sample name jurina_DCPuls_long_t1.4.1 Orientation Comment Folder Ivica	<b>Sample information</b> <table border="1"> <tr><td>Item</td><td>Analysis</td><td>Analysis</td></tr> <tr><td>Name</td><td>Al(311)</td><td>Al(222)</td></tr> <tr><td>Lattice constant(a)</td><td>4,0494 Å</td><td>4,0494 Å</td></tr> <tr><td>Lattice constant(b)</td><td>—</td><td>—</td></tr> <tr><td>Lattice constant(c)</td><td>—</td><td>—</td></tr> <tr><td>Wavelength</td><td>K-Alpha</td><td>K-Alpha</td></tr> <tr><td>Diffraction angle(2Theta)</td><td>139,497</td><td>156,966</td></tr> <tr><td>Diffraction lattice angle(2Eta)</td><td>40,503</td><td>de23,014</td></tr> <tr><td>Interplanar spacing(d)</td><td>1,221</td><td>1,169</td></tr> <tr><td>Diffraction plane(h,k,l)</td><td>3, 1, 1</td><td>2, 2, 2</td></tr> <tr><td>Crystal structure</td><td>F.C.C</td><td>F.C.C</td></tr> <tr><td>Young's modulus(E)</td><td>69,310</td><td>Gf72,470</td></tr> <tr><td>Poisson's ratio(v)</td><td>0,348</td><td>0,341</td></tr> <tr><td>Sigma(x) stress constant(K)</td><td>-103,343</td><td>-180,445</td></tr> <tr><td>Tau(xy) stress constant(K)</td><td>93,661</td><td>Gf163,539</td></tr> <tr><td>Sigma(y) stress constant(K)</td><td>-214,572</td><td>-678,966</td></tr> </table>	Item	Analysis	Analysis	Name	Al(311)	Al(222)	Lattice constant(a)	4,0494 Å	4,0494 Å	Lattice constant(b)	—	—	Lattice constant(c)	—	—	Wavelength	K-Alpha	K-Alpha	Diffraction angle(2Theta)	139,497	156,966	Diffraction lattice angle(2Eta)	40,503	de23,014	Interplanar spacing(d)	1,221	1,169	Diffraction plane(h,k,l)	3, 1, 1	2, 2, 2	Crystal structure	F.C.C	F.C.C	Young's modulus(E)	69,310	Gf72,470	Poisson's ratio(v)	0,348	0,341	Sigma(x) stress constant(K)	-103,343	-180,445	Tau(xy) stress constant(K)	93,661	Gf163,539	Sigma(y) stress constant(K)	-214,572	-678,966	<b>Camera image</b> 
Item	Analysis	Analysis																																																
Name	Al(311)	Al(222)																																																
Lattice constant(a)	4,0494 Å	4,0494 Å																																																
Lattice constant(b)	—	—																																																
Lattice constant(c)	—	—																																																
Wavelength	K-Alpha	K-Alpha																																																
Diffraction angle(2Theta)	139,497	156,966																																																
Diffraction lattice angle(2Eta)	40,503	de23,014																																																
Interplanar spacing(d)	1,221	1,169																																																
Diffraction plane(h,k,l)	3, 1, 1	2, 2, 2																																																
Crystal structure	F.C.C	F.C.C																																																
Young's modulus(E)	69,310	Gf72,470																																																
Poisson's ratio(v)	0,348	0,341																																																
Sigma(x) stress constant(K)	-103,343	-180,445																																																
Tau(xy) stress constant(K)	93,661	Gf163,539																																																
Sigma(y) stress constant(K)	-214,572	-678,966																																																

<b>Map</b> Debye ring(2D) Rotation: 0 [deg] 	Debye ring(3D) Rotation: 0 [deg] 	Distortion Rotation: 0 [deg] 34,738 --> 36,628 [mm] 	<b>Measurement condition</b> Measurement area All (5,000 - 40,500 mm) Pitch 100 um X-ray irradiation time(Setup) 30 sec X-ray irradiation time(Meas.) 17 sec X-ray irradiation time(Max) 18 sec X-ray tube current 1,50 mA X-ray tube voltage 30,00 kV Sample distance(Monitor) 39,532 mm Sample distance(Analysis) 41,781 / 45,004 mm X-ray incidence angle 25,0 deg Offset of alpha angle 0 deg X-ray wavelength (K-Alpha) 2,29093(A ( Cr ) X-ray wavelength (K-Beta) 2,08480 A ( Cr ) Total measurement count 1052 Oscillation count 1 X-ray tube total use time 11,44 h (41193 sec) Detection sensitivity 89,3 % (767970) Peak strength (Ave) 252k / 128k Level of ambient light 0,3 % Temperature 32,13 deg C K-Beta cut filter Unused Valid range of alpha angle 18,00 <--> 90,00 deg Peak analysis method Fitting Lorentz Correction coefficient (Stress) 0,0000x + 1,0000x + 0 Correction coefficient (FWHM) 0,0000x + 1,0000x + 0 Correction coefficient (R.Gamma) 0,0000x + 1,304x + 0 Austenite calculation method Integrated Intensity r: R-value (Alpha) — R-value (Gamma) — Collimator size Phi1,0
Extract(2D) Rotation: 0 [deg] 	Extract(3D) Rotation: 0 [deg] 	Profile Alpha: 0,00 --> 360,00 [deg] 	

