

# Toplinska obrada zavara od aluminijeve legure EN-AW 6082

---

**Islam, David**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2024**

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

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:232092>

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

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

*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# DIPLOMSKI RAD

**David Islam**

Zagreb, 2024.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Darko Landek, dipl. ing.

Student:

David Islam

Zagreb, 2024.

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

*Zahvale upućujem laborantu Bruni Kneževiću, tehničkim suradnicima Željku Kostanjskom, Ivanu Martinku i Ivanu Vovku te asistentu Josipu Cerovečkom za svu pruženu pomoć pri izvedbi praktičnog dijela ovog rada unatoč izazovnim uvjetima uzrokovanim selidbom fakulteta.*

*Uz to dugujem zahvale i kolegama iz ureda koje su uz svoj već opsežni angažman preuzele i moje obaveze kako bih studij nesmetano priveo kraju.*

*Međutim, najveće zahvale pripadaju mentoru prof. dr. sc. Darku Landeku na stručnom vođenju kroz zadnje korake mojeg fakultetskog obrazovanja.*

*David Islam*



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:

Proizvodno inženjerstvo, inženjerstvo materijala, industrijsko inženjerstvo i menadžment,  
mehatronika i robotika, autonomni sustavi i računalna inteligencija



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

## DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **David Islam** JMBAG: 0035220384

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Toplinska obrada zavara od aluminijeve legure EN-AW 6082**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Heat treatment of aluminum alloy EN-AW 6082 welds**

Opis zadatka:

Aluminijeve legure iz skupine EN-AW 60XX svoja uporabna svojstva postižu nakon precipitacijskog očvršćivanja, koje se sastoji od homogenizacijskog žarenja i umjetnog starenja. Nakon zavarivanja, područje zavara i zone utjecaja topline, značajno mijenjaju svoja mehanička i korozivna svojstva. U radu treba opisati toplinsku obradu i njen utjecaj na svojstva aluminijevih legura iz skupine EN-AW 60XX. U opisu toplinske obrade objasniti utjecaj parametra homogenizacijskog žarenja i umjetnog starenja na mikrostrukturu i mehanička svojstva ovih legura.

U eksperimentalnom dijelu rada treba predložiti plan pokusa te ispitati utjecaj temperature i vremena žarenja na mikrostrukturu i tvrdoću sučeljeno zavarenih uzorka aluminijeve legure EN AW 6082 T651 postupcima AC MIG i DC MIG. Na temelju rezultata ispitivanja predložiti optimalnu toplinsku obradu zavara.

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

Zadatak zadan:

26. rujna 2024.

Zadatak zadan:

Prof. dr. sc. Darko Landek

Datum predaje rada:

28. studeni 2024.

Predviđeni datum obrane:

5., 6. i 9. prosinca 2024.

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Ivica Garašić

## SADRŽAJ

1. UVOD.....	1
2. ALUMINIJ I ALUMINIJSKE LEGURE.....	2
2.1. ALUMINIJ.....	2
2.2. ALUMINIJSKE LEGURE .....	5
2.2.1. Podjela i označavanje.....	5
2.2.2. Utjecaj legirni elemenata na svojstva aluminijevih legura .....	6
2.2.3. Skupine gnječanih legura .....	8
3. TOPLINSKA OBRADA ALUMINIJSKIH LEGURA.....	10
3.1. PRECIPITACIJSKO OČVRŠĆIVANJE ALUMINIJSKIH LEGURA .....	11
3.1.1. Homogenizacijsko žarenje .....	12
3.1.2. Gašenje.....	13
3.1.3. Dozrijevanje .....	15
3.2. TOPLINSKA OBRADA 7xxx SKUPINE ALUMINIJSKIH LEGURA .....	17
3.3. TOPLINSKA OBRADA 6xxx SKUPINE ALUMINIJSKIH LEGURA .....	18
4. ZAVARIVANJE ALUMINIJSKIH LEGURA .....	19
4.1. POSTUPCI ZAVARIVANJA ALUMINIJSKIH LEGURA .....	20
4.1.1. TIG zavarivanje netaljivom elektrodom u inertnom plinu.....	20
4.1.2. MIG zavarivanje taljivom elektrodom u inertnom plinu .....	22
4.1.3. Ostali postupci zavarivanja aluminijevih legura .....	23
4.2. PROBLEMI ZAVARIVANJA ALUMINIJSKIH LEGURA .....	25
4.2.1. Sklonost pucanju .....	25
4.2.2. Poroznost.....	27
4.2.3. Zona utjecaja topline .....	28
5. PLAN POKUSA I PRIPREMA UZORAKA .....	32
6. ŽARENJE POLAZNOG MATERIJALA .....	33
7. PROMJENA TVRDOĆE NAKON ŽARENJA UZORAKA ZAVARA.....	36
8. ANALIZA MIKROSTRUKTURE ZAVARA .....	39
9. ZAKLJUČAK.....	53

**POPIS SLIKA**

Slika 1	Bayerov proces [2] .....	2
Slika 2	Hall/Hérouttov proces [3].....	3
Slika 3	Mehanizmi sprječavanja gibanja dislokacija [9] .....	10
Slika 4	Fazni dijagram precipitacijski očvrsnute aluminijske legure [11] .....	12
Slika 5	Fazni dijagram Al-Cu legure [12] .....	13
Slika 6	Ovisnost precipitacije o prezasićenju i brzini difuzije [12].....	14
Slika 7	Prirodno dozrijevanje 2014 i 6061 aluminijskih legura [12] .....	16
Slika 8	Raspodjele precipitata kod a) jednokratnog, b) poboljšanog, c) visokotemperaturnog i d) višestupanjskog režima žarenja.....	17
Slika 9	Shema zavarivanja TIG postupkom [15].....	21
Slika 10	Shema sustava za zavarivanje MIG postupkom [16] .....	22
Slika 11	Ovisnost osjetljivosti na pucanjepukotine o legirnom doprinosu zavarivanja [15] .....	26
Slika 12	Izvori vodika u sustavu zavarivanja [15] .....	27
Slika 13	Područja zavarenog spoja [16] .....	28
Slika 14	Profil tvrdoće oko zavara na leguri 6061-T6 [15].....	29
Slika 15	Profili tvrdoće za 6061-T4, -T6 u zavarenom (AW) i dozrijevanom (PWA) stanju [15] .....	30
Slika 16	Zavareni uzorci EN AW T651; a) AC-MIG, b) DC-MIG .....	32
Slika 17	Označeni uzorci legure EN AW 6082 T651 .....	33
Slika 18	Žarenje uzoraka u pećima.....	33
Slika 19	Mjerenje tvrdoće tvrdomjerom Zwick/Roell.....	34
Slika 20	Dijagram ovisnosti tvrdoće o temperaturi žarenja pri konstantnom vremenu .....	35
Slika 21	Uzorci AC i DC sa zonama mjerenja tvrdoće .....	36
Slika 22	Analiza pada tvrdoće nakon žarenja AC uzorka .....	37
Slika 23	Analiza pada tvrdoće nakon žarenja DC uzorka .....	38
Slika 24	Svjetlosni mikroskop Olympus GX51 .....	39
Slika 25	Osnovi materijal EN AW 6082 nakon žarenja, 50x .....	40
Slika 26	Osnovni materijal EN AW 6082 nakon žarenja, 500x .....	40
Slika 27	Uzorak DC, sredina, 50x .....	48
Slika 28	Uzorak AC, ZUT, sredina, 50x (a) .....	48
Slika 29	Uzorak DC, dno, ZUT, 50x .....	49
Slika 30	Uzorak DC, vrh, 50x .....	49
Slika 31	Uzorak AC, ZUT, sredina, 50x (b).....	50
Slika 32	Uzorak AC, ZUT, sredina, 50x (c) .....	50
Slika 33	Uzorak AC, vrh, 50x .....	51
Slika 34	Uzorak AC, dno, 50x.....	51
Slika 35	Uzorak DC, ZUT, dno, 200x .....	52
Slika 36	Uzorak AC, ZUT, dno, 200x .....	52

---

**POPIS TABLICA**

Tablica 1	Opća svojstva aluminija [5,6].....	4
Tablica 2	Gnječene aluminijske legure prema toplinskoj obradivosti [7].....	6
Tablica 3	Zavarljivost gnječenih legura u ovisnosti o svojstvima i legirnim elementima [15] .....	20
Tablica 4	Parametri žarenja i izmjerene tvrdoće .....	34
Tablica 5	Tvrdoće osnovnog materijala i zavara AC uzorka .....	36
Tablica 6	Tvrdoće osnovnog materijala i zavara DC uzorka .....	37
Tablica 7	Mikrostrukture AC i DC na dnu zavara .....	41
Tablica 8	Mikrostrukture AC i DC u ZUT-u na dnu zavara .....	42
Tablica 9	Mikrostrukture AC i DC na sredini zavara .....	43
Tablica 10	Mikrostrukture AC i DC u ZUT-u na sredini zavara .....	45
Tablica 11	Mikrostrukture AC i DC na vrhu zavara .....	46
Tablica 12	Mikrostrukture AC i DC u ZUT-u na vrhu zavara .....	47



---

**POPIS OZNAKA**

<b>Oznaka</b>	<b>Jedinica</b>	<b>Opis</b>
$\rho$	$\text{g/cm}^3$	gustoća
$Rm$	MPa	vlačna čvrstoća
$E$	MPa	modul elastičnosti
$\nu$	-	Poissonov koeficijent
$t_t$	$^{\circ}\text{C}$	talište
$Q$	J/kgK	specifična toplina
$K$	W/mK	toplinska vodljivost
$\gamma$	S/m	električna vodljivost
$N$	-	indeks loma

---

**SAŽETAK**

Aluminijske legure imaju široku primjenu u industriji zbog svojeg omjera mase i čvrstoće i otpornosti na koroziju. Njihova svojstva moguće je dodatno unaprijediti precipitacijskim očvršćivanjem, temperaturno-vremenskim procesom kojim se povećava čvrstoća materijala. Zavarivanje ovih legura zahtijeva preciznu kontrolu kako bi se izbjegli problemi poput poroznosti i promjena u zoni zahvaćenoj toplinom, a postupci poput AC i DC MIG-a najčešće se koriste za njihovo spajanje.

U teorijskom dijelu opisane su precipitacijski očvrstive aluminijske legure, koje su sistematizirane i klasificirane unutar skupine aluminijskih legura. Poseban naglasak je stavljen na njihov kemijski sastav, svojstva, karakteristike i pripadnost određenim skupinama aluminijskih legura. Detaljno su opisani procesi i mehanizmi precipitacijskog očvršćivanja uz poseban fokus na parametre koji uvjetuju te procese. Analizirani su i najčešći postupci zavarivanja aluminijskih legura, poput MIG-a uz razmatranje glavnih izazova povezanih s tim metodama, kao što su nastanak pukotina, osobine zone utjecaja topline (ZUT) i pojava poroznosti u zavarenim spojevima.

U eksperimentalnom dijelu rada provede će se žarenje uzoraka osnovnog materijala, žarenje zavarenih uzoraka i analiza mikrostrukture žarenih uzoraka zavara. Žarenje uzoraka osnovnog materijala provede će se zbog određivanja parametara žarenja zavarenih uzoraka s ciljem minimiziranja sniženja tvrdoće. Mikrostruktura zavara je analizirana radi usporedbe grešaka zavarivanja i traženja promjena u mikrostrukтури uzrokovanih zavarivanjem žarenjem.

Ključne riječi: aluminijske legure, precipitacijsko očvršćivanje, zavarivanje, MIG, žarenje

---

**SUMMARY**

Aluminum alloys are widely used in industry due to their strength-to-weight ratio and corrosion resistance. Their properties can be further enhanced through precipitation hardening, a temperature-time process that increases material strength. Welding these alloys requires precise control to avoid issues such as porosity and changes in the heat-affected zone (HAZ), with methods like AC and DC MIG welding being the most commonly used for joining.

The theoretical section describes precipitation-hardened aluminum alloys, which are systematized and classified within the group of aluminum alloys. Particular emphasis is placed on their chemical composition, properties, characteristics, and classification into specific aluminum alloy groups. The processes and mechanisms of precipitation hardening are thoroughly explained, with a special focus on the parameters that influence these processes. Additionally, common welding methods for aluminum alloys, such as MIG welding, are analyzed, addressing the main challenges associated with these techniques, including crack formation, the characteristics of the heat-affected zone (HAZ), and the occurrence of porosity in welded joints.

In the experimental section, annealing of base material samples, annealing of welded samples, and analysis of the microstructure of annealed weld samples will be conducted. Annealing of the base material samples will be performed to determine the annealing parameters for welded samples, with the goal of minimizing hardness reduction. The microstructure of the welds will be analyzed to compare welding defects and identify changes in the microstructure caused by welding and annealing.

Key words: aluminum alloys, precipitation hardening, welding, MIG, annealing

## 1. UVOD

Aluminijske legure ključan su materijal u suvremenoj industriji zbog svoje kombinacije korisnih svojstava, uključujući dobru čvrstoću, malu masu, otpornost na koroziju i dobru obradivost. Upravo te karakteristike čine ih široko primjenjivima u brodogradnji, zrakoplovnoj industriji, građevinarstvu i proizvodnji transportne opreme. Posebno su važne legure serije 6xxx i 7xxx, koje se ističu otpornosti na koroziju te sposobnošću postizanja visoke čvrstoće nakon odgovarajuće toplinske obrade.

Proces toplinske obrade aluminijskih legura precipitacijsko očvršnuće, ključan je za poboljšanje mehaničkih svojstava. Precipitacijsko očvršnuće obuhvaća kontrolirano zagrijavanje (žarenje), naglo hlađenje (gašenje) te umjetno ili prirodno dozrijevanje čime se u mikrostrukturi materijala formiraju sitne čestice koje povećavaju čvrstoću. Međutim, karakteristike legura uvelike ovise o sastavu legiranih elemenata i uvjetima toplinske obrade.

Zavarivanje aluminijskih legura također ima veliku važnost u njihovoj primjeni, ali dolazi s tehničkim izazovima. Tehnike poput TIG-a (zavarivanje netaljivom elektrodom u inertnom plinu) i MIG zavarivanja (zavarivanje taljivom elektrodom) najčešće su korištene metode za spajanje aluminijskih i njegovih legura. Međutim, zbog specifičnih svojstava aluminijskih, poput visoke toplinske vodljivosti i sklonosti oksidaciji, pri zavarivanju se često javljaju problemi poput poroziteta, pucanja te nastanka zone utjecaja toplinom (ZUT). Upravo ZUT, područje gdje dolazi do promjena mikrostrukture zbog intenzivnog unosa topline, značajno utječe na mehanička svojstva zavarenih spojeva.

Razumijevanje ovih procesa i izazova ključno je za optimizaciju proizvodnje i osiguranje kvalitete zavarenih spojeva. Inovacije i razvoj novih tehnologija u granama toplinske obrade i tehnologiji zavarivanja doprinosi povećanju efikasnosti te dugotrajnosti aluminijskih konstrukcija. Stoga aluminijske legure ostaju nezamjenjiv materijal u industriji istovremeno pružajući jedinstvenu ravnotežu svojstava i održivosti u širokom spektru primjena.

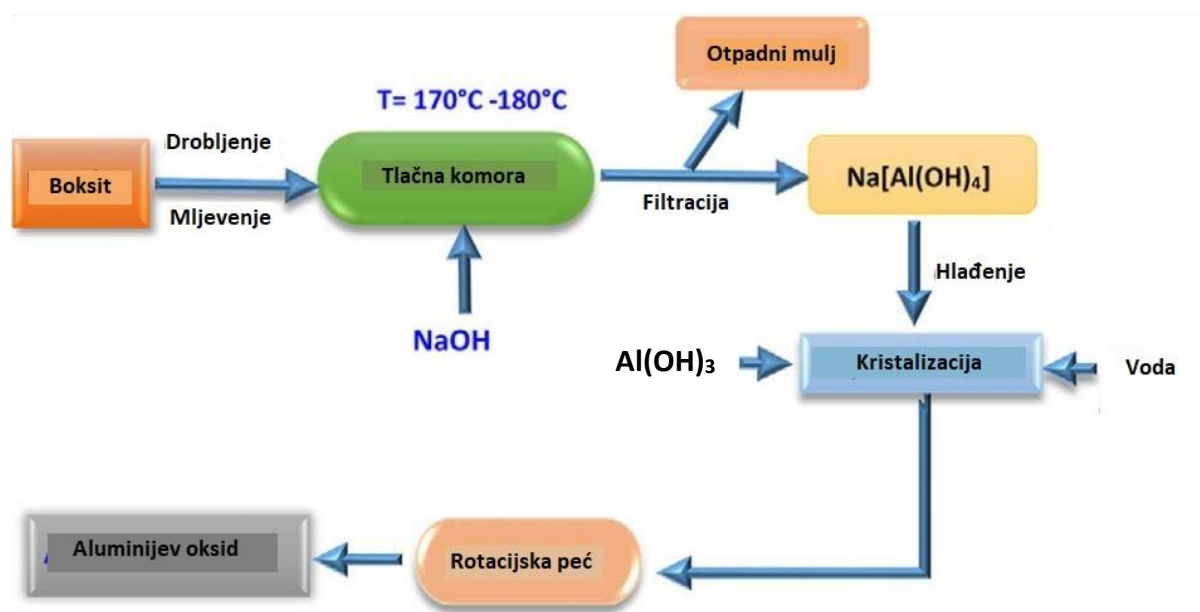
## 2. ALUMINIJ I ALUMINIJSKE LEGURE

Aluminij i njegove legure široko se koriste u raznim industrijama zbog svojih jedinstvenih svojstava. To uključuje otpornost na koroziju, visoku toplinsku i električnu vodljivost, visoku čvrstoću uz nisku gustoću, žilavost i sposobnost apsorpcije energije udaraca (žilavost). Također, aluminij je cijenjen zbog svoje žilavosti na niskim temperaturama, obradivosti, jednostavnosti spajanja (kroz zavarivanje, lemljenje i mehaničko pričvršćivanje) te mogućnosti recikliranja. Ove karakteristike čine aluminij i njegove legure idealnima za primjenu u raznim granama industrije poput zrakoplovne i automobilske industrije brodogradnje, industrije ambalaže za hranu i pića, građevinske industrije elektrotehničke industrije, posebno za prijenos električne energije, industrije za izradu prometne infrastrukture, obrambene industrije, proizvodnje strojeva te industrije za proizvodnju pomorskih građevinskih struktura. [1]

### 2.1. ALUMINIJ

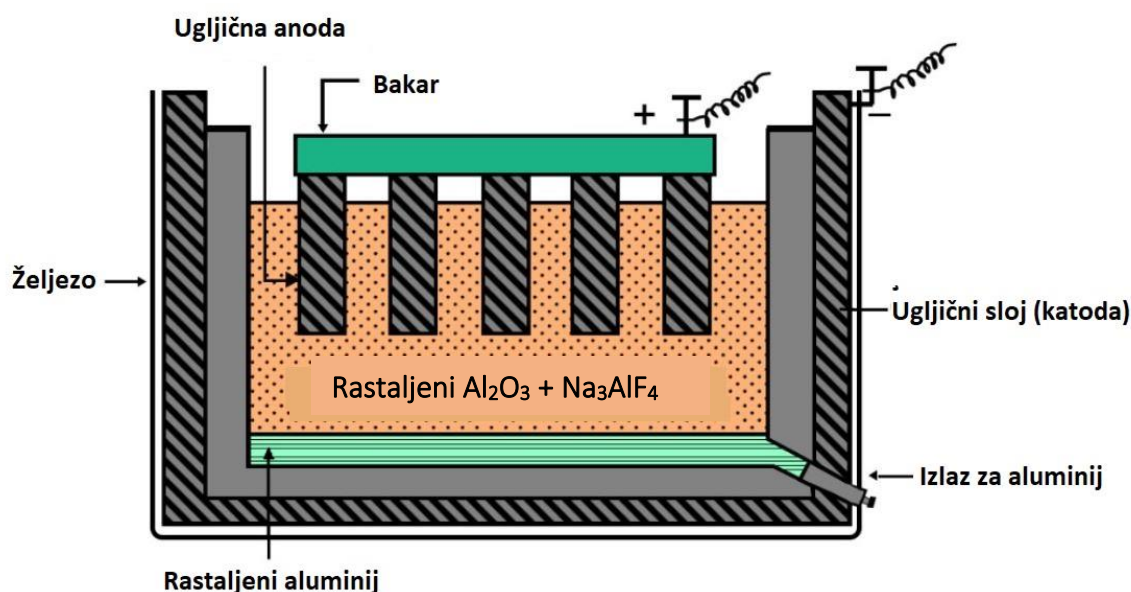
Aluminij, koji čini oko 8% Zemljine kore. Nalazi se u stijenama, glini, tlu i vegetaciji, ali nikada u elementarnom obliku već u spojevima s drugim elementima kao što je kisik i vodik. Prirodno je najrašireniji metal odmah nakon željeza.

Proizvodnja aluminija oslanja se na dva ključna procesa: Bayerov proces, prikazan na slici 1, kojim se iz boksita izvlači glinica ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), i Hall/Héroultov proces, prikazan na slici 2, kojim se iz glinice otopljen u rastaljenom kriolitu elektrolizom dobiva aluminij. Ovaj aluminij, poznat kao "tehnički čisti" aluminij, sadrži manje nečistoće od aluminija iz Bayerovog procesa.



Slika 1 Bayerov proces [2]

Značajan dio troškova njegove proizvodnje odnosi se na energetski intenzivan Hall/Héroultov proces.



Slika 2 Hall/Héroultov proces [3]

Globalna potražnja za aluminijem iznosi približno 29 milijuna tona godišnje. Od toga je oko 22 milijuna tona novi aluminij, a samo ostalih 7 milijuna tona dolazi iz recikliranog aluminijevog otpada. Za usporedbu, potrebno je 14000 kWh za proizvodnju 1 tone novog aluminija dok je za dobivanje iste količine aluminija iz aluminijevog otpada potrebno samo 5% navedene energije, a njegova kvaliteta ostaje ista. Prema tome, recikliranje aluminijevog otpada je ekonomski i ekološki opravdano i poželjno.

Niska gustoća aluminija, visoka površinska reflektivnost i izvrsna električna i toplinska vodljivost čine ga svestranim materijalom koji se može lijevati, oblikovati, obrađivati i spajati na različite načine. Njegova dobra otpornost na koroziju rezultat je zaštitnog sloja aluminijevog oksida koji se stvara na površini kada je izložen zraku. Otporniji je na kiseline nego na lužine. Aluminij je jedan od najlakših tehničkih materijala s boljim omjerom čvrstoće i težine od čelika. Legiranjem tehnički čistog aluminija moguće je unaprijediti njegova svojstva, a ponajviše čvrstoću. [4, 5]

Čisti aluminij nema visoku vlačnu čvrstoću te mu se dodaju legirni elementi za povišenje čvrstoće čiji maseni udio ovisi o primjeni legure. Značajna prednost aluminija naspram čelika

je povećanje vlačne čvrstoće pri sniženju temperature uz zadržavanje žilavosti dok čelik u istim dinamičkim uvjetima postaje krhak.

Aluminij je dobar vodič topline i električne struje. Triput je bolji vodič topline od čelika pa se često primjenjuje za izmjenjivače topline. Osim toga, koristi se u legurama s bakrom od kojih se rade električni vodiči; smanjuje masu vodiča i na taj način omogućava prijenos dvostruko više struje u odnosu na vodiče od bakra iste težine.

