

# **Utjecaj parametara starenja na svojstva aluminijске legure AISi1MgMn**

---

**Habuda, Karlo**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2023**

*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:235:578613>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-05-17**

*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

**Karlo Habuda**

Zagreb, 2023. godina

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRANJE

**ZAVRŠNI RAD**

Mentor:  
Prof.dr.sc. Darko Landek

Student:  
Karlo Habuda

Zagreb, 2023. godina

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

Zahvaljujem se mentoru prof.dr.sc. Darku Landeku na nesebičnoj pomoći i savjetima tijekom izrade završnog zadatka. Također zahvaljujem svojoj obitelji na maksimalnoj podršci koju su mi pružili tijekom preddiplomskog studija.

Karlo Habuda



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite

Povjerenstvo za završne i diplomske ispite studija strojarstva za smjerove,  
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo  
materijala, autonomni sustavi i računalna inteligencija i mehatronika i robotika



Sveučilište u Zagrebu	
Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 - 04 / 23 - 6 / 1	
Ur.broj: 15 - 1703 - 23 -	

## ZAVRŠNI ZADATAK

Student:

**Karlo Habuda**

JMBAG: **0035220732**

Naslov rada na  
hrvatskom jeziku:

**Utjecaj parametara starenja na svojstva aluminijске legure AlSi1MgMn**

Naslov rada na  
engleskom jeziku:

**Influence of aging parameters on the properties of AlSi1MgMn  
aluminium alloy**

Opis zadatka:

Aluminijске legure iz skupina EN-AW 20XX, EN-AW 60XX i EN-AW 70XX svoja uporabna svojstva postižu nakon precipitacijskog očvršćivanja, koje se uobičajeno sastoji od homogenizacijskog žarenja i umjetnog starenja.

U radu treba opisati toplinsku obradu i njen utjecaj na svojstva precipitacijski očvršćivih aluminijskih 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 umjetnog starenja na mikrostrukturu i tvrdoću aluminijске legure AlSi1MgMn. Na temelju rezultata ispitivanja predložiti matematički model za optimizaciju parametra starenja ispitivane legure.

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

Zadatak zadan:

20.4.2023.

Datum predaje rada:

**2. rok (izvanredni): 12. 7. 2023.**

Predviđeni datumi obrane:

**2. rok (izvanredni): 14. 7. 2023.**

**3. rok: 25. 9. – 29. 9. 2023.**

Zadatak zadao:

Prof. dr. sc. Darko Landek

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Damir Godec

# SADRŽAJ

SADRŽAJ .....	I
POPIS SLIKA .....	III
POPIS TABLICA .....	VI
POPIS OZNAKA .....	VII
SAŽETAK .....	VIII
SUMMARY .....	IX
1. UVOD .....	1
2. ALUMINIJ I NJEGOVE LEGURE .....	3
2.1. Tehnički aluminij .....	3
2.2. Legure aluminija i njegovo legiranje .....	6
2.2.1. Lijevane legure .....	7
2.2.2. Gnječene legure .....	7
2.3. Dijagrami stanja aluminijevih legura .....	9
2.3.1. Dijagram stanja aluminij silicij .....	9
2.3.2. Dijagram stanja aluminij – magnezij .....	10
2.3.3. Dijagram stanja aluminij – bakar .....	11
2.3.4. Trokomponentni sustavi aluminijevih legura .....	12
2.4. Svojstva i primjena toplinsko očvrstljivih aluminijevih legura .....	13
2.4.1. 2xxx legure aluminija - Durali .....	13
2.4.2. 6xxx legure aluminija - Antikorodali .....	13
2.4.3. 7xxx legure aluminija - Konstruktali .....	14
2.5. Precipitacijsko očvrsnuće aluminijevih legura .....	15
3. METODE KARAKTERIZACIJE ALUMINIJEVIH LEGURA .....	20
3.1. Ispitivanje tvrdoće metodom Vickers .....	20
3.2. SEM analiza .....	22

---

3.3.	EDS/EDX analiza .....	23
3.4.	Svjetlosna mikroskopija .....	24
4.	PLAN POKUSA I PROVEDBA TOPLINSKE OBRADE.....	27
4.1.	Kemijski sastav i dimenzije uzoraka .....	27
4.2.	Toplinska obrada uzoraka.....	29
4.3.	Ispitivanje tvrdoće uzoraka.....	32
4.4.	Model starenja .....	35
4.5.	Mikrostruktura uzoraka .....	40
5.	REZULTATI I DISKUSIJA.....	44
6.	ZAKLJUČAK.....	47
7.	LITERATURA .....	48

## POPIS SLIKA

Slika 1.	Minerali za dobivanje aluminija: a Boksit, b Alunit, c Kaolinit, d Leucit, e Nefelin[3–7] .....	3
Slika 2.	Plošno centrirana kristalna rešetka (FCC) [8] .....	4
Slika 3.	Primjena aluminija u različitim područjima [9] .....	5
Slika 4.	Top 10 država u proizvodnji aluminija u 2022. godini [10].....	5
Slika 5.	Dijagram stanja Al – Si [1].....	9
Slika 6.	Dijagram stanja Al – Mg [1].....	11
Slika 7.	Dijagram stanja Al – Cu [1] .....	12
Slika 8.	Shematski prikaz precipitacijskog očvrsnuća [13] .....	15
Slika 9.	Tipovi precipitata: <i>a</i> Koherentni, <i>b</i> Polukoherentni, <i>c</i> Nekoherentni [1].....	16
Slika 10.	Utjecaj temperature starenja na tvrdoću [14] .....	17
Slika 11.	Utjecaj trajanja starenja na vlačnu čvrstoću ( $T_1 < T_2 < T_3$ ) [14] .....	17
Slika 12.	Parametri precipitacijskog očvrsnuća [11] .....	18
Slika 13.	Tvrdoća po Vickersu [17].....	21
Slika 14.	SEM analiza [20] .....	22
Slika 15.	EDS analiza [22].....	23
Slika 16.	EDS spectrogram [23] .....	24
Slika 17.	Sastavni dijelovi svjetlosnog miroskopa: <i>1</i> Tijelo mikroskopa, <i>2</i> Stolić, <i>3</i> Dijelovi za fokusiranje slike, <i>4</i> Sustava za iluminaciju, <i>5</i> Optičke komponente [24] .....	25
Slika 18.	Dimenziije uzoraka .....	27