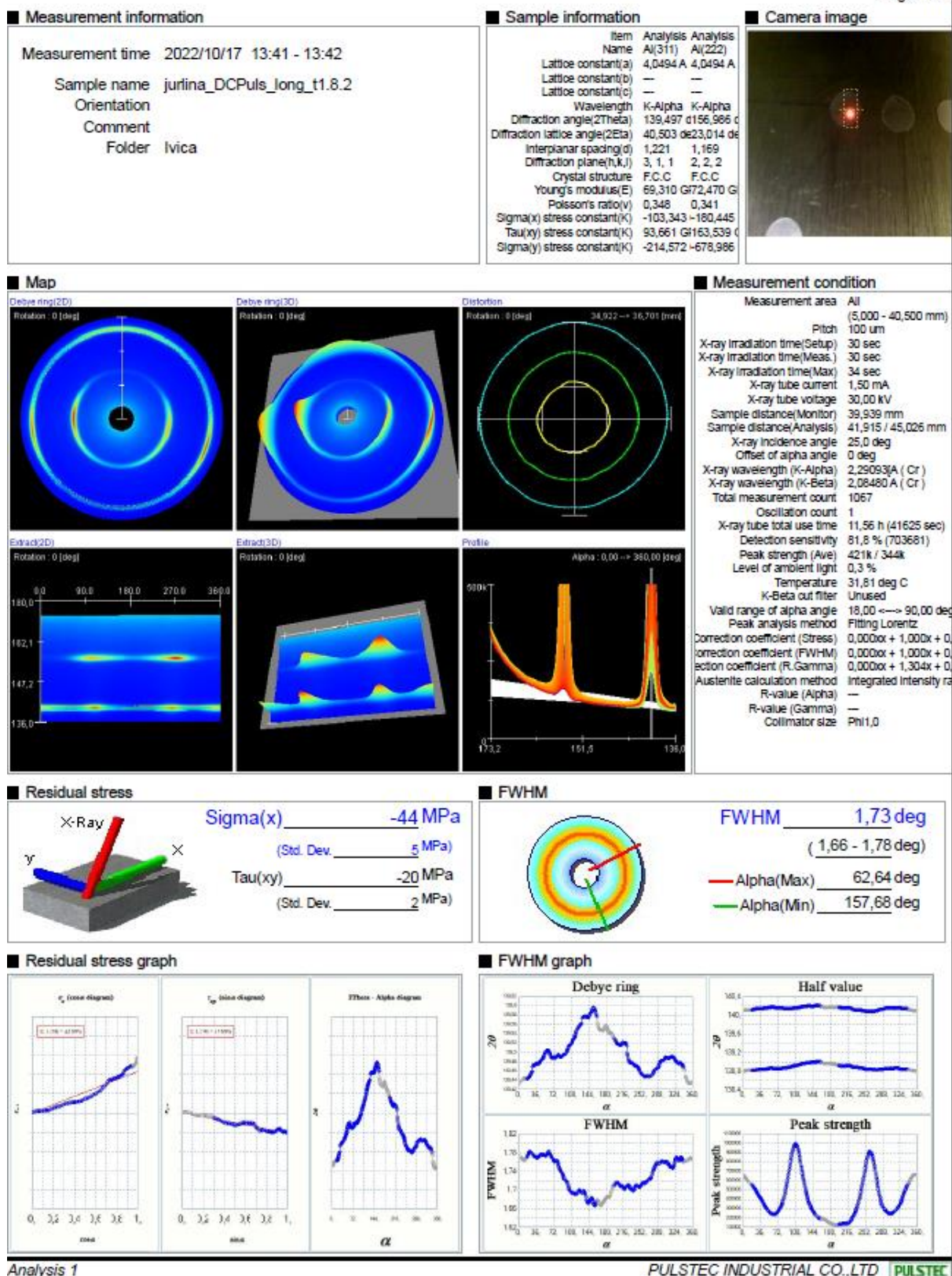
<b>Residual stress</b> 	Sigma(x) <u>-35 MPa</u> (Std. Dev. <u>11 MPa</u> ) Tau(xy) <u>17 MPa</u> (Std. Dev. <u>13 MPa</u> )	<b>FWHM</b> 	FWHM <u>1,67 deg</u> ( <u>1,50 - 1,87 deg</u> ) Alpha(Max) <u>86,40 deg</u> Alpha(Min) <u>215,28 deg</u>
----------------------------	--	-----------------	---

<b>Residual stress graph</b> 	<b>FWHM graph</b> 
----------------------------------	-----------------------

Slika 45. Primjer lošeg očitavanja naprezanja na točki 1.4.1, longitudinalno DCP



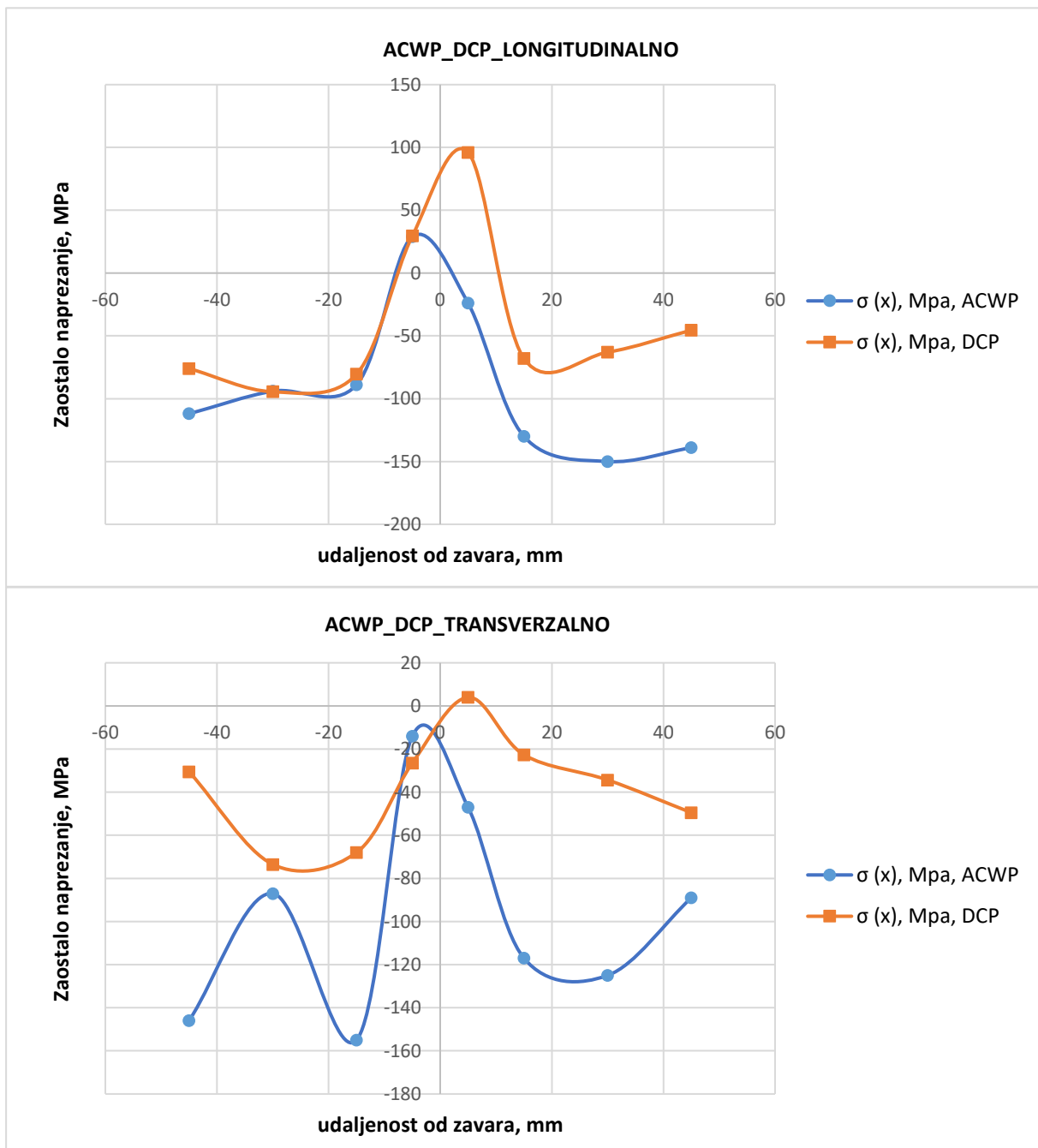
Slika 46. Prikaz lošeg očitavanja napreznja na točki 1.5.2, longitudinalno DCP