Aluminij dobro reflektira UV i infracrvenu svjetlost zahvaljujući površinskoj reflektivnosti. Reflektira oko 80% vidljivog spektra svjetlosti i zato se koristi kao refleksijski materijal za rasvjetne sustave kao i za zaštitu od štetnih Sunčevih zraka ljeti i zadržavanje topline zimi.

Aluminij se može deformirati do velikih iznosa deformacije prije loma pa je vrlo dobro obradiv valjanjem i izvlačenjem. Također je izuzetno livljiv i može se ekstrudirati u različitim profilima. Vlačna čvrstoća mu je oko 90 MPa, no neke legure koje je moguće toplinski obraditi mogu postići i do 690 MPa. Opća svojstva aluminija dana su u tablici 1. [5]

**Tablica 1 Opća svojstva aluminija [5,6]**

Gustoća, $\rho$	2,7 g/cm <sup>3</sup>
Vlačna čvrstoća, $R_m$	90 MPa
Modul elastičnosti, $E$	70 MPa
Poissonov koeficijent, $\nu$	0,33
Talište, $t$	660 °C
Specifična toplina, $Q$	898,7 J/kgK
Toplinska vodljivost, $K$	237 W/mK
Električna vodljivost, $\gamma$	3,5 x 10 <sup>7</sup> S/m
Indeks loma, $n$	1,44

## 2.2. ALUMINIJSKE LEGURE

### 2.2.1. Podjela i označavanje

Aluminijske legure mogu se podijeliti u dvije glavne skupine: gnječene i lijevane legure. Unutar tih skupina legure se razlikuju prema načinu poboljšanja njihovih svojstava. Neke legure poboljšavaju se toplinskom obradom poput žarenja, gašenja i dozrijevanja, što ih čini toplinski obradivima. S druge strane, druge gnječene legure oslanjaju se na očvrnuće hladnom deformacijom, često u kombinaciji sa žarenjem. Zato se nazivaju toplinski neobradivim legurama. Određene lijevane legure nisu toplinski obradive i koriste se samo u stanju nakon lijevanja ili s toplinskim modifikacijama koje nisu povezane sa žarenjem.

Kako bi se pojednostavnila identifikacija razvijen je sustav nomenklature koji razlikuje gnječene i lijevane aluminijske legure. [7]

Kod gnječenih legura utemeljen je četverozičasti sustav označavanja kod kojeg prva znamenka (Xxxx) označava primarni legirajući element u aluminijskoj leguri. Druga znamenka (xXxx) označava modifikaciju legure. Ako je druga znamenka 0 onda nema modifikacije. Treća i četvrta znamenka (xxXX) su nasumično odabrani brojevi čija je funkcija samo razlikovati specifične legure unutar skupine od drugih. Jedino odstupanje je u prvoj skupini (1xxx) u kojoj nema legirajućeg elementa jer se radi o tehnički čistom aluminiju; u tom slučaju zadnje dvije znamenke (xxXX) predstavljaju minimalni postotak aluminija u materijalu iznad 99%. Primjerice, u leguri 1255 nalazi se 99,55% aluminija. [8]

Ljevane legure koriste se troznamenkastim sustavom s decimalom iza njih (XXX.X). Prve tri znamenke predstavljaju isto što i kod gnječenih legura, dok kod decimala ,0 predstavlja ograničenje, a ,1 i ,2 označavaju da se radi o ingotima. Tablica 2 prikazuje podjelu gnječenih aluminijskih legura prema toplinskoj obradivosti. [8]



**Tablica 2 Gnječene aluminijske legure prema toplinskoj obradivosti [7]**

Legure	Oznaka skupine legura prema normi HRN EN 515:2017
Toplinski neobrađive	
Tehnički čisti aluminij	1xxx
Al-Mn	3xxx
Al-Si (silumin)	4xxx
Al-Mg	5xxx
Al-Fe	8xxx
Al-Fe-Ni	8xxx
Toplinski obrađive	
Al-Cu	2xxx
Al-Cu-Mg	2xxx
Al-Cu-Li	2xxx
Al-Mg-Si	6xxx
Al-Zn	7xxx
Al-Zn-Mg	7xxx
Al-Zn-Mg-Cu	7xxx
Al-Li-Cu-Mg	8xxx

### 2.2.2. Utjecaj legirni elemenata na svojstva aluminijevih legura

Legiranje aluminija prvenstveno je usmjereno na poboljšanje njegove čvrstoće, tvrdoće i otpornosti na trošenje, puzanje, eliminaciju zaostalih naprezanja i zamor. Ova poboljšanja uglavnom ovise o samim elementima legiranja, kao što su bakar, magnezij, mangan, silicij i cink, koji se dobro tope u aluminiju. Proces često uključuje kombiniranje ovih elemenata s termo-mehaničkim tretmanima, poput hladnog valjanja i toplinske obrade, kako bi se optimizirale nastale mikrostrukture i svojstva. Ova poboljšanja čine aluminijske legure prikladnima za širok spektar primjena, iako postizanje izuzetno visokih čvrstoća može narušiti svojstvo lomne žilavosti što ograničava njihovu upotrebu u kritičnim strukturama poput konstrukcije zrakoplova. [7]

Aluminijske legure s 2 do 10% bakra ističu se u skupinama gnječenih i lijevanih aluminijskih legura. Očvršćuju se žarenjem u kombinaciji s dozrijevanjem, a najveći potencijal očvršćivanja imaju legure s 4 do 6% bakra, ovisno o ostalim prisutnim elementima. Unatoč velikom interesu za njih i ekstenzivnim istraživanjima, rijetko se komercijalno upotrebljavaju. Obično postoje dodatni legirajući elementi uz bakar.

Magnezij je glavni legirni element u legurama serije 5xxx. Njegova maksimalna topljivost u aluminiju je 17,4%, iako u gnječenim Al-Mg legurama njegov sadržaj obično ne prelazi 5,5%. On se taloži na granicama zrna i to može dovesti do širenja pukotina po granicama zrna i interkristalne korozije. Međutim gnječene legure s do 5% magnezija pri ispravnoj izradi su stabilne pri normalnoj upotrebi. Dodavanje magnezija iznimno povećava čvrstoću aluminija, a da pritom ne narušava duktilnost u značajnoj mjeri. Legure imaju dobru otpornost na koroziju i zavarivost.

Mangan je uobičajena nečistoća u aluminiju, obično prisutna u koncentracijama od 5 do 50 ppm, i smanjuje električni otpor. U aluminijskim legurama, mangan povećava čvrstoću bez negativnog utjecaja na otpornost na koroziju. Također pridonosi u formiranju strukture zrna, povećava temperaturu rekristalizacije i potiče stvaranje vlaknaste strukture tijekom toplinske obrade. Mangan je glavni legirni element u seriji legura 3xxx, često korištenih u proizvodnji limenki za pića, gdje poboljšava čvrstoću i oblikovljivost.

Silicij je druga najčešća nečistoća u komercijalnom aluminiju, nakon željeza, s udjelima u rasponu od 0,01 do 0,15%. U gnječenim legurama, silicij se kombinira s magnezijem (do 1,5%) kako bi stvorio  $Mg_2Si$  u toplinski obradivim legurama serije 6xxx. Iako legure aluminija i silicija visoke čistoće mogu biti sklone vrućem pucanju (eng. hot cracking) pri razinama silicija do 3%, dodavanje silicija (0,5 do 4,0%) pomaže smanjiti pucanje u legurama aluminija, bakra i magnezija. Silicij također poboljšava mogućnost toplinske obrade kad se kombinira s magnezijem, a razne modifikacije mogu se postići dodavanjem elemenata poput natrija ili fosfora. Udjeli silicija do 23% koriste se u legurama za lijevanje za primjene kod velikog trošenja, dok se legure s oko 5% silicija eloksiraju za ukrasne svrhe zbog svoje crne boje.

Aluminijske legure s cinkom dugo su poznate, no postojali su izazovi u njihovoj proizvodnji zbog pojave vrućih pukotina u lijevanim legurama kao i pojave pukotina uzrokovanih napetosnom korozijom u gnječenim legurama, pa im je primjena bila vrlo ograničena. Međutim kad se cink koristi u kombinaciji s ostalim legirnim elementima, te legure postižu najviše vlačne čvrstoće među ostalim gnječenim legurama. Zahvaljujući tome proširila se i njihova komercijalna upotreba. Uz to, cink dodatno povećava korozijsku postojanost

aluminija što je korisno kod primjena poput zaštitnih omotača ili žrtvenih anoda kod anodne zaštite. [7]

### 2.2.3. Skupine gnječenih legura

Gnječene legure skupine 1xxx imaju 99,00% ili više aluminija i imaju široku primjenu u elektronici i kemiji zahvaljujući visokoj otpornosti koroziji, toplinskoj i električnoj vodljivosti i obradivosti. Unatoč mogućnosti povećavanja čvrstoće deformiranjem, ne ističu se svojom čvrstoćom.

Primarni legirni element 2xxx skupine aluminijskih legura je bakar, a često mu se dodaje i magnezij. Ove legure zahtijevaju žarenje u svrhu poboljšavanja mehaničkih svojstava koja tada mogu konkurirati svojstvima niskougličnih čelika. Dozrijevanjem nakon žarenja može se dodatno povećati čvrstoća uz mali gubitak istezljivosti. Međutim, ove legure nemaju dobru korozijsku postojanost u usporedbi s ostalim aluminijskim legurama. Ova skupina legura je prikladna za primjenu u visoko čvrstim i laganim dijelovima kamiona i zrakoplova.

3xxx skupinu aluminijskih legura karakterizira mangan kao glavni legirni element. Nisu toplinski obradivi, ali imaju zadovoljavajuću čvrstoću (20% višu od 1xxx skupine). Nema ih mnogo jer se aluminiju može dodati samo do 1,5% mangana, ali najraširenija je 3003 legura. Primjenu nalazi u slučajevima kad nije potrebna velika čvrstoća, a zahtjev se stavlja na obradivost (velikoserijska proizvodnja).

Glavni legirni element u legurama serije 4xxx je silicij, koji se može dodati u većim količinama (do 12%) kako bi se značajno poboljšala livljivost bez izazivanja lomljivosti. Zbog toga se aluminij-silicij legure koriste za zavarivanje i lemljenje aluminija, gdje je potreban niži raspon taljenja u odnosu na osnovni metal. Većina legura iz ove serije nije pogodna za toplinsku obradu, ali kad se koriste s legurama koje se mogu toplinski obraditi, mogu preuzeti neke legirne sastojke te u određenoj mjeri reagirati na toplinsku obradu. Legure koje sadrže veće količine silicija postaju tamno sive do crne kada se na njih primijene anodizirani oksidni završni slojevi, što ih čini popularnima za arhitektonske primjene. Legura 4032 ima nizak koeficijent toplinskog širenja i visoku otpornost na trošenje, zbog čega je pogodna za proizvodnju kovanih klipova motora s unutarnjim izgaranjem.

Skupina 5xxx uključuje magnezij kao glavni legirni element i to često u kombinaciji s manganom. Karakterizira ju srednja-visoka čvrstoća koja se može unaprijediti deformiranjem. Magnezij bolje očvršćuje leguru nego mangan i može se dodati u većim količinama. Ove legure imaju dobru zavarljivost i jaku otpornost koroziji, pogotovo kod primjene u morskim uvjetima

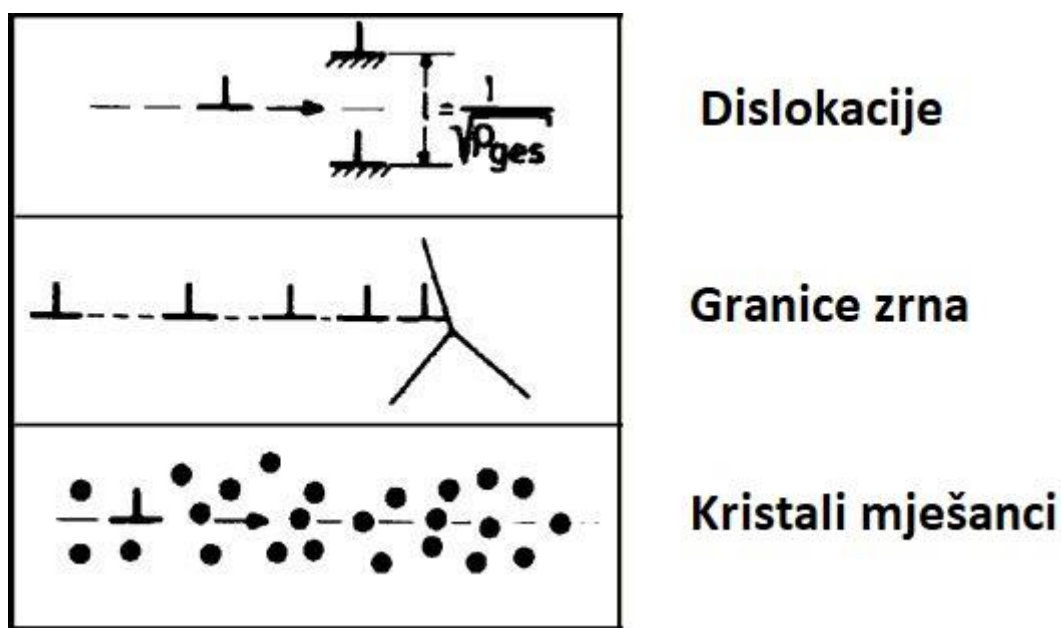
(brodovi, luke). Međutim, za legure s većim sadržajem magnezija (preko 3,5%) postoje ograničenja kod uvjeta rada u kontekstu temperature; za sprječavanje pucanja uslijed djelovanja napetosne korozije temperatura mora biti iznad 65°C.

Silicij i magnezij čine glavne legirne elemente aluminijskih legura 6xxx skupine i to u omjeru pogodnom za formiranje  $Mg_2Si$ . Dobro se zavaruju, oblikuju deformacijom, obrađuju odvajanjem čestice i postojani su na koroziju, no manje su čvrstoće od legura skupina 2xxx i 7xxx. Toplinski se obrađuju žarenjem i dozrijevanjem.

U 7xxx skupini aluminijskih legura glavni legirni element je cink i to s udjelom 1-8%. U kombinaciji s malim količinama magnezija moguća je toplinska obrada do visoke čvrstoće. 7xxx legure više čvrstoće pokazuju smanjenu otpornost na pucanje uslijed djelovanja napetosne korozije pa se implementira dozrijevanje za usklađivanje svojstava čvrstoće, korozijske postojanosti i lomne žilavosti. [7]

### 3. TOPLINSKA OBRADA ALUMINIJSKIH LEGURA

Mehaničko ponašanje metalnih materijala ovisi o njihovoj mikrostrukturi koja se sastoji od zrna u kojima su atomi raspoređeni u pravilnim kristalnim rešetkama. Ključni faktori koji utječu na ovo ponašanje uključuju poremećaje u tim rešetkama, posebno dislokacije, koje pripadaju tzv. u linijskim pogreškama ili nepravilnostima u mikrostrukturi metalnih materijala. Dislokacije mogu se pomicati uslijed djelovanja mehaničkog naprezanja, osim ako nisu spriječene drugim poremećajima u rešetki. Kada su dislokacije pokretne, materijali pokazuju elastično-plastičnu deformaciju pod opterećenjem, dok u suprotnom ostaju u elastičnom stanju. Jačanje metalnih materijala postiže se sprječavanjem pomicanja dislokacija, što se može postići mehanizmima poput gomilanja dislokacija, granicama zrna i kristalima mješancima (legiranjem) koji su prikazani na slici 3. Konkretno, kod aluminijskih legura, očvršćivanje se većinom postiže toplinskom obradom, a točnije precipitacijskim očvršćivanjem i to posebno u legurama kao što su 2xxx (Al-Cu(-Mg)), 6xxx (Al-Mg-Si) i 7xxx (Al-Zn-Mg). [9]



Slika 3 Mehanizmi sprječavanja gibanja dislokacija [9]

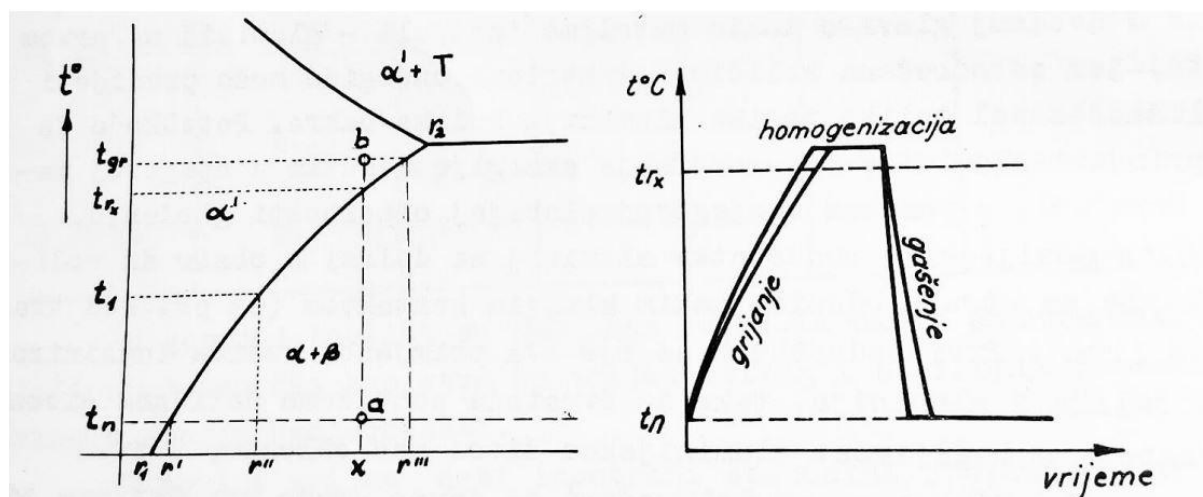
Toplinska obrada, u širokom smislu, odnosi se na bilo koje postupke zagrijavanja i hlađenja kojima se mijenjaju mehanička svojstva, mikrostruktura ili stanje zaostalih naprezanja u materijalu. Kada se taj termin koristi u kontekstu aluminijskih legura, često se odnosi na specifične postupke koji se primjenjuju kako bi se povećala čvrstoća i tvrdoća legura koje su podložne precipitacijskom očvršćivanju. Takve aluminijske legure nazivaju se toplinski

obrađivima. Ove postupke treba razlikovati od postupaka kod legura čija se čvrstoća ne može povećati zagrijavanjem i hlađenjem već se podvrgavaju hladnoj deformaciji u svrhu povećavanja čvrstoće. One se nazivaju toplinski neobrađivima. Zagrijavanje za smanjenje čvrstoće i povećanje duktilnosti (žarenje) koristi se kod obje vrste legura, iako se metalurške reakcije razlikuju ovisno o vrsti legure i stupnju omekšavanja. Potpuno ili djelomično žarenje jedini su postupci koji se koriste za legure koje se ne mogu toplinski obrađivati. [10]

### 3.1. PRECIPITACIJSKO OČVRŠĆIVANJE ALUMINIJSKIH LEGURA

Precipitacijsko očvršćivanje proces je koji se koristi za povećanje čvrstoće određenih aluminijskih legura. Proces se oslanja na temperaturno ovisnu ravnotežnu topljivost, pri čemu se stupanj otapanja legirajućih elemenata povećava s porastom temperature. Ovo ponašanje je ključno za formiranje finih precipitata tijekom toplinske obrade, koji su odgovorni za povećanje čvrstoće legure. [10]

Postoje uvjeti koji moraju biti zadovoljeni kako bi precipitacijsko očvršćivanje aluminijske legure bilo moguće. Potrebna je prisutnost barem jednog legirnog elementa kojem topivost u aluminiju raste s porastom temperature (krivulja  $r_1 - r_2$  na slici 4). Poželjno je da maseni udio legirnog elementa bude što veći, no opet manji od granice maksimalne topljivosti u kristalu mješancu aluminija  $r_2$ . Na taj način je moguća potpuna apsorpcija atoma legiranih elemenata kroz žarenje. Nadalje, legirni elementi moraju se otapati samo na visokim temperaturama dok pri okolišnoj temperaturi imaju malu topljivost. Iz tog razloga legura u polaznom stanju mora imati heterogenu strukturu koja se sastoji od  $\alpha$ -kristala mješanaca i  $\beta$ -kristala druge faze u obliku intermetalnog spoja kako bi došlo do ponovnog izlučivanja intermetalnog spoja u koherentnom obliku. Takvi sitni fino raspršeni precipitati će postupno otvrdnjavati leguru sve do postizanja maksimalne tvrdoće i čvrstoće. Precipitacijsko očvršćivanje se sastoji od rastvornog žarenja kako bi se postiglo potpuno otapanje legiranih elemenata, intenzivnog hlađenja ili gašenja do okolišne temperature kako bi legirni elementi ostali „zarobljeni“ u tada prezasićenoj otopini te od dozrijevanja. Dozrijevanje se provodi prirodno (na sobnoj temperaturi) ili umjetno (na povišenoj temperaturi). [11]



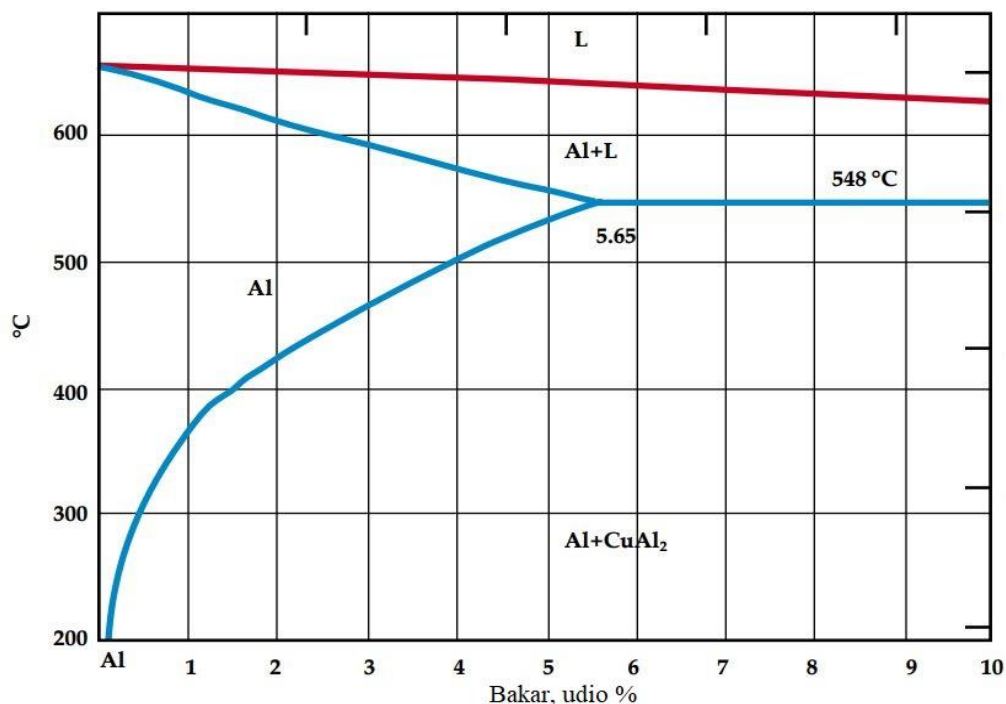
Slika 4 Fazni dijagram precipitacijski očvršnute aluminijske legure [11]