Slika 19. Difraktogram uzorka [25] .....	28
Slika 20. Homogenizacijsko žarenje uzorka .....	29
Slika 21. Gašenje uzorka u vodi.....	29
Slika 22. Shematski prikaz toplinskih obrada – uzorak A .....	30
Slika 23. Shematski prikaz toplinskih obrada – uzorak B .....	30
Slika 24. Shematski prikaz toplinskih obrada – uzorak C .....	31
Slika 25. Histogram tvrdoća – uzorak A.....	33
Slika 26. Histogram tvrdoća – uzorak B .....	33
Slika 27. Histogram tvrdoća – uzorak C .....	34
Slika 28. Ispitivanje tvrdoće uzorka.....	34
Slika 29. Ovisnost tvrdoće o vremenu starenja – uzorak A.....	36
Slika 30. Ovisnost tvrdoće o vremenu starenja – uzorak B .....	36
Slika 31. Ovisnost tvrdoće o vremenu starenja – uzorak C .....	37
Slika 32. Ovisnost tvrdoće o temperaturi starenja – $t_{star.} = 5 \text{ h}$ .....	37
Slika 33. Ovisnost tvrdoće o temperaturi starenja – $t_{star.} = 10 \text{ h}$ .....	38
Slika 34. Ovisnost tvrdoće o parametru starenja – $t_{star.} = 5 \text{ h}$ .....	39
Slika 35. Ovisnost tvrdoće o parametru starenja – $t_{star.} = 10 \text{ h}$ .....	39
Slika 36. Ispitivanje mikrostrukture uzorka.....	40
Slika 37. Mikrostruktura uzorka A pod različitim povećanjima u početnom stanju .....	41
Slika 38. Mikrostruktura uzorka B pod različitim povećanjima u početnom stanju .....	42
Slika 39. Mikrostruktura uzorka C pod različitim povećanjima u početnom stanju .....	43

Slika 40. Usporedba tvrdoća uzoraka ..... 44

Slika 41. Usporedba eksperimentalnih i matematičkih dobivenih vrijednosti tvrdoće za  $t_{\text{star}} = 5 \text{ h}$  45

Slika 42. Usporedba eksperimentalnih i matematičkih dobivenih vrijednosti tvrdoće za  $t_{\text{star}} = 10 \text{ h}$  45

**POPIS TABLICA**

Tablica 1.	Fizikalna i mehanička svojstva tehničkog aluminija [1].....	4
Tablica 2.	Kemijski sastav nekoliko komercijalnih legura aluminija [11] .....	6
Tablica 3.	Svojstva lijevanih aluminijevih legura [1] .....	7
Tablica 4.	Svojstva gnječenih aluminijevih legura [1] .....	8
Tablica 5.	Faze za precipitacijsko očvrsnuće i aluminieve legure u kojima se pojavljuje očvrsnuće [11].....	19
Tablica 6.	Parametri precipitacijskog očvrsnuća uobičajeno korištenih aluminijevih legura [16]	19
Tablica 7.	Dimenzije uzoraka .....	27
Tablica 8.	Kemijski sastav uzoraka .....	27
Tablica 9.	Parametri pojedinih toplinskih obradi.....	30
Tablica 10.	Vrijednosti tvrdoća uzoraka nakon toplinske obrade.....	32
Tablica 11.	Maksimalna postignuta tvrdoća uzoraka .....	35
Tablica 12.	Relativne pogreške vrijednosti tvrdoća za $t_{\text{star.}} = 5 \text{ h}$ .....	46
Tablica 13.	Relativne pogreške vrijednosti tvrdoća za $t_{\text{star.}} = 10 \text{ h}$ .....	46

## POPIS OZNAKA

Oznaka	Mjerna jedinica	Opis oznake
$R_e$	MPa	granica razvlačenja
$R_m$	MPa	vlačna čvrstoća
$A$	%	istezljivost
$\vartheta_t$	°C	talište
$\rho$	kg/m <sup>3</sup>	gustoća
$E$	MPa	modul elastičnosti
$G$	mΩ/mm <sup>2</sup>	električna vodljivost
$HV$	HV1	tvrdoća
$\vartheta_{star}$	°C	temperatura starenja
$t_{star.}$	h	vrijeme starenja
$P$	°C·h	parametar starenja
$\vartheta_{žarenja}$	°C	temperatura žarenja
$D$	m	promjer uzorka
$t$	m	debljina uzorka
$d$	m	duljina dijagonale
$\alpha$	1/K	toplinska rastezljivost
$F$	N	sila

## **SAŽETAK**

U radu se istražuje utjecaj parametara starenja na tvrdoću aluminijeve legure 6082. U teorijskom dijelu obuhvaćena su općenito svojstva tehničkog aluminija, njegovo legiranje, podjela precipitacijski očvrstljivih legura aluminija, dijagrami stanja aluminijevih legura te metode karakterizacije aluminijevih legura: ispitivanje tvrdoće, EDS/EDX analiza, SEM analiza i svjetlosna mikroskopija. U eksperimentalnom dijelu provedeno je određivanje kemijskog sastava uzorka aluminijeve legure 6082, mjerjenje dimenzija i ispitivanje tvrdoće uzorka nakon homogenizacijskog žarenja i umjetnog starenja. Umjetno starenje provedeno je prema planu pokusa u kojem je kombinirano vrijeme starenja 5 h i 10 h s temperaturom 155 °C, 165 °C i 175 °C. na temelju ispitanih tvrdoća predložen je matematički model za predviđanje tvrdoće aluminijeve legure 6082 u ovisnosti o temperaturi i vremenu starenja.

Ključne riječi: tehnički aluminij, legiranje, precipitacijsko očvrsnuće, homogenizacijsko žarenje, starenje, tvrdoća, EDS analiza, SEM analiza, svjetlosna mikroskopija

## SUMMARY

The paper investigates the influence of aging parameters on the hardness of aluminum alloy 6082. The theoretical part covers the general properties of technical aluminum, its alloying, the division of precipitation-hardenable aluminum alloys, state diagrams of aluminum alloys and methods of characterization of aluminum alloys: hardness testing, EDS/EDX analysis, SEM analysis and light microscopy. In the experimental part, the determination of the chemical composition of samples of aluminum alloy 6082, measurement of dimensions and testing of sample hardness after homogenization annealing and artificial aging were carried out. Artificial aging was carried out according to the experimental plan in which aging time of 5 h and 10 h was combined with temperatures of 155 °C, 165 °C and 175 °C. based on the tested hardnesses, a mathematical model was proposed for predicting the hardness of aluminum alloy 6082 depending on temperature and aging time..