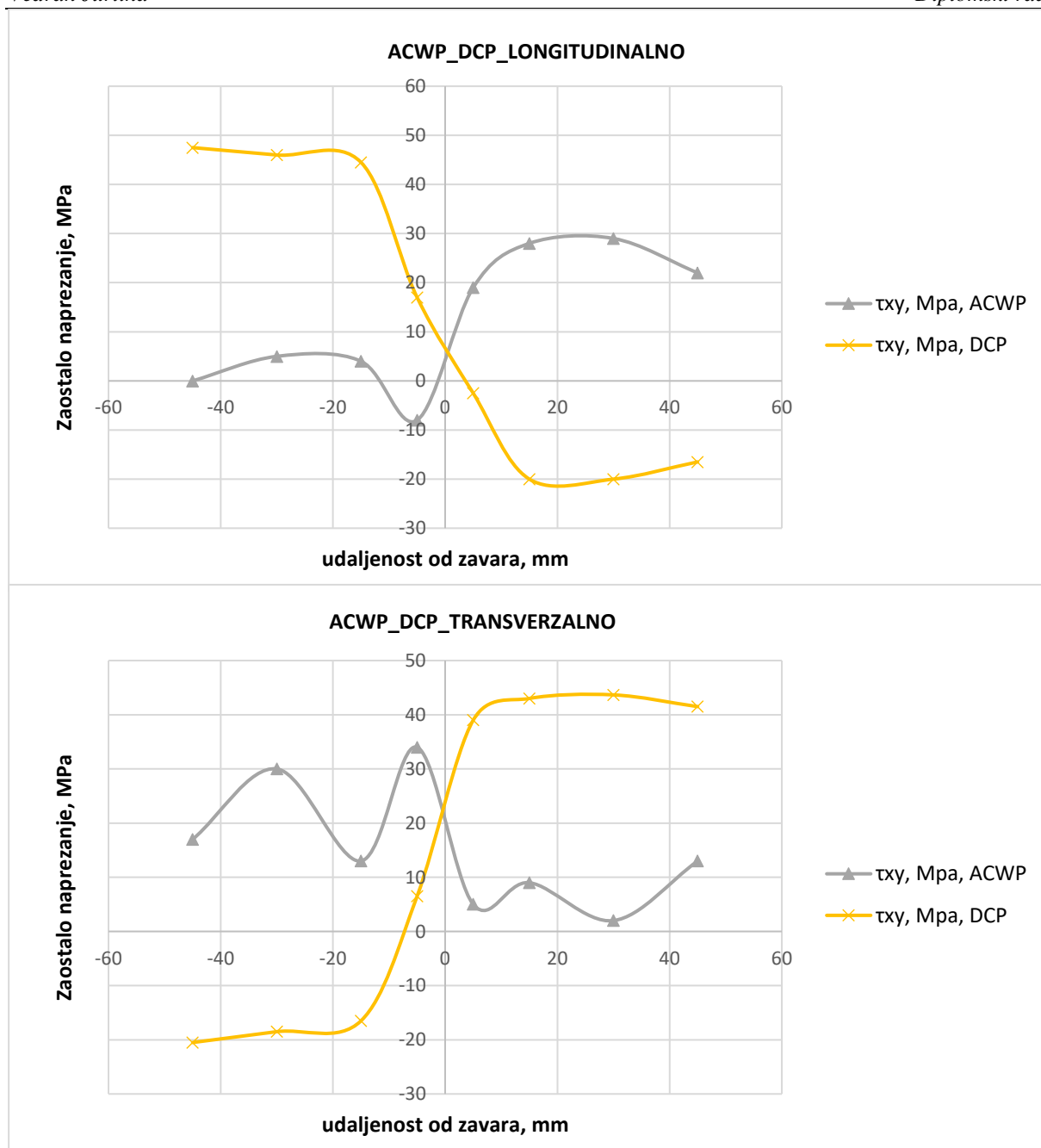
Slika 47. Prikaz dobrog očitavanja napreznanja na točki 1.8.2, longitudinalno DCP



Nakon što su izbačene nesukladne vrijednosti iz ispitivanja ostatak parametra je uspoređen sa parametrima druge ploče te je prikazan na slikama 48 i 49.