Kod ovih legura, nakon zagrijavanja (žarenja) i gašenja, materijal formira prezasićenu čvrstu otopinu. Tijekom dozrijevanja nastaju fino dispergirani precipitati i ispod granice topljivosti, posebno ispod metastabilnog područja otopine zvanog Guinier-Preston (GP) zona. Prisutnost precipitata i područja naprezanja koja stvaraju unutar kristalne rešetke pomaže pri sprječavanju gibanja dislokacija, na taj način značajno povećavajući čvrstoću legure. Precizna svojstva i učinkovitost ovog procesa očvršćivanja ovise o sastavu legure te njezinoj toplinskoj i mehaničkoj povijesti. GP zone su metastabilne, što znači da se s vremenom rastvaraju kako nastaju stabilniji precipitati, iako ti stabilni precipitati manje doprinose očvršćivanju. [10]

### 3.1.1. Homogenizacijsko žarenje

Kako bi provođenje precipitacijskog očvršćivanja u aluminijskim legurama bilo moguće, prvo je potrebno iz legure formirati čvrstu otopinu. Ovo se postiže homogenizacijskim (rastvornim) žarenjem čiji je cilj rastopiti maksimalnu moguću količinu legiranih elemenata za očvršćivanje u leguri. Proces uključuje zadržavanje legure na dovoljno visokoj temperaturi dovoljno dugo da se postigne gotovo homogena čvrsta otopina. To temperaturno područje nalazi se odmah ispod eutektičke temperature, a točna temperatura homogenizacijskog žarenja ovisi o sastavu legure i uključuje marginu za varijacije temperature, obično unutar  $\pm 6$  °C. Međutim, kod nekih visoko legiranih, visoko-čvrstih legura koje zahtijevaju kontroliranu žilavost, potrebna je stroža kontrola temperature. Homogenizacijsko žarenje aluminijskih legura obično se provodi u pećima na zraku, pećima u zaštitnoj atmosferi ili u pećima sa solnom kupkom. [9, 10]

Slika 5 prikazuje fazni dijagram Al-Cu legure. Na njega se može primijeniti dijagram postupka prikazan na slici 4 sastavljen od zagrijavanja i držanja legure npr. s 4,5% bakra na temperaturu 515°C do 550 °C (temperaturno područje homogenizacijskog žarenja) koje rezultira potpunim otapanjem bakra u čvrstoj otopini. [12]



Slika 5 Fazni dijagram Al-Cu legure [12]

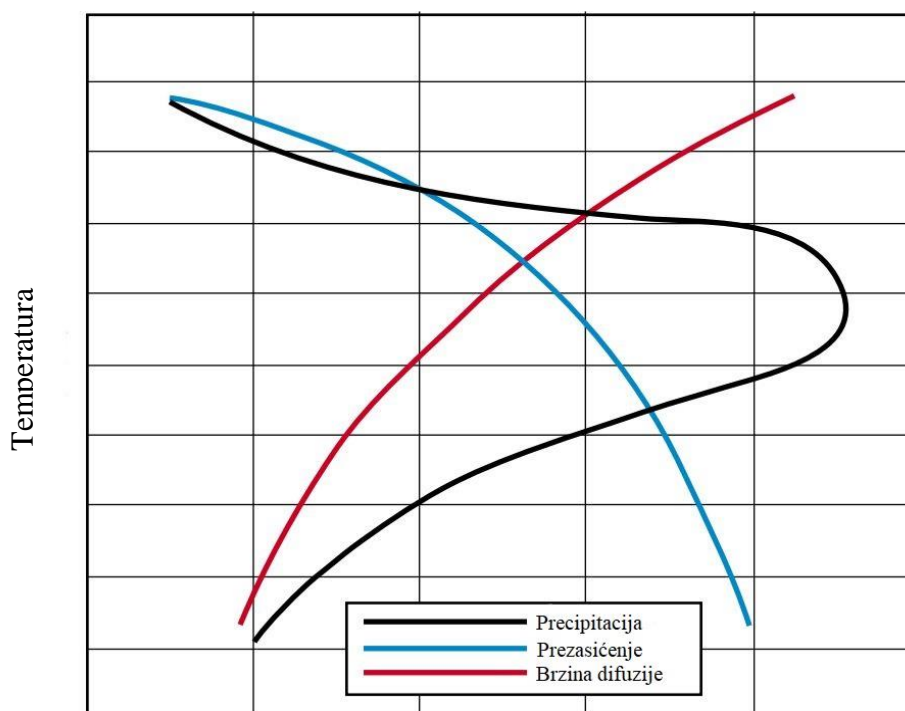
### 3.1.2. Gašenje

Gašenje je idući ključni korak u procesu precipitacijskog očvršćivanja aluminijskih legura. Glavni cilj je intenzivno hlađenje legure s temperature na kojoj se prethodno provelo žarenje kako bi se sačuvala čvrsta otopina stvorena na toj povišenoj temperaturi. Ovo brzo hlađenje pomaže zadržati atome legiranih elemenata i praznine unutar kristalne rešetke, koji su ključni za kasniji proces očvršćivanja precipitacijom. Ako je hlađenje presporo, ti elementi mogu migrirati na granice zrna ili druge čestice, gdje više ne doprinose očvršćivanju. Proces gašenja obično uključuje uranjanje legure u hladnu vodu, a za složenije oblike koristi se sredstvo koje omogućuje sporije hlađenje, poput tople vode, ključale vode ili određenih tekućih medija poput otopina polialkil-glikola. Intenzivno gašenje je nužno kako bi se izbjegla neželjena precipitacija koja može oslabiti mehanička svojstva ili smanjiti otpornost na koroziju. Međutim, za određene Al-Zn-Mg legure, sporije gašenje može poboljšati otpornost na pucanje uslijed djelovanja



napetosne korozije. Kako bi se spriječila neželjena precipitacija tijekom gašenja, moraju biti zadovoljena dva uvjeta: prijenos iz peći u sredstvo za gašenje mora biti dovoljno brz kako bi se izbjeglo hlađenje kroz kritične temperaturne intervale u kojima može doći do brze precipitacije, a sredstvo za gašenje mora imati dovoljan volumen i kapacitet apsorpcije topline da održava brzo hlađenje. Prekidi tijekom gašenja, koji bi mogli omogućiti ponovno zagrijavanje u kritični temperaturni raspon gdje može doći do brze precipitacije, moraju se strogo izbjegavati kako bi se osigurala željena svojstva legure. [10]

Brzina precipitacije tijekom gašenja aluminijskih legura ovisi o dva ključna faktora: stupnju prezasićenja otopine i brzini difuzije, koja se mijenja s temperaturom. Tijekom gašenja, veće prezasićenje može se postići ako se otopina još nije precipitirala. Slika 6 prikazuje ovisnost precipitacije o brzini difuzije i prezasićenju otopine. Brzina difuzije, koja omogućava atomima da se kreću i talože, povećava se s porastom temperature. Na visokim temperaturama, brzina difuzije je velika, ali ako je prezasićenje nisko, taloženje se odvija sporo. S druge strane, na niskim temperaturama, čak i s visokim prezasićenjem, brzina difuzije je niska, što također dovodi do sporog taloženja. Kritična točka javlja se na srednjim temperaturama gdje su i brzina difuzije i razina prezasićenja dovoljno visoki, što rezultira najbržom stopom precipitacije. Vrijeme koje legura provede u ovom temperaturnom rasponu tijekom gašenja, koje ovisi o brzini gašenja, ključno je za kontrolu procesa precipitacije. [12]



Slika 6 Ovisnost precipitacije o prezasićenju i brzini difuzije [12]

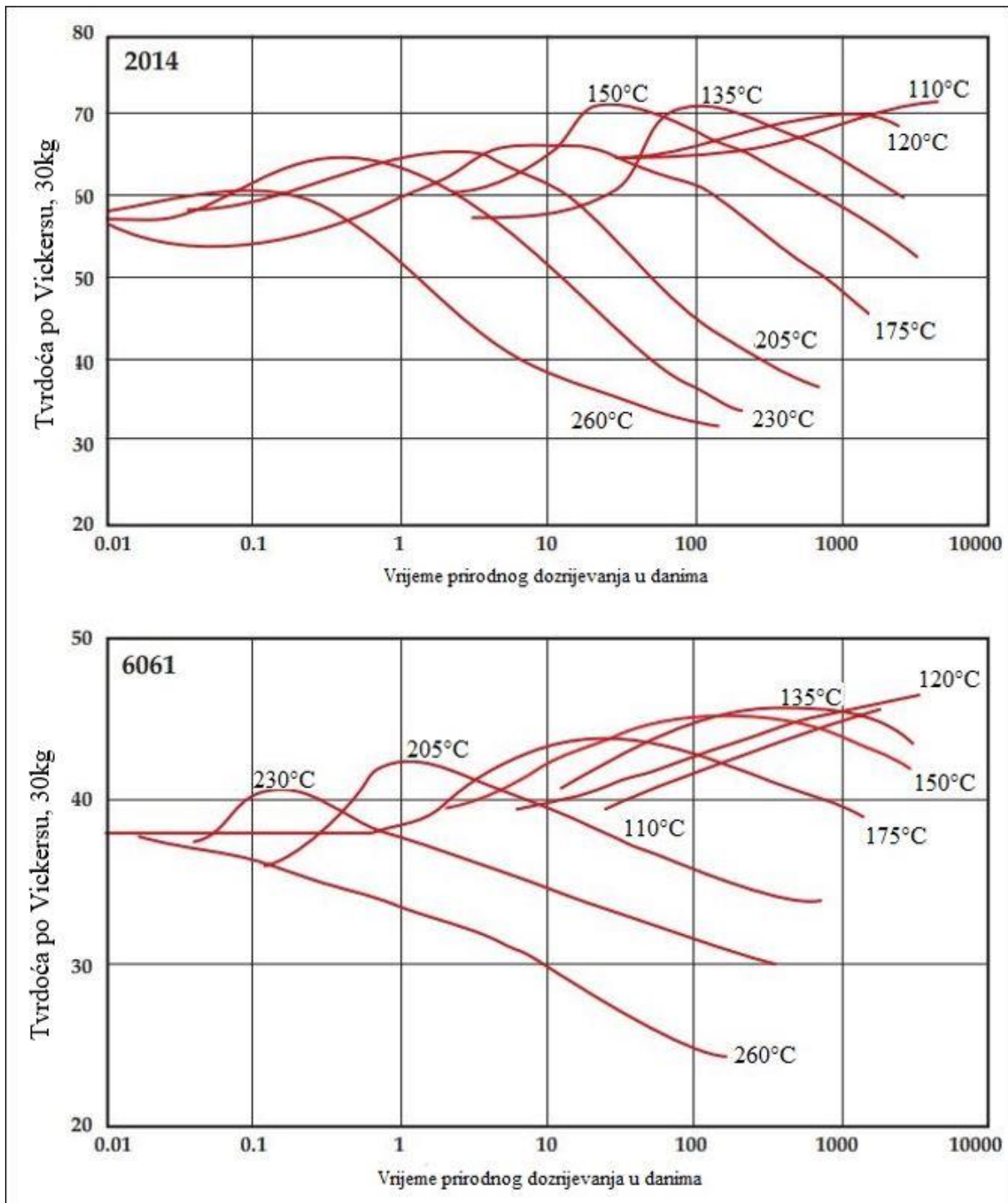
### 3.1.3. Dozrijevanje

Nakon homogenizacijskog žarenja i gašenja, očvršćivanje aluminijskih legura postiže se na sobnoj temperaturi (prirodno dozrijevanje) ili na povišenoj temperaturi (umjetno dozrijevanje). U nekim legurama, dovoljan stupanj precipitacije se odvija u roku od nekoliko dana na sobnoj temperaturi, čime se dobivaju stabilni proizvodi s osobinama koje su adekvatne za mnoge primjene. Te legure se ponekad podvrgavaju precipitaciji kako bi se povećala čvrstoća i tvrdoća u obrađenim ili lijevanim proizvodima. Druge legure sa sporim procesom precipitacije na sobnoj temperaturi uvijek zahtijevaju ovu toplinsku obradu prije upotrebe. U nekim legurama, osobito iz serije 2xxx, hladna deformacija svježe gašenog materijala značajno povećava njegovu reakciju na kasnije dozrijevanje na povišenoj temperaturi. Tvornice iskorištavaju ovaj fenomen primjenom kontroliranog valjanja (ploča i limova) ili rastezanja (ekstrudiranih proizvoda, šipki i ploča) kako bi postigla bolja mehanička svojstva. [10]

Prirodno dozrijevanje aluminijskih legura uključuje brzu formaciju GP zona iz prezasićene čvrste otopine i zarobljenih vakancija. Ovaj proces dovodi do brzog povećanja čvrstoće, a svojstva se stabiliziraju nakon otprilike 4-5 dana. Kod legura serije 2xxx, poboljšanja nakon ovog perioda su minimalna, a stabilnost se obično postiže unutar tjedan dana. Legure skupine 7xxx i 6xxx također otvrdnjavaju formiranjem GP zona, ali su njihova svojstva stečena prirodnim dozrijevanjem manje stabilna i mogu se nastaviti mijenjati tijekom vremena što je i vidljivo na slici 7. Karakteristike prirodnog dozrijevanja variraju između različitih legura, posebno u inkubacijskom vremenu prije nego što se primijete promjene svojstava i u brzini tih promjena. Snižavanje temperature može suzbiti učinke dozrijevanja; primjerice, kod legura serije 7xxx, držanje na  $-40^{\circ}\text{C}$  gotovo potpuno zaustavlja prirodno starenje. [12]

Nakon gašenja, većina aluminijskih legura ipak prolazi kroz umjetno dozrijevanje. Ovaj proces značajno povećava tvrdoću, granicu tečenja i krajnju čvrstoću održavanjem legure na konstantnoj temperaturi dozrijevanja nakon brzog hlađenja s više temperature homogenizacijskog žarenja. Tijekom dozrijevanja, prezasićena čvrsta otopina se razlaže, što dovodi do formiranja koherentnih, a zatim nekoherentnih precipitata. Precipitati pojačavaju leguru ometajući kretanje dislokacija unutar mikrostrukture metala. Umjetno dozrijevanje, obično između  $95^{\circ}\text{C}$  –  $205^{\circ}\text{C}$ , ubrzava precipitaciju i poboljšava mehanička svojstva, ali također smanjuje duktilnost i žilavost. Temperature dozrijevanja pažljivo se kontroliraju kako bi se optimizirala mehanička svojstva legure bez pretjeranog dozrijevanja, što bi moglo dovesti

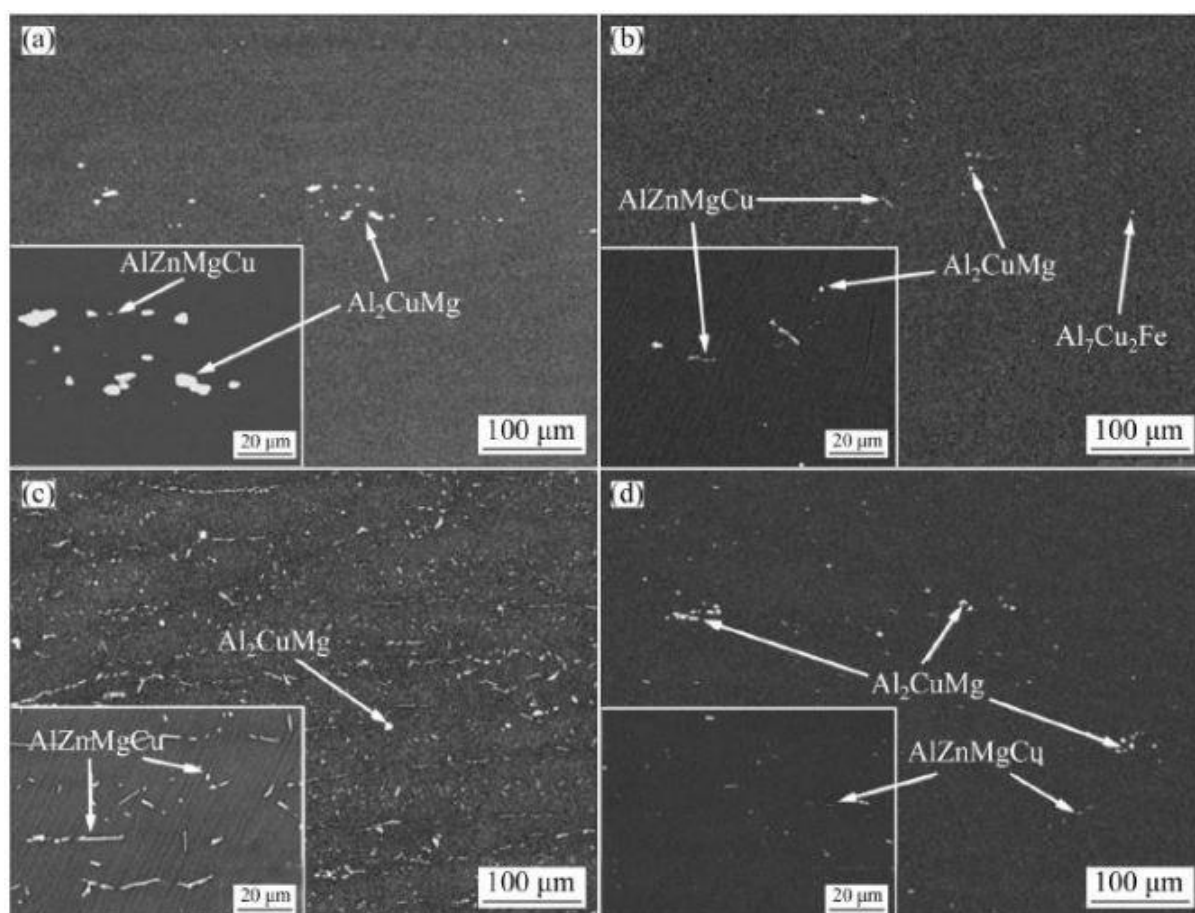
do smanjenja vlačne čvrstoće, ali i poboljšanja otpornosti na pukotine uzrokovane naprezanjem i umorom materijala. [12]



Slika 7 Prirodno dozrijevanje 2014 i 6061 aluminijskih legura [12]

### 3.2. TOPLINSKA OBRADA 7xxx SKUPINE ALUMINIJSKIH LEGURA

Homogenizacijsko žarenje može se izvesti na različite načine: jednokratno, višestupanjski, poboljšano ili obradom pri visokoj temperaturi prije precipitacije. Slika 8 prikazuje razlike u raspodjeli precipitata obzirom na režim žarenja. Višestupanjska obrada otopine (eng. Multi-stage Solution Treatment - MST) uključuje postupno povećanje temperature u fazama, čime se poboljšava ujednačenost i performanse legure. Na primjer, dvostupanjski proces na 470 °C tokom 1 sata, a zatim na 480 °C tokom 1 sata, uspješno se koristi za leguru 7A55 kako bi se poboljšala njezina tvrdoća i vodljivost.



**Slika 8** Raspodjele precipitata kod a) jednokratnog, b) poboljšanog, c) visokotemperaturnog i d) višestupanjskog režima žarenja

Nakon homogenizacijskog žarenja, legure 7xxx intenzivno se hlade u vodi, kako bi se otopljeni elementi "zarobili" na mjestu, stvarajući prezasićenu čvrstu otopinu.

Dozrijevanje se može izvoditi prirodno na sobnoj temperaturi ili umjetno zagrijavanjem legure na određenu temperaturu. Kod legura serije 7xxx, umjetno starenje na temperaturama

između 95-205°C ubrzava precipitaciju, značajno poboljšavajući mehanička svojstva. Na primjer, starenje na 121°C tijekom 12 sati može rezultirati vrhunskom čvrstoćom i tvrdoćom.

Kako bi se postigla ravnoteža između čvrstoće i otpornosti na korozijsko pucanje, primjenjuje se postupak povratnog dozrijevanja (Regression Reaging - RRA). Ovaj proces uključuje ponovno zagrijavanje legure nakon dozrijevanja kako bi se postigla kombinacija visoke čvrstoće i poboljšane otpornosti na pucanje uslijed djelovanja napetostne korozije. Proces uključuje faze pred-dozrijevanja, povratne precipitacije i ponovnog dozrijevanja, pri čemu se temperatura pažljivo kontrolira kako bi se optimizirala veličina i raspodjela precipitata. Ovaj složeni proces osigurava da materijal zadrži svoju mehaničku čvrstoću, istovremeno poboljšavajući trajnost u korozivnim okruženjima. [13]

### 3.3. TOPLINSKA OBRADA 6xxx SKUPINE ALUMINIJSKIH LEGURA

Glavni legirajući elementi su magnezij (Mg) i silicij (Si), koji stvaraju različite vrste  $Mg_2Si$  precipitata. Ti se precipitati dijele u tri vrste prema veličini i doprinosu mehaničkim svojstvima: Koherentni precipitati  $\beta''$  koji značajno poboljšavaju mehanička svojstva kada su gusto raspršeni, djelomično koherentni precipitati  $\beta'$  koji rastu iz  $\beta''$  precipitata, ali imaju minimalan utjecaj na mehanička svojstva i nekoherentni precipitati  $\beta$  koji ne doprinose mehaničkim svojstvima. Proces toplinske obrade za 6xxx seriju legura uključuje ista tri glavna koraka: homogenizacijsko žarenje, gašenje i dozrijevanje. Tijekom homogenizacijskog žarenja legura se zagrijava na oko 580 °C na 1 sat kako bi se svi legirajući elementi otopili u čvrstoj otopini. Legura se zatim intenzivno hladi u vodi kako bi se elementi zadržali u otopini, što dovodi do T4 stanja. Za povećanje čvrstoće, legura se podvrgava umjetnom dozrijevanju na temperaturama između 150 °C do 200 °C, gdje legirajući elementi stvaraju GP zone unutar aluminijske matrice, što rezultira T6 stanjem koje nudi poboljšana mehanička svojstva. [14]

#### 4. ZAVARIVANJE ALUMINIJSKIH LEGURA

Zavarivanje toplinski obradivih aluminijskih legura ključno je u industrijama poput zrakoplovstva, transporta i brodogradnje zbog njihove visoke čvrstoće, niske gustoće i izvrsne otpornosti na koroziju. Zavarivanje ovih legura prvenstveno se vrši konvencionalnim postupcima zavarivanja lukom, uključujući elektrolučno zavarivanje taljivom žicom u zaštiti inertnog plina (MIG – eng. Metal Inert Gas) i elektrolučno zavarivanje netaljivom elektrodom u zaštiti inertnog plina (TIG – eng. Tungsten Inert Gas), kao i tehnikama poput elektrootpornog točkastog varenja i visokoenergetskim postupcima kao što su lasersko zavarivanje i zavarivanje snopom elektrona.