**Key words:** Technical aluminum, alloying, precipitation hardening, solution annealing, aging, hardness, EDS analysis, SEM analysis, optical microscopy

## **1. UVOD**

Aluminij kao tehnički materijal nezamjenjiv je u tehničkim strukama kao što je strojarstvo. Posebno je zanimljiv zbog svojih karakteristika koje postiže tijekom toplinske obrade. Često se koristi u kombinaciji sa drugim elementima kako bi mu se poboljšala svojstva. Jedan od procesa toplinske obrade je i proces starenja. Tim procesom, u mikrostrukturi aluminija pojavljuju se čestice, odnosno precipitati koji očvršćuju leguru te daju poboljšana mehanička svojstva. Procesom starenja mogu se očvrsnuti legure iz serija 2xxx, 6xxx i 7xxx. Za svaku od navedenih serija legura postoje glavni legirni elementi koji pridonose određenim svojstvima. Pokazana su također i mehanička svojstva navedenih serija legura, kao i kemijski sastav. Određivanje kemijskog sastava provodi se uz pomoć EDS analize, mjerjenje tvrdoće metodom Vickers, mjerjenje dimenzija pomoću pomičnog mjerila i toplinska obrada u peći. Aluminij, zbog svojih svojstava nakon toplinske obrade, nalazi primjenu u granama kao što su zrakoplovstvo, građevinarstvo, prehrambena industrija, automobilska industrija itd.

# **TEORIJSKI DIO**

## 2. ALUMINIJ I NJEGOVE LEGURE

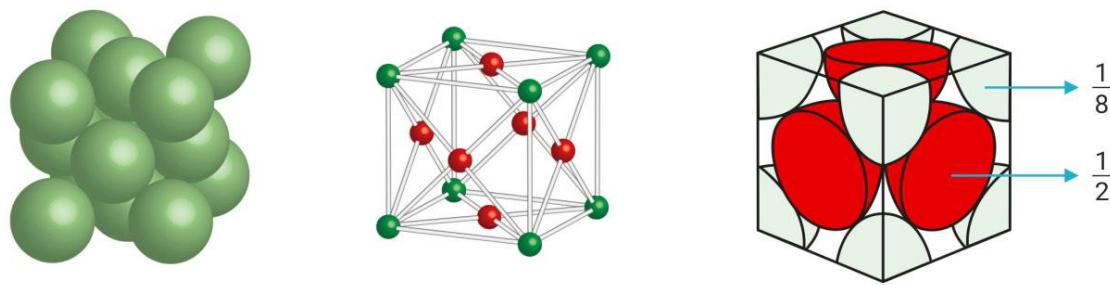
Ovim poglavljem obuhvaćeni su podaci o fizikalnim i mehaničkim svojstvima tehničkog aluminija, legure aluminija koje se toplinski očvršćuju te općenita podjela toplinsko očvrstljivih aluminijevih legura.

### 2.1. Tehnički aluminij

Aluminij je tehnički metal koji se u prirodi nalazi u obliku oksida i smjese oksida iz kojih se izdvaja skupim elektrolitičkim postupkom. Najčešći oksid koji se primjenjuje u proizvodnji aluminija je aluminijev oksid ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), odnosno glinica koja se Bayerovim postupkom odvaja iz prirodnih sirovina koje sadrže aluminijeve okside, a najčešća sirovina je boksit. Osim boksita može se koristiti i alunit, leucit, nefelin, kaolinit, ali postupci za preradu ovih sirovina mnogo su skuplji u odnosu na boksit. Tako dobiveni aluminijev oksid podvrgnut je elektrolizi u rastopljenom kriolitu postupkom Herouulta i Halla gdje se na katodi izlučuje aluminij, zatim se rafinira čime se omogućuje oksidacija većine prisutnih nečistoća kao što su željezo i silicij koji su ostali kao primjese nakon elektrolize glinice. Važno je napomenuti da za proizvodnju čistog aluminija treba utrošiti veliku količinu električne i toplinske energije [1, 2].



**Slika 1.** Minerali za dobivanje aluminija: a) Boksit, b) Alunit, c) Kaolinit, d) Leucit, e) Nefelin[3–7]



**Slika 2. Plošno centrirana kristalna rešetka (FCC) [8]**

Ono što aluminij čini posebnim i zbog čega se primjenjuje kao inženjerski materijal je povoljan omjer čvrstoće i gustoće, omjer električne vodljivosti i gustoće, a korozija postojanost mu je relativno velika s obzirom da ima veliki afinitet prema kisiku, što ga čini otpornim za većinu koncentriranih kiselina (izuzetak fluorovodična kiselina - HF). Aluminij je neotporan na tvari koje razaraju zaštitni oksidni sloj, a to su u prvom redu koncentrirane lužine. Izvanredno je toplo i hladno oblikovljiv deformiranjem zbog plošno centrirane strukture (FCC). Fizikalna i mehanička svojstva aluminija u osnovnom stanju prikazana je u Tablica 1. Zbog takvih karakteristika, aluminij ima široku primjenu u zrakoplovstvu, automobilskoj industriji, u brodogradnji, u kemijskoj i prehrambenoj industriji (aparati, posude i rezervoari), kao kuhinjsko posuđe i metalni proizvodi široke potrošnje, graditeljstvo (krovovi, žljebovi i ukrasi), pakiranje (folije, tube, limenke), električni vodiči, sport itd. Kako je aluminij u svom osnovnom stanju relativno mekan, u inženjerstvu se upotrebljava u legiranom stanju tj. u kombinaciji s drugim elementima [1, 2].