Slika 48. Usporedba  $\sigma(x)$  naprezanja između prve i četvrte ploče

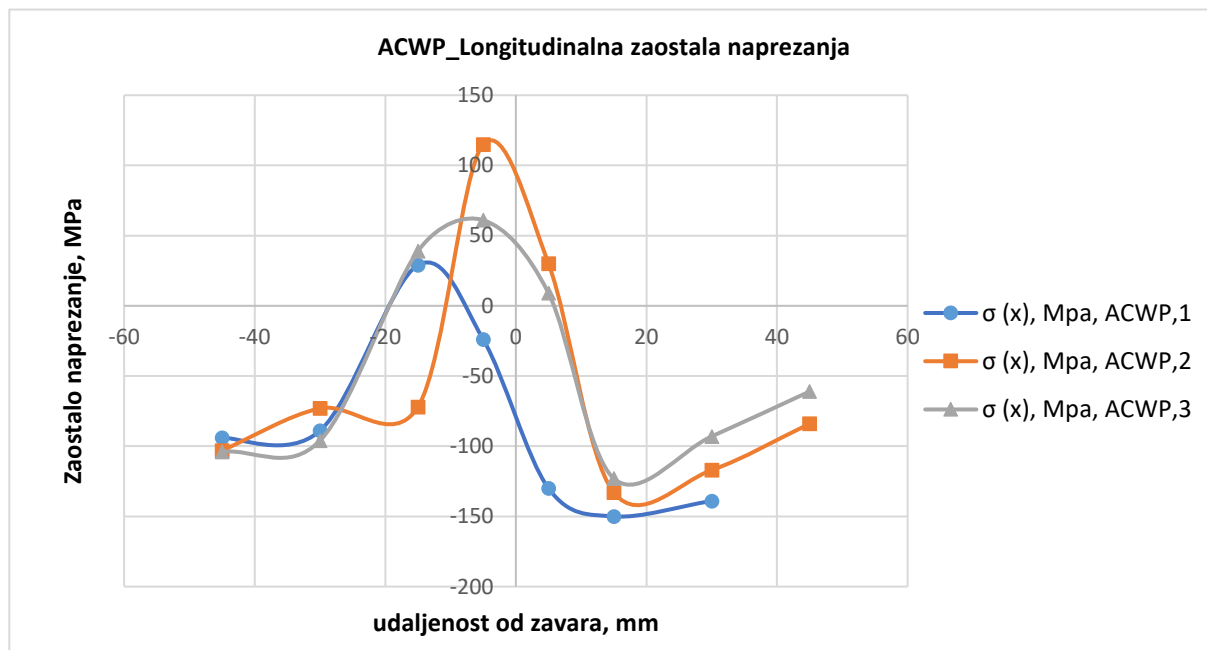


Slika 49. Usporedba  $\tau_{xy}$  naprezanja između prve i četvrte ploče

Zbog ne mogućnosti mjerenja zaostalog naprezanja na samom zavaru, vrijednost grafova zaostalog naprezanja treba biti zanemaren za udaljenosti  $\langle -5,5 \rangle$  mm.

Na slici 48 može se primjeriti da nakon zavarivanja DCP metodom područje blizu zavara je u vlaku dok je ZUT i osnovni materijal u tlaku, zavaravanjem ACWP metodom dolazi do puno nižih iznosa u području zavara dok u području ZUT-a i osnovnog materijala poprimaju veće negativne vrijednost. Na slici 49 prikazani su iznosi transverzalnih naprezanja te oni

prilikom zavarivanja DCP metodom imaju raspon od -20 do 40 MPa dok zavarivanjem ACWP metodom poprimaju vrijednosti od -10 do 30 Mpa. Na slici 50 dana je usporedba tri longitudinalnih napreznja sa ploče broj četiri.



Slika 50. Usporedba  $\sigma(x)$  napreznja na četvrtoj ploči

Na slici 50 može se primijetiti da je materijal u vlaku u području zavara i ZUTa dok je u području osnovnog materijala u tlaku.