Kod zavarivanja aluminijskih legura postoje izazovi koji proizlaze iz njihovih svojstava. Materijal ima površinski sloj oksida koji, iako pruža zaštitu od korozije, otežava zavarivanje. Ovaj sloj oksida potrebno je ukloniti prije zavarivanja, bilo mehanički ili kemijski, te dodatno smanjiti pomoću katodne zaštite tijekom postupka zavarivanja. Visoka toplinska vodljivost aluminijskih legura zahtijeva veći unos topline i struje u usporedbi s ostalim metalima poput čelika, a visoki koeficijent toplinskog širenja može rezultirati značajnim deformacijama tijekom zavarivanja. Aluminijske legure su također sklone poroznosti zbog visoke topljivosti vodika u tekućem stanju i niske topljivosti u čvrstom stanju. Održavanje čistoće površine i odgovarajuća zaštita plinom pomažu u sprječavanju ovog problema. Ključni problem je i pojava loma, osobito kod toplinski obradivih legura, što se može ublažiti pravilnim odabirom dodatnog materijala za zavarivanje. Kod aluminijskih legura izvedivo je i elektrootporno točkasto zavarivanje, ali zahtijeva posebnu opremu zbog niske električne otpornosti aluminijskih legura i uske zone plastičnosti. Visoke struje zavarivanja i precizna kontrola parametara ključni su za postizanje visoke kvalitete zavara, osobito u primjenama poput konstrukcija zrakoplova. Uspješno zavarivanje aluminijskih legura temelji se na razumijevanju njihovih jedinstvenih toplinskih i mehaničkih svojstava, korištenju prikladnih metoda zavarivanja i ublažavanju potencijalnih nedostataka kroz pažljivu pripremu i kontrolu parametara zavarivanja. Tablica 3 prikazuje zavarljivost gnječanih legura u ovisnosti o legirnim elementima i svojstvima. [15]

**Tablica 3 Zavarljivost gnječanih legura u ovisnosti o svojstvima i legirnim elementima [15]**

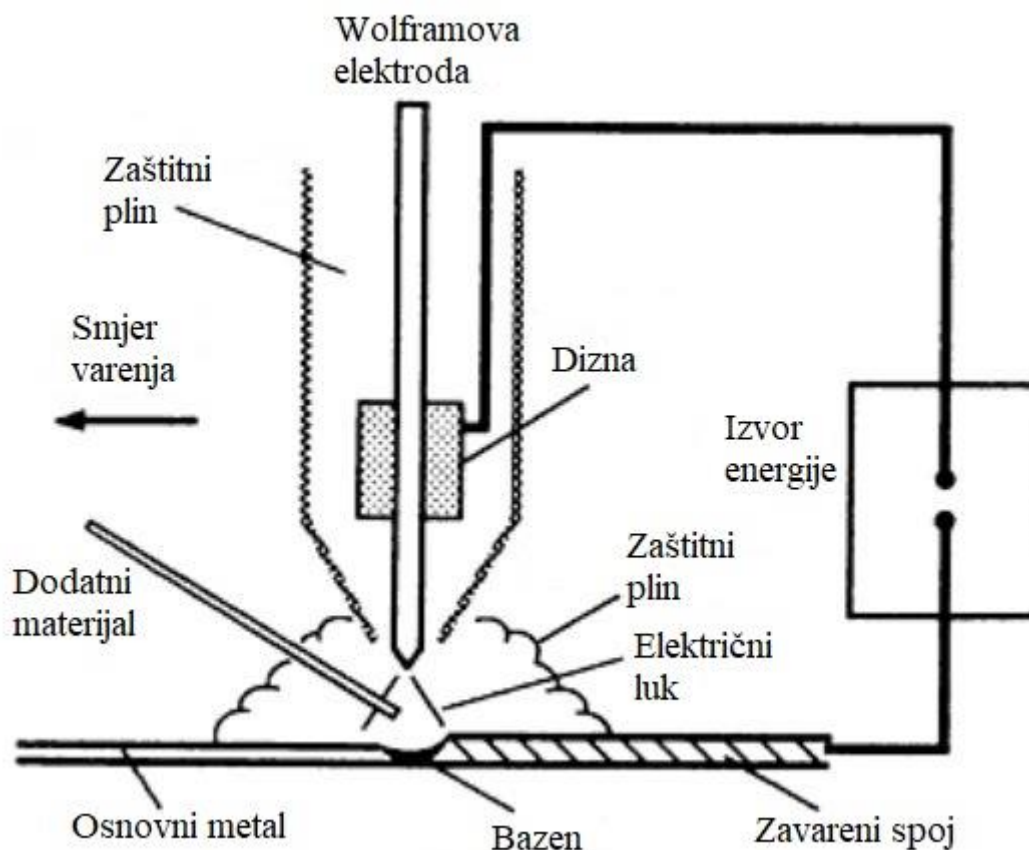
Legura	Udio legiranih elemenata, %							Prosječna zona taljenja, °C	Toplinska vodljivost na 25°C, W/MK	Električna vodljivost, %IACS	Zavarivost		
	Cu	Si	Mn	Mg	Zn	Cr	Drugi				Plinsko	REL	MIG TIG
6009	0.4	0.8	0.5	0.6	0.2-5	0.1	-	560-649	167	44	C	C	B
6013	0.9	0.2-5	0.3-5	0.9-5	-	-	-	579-649	150	38	C	C	B
6061	0.2-8	0.6	-	1	-	0.2	-	582- 652	167	43	A	A	A
6063	-	0.4	-	0.7	-	-	-	616- 654	200	53	A	A	A
6101	-	0.5	-	0.6	-	-	-	621- 654	218	57	A	A	A
6262	0.2-8	0.6	-	1	-	0.0-9	0.6 Pb, 0.6Bi	582- 652	172	44	C	C	B
6351	-	1	0.6	1	-	-	-	596- 652	176	46	A	A	A
6951	0.2-8	0.3-5	-	0.6	-	-	-	616- 654	198	52	A	A	A
7005	-	-	0.4-5	1.4	4.5	0.1-3	0.15 Zr, 0,04 Ti	607- 646	-	-	X	X	A
7039	-	-	0.3	2.8	4	0.2	-	577- 638	154	34	X	X	A
7075	1.6	-	-	2.5	5.6	0.2-3	-	477- 635	130	33	X	X	C
7079	0.6	-	0.2	3.3	4.3	0.2	-	482- 638	125	32	X	X	C
7178	2	-	-	2.8	6.8	0.2-3	-	477- 629	125	31	X	X	C

A	lako varenje
B	varenje uz posebnu tehniku/materijal
C	teško varenje
X	nije preporučljivo

#### 4.1. POSTUPCI ZAVARIVANJA ALUMINIJSKIH LEGURA

##### 4.1.1. TIG zavarivanje netaljivom elektrodom u inertnom plinu

TIG zavarivanje proces je koji se koristi za zavarivanje aluminijskih legura, posebice u primjenama koje zahtijevaju visoku kvalitetu i preciznost. Razvijen 1940-ih, ovaj je način zavarivanja i dalje popularan, osobito za tanje materijale (do 6,4 mm) i spojeve gdje je estetska kvaliteta od ključne važnosti. TIG je pogodan za ručno i automatsko zavarivanje te se koristi za postizanje visokokvalitetnih zavara u kritičnim primjenama poput dijelova u zrakoplovstvu. Postupak se može koristiti u svim položajima što ga čini učinkovitim za zavarivanje cijevi i složenih oblika. Shematski prikaz TIG zavarivanja prikazan je slikom 9.



Slika 9 Shema zavarivanja TIG postupkom [15]

Što se tiče zaštitnih plinova, čisti argon najčešće je korišten kod TIG-a, posebice kada se koristi izmjenična struja za tanje aluminijske legure. Kod debljih materijala ili gdje je potrebna dublja penetracija, koristi se mješavina argona i helija (do 50%).

Izmjenična struja je najčešći način za zavarivanje aluminija jer pruža čišćenje električnim lukom koje uklanja oksidni sloj na aluminiju, dok negativni pol ciklusa omogućuje dublju penetraciju. Jednosmjerna struja s negativnom elektrodom koristi se za dublju i užu penetraciju te je prikladna za deblje materijale (do 25 mm), no nema čišćenje električnim lukom pa se oksid mora ukloniti prije zavarivanja. Jednosmjerna struja s pozitivnom elektrodom pruža dobro čišćenje, ali ima vrlo plitku penetraciju i rijetko se koristi.

Kod zavarivanja izmjeničnom strujom koriste se čiste ili Zr-W elektrode, dok se Th-W elektrode više koriste kod zavarivanja istosmjernom strujom. Stabilnost luka i konstantna penetracija ključni su za osiguranje visokokvalitetnih zavara.

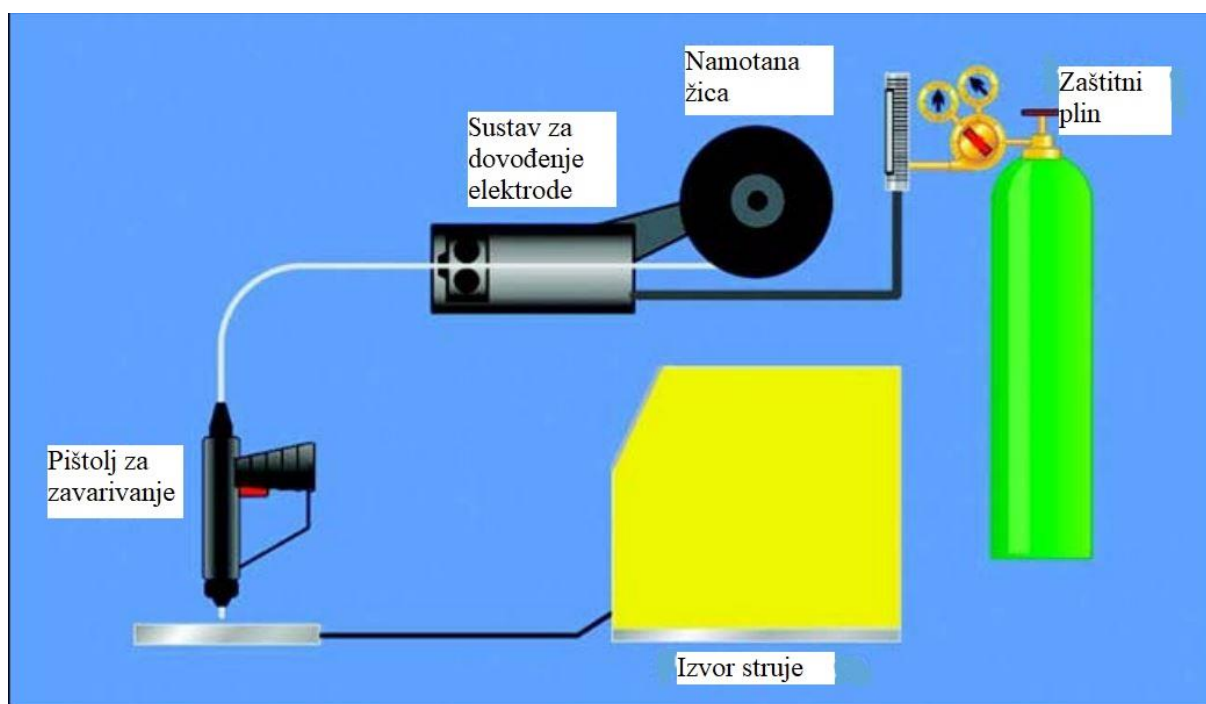
Zbog visoke toplinske vodljivosti aluminija, TIG zahtijeva veći unos topline nego čelika, što ga čini osjetljivijim na mikrostrukturne promjene pri unošenju topline. TIG ostaje ključna



metoda za zavarivanje aluminijskih legura u primjenama koje zahtijevaju preciznost i visoku kvalitetu, poput zrakoplovne i građevinske industrije. [15]

#### 4.1.2. MIG zavarivanje taljivom elektrodom u inertnom plinu

MIG zavarivanje aluminijskih legura podrazumijeva korištenje elektrode od aluminija ili aluminijske legure. Pošto se ista elektroda koristi i kao dodatni materijal, autogeno zavarivanje MIG-om nije opcija. Proces se odvija pomoću istosmjerne električne struje u inertnom zaštitnom plinu s pozitivno polariziranom elektrodom. Moguće ga je automatizirati tako da uređaj za varenje upravlja ključnim faktorima poput struje, duljinom luka i brzinom dodavanja elektrode te nakon postavljanja naknadna kalibracija nije potrebna. Shematski prikaz sustava za MIG postupak varenja prikazan je na slici 10. Iz tog razloga se nekad naziva i poluautomatsko zavarivanje. MIG postupkom moguće je zavariti komade svih debljina. [16]



Slika 10 Shema sustava za zavarivanje MIG postupkom [16]

MIG postupak dijeli nekoliko prednosti s TIG postupkom, poput toga da nema potrebe za fluksom, dolazi do vrlo malo prskanja, omogućuje zavarivanje u svim položajima te uklanja oksidni film s aluminija tijekom zavarivanja. Međutim, MIG ima dodatne prednosti, uključujući veće brzine zavarivanja, dublju penetraciju i užu zonu toplinskog utjecaja (ZUT) zbog koncentriranijeg izvora topline. Također je jednostavniji za korištenje i zahtijeva manje vještine jer koristi samo jednu ruku za poluautomatsko zavarivanje. U MIG zavarivanju aluminijskih

legura koristi se način prijenosa metalne taljevine raspršivanjem (eng. spray transfer) koji osigurava visoku toplinsku učinkovitost i zavarivanje u svim položajima zahvaljujući stvaranju superzagrijanih kapljica rastaljenog metala koje prodiru duboko u komad. Ovaj prijenos omogućuje magnetska sila koja ubrzava kapljice. Načini prijenosa, poput kratkog spoja i globularnog prijenosa, koji su pogodni za čelik, nisu prikladni za aluminijske legure jer ne stvaraju dovoljnu toplinu, što može dovesti do nepotpunog spajanja. Kod MIG-a ključno je usklađivanje brzine dodavanja žice i njezinog topljenja, a moderni pristup je prilagodba struje kako bi se nadomjestile fluktuacije brzine žice, čime se poboljšava stabilnost procesa. [16]

#### **4.1.3. Ostali postupci zavarivanja aluminijskih legura**

Plazma elektrolučno zavarivanje (eng. plasma arc welding - PAW) je postupak zavarivanja u plinskoj zaštitnoj atmosferi pri kojem se spoj metala postiže toplinom koju prenosi električni luk između volframove elektrode i radnog komada. Luk se sužava i usmjerava kroz mlaznicu od bakrove legure stvarajući visoko koncentriran i intenzivan izvor topline. Plazma se stvara ionizacijom dijela plina koji prolazi kroz mlaznicu i to omogućava topljenje metala na spoju. Zavarivanje se može izvesti sa ili bez dodatnog materijala, ovisno o primjeni i vrsti spoja. PAW se izvodi u dvije faze. U prvoj se fazi primarni luk uspostavlja između elektrode i mlaznice koristeći visokofrekvencijski napon. Ovaj luk pomaže stabilizirati glavni luk u sljedećoj fazi. U idućem koraku glavni zavarivački luk se prenosi s elektrode na radni komad kroz mlaznicu, stvarajući potrebnu toplinu za formiranje bazena taline i završetak spoja. Ova usmjerena toplina omogućava preciznu kontrolu zavarivanja, čineći PAW pogodnim za visokokvalitetne i specijalizirane primjene, kao što su zrakoplovstvo, elektronika i industrije koje zahtijevaju precizno zavarivanje s dubokom penetracijom. [15]

Lasersko zavarivanje (eng. laser beam welding - LBW) je proces zavarivanja visoke gustoće energije, izuzetno učinkovit kod aluminijskih i njegovih legura. Ovaj postupak pruža brojne prednosti, uključujući preciznu kontrolu unosa topline, visoke brzine zavarivanja tankih materijala, duboku penetraciju kod debljih materijala, uske zavare s paralelnim granicama spoja te minimalne toplinske deformacije. Rezultat su zavari visokog omjera dubine prema širini i smanjenog toplinskog utjecaja. Unatoč tim prednostima, visoka početna cijena opreme predstavlja nedostatak u usporedbi s tradicionalnijim metodama zavarivanja. LBW funkcionira u dva osnovna načina rada: zavarivanje ograničeno vođenjem topline i zavarivanje ključanicom, ovisno o gustoći energije lasera na površini materijala. Zavarivanje ograničeno vođenjem topline nastaje kada je gustoća energije relativno niska. Energija lasera se apsorbira

na površini materijala bez značajnog prodora, što rezultira širim, ali plitkim zavarenim spojevima. Zavarivanje ključanicom nastupa kada je laser fokusiran na malu površinu i energija postaje dovoljno intenzivna da metal isparava ispod zrake, stvarajući efekt ključanice. Ovaj efekt omogućava višestruka refleksija zrake, što poboljšava apsorpciju energije. Ovaj način omogućuje proizvodnju zavara s visokim omjerom dubine prema širini, pogodan za duboku penetraciju u debljim materijalima. [16]

Zavarivanje snopom elektrona (eng. electron beam welding - EBW) je proces visokogeneretskog zavarivanja fuzijom, gdje se na spoj koji se zavaruje usmjerava snop visoko ubrzanih elektrona. [15]

Ovaj proces može proizvesti zavare u aluminijskim pločama debljine do 150 mm s omjerom dubine i širine od 40 prema 1. Elektronski snop se generira pomoću „elektronske puške“ koja se sastoji od katodnog emitera, rešetkaste šalice i anode, koji su konfigurirani tako da stvaraju elektrostatsko polje koje ubrzava i oblikuje elektrone u dobro usmjereni snop. [16]

Kada elektroni udare u radni komad, njihova kinetička energija pretvara se u toplinsku, što uzrokuje lokalizirano topljenje, a time i stvaranje zavara. Ova koncentracija energije omogućava postizanje izuzetno visokih gustoća snage. Prednost EBW-a leži u sposobnosti zavarivanja metala koji se mogu zavarivati lukom, pri čemu kvaliteta zavara često nadmašuje onu postignutu postupkom MIG ili TIG zavarivanjem. Proces je vrlo učinkovit zbog brzog topljenja i isparavanja materijala, što omogućava duboke i uske zavarene spojeve s minimalnom toplinskom deformacijom. Za razliku od drugih metoda, EBW omogućava trenutačno topljenje materijala, dok druge metode ovise o sporijem prijenosu topline putem provodljivosti. Ovaj jedinstveni aspekt omogućava preciznu kontrolu i minimalne deformacije pri zavarivanju. Međutim, proces zahtijeva vakuumsko okruženje kako bi se spriječilo raspršivanje snopa elektrona, što može predstavljati ograničenje u nekim proizvodnim okruženjima. [15]

Tijekom zavarivanja elektronskim snopom, nužno je koristiti zaštitu od X-zračenja pomoću olova, debelog čelika ili betonskih blokova. Osim toga, budući da su promjeri snopa iznimno usmjereni, potrebno je precizno postavljanje spojeva kod sučeljenog spoja. [16]

## 4.2. PROBLEMI ZAVARIVANJA ALUMINIJSKIH LEGURA

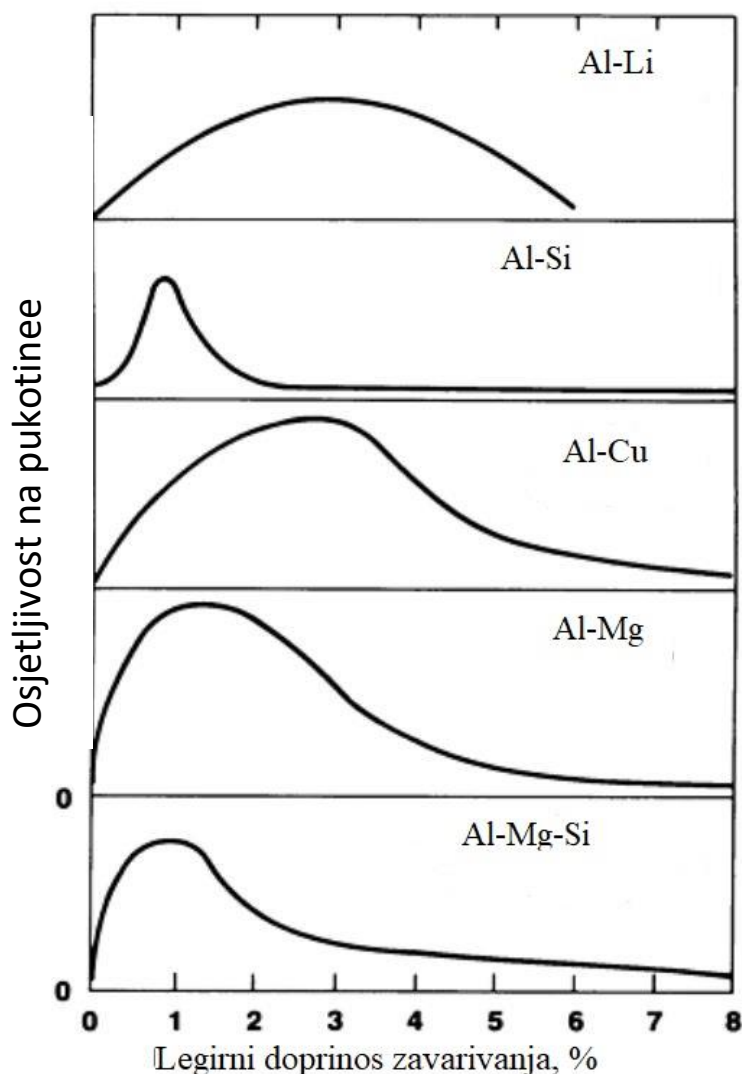
Prilikom zavarivanja toplinski obradivih aluminijskih legura potrebno je obratiti pozornost na nekoliko problema kako bi se osigurali kvalitetni zavareni spojevi. Ove legure poznate su po svojim inherentnim karakteristikama poput tvrdog oksidnog sloja, visoke toplinske vodljivosti i visokog koeficijenta toplinskog širenja. Uz ove čimbenike, dodatni problemi uključuju skupljanje pri skrućivanju, koje je gotovo dvostruko veće nego što je to kod željeznih legura, širok temperaturni raspon skrućivanja te visoku topljivost vodika u rastaljenom stanju što može uzrokovati poteškoće prilikom zavarivanja. Glavni problemi uključuju pucanje zbog toplinskog rastezanja i skupljanja pri skrućivanju, poroznost uzrokovanu apsorpcijom vodika te degradaciju zone utjecaja topline (ZUT). Pravilnim prethodnim tretmanom za minimiziranje oksida korištenjem visokih struja i brzih prijelaza te pažljivom kontrolom uvjeta obrade, moguće je ublažiti ove probleme i postići zavarene spojeve sa zadovoljavajućim svojstvima. [15]

### 4.2.1. Sklonost pucanju

Pukotine u zavarenim spojevima aluminijskih legura predstavljaju značajan problem zbog visoke vrijednosti koeficijenta toplinskog širenja aluminijske legure, velikih promjena volumena tijekom skrućivanja i širokog temperaturnog raspona skrućivanja. Osjetljivost na pucanje posebno je izražena kod legura koje se mogu toplinski obrađivati, zbog većih količina dodanih legirajućih elemenata. Postoje dvije glavne vrste pukotina: pukotine od skrućivanja (eng. solidification cracks), koje se pojavljuju u zoni taline (obično u središtu zavara ili na kraju), te pukotine ukapljivanja (eng. liquidation cracks), koje nastaju uz zonu taline i općenito su manje vidljive. [15]

Pukotine pri skrućivanju zavara događaju se kada je prisutno visoko toplinsko opterećenje i skupljanje. Ovaj tip pukotina ovisi o kombinaciji mehaničkih, toplinskih i metalurških čimbenika poput stupnja opterećenja zavarenog spoja i sastava zavarivačkog materijala. Faktori poput visokog unosa topline, velikih struja i sporih brzina zavarivanja povećavaju rizik od pojave pukotina. Proces s minimalnim unosom topline, poput zavarivanja snopom elektrona, smanjuju osjetljivost na pukotine. Kako bi se spriječilo pucanje, ključno je kontrolirati sastav pažljivim odabirom elektrode i dodatnog materijala. Ovisnost osjetljivosti na pucanje o legirnom dodatku zavarivanjem pri različitim legurama prikazana je na slici 11. U legurama poput 2024 i 7075 manji dodaci legirnih elemenata poput bakra ili magnezija dramatično povećavaju osjetljivost na pukotine zbog proširenja temperaturnog raspona stvrdnjavanja,

osobito kod zavarivanja dviju različitih legura, kao što je zavarivanje serije 2xxx sa serijom 5xxx. [15, 16]