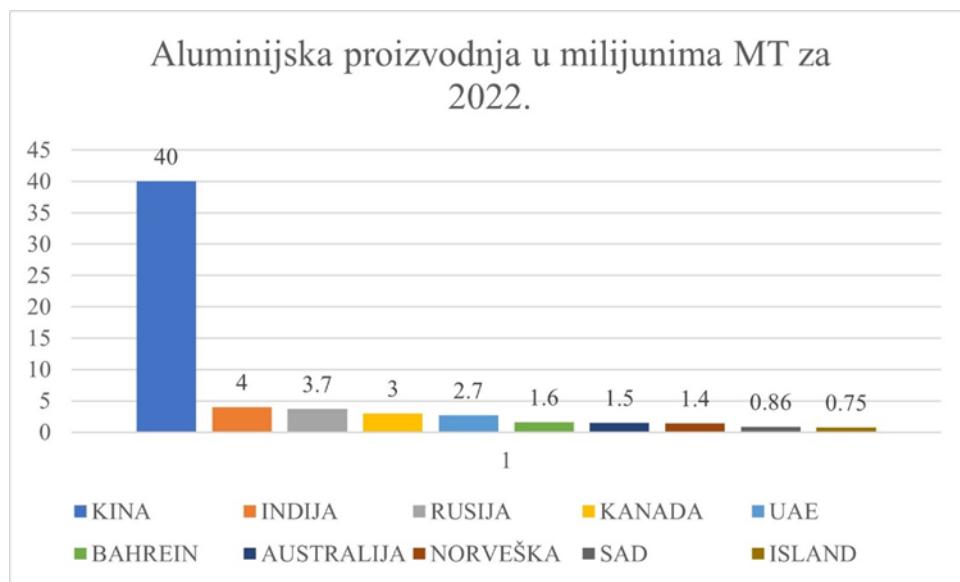
**Tablica 1. Fizikalna i mehanička svojstva tehničkog aluminija [1]**

<b>Gustoća <math>\rho</math></b>	$\text{kg/m}^3$	2700
<b>Talište <math>T_t</math></b>	$^{\circ}\text{C}$	660
<b>Modul elastičnosti</b>	$\text{N/mm}^2$	69000
<b>Toplinska</b>	$10^{-6}/\text{K}$	23,8
<b>Električna</b>	$\text{m}/\Omega\text{mm}^2$	36...37,8
<b>Granica</b>	$\text{N/mm}^2$	20...120
<b>Vlačna čvrstoća*</b>	$\text{N/mm}^2$	40...180
<b>Istezljivost*A</b>	%	50...4

\* Ovisno o stanju



**Slika 3.** Primjena aluminija u različitim područjima [9]



**Slika 4.** Top 10 država u proizvodnji aluminija u 2022. godini [10]

## 2.2. Legure aluminija i njegovo legiranje

Legiranje ima za cilj prvenstveno poboljšanje mehaničkih svojstava, ponajprije vlačne čvrstoće i tvrdoće, zatim krutosti, rezljivosti, katkada žilavosti i livljivosti. Najvažniji legirni elementi kod legiranja aluminija su: bakar, magnezij, silicij, cink i mangan. Kao dodaci ili primjese prisutni su u manjoj količini željezo, krom i titan.

Legure aluminija mogu se nalaziti u gnečenom i u lijevanom stanju. Osim ove podjele legure aluminija se mogu podjeliti na toplinski očvrstljive i toplinski neočvrstljive. Neke od legura prikazane su u tablici 2. [1].

**Tablica 2. Kemijski sastav nekoliko komercijalnih legura aluminija [11]**

<b>Legura</b>	<b>Kemijski sastav (%)</b>							
	<b>Si</b>	<b>Fe</b>	<b>Cu</b>	<b>Mn</b>	<b>Mg</b>	<b>Cr</b>	<b>Zn</b>	<b>Li</b>
<b>2024</b>	0,06	0,16	4,65	0,65	1,50			
<b>2090</b>	0,06	0,08	2,70	0,04	0,20			2,30
<b>2219</b>	0,04	0,11	6,03	0,24	0,00			
<b>6013</b>	0,75	0,25	0,85	0,40	1,00		0,03	
<b>6061</b>	0,61	0,25	0,27	0,04	1,00	0,20	0,03	
<b>6063</b>	0,40	0,17		0,05	0,65		0,03	
<b>6082</b>	1,00	0,25		0,70	0,90	0,13	0,03	
<b>7010</b>	0,05	0,08	1,75		2,35		6,30	
<b>7050</b>	0,06	0,07	2,25		2,20		6,10	
<b>7055</b>	0,08	0,11	2,35		1,95		8,10	
<b>7075</b>	0,08	0,30	1,50		2,50	0,29	5,60	
<b>357</b>	7,00	0,10	0,00		0,60			

### 2.2.1. Lijevane legure

Lijevane se legure mogu svrstati u tri osnovne grupe: Al – Si, Al – Mg i Al – Cu čijom se kombinacijom mogu dobiti legure s poboljšanim nekim od osnovnih svojstava. Aluminijeve legure mogu se lijevati jednako dobro na sva tri osnovna načina: u pjesak, u kokilu i tlačno, ako je izbor dobro izvršen, što je povoljnije nego li kod ostalih metala. Neke od njih mogu se dodatno precipitacijski očvrsnuti, a neke se mogu i gnječiti, ali su osnovno lijevačke legure. Legure koje su namijenjene toplinskom očvršćivanju koriste se za opće namjene gdje su krutost, dobra korozija postojanost i žitkost taljevine od veće važnosti nego li čvrstoća [1].

**Tablica 3. Svojstva lijevanih aluminijevih legura [1]**

Mehanička otpornost	Lijljivost	Rezljivost	Otpornost na koroziju	Tip legure	Predstavnik
Mala	Srednja	Dobra	Vrlo dobra	Al - Mg	AlMg3
					AlMg5
				Al – Si - Mg	AlSi10Mg
					AlSi7Mg1
Mala	Vrlo dobra	Slaba	Dobra	Al – Si	AlSi12
				Al – Si - Cu	AlSi5Cu1
					AlSi6Cu2
Osrednja	Slaba	Dobra	Vrlo slaba	Al - Cu	AlCu4MgTi

### 2.2.2. Gnječene legure

Osnovna podjela gnječenih aluminijevih legura temelji se na kemijskom sastavu i mogućnosti precipitacijskog očvrsnuća. Od legura koje očvršćuju hladnim deformiranjem zahtjeva se dovoljna čvrstoća i krutost u hladnom stanju, kao i dobra korozija postojanost. Većina ovih legura ima mikrostrukturu koja se potpuno sastoji od čvrste otopine. To je dodatni faktor u prilog njihovoj velikoj duktilnosti i velikoj korozionskoj postojanosti. Obično se legure koje su

oblikovane hladnim deformiranjem isporučuju u mekom stanju ili nakon određenog stupnja hladnog ugnječenja. Glavni im je nedostatak to kada postignu konačne dimenzije, ne mogu više mijenjati mehanička svojstva osim mekšanja postupkom žarenja. S druge pak strane, precipitacijski očvrstljive legure imaju prednost kada se traži povoljan omjer čvrstoće i gustoće. Osnovu precipitacijski očvrstljivih legura čine legirni elementi bakar, magnezij, cink i silicij koji stvaraju intermetalne spojeve s aluminijem ili međusobno. Očvrsnuće postignutog precipitacijom je veće od onog hladnim oblikovanjem pa je precipitacijsko očvrsnuće osnovni postupak za povećanje čvrstoće i tvrdoće prethodno gnječenih legura. Drugi elementi koji se mogu nalaziti u gnječenim legurama također poboljšavaju određena svojstva: titan nalazi primjenu kao dodatak za usitnjenje zrna, olovo i bizmut poboljšavaju rezljivost, a krom pospješuje precipitacijsko očvrsnuće [1].