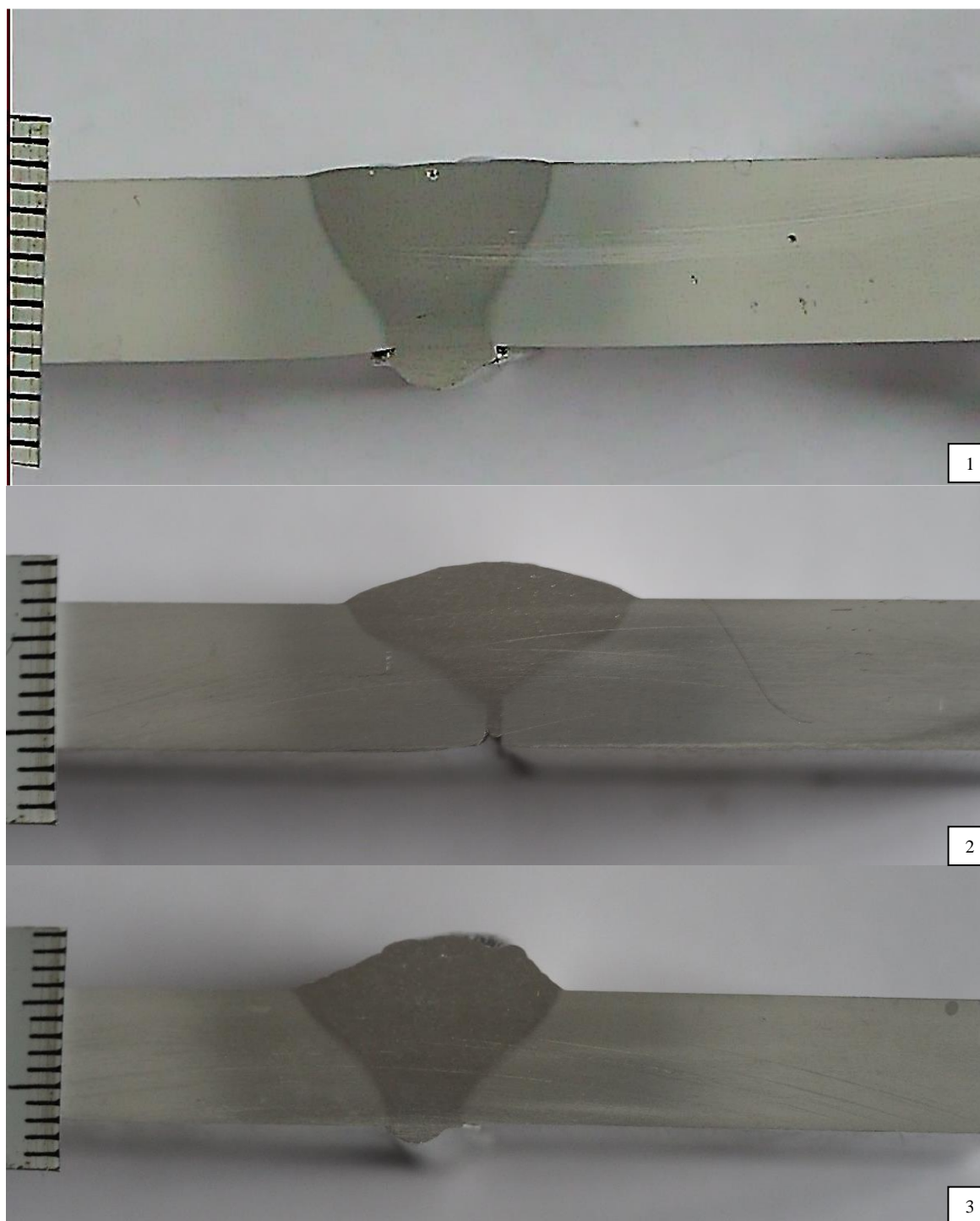
## 5.5 Makroanaliza

Nakon provedene rendgenske difrakcije provedeno je razorno ispitivanje u obliku izrezivanja ploča njihovo brušenje, poliranje te na posljetku nagrivanje. Izrezana su dva uzorka iz ploče broj 1 te jedan uzorak iz ploče broj 2. Uzorci su ručno brušeni sa brusnim papirima oštine: 100, 150, 180, 240. Poliranje je bilo provedeno na uređaju za fino poliranje Mecatech 250 SPI prikazanom na slici 51. Korišteni su brusni papiri oštine: 320, 600, 1000, 2400, 4000. Brzina vrtnje rotacionog brusnog papira iznosila je 300 rpm.



**Slika 51. Uređaj za poliranje Mecatech 250 SPI**

Nakon poliranja uzorci su nagriveni u smjesi koja sadrži 13,63 % HCl kiseline, 9 % HF kiseline te vode u trajanju od 2 minute. Makroanaliza uzoraka vidljiva je na slici 46.



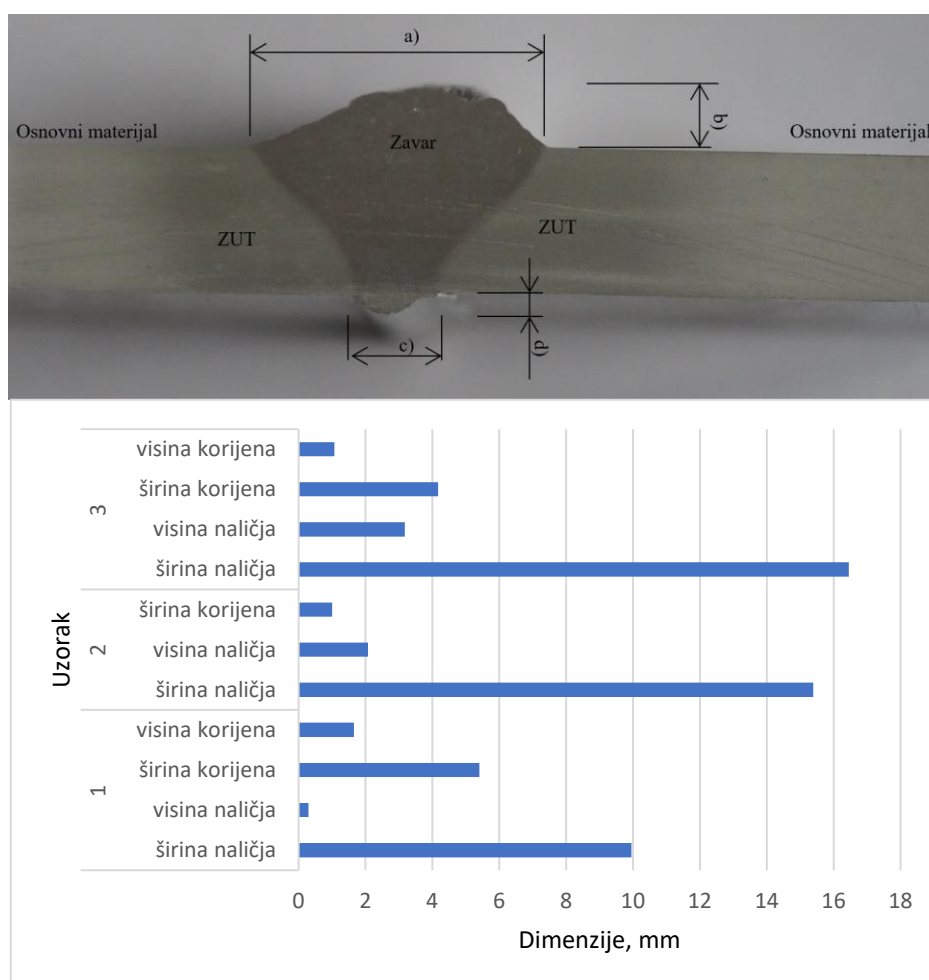
**Slika 52. Makro prikaz uzoraka: 1 i 2 uzorci su sa ploče broj 1, uzorci 3 sa ploče broj 4.**

Na slici 52 (1) može se primijetiti da su naličje i korijen nepravilno formirani dok na slici 52 (2) nije došlo do formiranja korijena. Uzorak (3) posjeduje uzvišenje naličja te nepravilno formirani korijen. Uzorci (1) i (3) izrezani su sa ploče koja je zavarena MIG\_DCP postupkom

dok je uzorak (3) izrezan sa ploče zavarene ACWP\_MIG postupkom. Dimenzije uzorka su grafički prikazani u tablici 16 te grafički na slici 53.