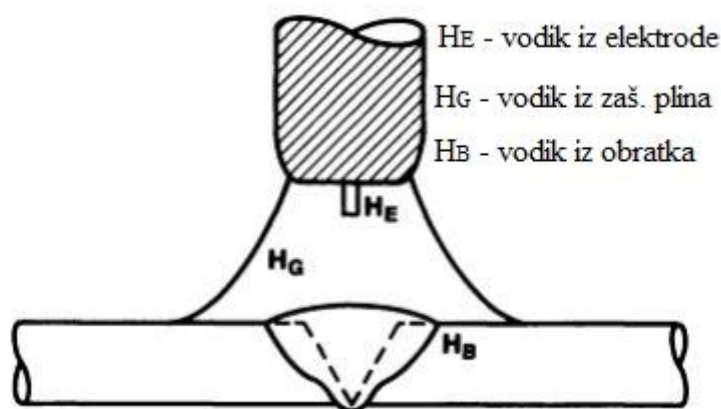
**Slika 11 Ovisnost osjetljivosti na pucanje pukotine o legirnom doprinosu zavarivanja [15]**

U toplinski obradivim aluminijskim legurama, zona utjecaja topline (ZUT) obuhvaća dio poznat kao djelomično rastaljena zona, koja se nalazi blizu područja zavarenog spoja. Ova se zona formira kada eutektička faza koja ima nižu točku taljenja od glavnog materijala, postane tekuća na granicama zrna tijekom zavarivanja. Prisutnost tih faza dovodi do ukapljivanja, a ako je toplinsko opterećenje tijekom zavarivanja dovoljno, moguća je pojava pukotina duž sučelja spoja. Viši unos topline povećava veličinu ove zone i njenu osjetljivost na pucanje. Izbor dodatnog materijala za zavarivanje značajno utječe na pojavu pukotina. Legure s nižim

temperaturama očvršćivanja pridonose smanjenju pucanja jer omogućuju očvršćivanje prije nego što nastupi skupljanje materijala. [15]

#### 4.2.2. Poroznost

Poroznost u aluminijskim zavarenim spojevima uglavnom nastaje zbog vodika koji ostaje zarobljen tijekom skrućivanja metala zavara. Vodik ima istaknutu topljivost u rastaljenom aluminiju, dok je njegova topljivost u čvrstom stanju vrlo niska. Tijekom zavarivanja, vodik se apsorbira u rastaljenom bazenu, ali kako se materijal hladi i očvršćuje, vodik se odvaja, što dovodi do stvaranja plinskih pora. Ovaj proces nastajanja poroznosti pokreće razlika u topljivosti vodika između rastaljenog i čvrstog aluminija. Nekoliko čimbenika utječe na razinu poroznosti, uključujući parametre zavarivanja, položaj zavarivanja i ponašanje vodika unutar rastaljenog bazena. Kako se zavar hladi, plinski mjehurići mogu se podići na površinu i izaći ili ostati zarobljeni, stvarajući pore unutar zavara. Manje brzine zavarivanja omogućuju više vremena za izlazak pora, smanjujući poroznost. Zavarivanje u vertikalnom položaju općenito uzrokuje manje poroznosti, jer uzgon plina pomaže porama da izađu na površinu. S druge strane, zavarivanje iznad glave često rezultira većom poroznošću zbog nepovoljnih obrazaca uzgona i konvekcije koji zarobe pore unutar zavara. Glavni izvori vodika u sustavu zavarivanja uključuju onečišćenja iz osnovnog materijala, dodatnog materijala i zaštitnog plina koji su prikazani slikom 12. [15, 16]



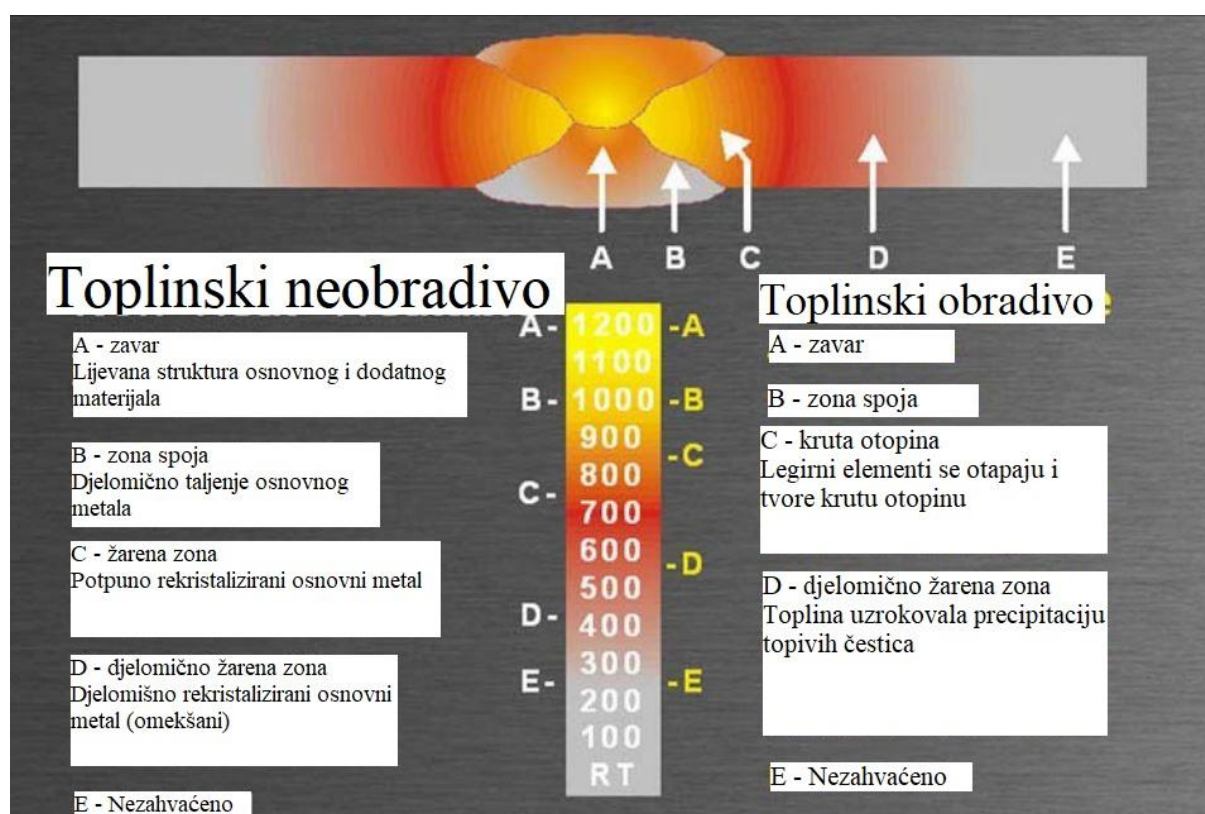
Slika 12 Izvori vodika u sustavu zavarivanja [15]

Na primjer, površinske nečistoće poput ugljikohidrata i hidratiziranih oksida na osnovnom i dodatnom materijalu mogu unijeti vodik u zavar. Također, kontaminacija vlagom u zaštitnom plinu može doprinijeti poroznosti, stoga je važno održavati nisku točku rosišta u plinskom

sustavu kako bi se spriječio ulazak vlage u područje zavara. Preventivne mjere za smanjenje poroznosti počinju pravilnim čišćenjem osnovnog i dodatnog materijala. Osim toga, upotreba visokokvalitetnih elektroda, održavanje plinskih crijeva i dodatne opreme, kao i pravilna tehnika zavarivanja, mogu pomoći u smanjenju onečišćenja vodikom, a samim time i poroznosti. [15, 16]

#### 4.2.3. Zona utjecaja topline

U procesu zavarivanja aluminijskih legura dolazi do topljenja osnovnog materijala kako bi se stvorio zavaren spoj. Tijekom ovog procesa toplina se provodi u okolni materijal pored zavara. Gotovi zavareni spoj obično se dijeli na tri glavna područja: zavareno područje, zonu utjecaja topline (ZUT) koja je odmah uz zavar i osnovni materijal koji nije bio pod toplinskim opterećenjem procesa zavarivanja (slika 13). [16]



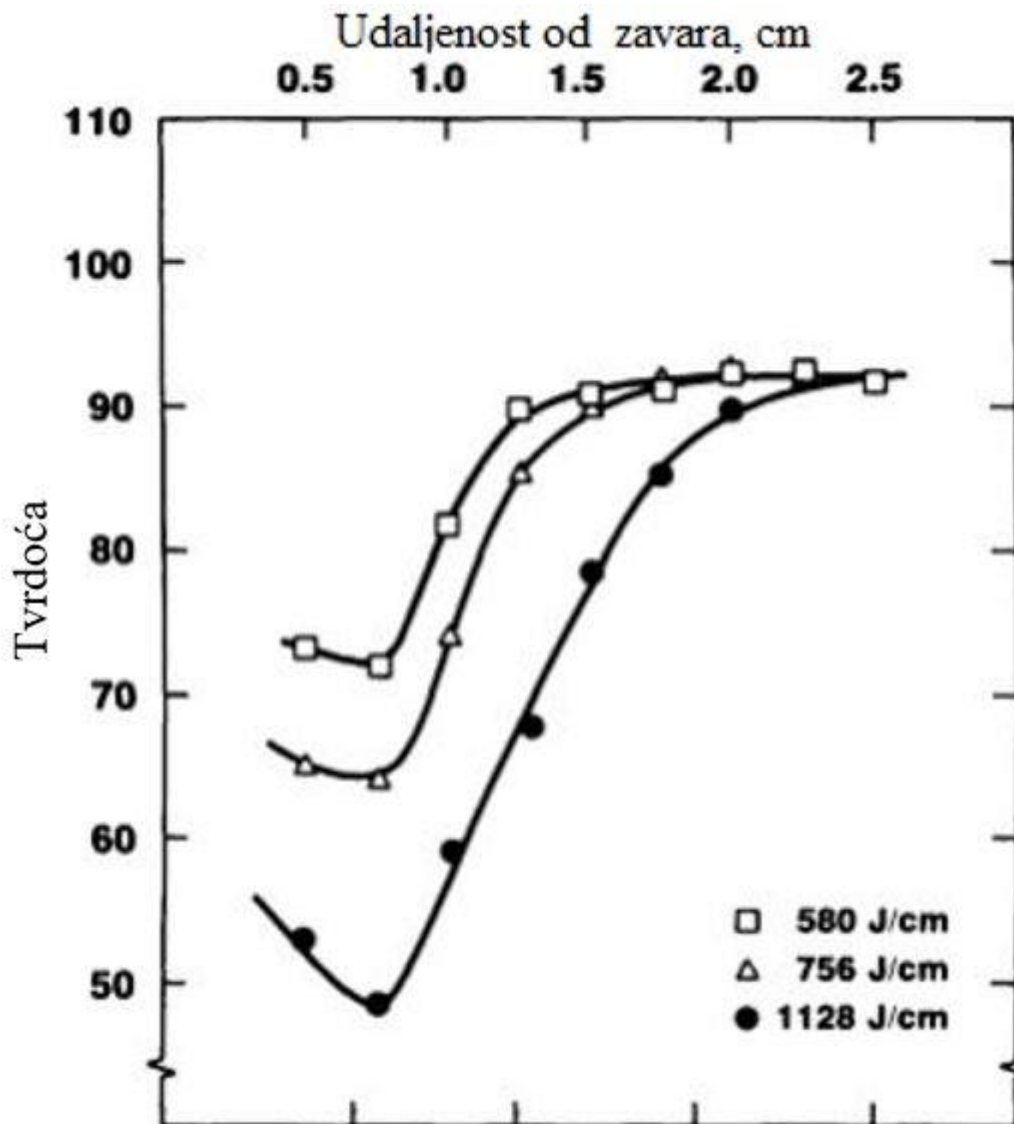
Slika 13 Područja zavarenog spoja [16]

ZUT prolazi kroz cikluse zagrijavanja i hlađenja tijekom procesa zavarivanja. Kod materijala koji su ojačani procesima kaljenja ili očvršćivanja taloženjem, ovaj termalni ciklus može značajno promijeniti svojstva, čineći ih različitima od originalnog osnovnog legura i

nepromijenjenog dijela osnovnog materijala. Ove promjene u ZUT-u su ključne jer mogu utjecati na mehanička svojstva i ukupnu učinkovitost zavarenog spoja. [16]

#### 4.2.3.1. Utjecaj unosa topline na ZUT

Metalurške transformacije u zoni utjecaja topline (ZUT) aluminijskih legura pod značajnim su utjecajem toplinskih ciklusa. Proces zavarivanja i njegove postavke igraju ključnu ulogu u određivanju stupnja degradacije osnovnog materijala. Veliki unos topline i predgrijavanje doprinose povećanju veličine ZUT-a i degradaciji, posebno kod aluminijskih legura koje se mogu očvrnuti precipitacijom; utjecaj ZUT-a na zavaru prikazuje se profilom tvrdoće kao što je to napravljeno za 6061-T6 leguru na slici 14. [15, 16]



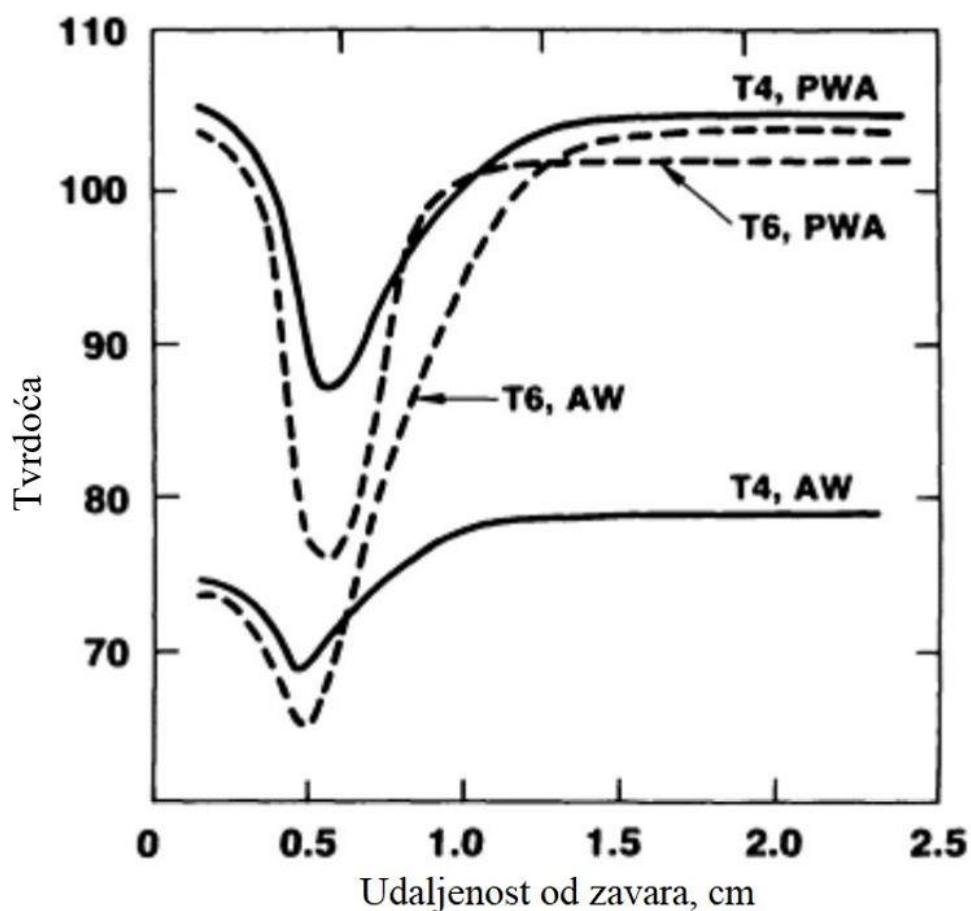
Slika 14 Profil tvrdoće oko zavara na leguri 6061-T6 [15]



Kako bi se smanjila ova degradacija, preporučuju se tehnike poput višeslojnog zavarivanja, pažljive kontrole temperature između prolaza i izbjegavanja predgrijavanja. Najveća čvrstoća zavara postiže se kada temperature između prolaza ne prelaze 65 °C i kada je unos topline tijekom zavarivanja sveden na minimum. Ove metode pomažu u očuvanju strukturnog integriteta legura i smanjenju negativnih utjecaja na kvalitetu zavara. [15]

#### 4.2.3.2. Toplinska obrada zavara

Toplinska obrada aluminijskih legura nakon zavarivanja može značajno poboljšati čvrstoću zone utjecaja topline (ZUT). Postoje dvije osnovne metode: kompletno homogenizacijsko žarenje i dozrijevanje ili samo dozrijevanje. Iako samo dozrijevanje ne vraća toliko čvrstoće kao uz homogenizacijsko žarenje, nudi prednosti poput nižih temperatura obrade i izbjegavanja gašenja u vodi, što može uzrokovati zaostale napetosti i deformacije. Razvoj novih polimernih gašenja smanjio je distorziju kod gašenja, što pruža alternativu klasičnim uobičajenim metodama. Kod legura 6061-T4 i 6061-T6, značajan povratak čvrstoće u ZUT-u postiže se dozrijevanjem nakon varenja, posebno za T4 stanje (slika 15). [15]

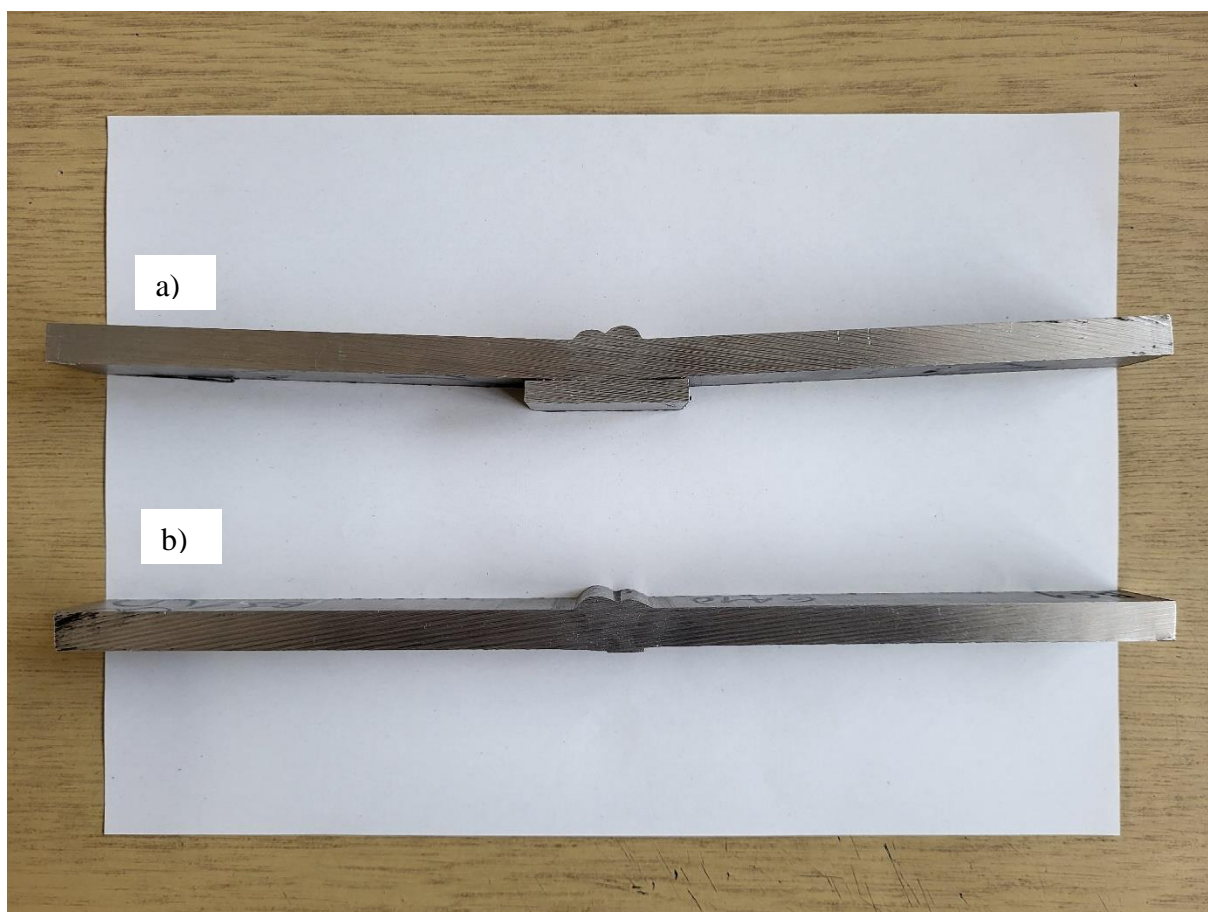


Slika 15 Profili tvrdoće za 6061-T4, -T6 u zavarenom (AW) i dozrijevanom (PWA) stanju [15]

Međutim, dozrijevanje nakon varenja 6061-T6 može dovesti do prekomjernog dozrijevanja, smanjujući čvrstoću u netaknutom osnovnom materijalu, zbog čega su T4 ili T3 materijali povoljniji za zavarivanje i dozrijevanje kod legura koje se mogu precipitacijski ojačavati. Serija legura 7xxx također pokazuje sposobnost prirodnog dozrijevanja, omogućujući oporavak čvrstoće u ZUT-u na sobnoj temperaturi tijekom vremena, obično u razdoblju od oko 14 dana, što je učinkovita alternativa umjetnom dozrijevanju za vraćanje čvrstoće u ZUT-u ovih legura. [15]

## 5. PLAN POKUSA I PRIPREMA UZORAKA

Cilj eksperimentalnog dijela rada je toplinski obraditi sučeljeno zavarene ploče od materijala EN AW 6082 u stanju T651 (homogenizirano, istežano za pojavu zaostalih naprežanja, umjetno dozrijevano). Dobivena su dva zavora prikazana na slici 16; jedan je zavaren a) AC-MIG, a drugi b) DC-MIG postupkom.



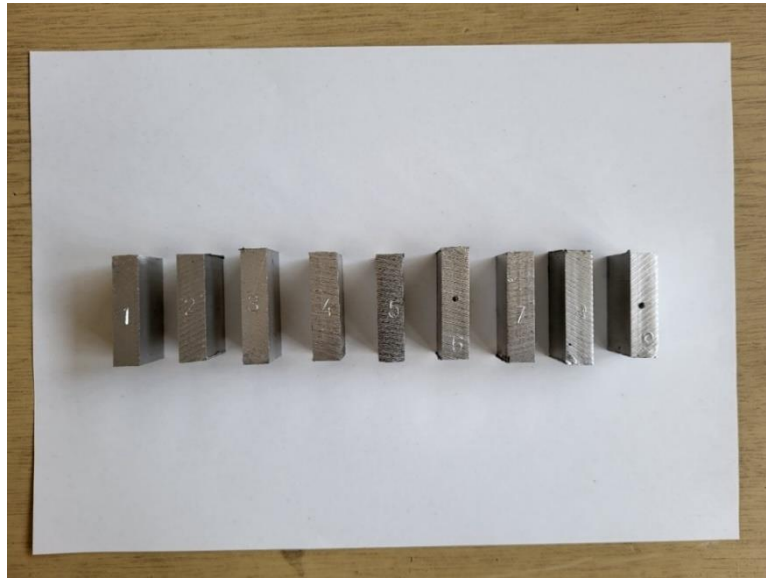
**Slika 16** Zavareni uzorci EN AW T651; a) AC-MIG, b) DC-MIG

Toplinska obrada zavora provodi se s ciljem povratka mehaničkih svojstava i mikrostrukturnog stanja u ZUT-u prije zavarivanja. Pri tom je potrebno obratiti pažnju da se tvrdoća osnovnog materijala smanji minimalno kako se ne bi smanjio potencijal primjene.