**Tablica 4. Svojstva gnječenih aluminijevih legura [1]**

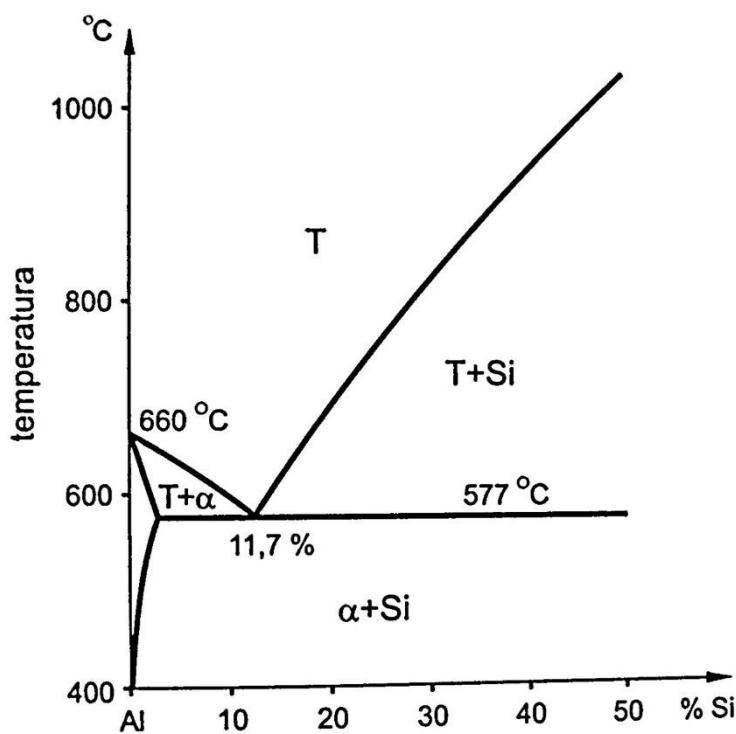
Oznaka legure	Toplinsko očvrstljive	Eloksal kvalitete	Otpornost u morskoj	Za statički opterećene	Dobro zavarjiv	Za obradu na automatima
AlMn1		x	x		x	
AlMg1		x	x		x	
AlMg3		x	x	x	x	
AlMg5			x	x	x	x
AlMg2Mn0,8			x	x	x	
AlMg4,5Mn			x	x	x	
AlMgSi0,5	x	x	x	x	x	
AlCuBiPb	x					x
AlCuMg1	x			x		
AlCuMg2	x			x		
AlZnMgCu1,5	x			x		

## 2.3. Dijagrami stanja aluminijevih legura

Dijagrami stanja aluminijevih legura najvažnijih legirnih elemenata s aluminijem imaju polje eutektičkog tipa, ograničeno polje kristala mješanca u graničnom području prema aluminiju i polje prijelaznih faza (intermetalnih spojeva) u području prema višim udjelima legirnih elemenata. Za praktično djelovanje odlučujući je relativni međusobni položaj ovih značajki u dijagramu stanja.

### 2.3.1. Dijagram stanja aluminij silicij

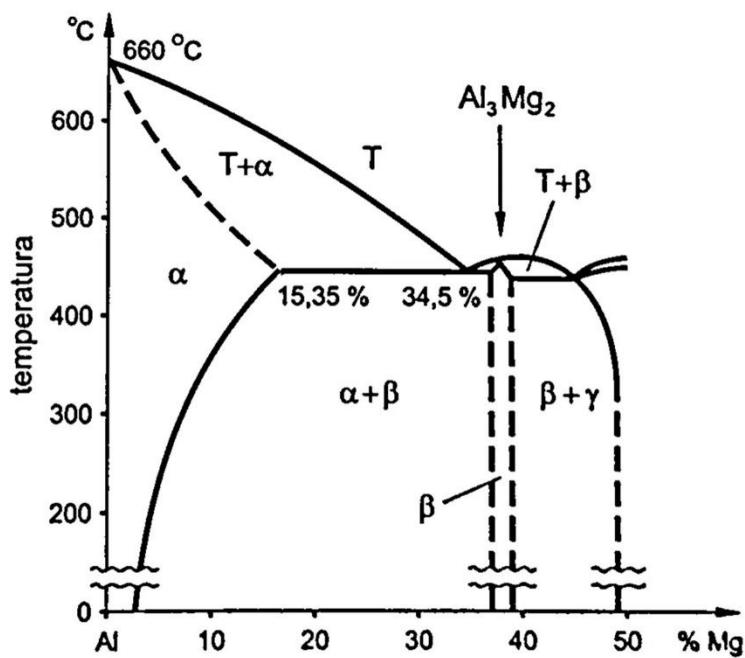
Silicij je eutektičkog tipa s eutektikom pri 11,7 % Si i temperaturi 577 °C. Pri toj temperaturi se u kristalima mješancima aluminija (alfa) otapa 1,65 % Si, a pri temperaturi 300 °C još samo 0,07 %Si. Primjenom polužnog pravila izlazi da se eutektik sastoji oko 90 % kristala mješanaca aluminija, a ostatak je čisti silicij. Prema tome svojstva pretežno ovise ovise o žilavim mješancima aluminija, a manje o krhkem siliciju. To su povoljni preduvjeti za lijevanu leguru, a uz to eutektički sastav omogućuje i dobro popunjavanje kalupa pri lijevanju i daje sitnozrnatu mikrostrukturu.