**Tablica 16. Dimenzije zavora uzoraka**

Uzorak	mjereni dio zavora	iznos, mm	Površina ZUTa, mm <sup>2</sup>
1	širina naličja, a)	9,95	64,65
	visina naličja, b)	0,29	
	širina korijena, c)	5,41	
	visina korijena, d)	1,65	
2	širina naličja, a)	15,39	152,53
	visina naličja, b)	2,07	
	širina korijena, c)	1	
3	širina naličja, a)	16,45	146,88
	visina naličja, b)	3,18	
	širina korijena, c)	4,17	
	visina korijena, d)	1,07	



**Slika 53. Grafički prikaz dimenzija**

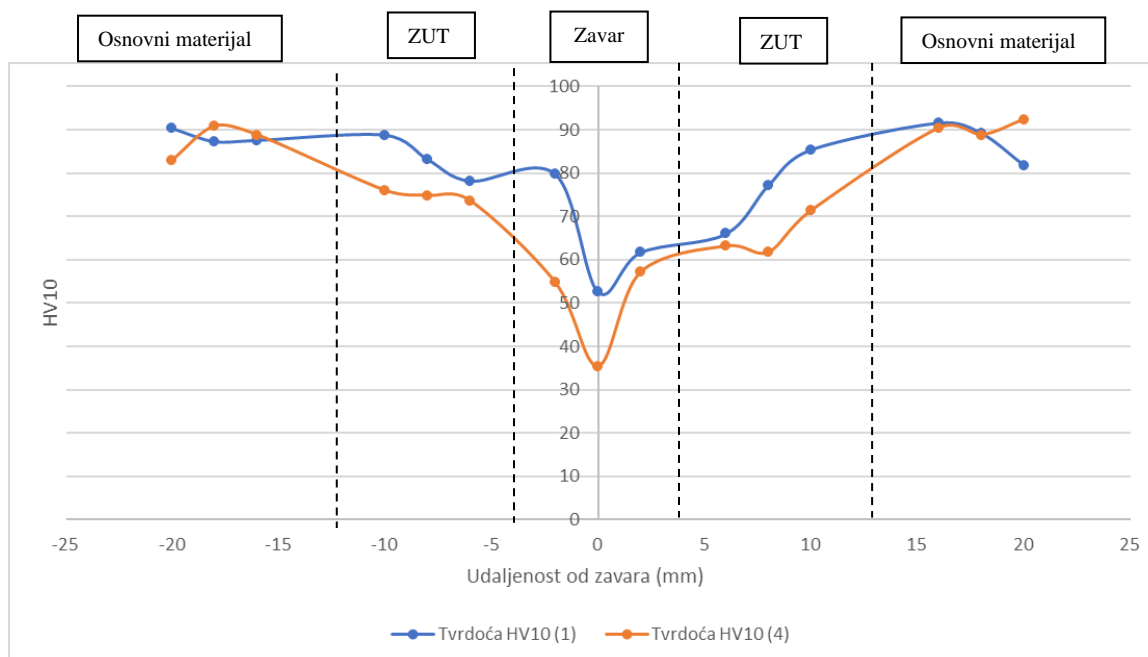
Na slici 53 može se primijetiti da je iznos širine naličja najveći na trećem uzorku. Na prvom i drugom uzorku dolazi do znatne promjene oblika zavora kroz cjelokupnu duljinu zavora. Uzorci jedan i dva također imaju drugačije površine ZUTa što je vidljivo u tablici 16. Uzorak 3 se odlikuje konstantnim dimenzijama kroz cijelu duljinu zavora.

## 5.6 Mjerenje tvrdoće te korelacija sa čvrstoćom

Tvrdoća je izmjerena na uzorcima 1 i 4 sa *Vickers* metodom mjerenja i silom od ~ 100 N (HV10). Dobiveni rezultati prikazani su u tablici 14. Usporedba pada tvrdoće u području zavora uzoraka 1 i 4 prikazana je na slici 54.

**Tablica 17. Iznos izmjerenih tvrdoća uzoraka**

Mjerenje	udaljenost od zavora(mm)	Tvrdoća HV10 (1)	Tvrdoća HV10 (4)
1.	-20	90,4	82,9
2.	-18	87,3	90,8
3.	-16	87,6	88,8
4.	-10	88,8	76
5.	-8	83,2	74,8
6.	-6	78,2	73,6
7.	-2	79,8	54,7
8.	0	52,6	35,4
9.	2	61,7	57,1
10.	6	66	63,1
11.	8	77,2	61,7
12.	10	85,4	71,3
13.	16	91,6	90,4
14.	18	89,2	88,8
15.	20	81,8	92,4



**Slika 54. Usporedba pada tvrdoće u području zavara, ZUTa i osnovnog materijala**

Nakon dobivenih iznosa tvrdoća moguće je povući korelaciju između vlačne čvrstoće legura i tvrdoće prema Vickersu. Ovisnost je linearna te je prikazana formulom 9 [18].