Toplinska obrada sastoji se od predpokusa žarenja uzorka od legure EN AW 6082 T651 s ciljem određivanja ovisnosti smanjenja tvrdoće legure o temperaturi žarenja i pokusa žarenja zavora s ciljem minimalnog smanjenja tvrdoće i smanjenja zaostalih naprežanja u zavaru.

## 6. ŽARENJE POLAZNOG MATERIJALA

Prvim pokusom ispituje se utjecaj unosa topline na smanjenje tvrdoće osnovnog materijala. Iz zavarenih ploča izrezano je i označeno devet uzoraka van ZUT-a prikazanih na slici 17.



Slika 17 Označeni uzorci legure EN AW 6082 T651

Jedan uzorak ostavljen je u polaznom stanju. Svi uzorci brušeni su i polirani kako bi se pripremili za mjerenje tvrdoće. Uzorcima 5 i 6 izmjerena je tvrdoća u polaznom stanju. Uzorci su podvrgnuti žarenju jedan sat u pećima prikazanim slikom 18. Hlađenje je provedeno na zraku te im je tvrdomjerom Zwick/Roell izmjerena tvrdoća nakon hlađenja što je prikazano slikom 19.



Slika 18 Žarenje uzoraka u pećima

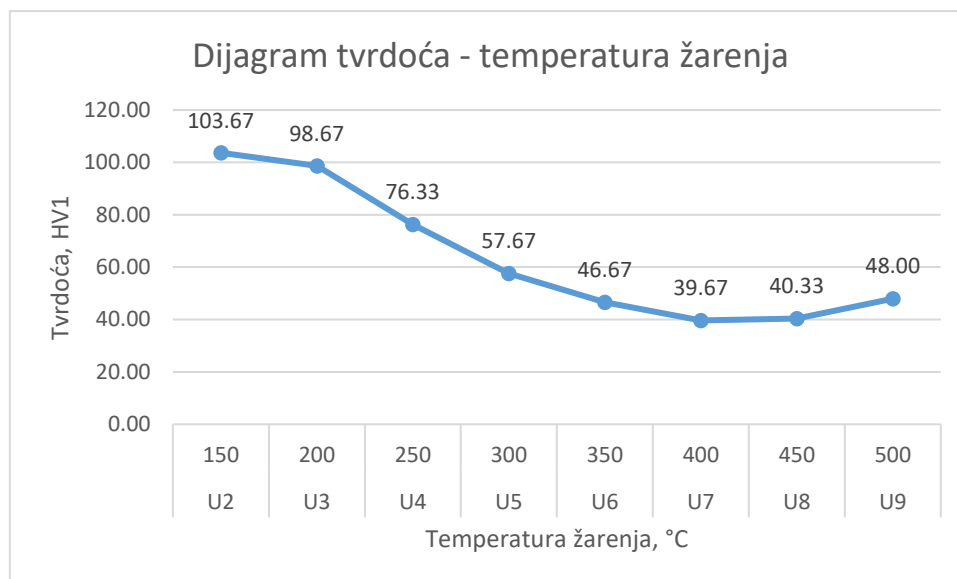


Slika 19 Mjerenje tvrdoće tvrdomerom Zwick/Roell

Parametri žarenja kao i izmjerene tvrdoće prije i poslije žarenja prikazani su tablicom 4, a ovisnost pada tvrdoće o temperaturi žarenja vidi se na slici 20.

Tablica 4 Parametri žarenja i izmjerene tvrdoće

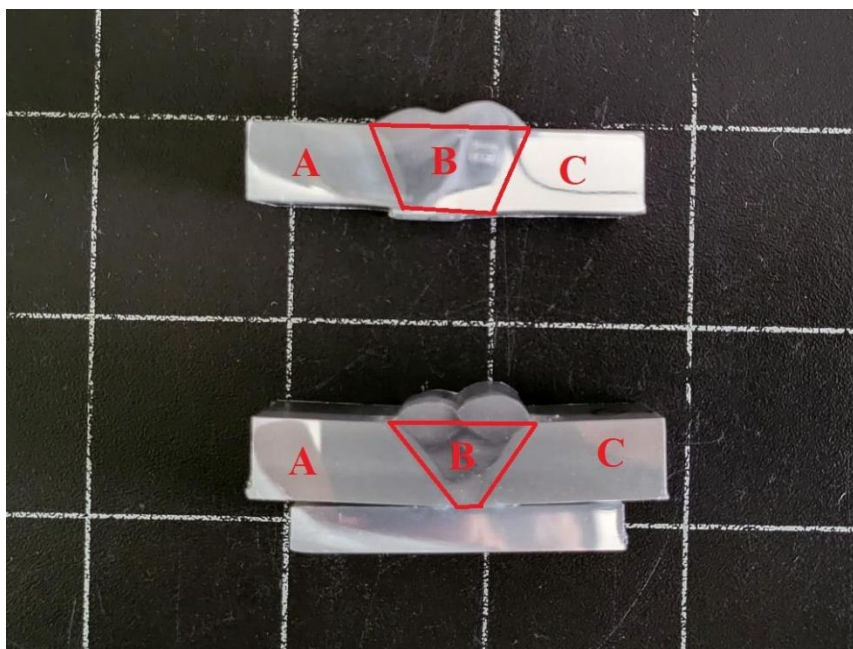
Uzorci	Vrijeme, h	Temp. žarenja, °C	Tvrdoća prije žarenja, HV1			Srednja tvrdoća prije žarenja, HV1	Tvrdoća nakon žarenja, HV1			Srednja tvrdoća nakon žarenja, HV1
U1	-	polazno	-	-	-	109,5	109,5	109,5	109,5	-
U2	1	150	-	-	-	109,5	105	103	103	103.67
U3	1	200	-	-	-	109,5	100	99	97	98.67
U4	1	250	-	-	-	109,5	77	76	76	76.33
U5	1	300	108	112	113	109,5	58	57	58	57.67
U6	1	350	108	108	108	109,5	46	47	47	46.67
U7	1	400	-	-	-	109,5	39	40	40	39.67
U8	1	450	-	-	-	109,5	41	40	40	40.33
U9	1	500	-	-	-	109,5	48	48	48	48.00



**Slika 20** Dijagram ovisnosti tvrdoće o temperaturi žarenja pri konstantnom vremenu

## 7. PROMJENA TVRDOĆE NAKON ŽARENJA UZORAKA ZAVARA

Prema rezultatima iz pokusa žarenja polaznog materijala odabrana je temperatura žarenja AC i DC zavora. Odabrana temperatura iznosi 175 °C jer je na tom temperaturnom području pad tvrdoće zadovoljavajuće mali, a do 200 °C ponašanje pada tvrdoće je linearno. Uzorci su pripremljeni za mjerenje tvrdoće brušenjem i poliranjem. Na slici 21. vidljivi su uzorci zajedno sa zonama (A, B, C) u kojima im je mjerena tvrdoća. U svakoj zoni napravljeno je 3 otiska.



Slika 21 Uzorci AC i DC sa zonama mjerenja tvrdoće

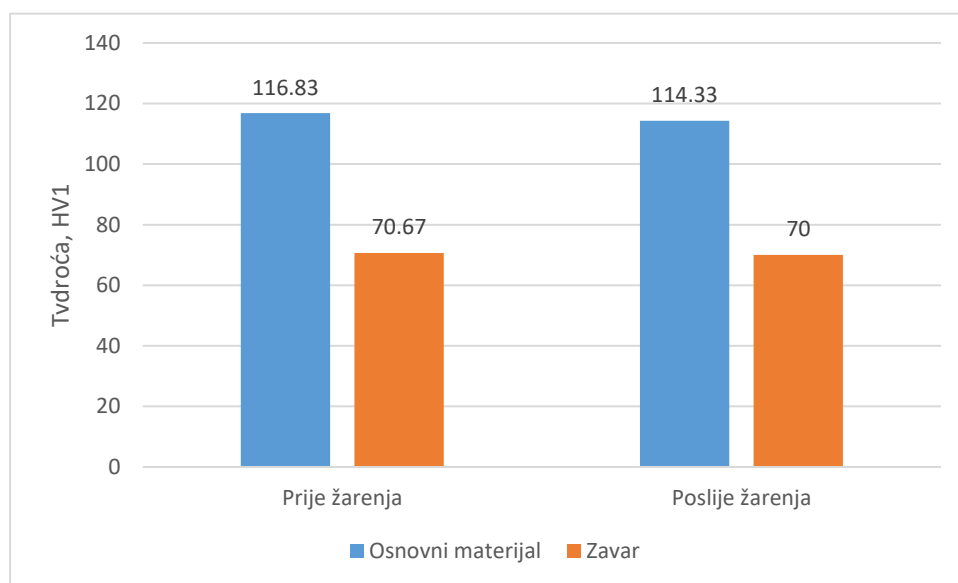
Vizualnom kontrolom uzoraka na slici 21 postaje jasno da je na DC (gornjem) uzorku zavar izveden u 3 prolaza, a na AC (donjem) uzorku u 5 prolaza.

Tvrdoće prije i poslije žarenja za AC zavoreni uzorak prikazane su u tablici 5.

Tablica 5 Tvrdoće osnovnog materijala i zavora AC uzorka

AC	Mjerenja	Tvrdoća A, HV1	Tvrdoća B, HV1	Tvrdoća C, HV1	Prosječna tvrdoća A+C
Prije žarenja	1	117	72	120	116.83
	2	119	72	116	
	3	115	68	114	
	Prosječno	117	70.67	116.67	
Poslije žarenja	1	119	72	103	114.33
	2	114	72	113	
	3	121	66	116	
	Prosječno	118	70	110.67	

Očituje se pad prosječne tvrdoće za manje od 1 HV u zavaru (B zona) i 2,5 HV u osnovnom materijalu (A + C zone) nakon žarenja što je prikazano na slici 22.



**Slika 22** Analiza pada tvrdoće nakon žarenja AC uzorka

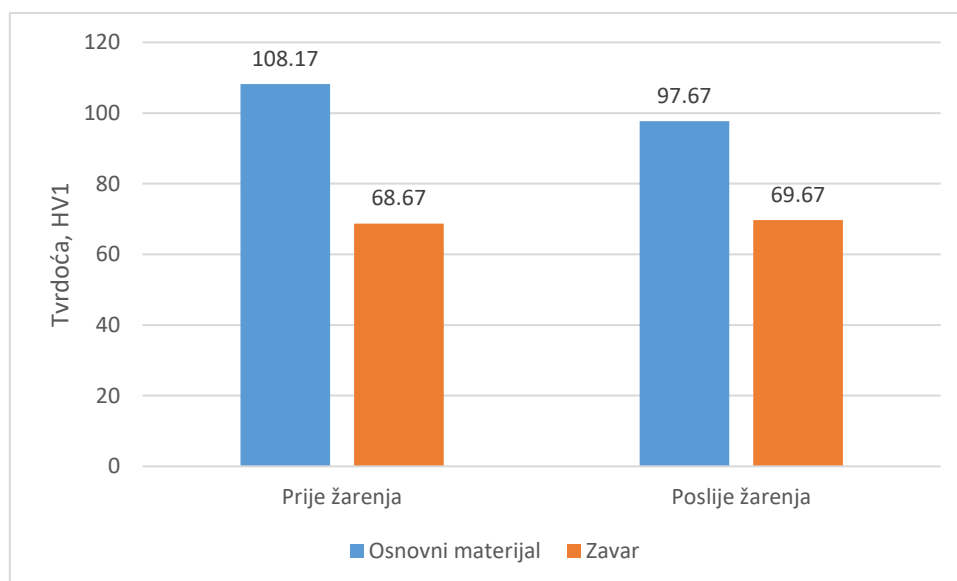
Tvrdoće prije i poslije žarenja za DC zavareni uzorak prikazane su u tablici 6.

**Tablica 6** Tvrdoće osnovnog materijala i zavara DC uzorka

DC	Mjerenja	Tvrdoća A, HV1	Tvrdoća B, HV1	Tvrdoća C, HV1	Prosje. tvrdoća A+C
Prije žarenja	1	102	70	114	108.17
	2	95	68	112	
	3	114	71	112	
	Prosječno	103.67	69.67	112.67	
Poslije žarenja	1	83	70	92	97.67
	2	95	65	101	
	3	99	71	116	
	Prosječno	92.33	68.67	103.00	

Pad tvrdoće osnovnog materijala (A + C) u DC uzorku u prosijeku iznosi 10,5 HV. Međutim, tvrdoća zavara (B zona) ima prosječni rast od 1 HV što je prikazano na slici 23.

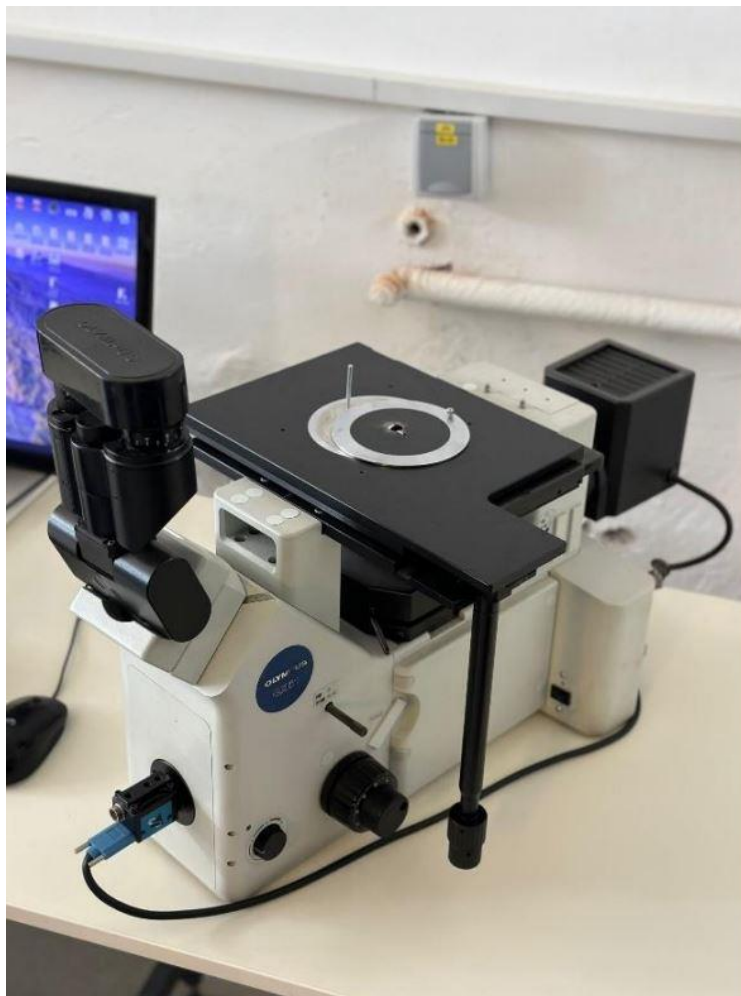




**Slika 23** Analiza pada tvrdoće nakon žarenja DC uzorka

## **8. ANALIZA MIKROSTRUKTURE ZAVARA**

Nakon mjerenja tvrdoće uzorci su pripremljeni za metalografsku analizu. Ponovo su brušeni i polirani, a potom nagrizeni u vodenoj otopini sljedećeg sastava: 10 ml HF, 15 ml HCl, 85 ml H<sub>2</sub>O u vremenu od 45 s. Analiza je provedena na svjetlosnom mikroskopu Olympus GX51 koji je prikazan na slici 24.



**Slika 24 Svjetlosni mikroskop Olympus GX51**

Slika 25 prikazuje mikrostrukturu osnovnog materijala AC i DC zavara nakon žarenja na 175°C na povećanju 50 x.



**Slika 25 Osnovi materijal EN AW 6082 nakon žarenja, 50x**

Na slici mikrostrukture se uočava heterogena mikrostruktura aluminijske matrice i ravnomjerno dispergirani precipitati  $Mg_2Si$ . Također se uočava uzorak izduženih zrna kroz cijelu mikrostrukturu nastao defomacijskim istezavaljanjem precipitacijski očvrsnute mikrostrukture.

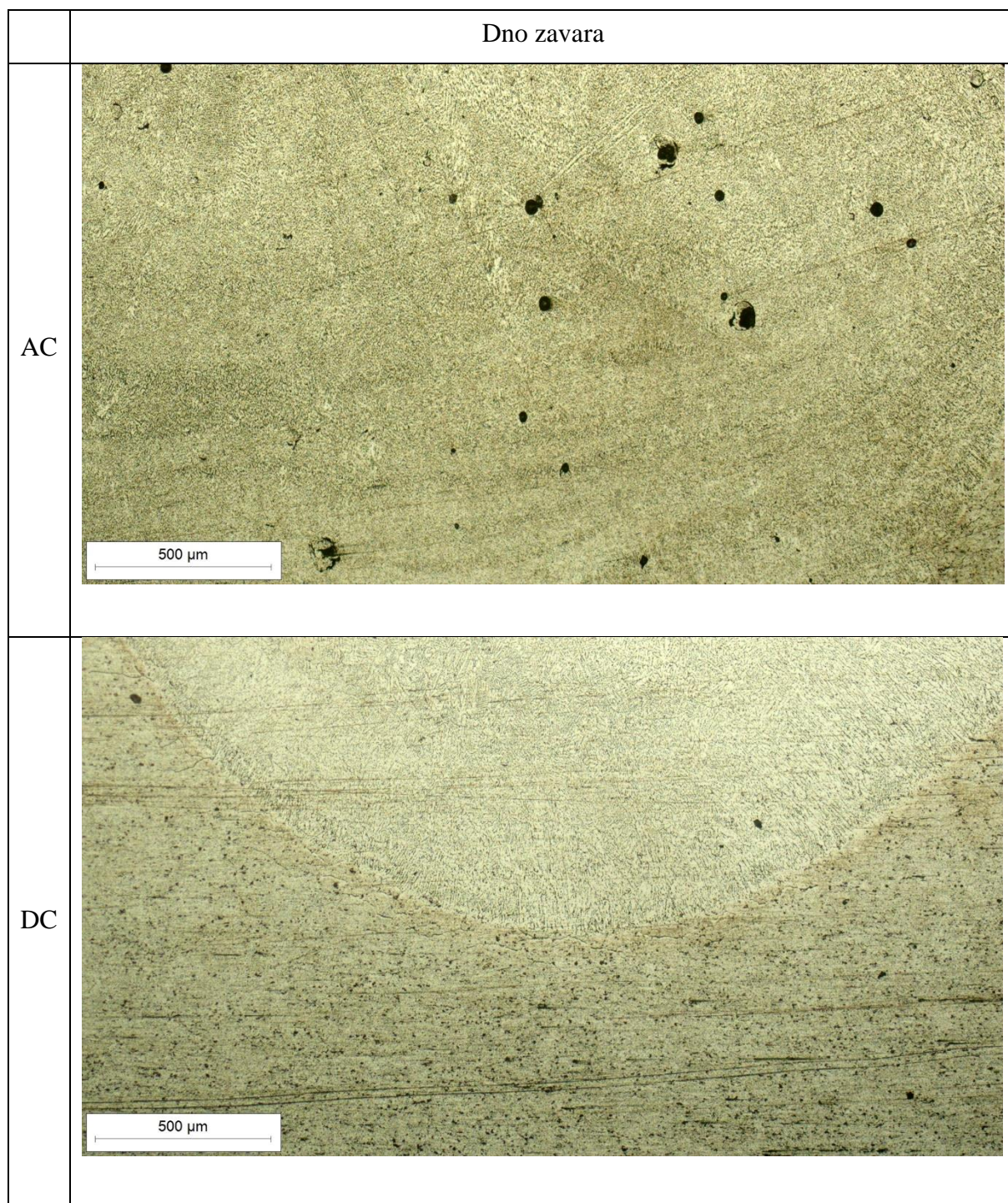


**Slika 26 Osnovni materijal EN AW 6082 nakon žarenja, 500x**

Na slici 26 jasno su vidljivi ravnomjerno dispergirani precipitati, crvenkasto obojeni željezni uključci i kompleksna intermetalna faza tzv. „kinesko pismo“.

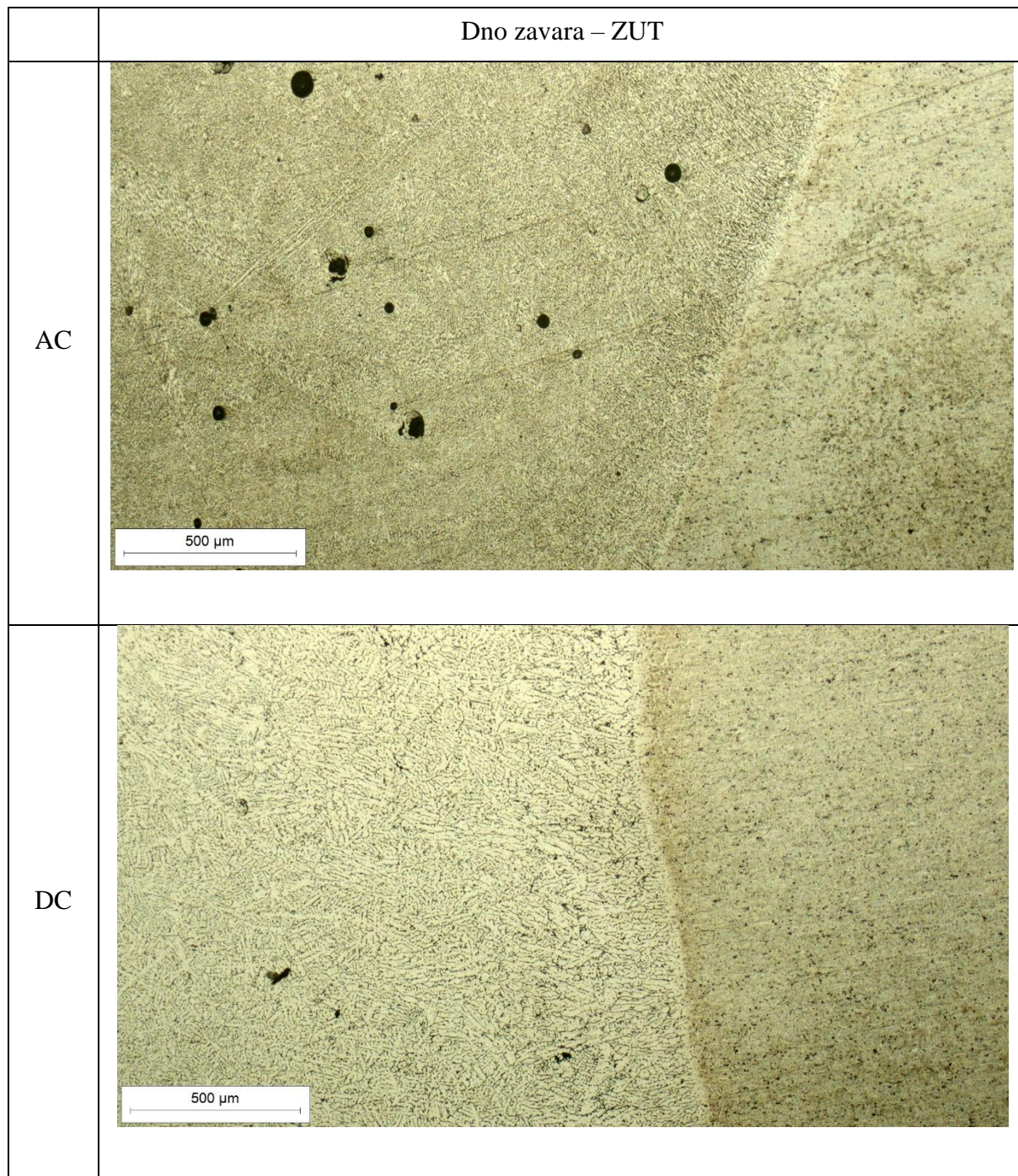
U slijedećim tablicama dane su usporedbene slike mikrostrukture AC i DC zavara na karakterističnim mjestima: dno zavara, sredina zavara i vrh zavara kao i slike ZUT-a uz zavar.