Slika 5. Dijagram stanja Al – Si [1]

### 2.3.2. Dijagram stanja aluminij – magnezij

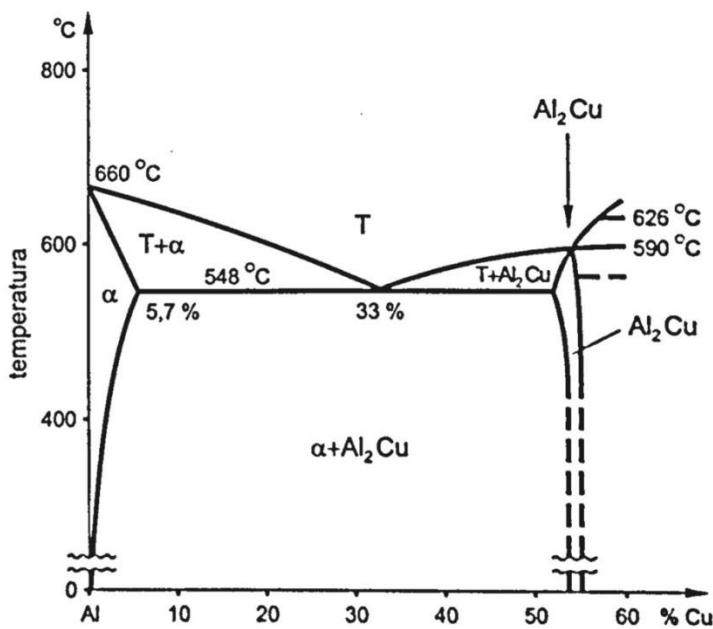
Magnezij pokazuje da aluminij i magnezij tvore intermetalni spoj Al<sub>3</sub>Mg<sub>2</sub> (beta) kod 37,5 % Mg. Ta faza je u legurama aluminija s magnezijem nepoželjna iz dva razloga. Vrlo je tvrda i zato slabo oblikovljiva deformiranjem, a kod djelovanja korozivnog medija prelazi prva u otopinu zbog visokog udjela magnezija. Nadalje, unatoč tome što eutektičke legure s 34,5 % Mg imaju vrlo nisku temperaturu skrućivanja od 451 °C, nisu uporabive kao lijevane legure jer eutektik sadrži gotovo 80 % tvrde i krhke faze Al<sub>3</sub>Mg<sub>2</sub>. Na toj osnovi ograničena je uporaba Al – Mg legura na područje ispod 15 % magnezija teorijski, a praktički još i dosta manje. Naime, maksimalna topljivost magnezija u aluminiju iznosi 15,3 % na eutektičkoj temperaturi, pa se i lijevane legure biraju iz područja alfa – faze. Povišenje čvrstoće binarnih legura postiže se povećanjem udjela otopljenog magnezija u kristalu mješancu aluminija. Iako se ispod eutektičke temperature zbog smanjene topljivosti izlučuje beta – faza, njezin utjecaj na očvrsnuće je beznačajan. Intermetalni spoj Al<sub>3</sub>Mg<sub>2</sub> izlučuje se u obliku krupnih čestica, ponajprije po granicama zrna. Kod legura s više od 7 % Mg nastaje oko aluminijevih zrna mreža precipitata Al<sub>3</sub>Mg<sub>2</sub> koji uzrokuju međukristalnu koroziju. Ta se mreža može odstraniti rastvornim žarenjem, ali se legura mora s temperature rastvornog žarenja gasiti i ponovo žariti na nižoj temperaturi da se postigne ravnomjerno izlučivanje beta – faze u mikrostrukturi. Tako toplinski obrađena legura nije više osjetljiva na interkristalnu koroziju.



Slika 6. Dijagram stanja Al – Mg [1]

### 2.3.3. Dijagram stanja aluminij – bakar

Bakar pokazuje nastajanje intermetalnog spoja Al<sub>2</sub>Cu kod 54 % Cu. Intermetalni spojevi su tvrdi i krhki i nepoželjni u tehničkim legurama. U svim legurama sa više od 5,7 % Cu mora se računati s prisutnošću te faze, najmanje kao dio eutektičkog skrućivanja preostale taljevine. Lijevane legure eutektičkog (33 % Cu) imaju slabu žitkost i nisu u uporabi. Zbog svega toga u svim legurama nastoji se izbjegći primarne kristale Al<sub>2</sub>Cu. Tehničke legure sadrže zbog širokog intervala skrućivanja oko 4,5 % Cu, što je dosta ispod maksimalne topljivosti bakra u aluminiju koja iznosi 5,7 % Cu pri eutektičkoj temperaturi. Topljivost se smanjuje sniženjem temperature na svega 0,45 % pri 300 °C. Višak bakra precipitira u obliku intermetalnog spoja Al<sub>2</sub>Cu. To je temeljni preduvjet za toplinsko očvrsnuće aluminijevih legura koje prvi puta otkriveno na ovoj leguri.



Slika 7. Dijagram stanja Al – Cu [1]

### 2.3.4. Trokomponentni sustavi aluminijevih legura

Od trokomponentnih legirnih sustava važan je sustav aluminij – magnezij – silicij u kojem u dijagramu stanja na stranici magnezij – silicij nastaje prijelazna faza  $Mg_2Si$ . Ta se faza može promatrati kao samostalna legirna komponenta, pseudobinarni dijagram stanja Al –  $Mg_2Si$ . Iz dijagrama stanja je vidljivo da opada topljivost  $Mg_2Si$  u alfa – kristalu mješancu ispod eutektičke temperature. To dovodi za razliku od Al – Si i Al – Mg, uz odgovarajuću toplinsku obradu do značajnog očvrsnuća. Najviše čvrstoće postižu se sustavima koji imaju iste mogućnosti precipitacijskog očvrsnuća, a to su sustavi aluminij – bakar – magnezij i aluminij – cink – magnezij. Kod posljednjeg nastaje intermetalni spoj  $MgZn_2$ . Na osnovi ova tri sustava razvijen je niz tehnički važnih precipitacijski očvrstljivih legura. Precipitacijsko očvrsnuće može se primijeniti i na druge legure pogodnog sastava drugih sustava u kojima se mijenja topljivost legirnih elemenata s temperaturom [1].

## 2.4. Svojstva i primjena toplinsko očvrstljivih aluminijevih legura

Od toplinsko očvrstljivih legura na rapolaganju su osnovne skupine legura s mnogostrukim varijantama. Toplinske očvrstljive aluminijске legure podvrgavaju se homogenizacijskom žarenju, gašenju te starenju (dozrijevanju) legure. Toplinsko očvrstljive aluminijске legure uključuju legure iz serije 2xxx, 6xxx i 7xxx. Za svaku seriju legura zaslužni su određeni elementi, tvoreći tako intermetalne spojeve s aluminijem ili s drugim legirnim elementima.