$$\sigma = 0,312 \text{ Hv} + 113,1 \quad (9)$$

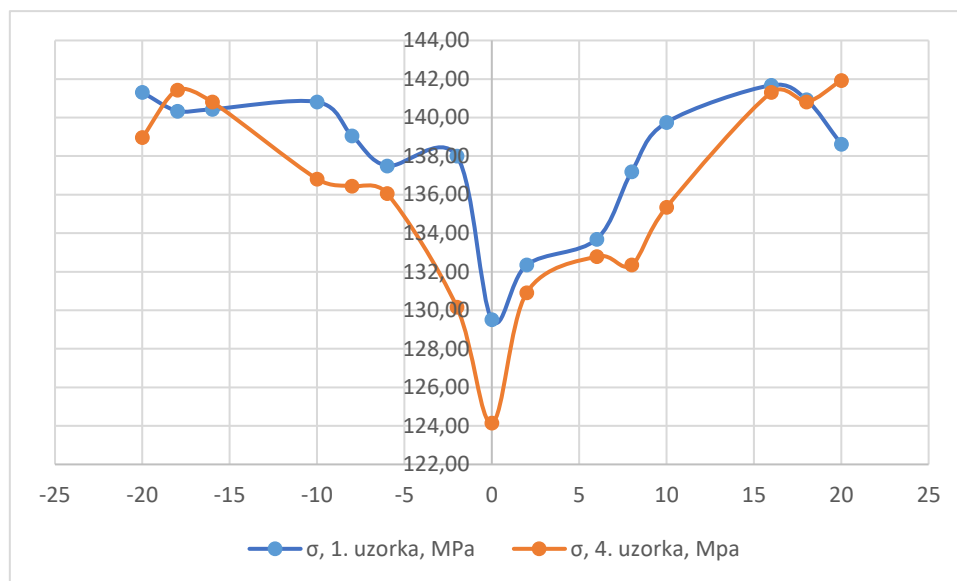
Dobiveni iznosi prikazani su tablično u tablici 15 te grafički na slici 55.

**Tablica 18. Usporedba vlačne čvrstoće legura**

udaljenost od zavara (mm)	$\sigma$ , 1. uzorka, MPa	$\sigma$ , 4. uzorka, MPa
-20	141,30	138,96
-18	140,34	141,43
-16	140,43	140,81
-10	140,81	136,81
-8	139,06	136,44
-6	137,50	136,06
-2	138,00	130,17
0	129,51	124,14
2	132,35	130,92
6	133,69	132,79
8	137,19	132,35
10	139,74	135,35
16	141,68	141,30
18	140,93	140,81
20	138,62	141,93



Zbog linearne ovisnosti između vlačne čvrstoće i tvrdoće materijala izgled grafa čvrstoće je identičnog oblika kao i graf tvrdoće legura.



**Slika 55. Usporedba čvrstoća aluminijskih legura po presjeku**

Na slici 55 može se primijetiti da dolazi do znatnog pada čvrstoće u području zavara i ZUT-a aluminijskih legura. Zbog većeg unosa topline kao što je vidljivo na slici 55 uzorak 4 posjeduje neznatno veći pad u čvrstoći u odnosu na uzorak 1. Uzrok tome je veći unos topline koji je nastao uslijed manje brzine zavarivanja. Prilikom zavarivanja ACWP dolazi do većeg unosa topline u materijal te kao posljedicu ima veći pad tvrdoće u području zavara.

## 6. ZAKLJUČAK

Sve češća pitanja uštede energije i smanjenja emisija postala su neizbježan trend. U međuvremenu je aluminijska legura jedan od idealnih materijala za prevladavanje problema zbog svoje male težine. Aluminijske legure serije 5000 i 6000 naširoko se koriste u konstrukcijskim materijalima kao što su automobili, željeznička vozila, brodovi i sl. Primjena navedenog materijala, prihvatljiva je zbog niske gustoće, dobre otpornosti na koroziju, dobre duktilnosti, dobra obradivost i dobre zavarljivost. Tijekom procesa proizvodnje, kao što su toplinska obrada, brušenje, zavarivanje, galvanizacija, sačmarenje ili drugim procesima, unose se zaostala naprezanja u dijelove. Zaostala naprezanja koja mogu uzrokovati lokalno popuštanje i plastičnu deformaciju koja ozbiljno utječe na performanse komponenti. Vlačna zaostala naprezanja na površini komponente općenito su nepoželjna jer mogu potaknuti lom uslijed zamora, pucanje uslijed gašenja i pucanja uzrokovano naprežanjem. Tlačna zaostala naprezanja na površinskim slojevima su poželjna jer povećavaju čvrstoću i otpornost na zamor te otpornost na pucanje uzrokovano korozijom. Nakon provedenog eksperimentalnog djela te usporedbe DCP te ACDP metode može se zaključiti da ACDP metoda ima puno više mogućnosti da postane standardizirana tehnologija prilikom zavarivanja aluminijskih legura. Vidljivo je da zavarivanje ACWP tehnologijom daje bolji oblik samog zavara i konzistenciju nego DCP tehnologija. Kako bi se spriječilo nepravilno formiranje korijena umjesto bakrene ploče sa utorom potrebno je koristiti keramičke podloške u kombinaciji sa ljepljivom takom. Skupljanje ploča tijekom zavarivanja moguće je izbjeći na način da se na strani korijena zavare držači u obliku slova C koji bi bili pozicionirani okomito na ploču svakih 10 cm. Tehnologija ACWP ne zahtjeva pripremu osnovnog materijala do debljine od 8 mm i time postaje isplativiji i tehnološki produktivniji proces. Prilikom usporedbe pada tvrdoće i čvrstoće aluminijskih legura u području zavara može se zaključiti da korištenje ACWP metode rezultira sa nešto većim padom tvrdoće i time čvrstoće materijala. Navedene karakteristike mogu se pripisati većem unosu topline zbog smanjene brzine zavarivanja prilikom korištenja ACWP tehnologije. ACWP tehnologija daje veće naličje te konstantan izgled zavara nego DCP metoda. Kod DCP metode dolazi do značajnih vlačnih iznosa zaostalih naprezanja kraj samog zavara dok se kod ACWP pretežito javljaju tlačna naprezanja uz sam zavar ali i većih tlačnih vrijednosti prilikom udaljavanja od zavara. Potrebno je provesti daljnja ispitivanja na postojećoj ACWP tehnologiji kako bi se optimizirali parametri zavarivanja i time kvalitetnije usporedili navedene dvije tehnologije.