**Tablica 7 Mikrostrukture AC i DC na dnu zavara**



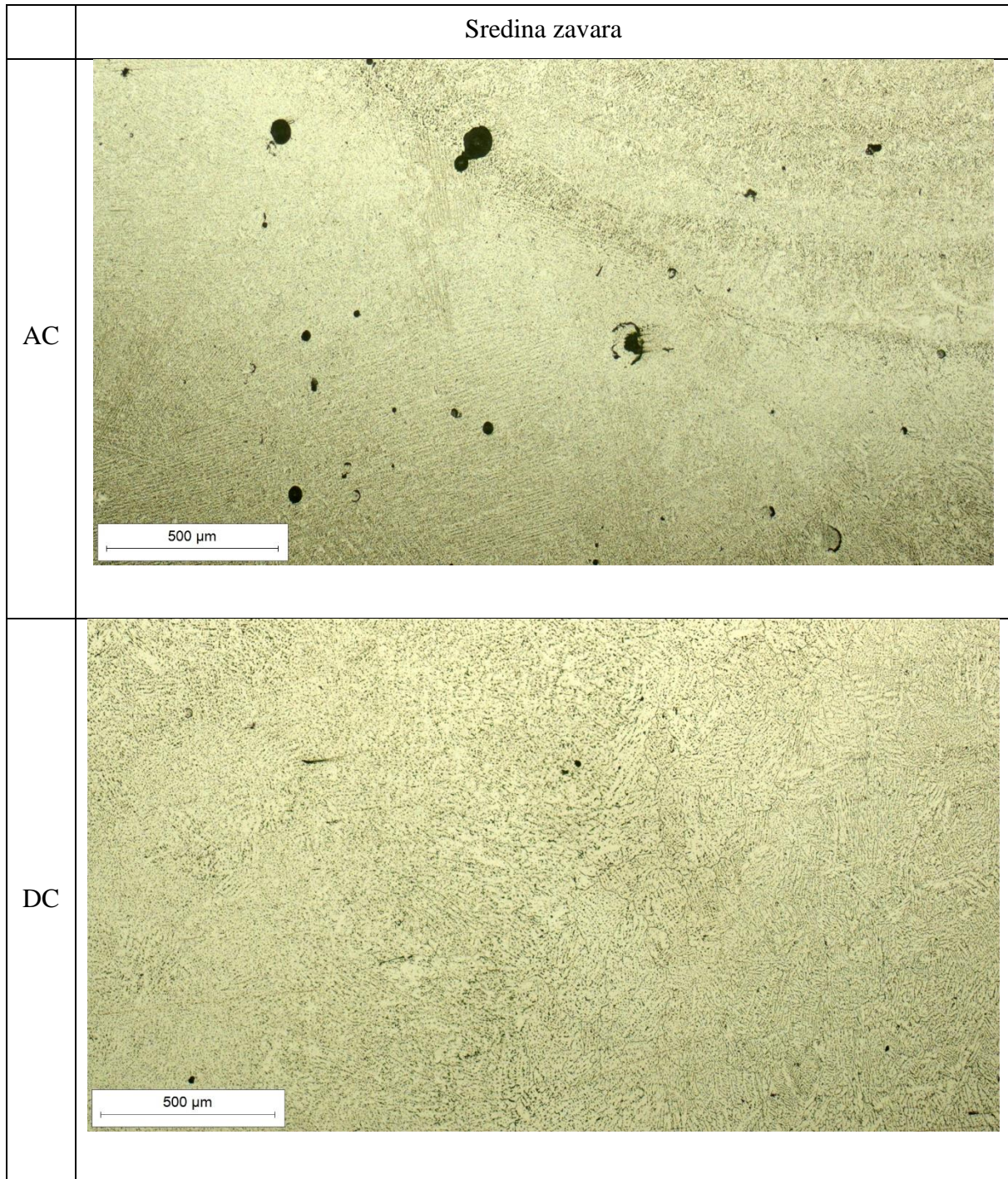
U tablici 7 nalaze se slike dna AC i DC zavara. Kod dna AC zavara jasno je vidljiva dendritna mikrostruktura sa sadržajem manjih pora. Ista krupnozrnatija struktura vidljiva je i kod DC zavara, no bez značajne poroznosti. Ravne crte koje se protežu preko obje slike su tragovi abraziva nastali pri poliranju te se zato zanemaruju.

**Tablica 8 Mikrostrukture AC i DC u ZUT-u na dnu zavara**



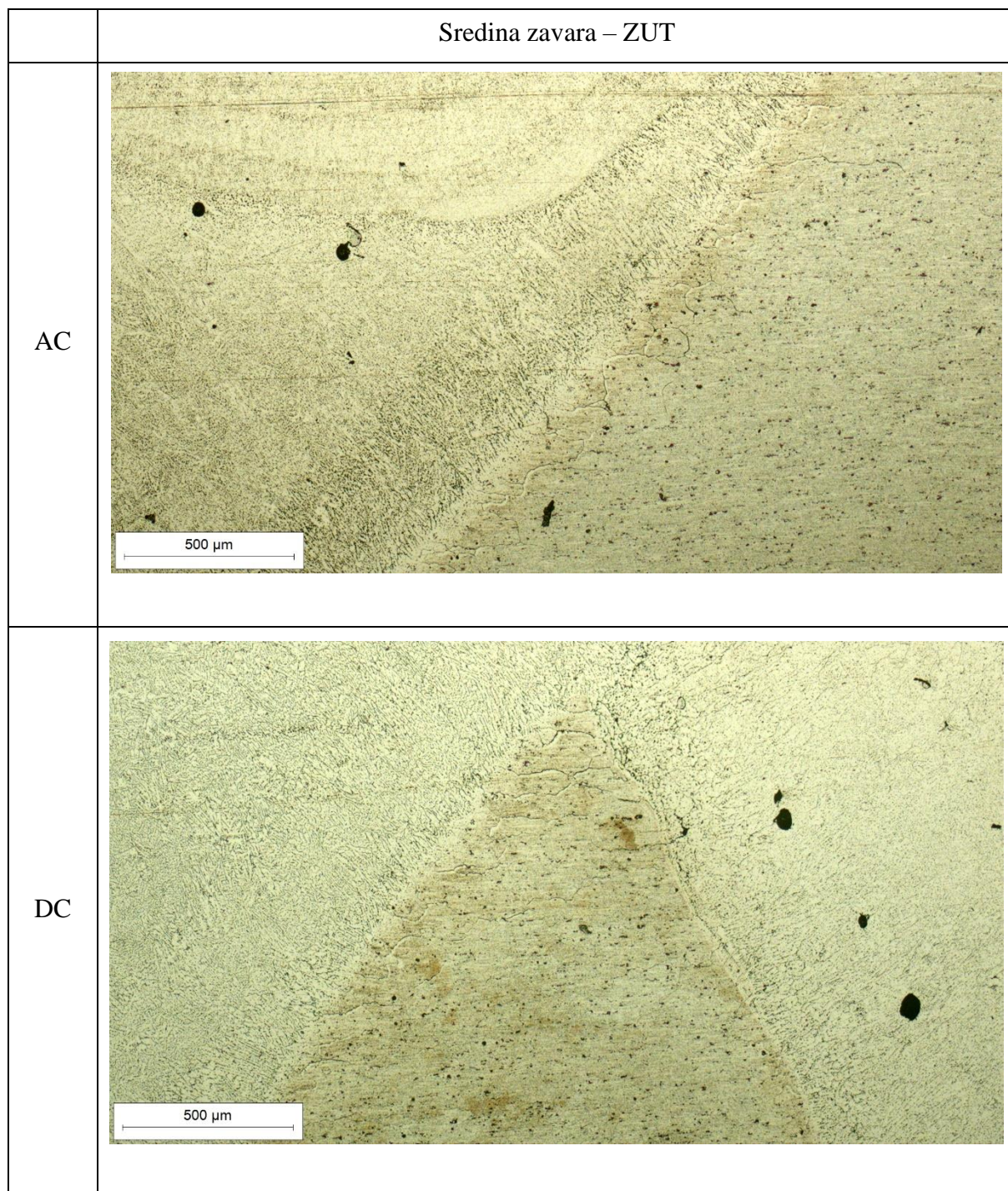
Tablica 8 prikazuje AC i DC zavar pri dnu zavar i njemu pripadni ZUT. Kod AC u zavaru su opet prisutne pore u dendritnoj mikrostrukturi i ravne crte kao greške pri poliranju dok je kod DC mikrostruktura ujednačena, krupnija i pravilnija nego kod AC te sadrži manje pora. Dendritna mikrostruktura kod oba zavara tipična je ljevačka mikrostruktura koja nastaje konvektivnim prijenosom topline s vruće taljevine dodatnog materijala na hladniji osnovni materijal; tim mehanizmom su dendriti i usmjereni okomito na njihovu liniju spoja.

**Tablica 9 Mikrostrukture AC i DC na sredini zavara**



Na sredini zavara (tablica 9) kod AC uočava se nova struktura sastavljena od dviju nakupina dendrita odvojenih lukom u desnog gornjem kutu. Radi se o mikrostrukturi koja nastane uslijed više prolaza pri zavarivanju; donji (stariji) zavar postaje osnovni materijal, a gornjim zavarom dolazi „novi“ dodatni materijal. Luk se formira radi smjera prijenosa topline s vruće taline novog zavara na stariji i hladniji. Na taj način je moguće vidjeti u koliko prolaza je izveden spoj ako to već nije vidljivo golim okom. Osim toga, uočava se veća količina pora u AC zavaru nego u DC, koji ima ravnomjernu i ujednačenu dendritnu strukturu bez prisutnosti pora.

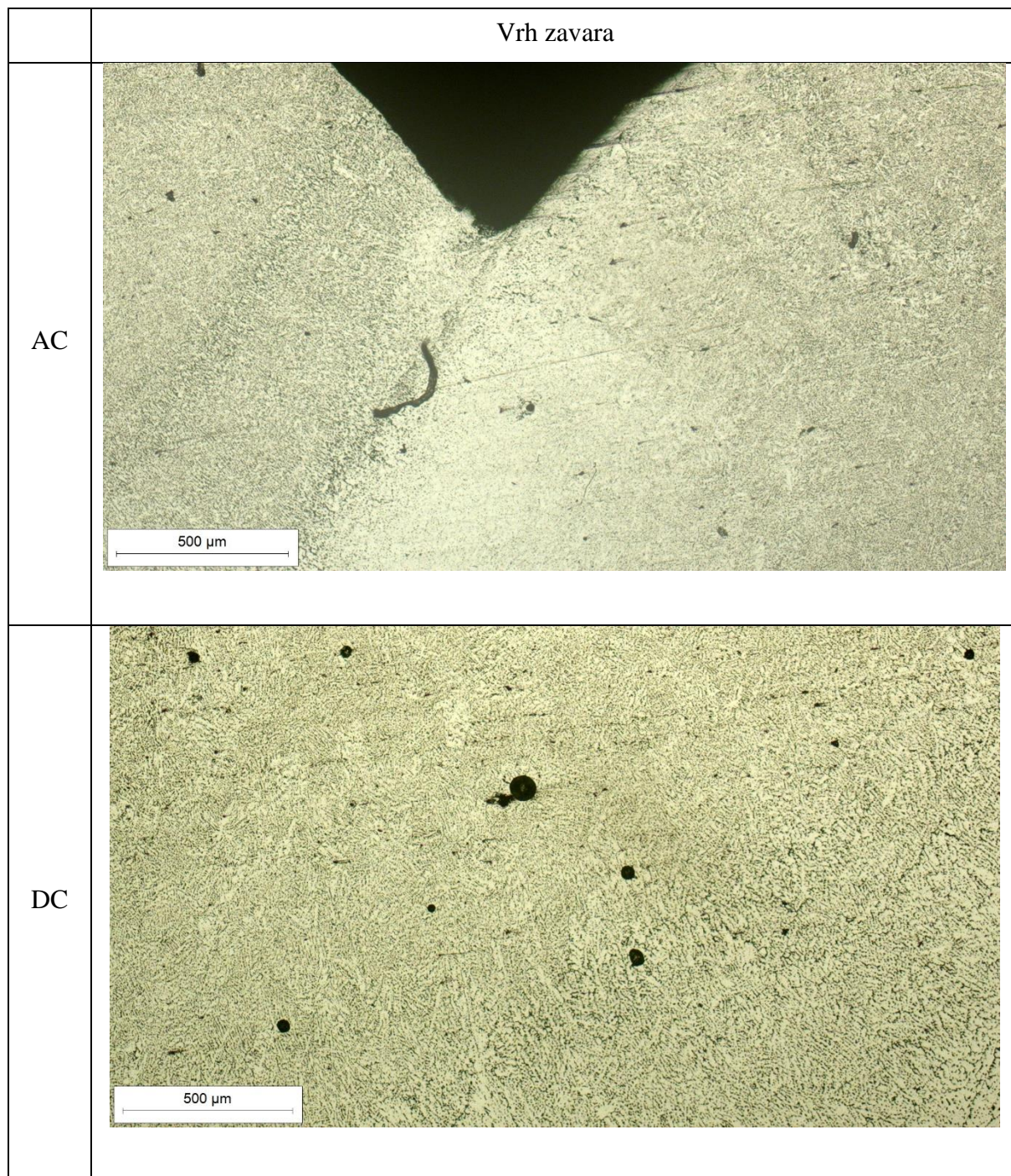
Tablica 10 Mikrostrukture AC i DC u ZUT-u na sredini zavara



Usporedba ZUT-a sredine zavara dana je u tablici 10. Obje mikrostrukture su dendritne u zavaru s relativno sličnim sadržajem pora i istom strukturom osnovnog materijala. Ono što se jasnije vidi kod zavara na sredini u ZUT-u su granice krupnijih zrna osnovnog materijala. Rast zrna uzrokovan je prijenosom topline s taline u zavaru na osnovni materijal.

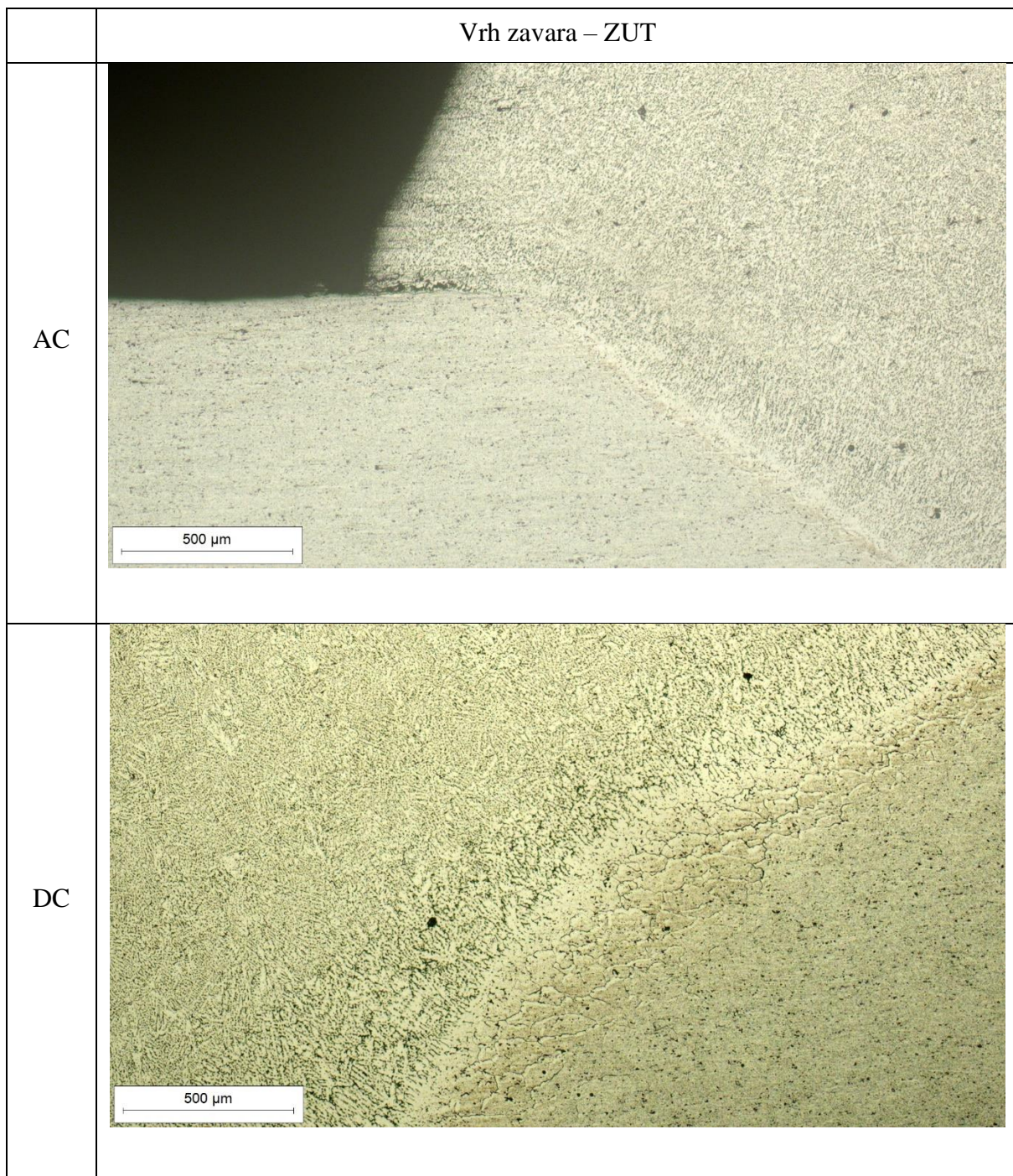


Tablica 11 Mikrostrukture AC i DC na vrhu zavora



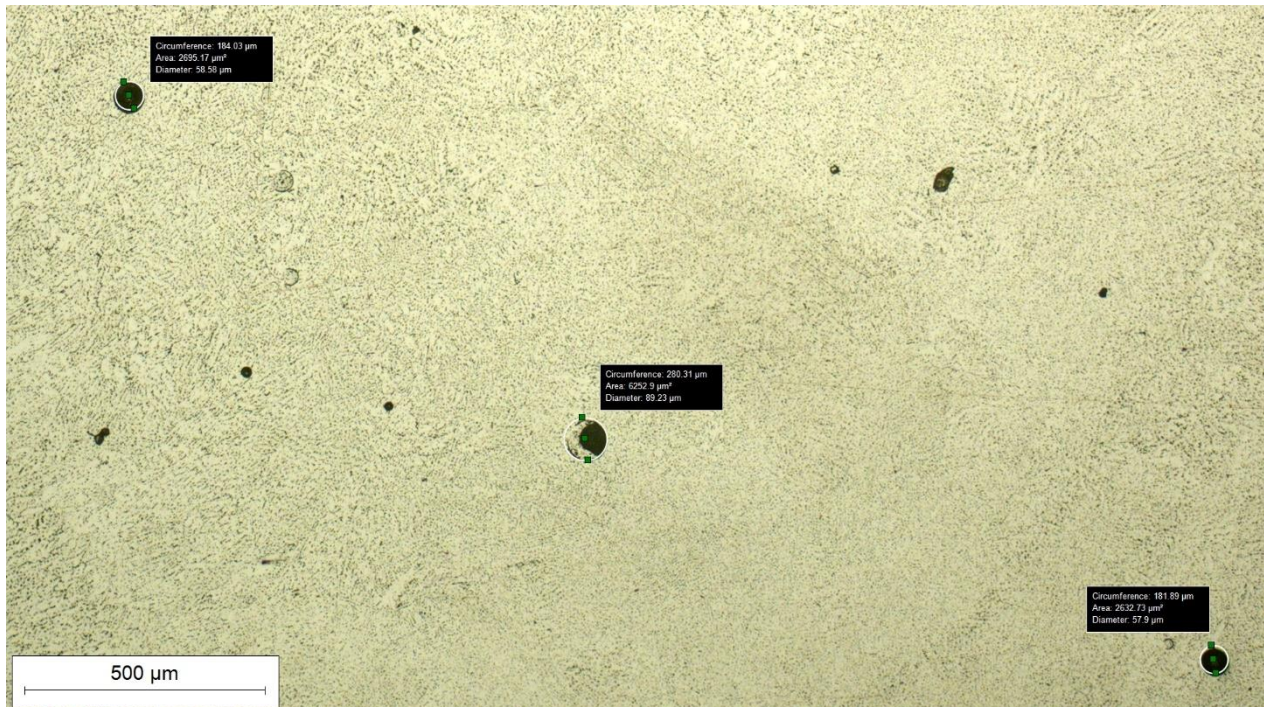
Mikrostrukture vrhova AC i DC zavora vidljive su u tablici 11. AC zavar pokazuje sučeljenje dvaju zavora koje se očituje tamnijim lukom (zanemaruje se tamna crvičasta mrlja; ostatak papira za čišćenje). Također nema pora kao na ostalim dijelovima zavora. DC zavar ima krupnozrnatiju mikrostrukturu i više pora u odnosu na AC zavar, no mikrostruktura je i dalje uređena i ujednačena.

Tablica 12 Mikrostrukture AC i DC u ZUT-u na vrhu zavara



U tablici 12 nalaze se snimke mikrostrukture u ZUT-u na vrhu AC i DC zavara. AC zavar ima jasno razlučivu granicu osnovnog i dodatnog materijala sa sitnim dendritičnim mikrostrukturnim elementima prema kojima je lako odrediti smjer odvođenja topline iz zavara. U lijevom gornjem kutu je vidljiv izlazak dodatnog materijala iz osnovnog te se očituje nespojeni segment na gornjoj površini. DC zavar se razlikuje od AC zavara po veličini dendrita i širini pojasa rekristaliziranog zrna u osnovnom materijalu.