### 2.4.1. 2xxx legure aluminija - Durali

Bakar je glavni legirajući element u seriji legura 2xxx, često s magnezijem kao drugim dodatkom. Ove legure zahtijevaju homogenizacijsko žarenje kako bi se dobila optimalna svojstva; u uvjetima toplinske obrade otopine, mehanička svojstva su slična, i ponekad premašuju, ona niskougljičnih čelika. U nekim slučajevima, starenje se upotrebljava da nadalje poveća mehanička svojstva. Ta obrada povećava granicu razvlačenja, s popraćenim gubitkom istezljivosti; efekt starenja nije toliko dobar na vlačnu čvrstoću. Ove legure nemaju dobru koroziju postojanost kao ostale aluminijске legure, i pod određenim uvjetima može biti podložna interkristalnoj koroziji. Taj se nedostatak otklanja platiranjem valjanih limova ili prešanih profila čistim aluminijem ili legurama otpornim na koroziju. Mogu postići vrijednosti  $R_{p0,2}$  do 290 N/mm<sup>2</sup> i  $R_m$  do 450 N/mm<sup>2</sup>, ovisno o načinu starenja nakon gašenja s temperature homogenizacijskog žarenja. Dodatak magnezija ubrzava očvrstnuće stvaranjem intermetalnih spojeva. Legure iz serije 2xxx su naročito prikladna za dijelove i strukture koje zahtijevaju omjer visoke čvrstoće u odnosu na težinu i općenito se upotrebljavaju za izradu kamiona i kotača zrakoplova, dijelova suspenzija kamiona, trupa zrakoplova i oplata krila, strukturalnih dijelova, i onih dijelova koji zahtijevaju dobru čvrstoću na temperaturama do 150 °C.

### 2.4.2. 6xxx legure aluminija - Antikorodali

Legure iz serije 6xxx sadrže silicij i magnezij otprilike u omjerima koje trebaju za stvaranje magnezijevog silicida ( $Mg_2Si$ ), čine ga toplinski obradljivim. Iako ne puno čvršći u odnosu na 2xxx i 7xxx legure, 6xxx

legure imaju dobru oblikovljivost, zavarljivost, obradljivost, i koroziju postojanost, s srednjom čvrstoćom. Imaju  $R_m < 330 \text{ N/mm}^2$ , umjetnim starenjem  $R_{p0,2}$  oko  $240 \text{ N/mm}^2$ , a prirodnim starenjem oko  $110 \text{ N/mm}^2$ . Ove legure otporne su na koroziju, uvjetno pogodne za zavarivanje, anodizaciju i poliranje. U hladno očvrsnutom stanju i precipitacijski očvrsnutom stanju imaju posebno visok omjer čvrstoće i električne vodljivosti, pa se koristi za prijenos električne energije (provodne žice, sabirnice). Osim za prijenos električne energije, 6xxx legure mogu se koristiti kao obloge. Mogu se primijeniti za ekstrudirane oblike i cijevi za transport nafte. Imaju također i primjenu u automobilskoj industriji kao rastezljivi limovi karoserije automobila.

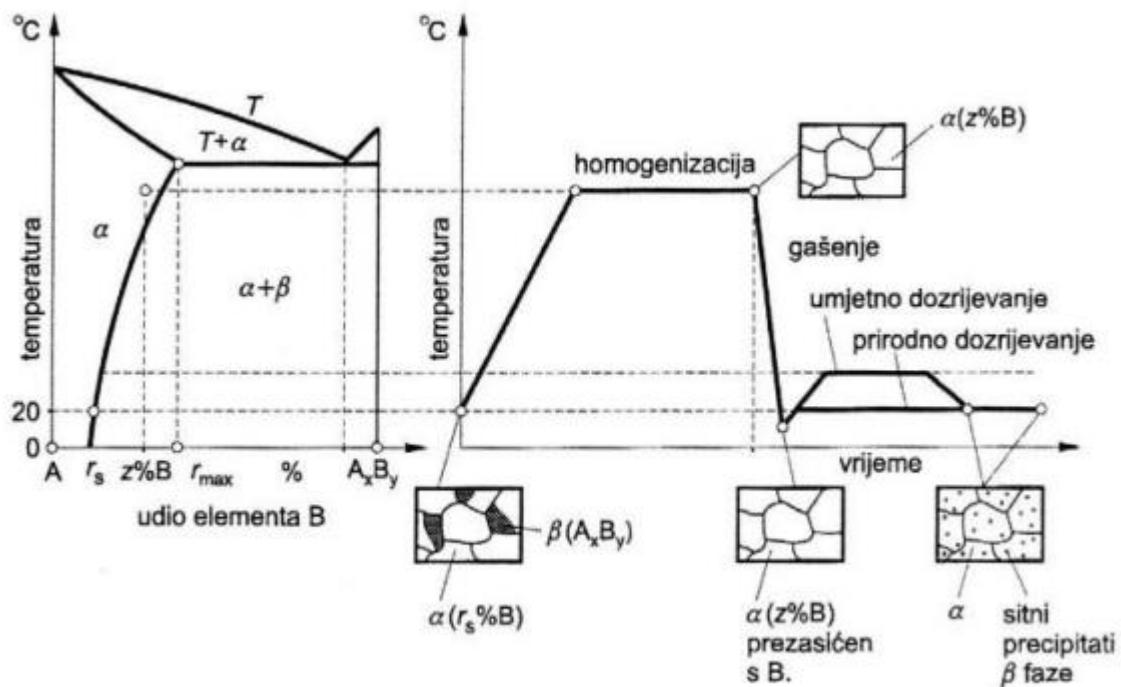
#### **2.4.3. 7xxx legure aluminija - Konstruktali**

Cink u količinama od 1 do 8% je glavni legirajući element u 7xxx legurama, a kada se spoji s malim postotkom magnezija tvori toplinsko oblikovljive legure od srednje do vrlo visoke čvrstoće. Ne dosežu potpunu čvrstoću 2xxx legura ali su zato otpornije od ovih na kemijske utjecaje. One predstavljaju dobar kompromis glede čvrstoće i korozijske postojanosti i uz to im je zadovoljavajuća zavarljivost. Obično ostali elementi, kao što su bakar i krom, dodani su u malim količinama. Razrjeđeni dodaci skandija također poboljšavaju svojstva. 7xxx legure upotrebljavaju se u strukturama trupova zrakoplova, opremi za mobitel i u ostalim dijelovima koji su visokonapregnuti. 7xxx legure visoke čvrstoće pokazuju smanjenu otpornost na napetosnu koroziju i često se koriste u starenom stanju kako bi osigurale bolju kombinaciju čvrstoće, otpornosti na koroziju i lomnu žilavost. Sa srednjom čvrstoćom u precipitacijski očvrsnutom stanju od oko  $550 \text{ N/mm}^2$  su legure s najvećom čvrstoćom među svim aluminijevim legurama. Što se tiče napetosne korozije, ona se može spriječiti nizom termomehaničkih postupaka [1, 12].