**LITERATURA**

- [1] Patent broj: 2,274,631 R. MEREDITH, WELDING TORCH, Filed Jan. 4, 1941
- [2] Svojstva i primjena materijala; Tomislav Filetin, Franjo Kovačiček, Janez Indof, Intergrafika TTŽ, sedmo izdanje, Zagreb 2013
- [3] Aluminum and Aluminum Alloys, J.R. Davis; Alloying: Understanding the Basics, p351-416; 2001
- [4] Welding of dissimilar aluminium alloys; T. Luijendijk; Laboratory of Materials Science, Delft University of Technology, PO Box 5025, 2600 GA Delft, Netherlands; Journal of Materials Processing Technology 103 (2000) 29-35.
- [5] CONSIDERATIONS OF THE EFFECT OF RESIDUAL STRESSES ON FATIGUE OF WELDED ALUMINIUM ALLOY STRUCTURES; A. Berkovits, D. W. Kelly<sup>1</sup> and S. Di<sup>1</sup>; Faculty of Aerospace Engineering, Technion, Haifa, Israel, <sup>1</sup>School of Mechanical and Manufacturing Engineering, UNSW, Sydney, Australia; Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures 1998; 21: 159–170
- [6] <https://www.weibull.com/hotwire/issue116/hottopics116.htm> Pristupljeno:8.9.2020.
- [7] MIG welding guide; K Weman, G Lindén, 2006; Woodhead publishing limited; Cambridge England.
- [8] Effect of Double Pulse MIG Welding on Porosity Formation on Aluminium 5083 Fillet Joint; Eakkachai Warinsiriruk<sup>1</sup> \*, Jukkapun Greebmalai<sup>1</sup> , and Montri Sangsuriyun<sup>2</sup>; <sup>1</sup>Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Mahidol University <sup>2</sup>Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Nakhon Phanom University
- [9] Double-Pulse Triple-Wire MIG Welding of 6082-T6 Aluminum Alloy: Process Characteristics and Joint Performances; Ke Yang <sup>1</sup> , Fei Wang <sup>2,3</sup>, Hongbing Liu <sup>2,3</sup>, Peng Wang <sup>1</sup> , Chuanguang Luo <sup>4</sup>, Zhishui Yu <sup>2,3</sup>, Lijun Yang <sup>1</sup> and Huan Li <sup>1</sup>, <sup>1</sup> Tianjin Key Laboratory of Advanced Joining Technology, Tianjin University, Tianjin 300072, China, <sup>2</sup> School of Materials Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China; <sup>3</sup> Shanghai Collaborative Innovation Center of Laser Advanced Manufacturing Technology, Shanghai 201620, China, <sup>4</sup> Sichuan Institution of Aerospace Systems Engineering, Chengdu 610100, China.

- [10] Development of low-frequency pulsed MIG welding for aluminium alloys; H YAMAMOTO, S HARADA, T UEYAMA and S OGAWA; Welding International 1992 6 (7) 580-583; Welding Machine Division, Daihen KK.
- [11] B. D. Cullity, Elements of X-ray Diffraction 1978, Addison-Wesley Publishing CoMPany, Inc.: Reading, Massachusetts.
- [12] Using x-ray diffraction to assess residual stresses in laser peened and welded aluminum; Banazwski, Brian J.; 2011-12; Monterey, California. Naval Postgraduate School.
- [13] I. C. Noyan and J. B. Cohen, Residual Stress Measurement by Diffraction and Interpretation 1987, Springer-Verlag New York Inc.: Germany.
- [14] XRD Residual Stress and Texture Analysis on 6082T Aluminum Alloy; Maykel Manawan <sup>1,a\*</sup>, Sovian Aritonang <sup>1,b</sup>, Masayu Elita <sup>1,c</sup>, Antonius Suban Hali <sup>2,d</sup>, Nono Darsono <sup>3,e</sup>, Toto Sudiro <sup>4,f</sup>, Permono Adi Putro <sup>5,g</sup>, Risdiana <sup>6,h</sup>; <sup>1</sup> Faculty of Defense Technology, Indonesia Defense University, Bogor, Indonesia <sup>2</sup> FKIP Fisika, University of Nusa Cendana, Kupang 85361, Indonesia <sup>3</sup> Research Center for Metallurgy and Materials - LIPI, Puspiptek, Serpong 15314, Indonesia <sup>4</sup> Research Center for Physics - LIPI, Puspiptek, Serpong 15314, Indonesia <sup>5</sup> Department of Physics, IPB University, Bogor 16680, Indonesia <sup>6</sup> Department of Physics, Universitas Padjadjaran, Sumedang 45363, Indonesia; Materials Science Forum ISSN: 1662-9752, Vol. 1028, pp 409-414 2021 Trans Tech Publications Ltd, Switzerland.
- [15] <https://ch-delivery.lincolnelectric.com/api/public/content/2a5d66499318413a94843856c716e8f9?v=b39d2c57>, Pristupljeno: 25.11.2022
- [16] <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=4244>, Pristupljeno: 25.11.2022
- [17] [https://www.youtube.com/watch?v=mXToCNSIr8Y&t=55s&ab\\_channel=%E3%83%91%E3%83%AB%E3%82%B9%E3%83%86%E3%83%83%E3%82%AF%E5%B7%A5%E6%A5%AD%E6%A0%AA%E5%BC%8F%E4%BC%9A%E7%A4%BE%2FPulstecIndustrialCo.%2CLtd](https://www.youtube.com/watch?v=mXToCNSIr8Y&t=55s&ab_channel=%E3%83%91%E3%83%AB%E3%82%B9%E3%83%86%E3%83%83%E3%82%AF%E5%B7%A5%E6%A5%AD%E6%A0%AA%E5%BC%8F%E4%BC%9A%E7%A4%BE%2FPulstecIndustrialCo.%2CLtd). Pristupljeno 6.11.2022
- [18] Hardness–strength relationships in the aluminum alloy 7010; M. Tiryakioğlu <sup>a</sup>, J.S. Robinson <sup>b</sup>, M.A. Salazar-Guapuriche <sup>c</sup>, Y.Y. Zhao <sup>d</sup>, P.D. Eason <sup>a</sup>. <sup>a</sup> School of Engineering, University of North Florida, Jacksonville, FL 32224 USA, <sup>b</sup> Department of Mechanical, Aeronautical and Biomedical Engineering, University of Limerick, Limerick, Ireland, <sup>c</sup> Materials Laboratory, Airbus UK, Broughton, Chester CH4 0DR, UK, <sup>d</sup> School of Engineering, The University of Liverpool, Liverpool L69 3GH, UK; Materials Science and Engineering: A 631, 17 April 2015, Pages (196-200); Elsevier