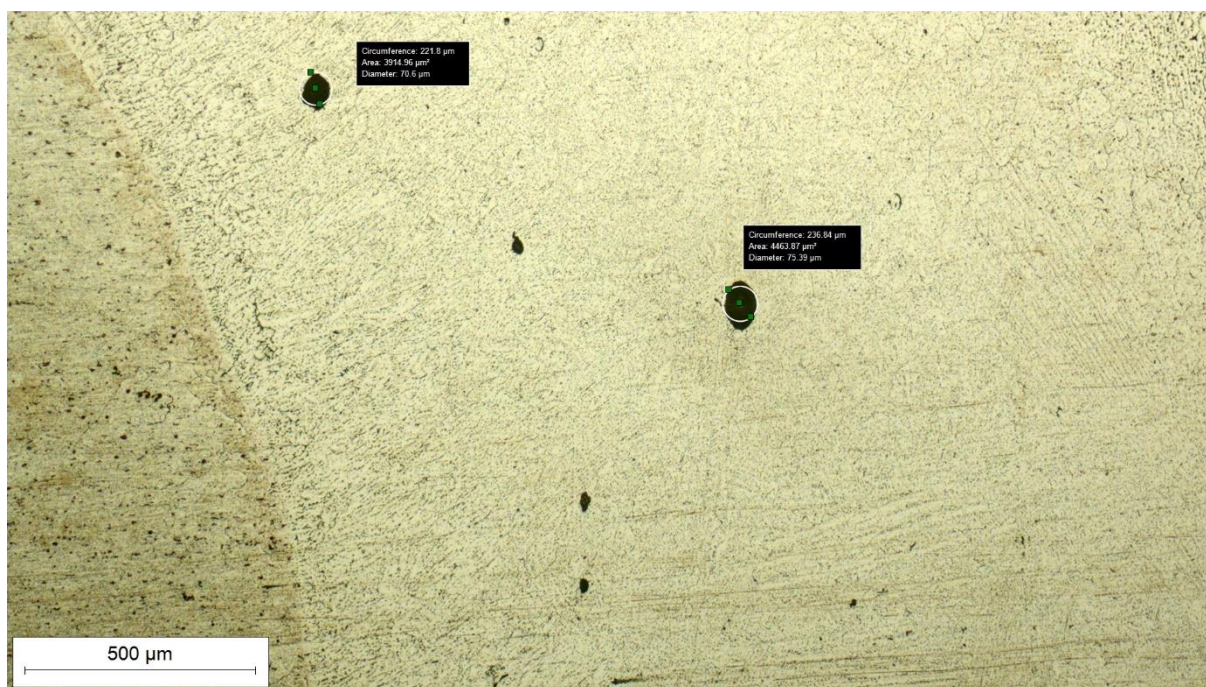
Pomoću računalnog programa za analizu slike izmjerene su i pore na pojedinim mjestima što se vidi na slikama 27 – 30.



Slika 27 Uzorak DC, sredina, 50x



Slika 28 Uzorak AC, ZUT, sredina, 50x (a)



Slika 29 Uzorak DC, dno, ZUT, 50x



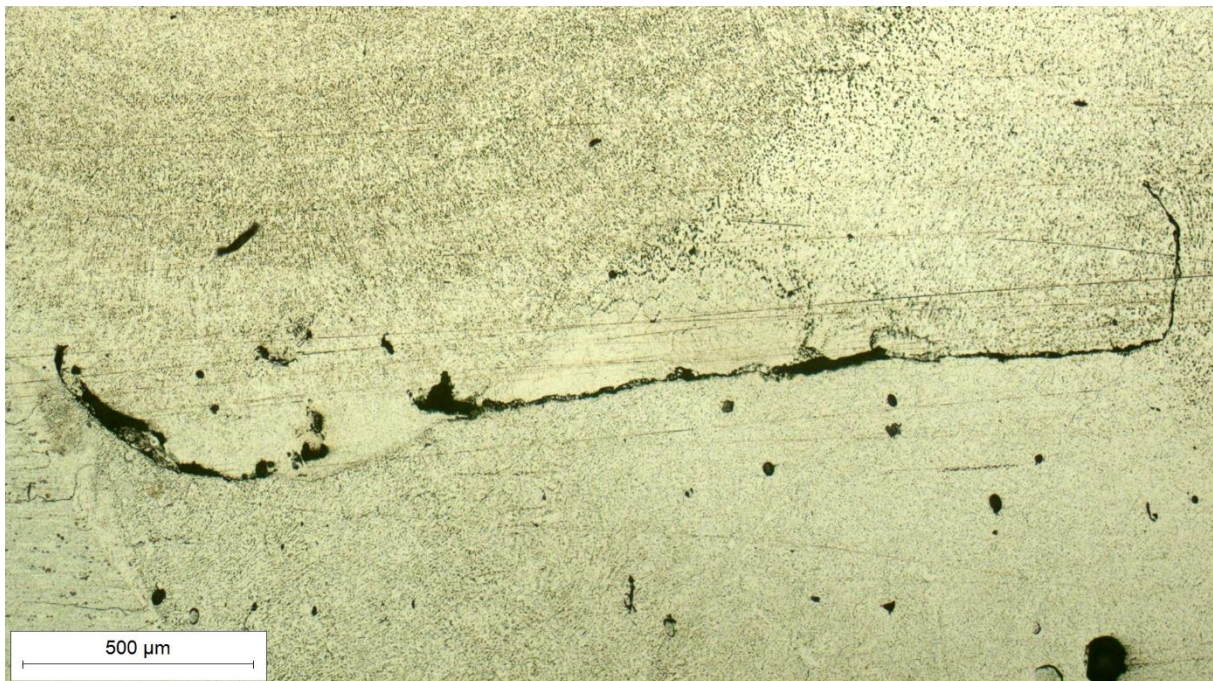
Slika 30 Uzorak DC, vrh, 50x

Pore koje se formiraju okruglog su oblike te su im promjeri manji od 2 mm. Pukotine između ili oko pora nisu detektirane.

Osim poroznosti pronađena je još jedna greška u AC zavaru koja je prikazana na slikama 31 i 32.



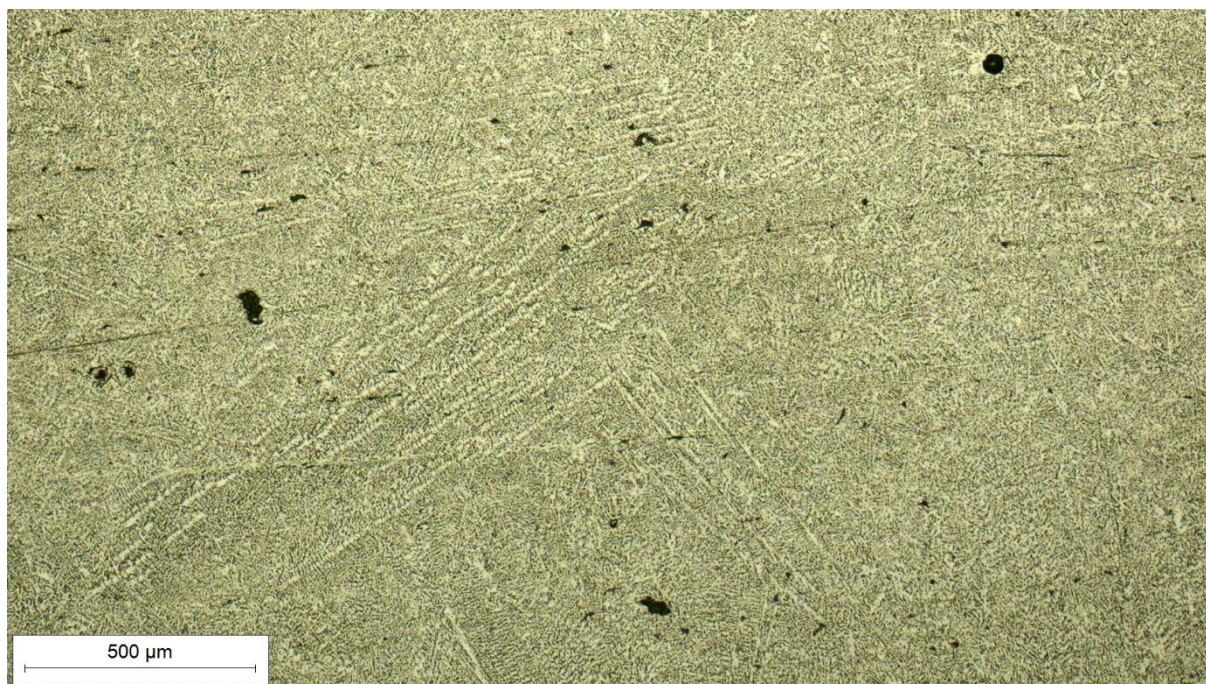
**Slika 31** Uzorak AC, ZUT, sredina, 50x (b)



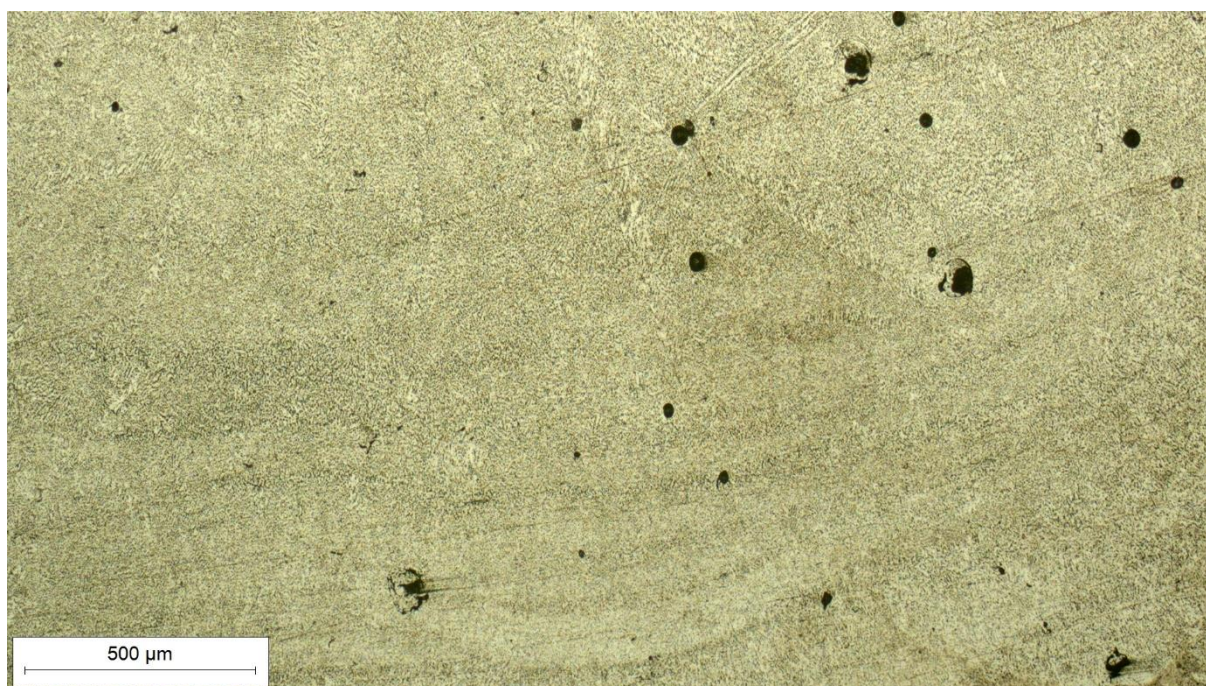
**Slika 32** Uzorak AC, ZUT, sredina, 50x (c)

Radi se o sučelju dvaju zavora jednog iznad drugog. Tokom zavarivanja mjehurići se kreću prema gore; u ovom slučaju takvi mjehurići akumulirali su se na sučelju s drugim zavarom i ostali zarobljeni (primijetiti nedostatak pora iznad nepravilnosti). Ne radi se o pukotini nego o planarnoj praznini.

Također, ovisno u kojem presjeku ih se promatra, dendriti se očituju drukčije. Primjeri su na slikama 33 i 34.



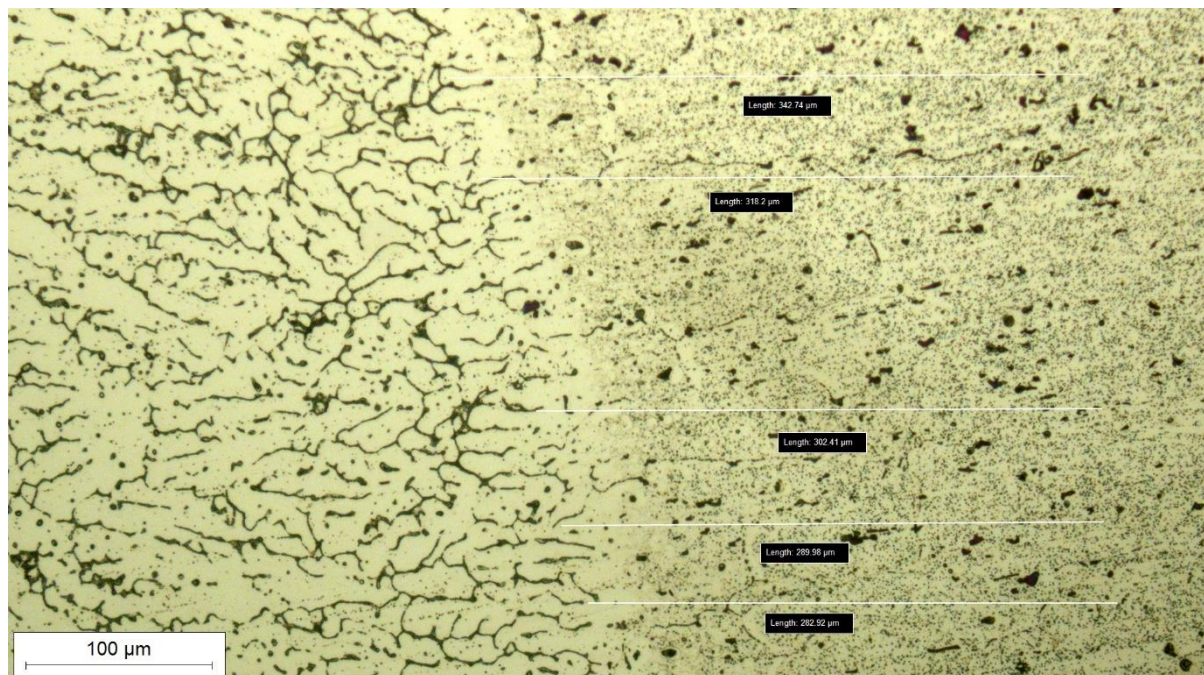
**Slika 33** Uzorak AC, vrh, 50x



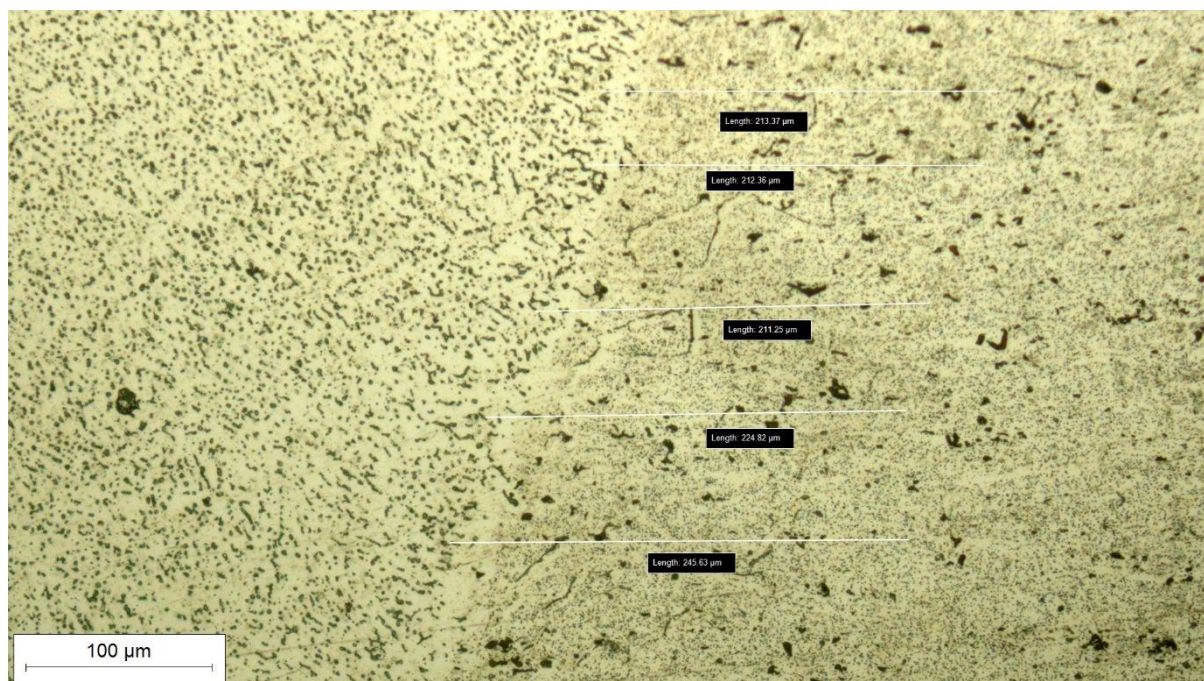
**Slika 34** Uzorak AC, dno, 50x

Na slici 33 je to segment u obliku slova „X“ u gornjem dijelu u sredini, a na slici 34 oblik vrha strijele preko sredine slike. Isprva asocira na grešku (ogrebotinu) pri poliraju, no radi se o dendritskoj strukturi koju se gleda čeno.

Osim pora, dendrita i nepravilnosti proučene su i širine ZUT-a. Slika 35 prikazuje širinu ZUT-a kod DC uzorka, a slika 36 AC uzorka.



**Slika 35** Uzorak DC, ZUT, dno, 200x



**Slika 36** Uzorak AC, ZUT, dno, 200x

Debljine su aproksimirane prema sloju rekristalizacije i prestarenom sloju (krupniji precipitati). Prosječna debljina ZUT-a kod AC zavora je 0,22 mm, a kod DC zavora 0,31 mm.

## 9. ZAKLJUČAK

U teorijskom dijelu precipitacijski očvrstive aluminijske legure sustavno su obrađene i klasificirane u kontekstu aluminijske i aluminijskih legura, s naglaskom na njihov sastav, karakteristike, svojstva i pripadnost specifičnoj skupini. Također su detaljno analizirani i opisani procesi i mehanizmi precipitacijskog očvršćivanja aluminijskih legura, a posebno su istaknuti parametri o kojima oni ovise. Dan je i uvid u najzastupljenije procese zavarivanja aluminijskih legura poput MIG i TIG zavarivanja te su također analizirane ključne prepreke povezane s takvim postupcima, uključujući sklonost nastanku pukotina, karakteristike zone utjecaja topline (ZUT) i poroznost u zavarenim spojevima.

Eksperiment je razdvojen u dva dijela; izveden je prvi pokus žarenja uzoraka osnovnog materijala sa svrhom dobivanja parametara potrebnih za izvođenje drugog (glavnog) pokusa koji uključuje žarenje zavarenih uzoraka. U prvom pokusu zaključci su sljedeći:

- Pad tvrdoće osnovnog materijala je proporcionalan povećanju temperature žarenja do temperature 400 °C nakon čega tvrdoća raste uslijed dozrijevanja.
- Najmanji pad tvrdoće je kod uzoraka U2 (150 °C) i U3 (200 °C).
- Optimalna temperatura žarenja zavarenih uzoraka jest 175 °C.

Uz odabranu temperaturu žarenja izveden je drugi pokus kojim su doneseni idući zaključci:

- Pad tvrdoće zavara u AC uzorku nakon žarenja je 0,95%, a u DC uzorku 1,4%.
- Pad tvrdoće osnovnog materijala u AC uzorku nakon žarenja je 2%, a u DC uzorku 9,7%.
- U oba uzorka je rasipanje rezultata mjerenja tvrdoće manje prije žarenja.

Analizom i usporedbom mikrostruktura AC i DC uzoraka u osnovnom materijalu te vrhu, sredini i dnu zavara zajedno sa ZUT-ovima utvrđeno je sljedeće:

- Osnovni materijal u oba zavarena uzorka ima precipitatima ojačanu mikrostrukturu istog stupnja disperzije po presjeku.
- Zavari u oba zavarena uzorka imaju tipičnu ljevačku (dendritnu) mikrostrukturu, no dendriti su krupniji kod AC uzorka.



- Greške poput pora i ravninskih praznina uzrokovanih akumuliranim mjehurićima zarobljenog plina daleko su učestalije u zavaru kod AC zavarenog uzorka radi turbulentnijeg procesa zavarivanja.
- Sve snimljene pore su promjera manjeg od 2 mm te oko njih nema naznaka iniciranja pukotina.
- Debljina ZUT-a je za 0,09 mm veća kod DC zavara.

Žarenjem uzoraka zavara zabilježen je zanemarivi pad tvrdoće u osnovnom materijalu, a još manji u samim zavarima. Analizom mikrostrukture utvrđeno je da toplinska obrada nije ostvarila negativan utjecaj. DC zavar je kvalitetniji jer ima daleko manje pora od AC zavara.

Preporuča se ispitivanje više uzoraka zavara na više temperatura sa svrhom komparativne analize utjecaja temperaturno-vremenskih ciklusa na mikrostrukturu. Također se preporuča mehaničko ispitivanje istih radi uvida u promjenu čvrstoće i koncentracije naprezanja nakon toplinske obrade.

---

**LITERATURA**

- [1] Gungor B, Kaluc E, Taban E, Sik A. Mechanical, fatigue and microstructural properties of friction stir welded 5083-H111 and 6082-T651 aluminum alloys. *Materials & Design* (1980-2015). 2014 Apr;56:84–90.
- [2] Dodoo-Arhin, D., Nuamah, R. A., Agyei-Tuffour, B., Obada, D. O., & Yaya, A. (2017). Awaso bauxite red mud-cement based composites: Characterisation for pavement applications. *Case Studies in Construction Materials*, 7, 45–55.
- [3] <https://facts.net/science/chemistry/13-astounding-facts-about-hall-heroult-process/>, slika s interneta (pristupljeno 27.08.2024.)
- [4] B Liščić, International Federation For Heat Treatment And Surface Engineering. Quenching theory and technology. Boca Raton: Crc Press; 2010.
- [5] Alam MT, Ansari AH. Review on Aluminium and its Alloys for Automotive Applications. In: *International Journal of Advanced Technology in Engineering and Science*. Department of Mechanical Engineering, Aligarh Muslim University: ijates; 2017.
- [6] <https://www.matweb.com/search/datasheet.aspx?bassnum=AMEAL00&ckck=1>, (pristupljeno 24.08.2024.)
- [7] Davis JR. Alloying. ASM International; 2001.
- [8] Genculu, S.: Aluminum Alloys and Heat Treatment, 2000., <https://www.cabww.com/wp-content/uploads/2024/06/HeatTreatAlum-wp.pdf>, (pristupljeno 25.08.2024.)
- [9] Keßler O. Precipitation Hardening of Aluminum Alloys. *The Heat Treatment Market*. 2001 Feb
- [10] American Society For Metals Materials Park, Ohio. ASM handbook. Vol. 4, Heat treating. Metals Park: Asm International; 2007.
- [11] Ćorić D., Filetin T.: Materijali u zrakoplovstvu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Ivana Lučića 5, Zagreb, 2012
- [12] MacKenzie DS. Heat treating aluminum for aerospace applications. *Heat Treat Progress*, July 2005
- [13] Dai, Y.; Yan, L.; Hao, J. Review On Progress of 7xxx Series Aluminum Alloy Materials. *Preprints* **2021**, 2021
- [14] Krishna Pal Singh Chauhan. Influence of Heat Treatment on the Mechanical Properties of Aluminium Alloys (6xxx Series): A Literature Review. *Int J Eng Res*. 2017
- [15] ASM Handbook, Vol.6, Welding, Brazing, and Soldering, ASM International, 1993.

---

[16] Anderson T. Welding Aluminum - Questions and Answers: 2008.