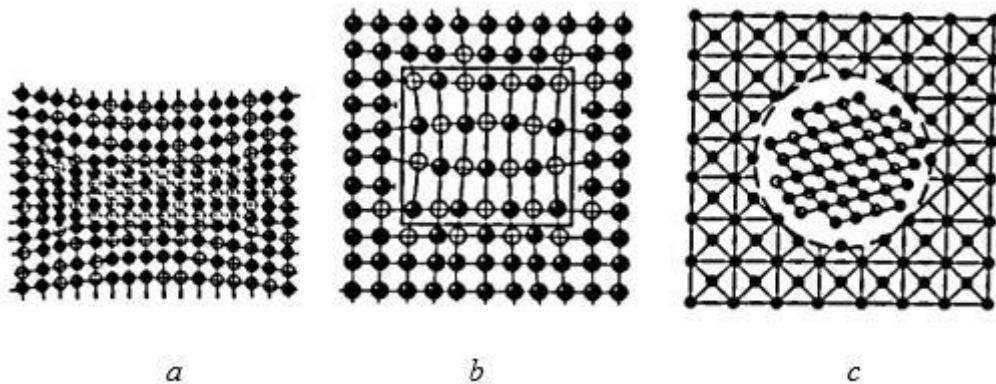
## 2.5. Precipitacijsko očvrsnuće aluminijevih legura

Precipitacijsko očvrsnuće zajednička je pojava mnogim legurama u kojima je topljivost nekih konstituenata u osnovnom metalu promjenom temperature, ali se najviše koristi u odgovarajućim aluminijevim legurama. Pojavu je prvo uočio njemački istraživač A. Wilm, koji je 1906. godine primijetio da Al-Cu legura gašena u vodi s temperaturom od oko  $500^{\circ}\text{C}$  očvrsne stajanjem na temperaturi okoline. Čvrstoća porasla tim postupkom postiže maksimum za tjedan dana. Prva značajna uporaba durala bila je tijekom I. svjetskog rata i to za konstrukcijske elemente zračnog broda poznatog pod imenom „Graf von Zeppelin“.

Postupak očvrsnuća nakon gašenja držanjem legure na temperaturi okoline, zvanog prirodno starenje, može se ubrzati i tako postići veće čvrstoće ako je gašena legura zagrijava do temperature od oko  $180^{\circ}\text{C}$ . Takva obrada bila prozvana je precipitacijsko očvršćivanje ili „precipitacijsko otvrđivanje“. Mnoge hipoteze su predlagane godinama za objašnjenje prirode ove pojave, a danas se svi slažu da je prirast čvrstoće i tvrdoće direktno povezan sa stvaranjem koherenntnih precipitata unutar rešetke osnovnog kristala mješanca [1].

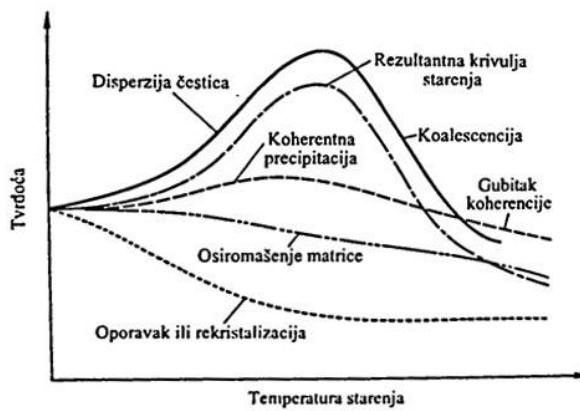


Slika 8. Shematski prikaz precipitacijskog očvrsnuća [13]

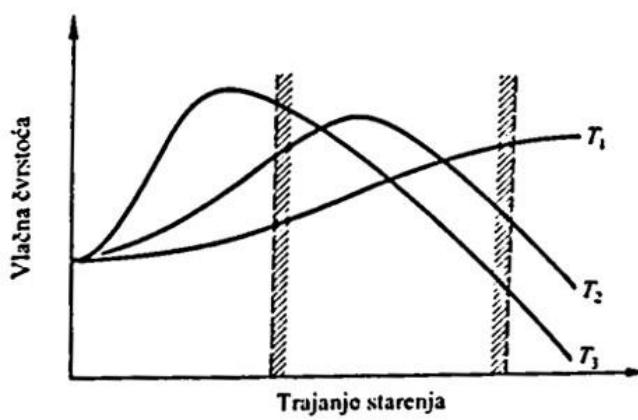


**Slika 9. Tipovi precipitata: *a* Koherentni, *b* Polukoherenčni, *c* Nekoherenčni [1]**

Ako se taljevina hlađi sporo sa temperature homogenizacijskog žarenja, ravnoteža će biti dostignuta pri svakoj temperaturi i nastajat će nekoherentni precipitati po granicama zrna. Nastajanjem nekoherentnih precipitata uzrokuje smanjenje čvrstoće, granice razvlačenja, a i tvrdoće. Ako se taljevina brzo gasi sa temperature homogenizacijskog žarenja, na sobnoj će temperaturi nastati prezasićena otopina aluminija atomima legirnog elementa na okolnoj temperaturi. U tom stanju legura je nešto čvršća i tvrđa zbog većeg postotka legirnog elementa u čvrstoj otopini aluminija. Prezasićena otopina aluminija legirnim elementom nije stabilna pri sobnoj temperaturi zbog prezasićenosti čvrste otopine aluminija legirnim elementom. U svakom trenutku postoji težnja izlaska atoma legirnog elementa iz čvrste otopine u obliku čestica nekoherentnog precipitata, ali zbog sporosti difuzije atoma legirnog elementa kroz rešetku aluminija, to se ne ostvaruje. Ali bez obzira što je difuzija atoma legirnog elementa spora, postoji određeno gibanje unutar rešetke aluminija tako da se stvaraju klice (nukleusi) međufaze. Te klice su prisutne kao koherentni precipitati i oko njih dolazi, uslijed distorzije rešetke, do pojave naprezanja. To učinkovito ometa gibanje dislokacija radi čega raste granica razvlačenja legure [1].



**Slika 10.** Utjecaj temperature starenja na tvrdoću [14]



**Slika 11.** Utjecaj trajanja starenja na vlačnu čvrstoću ( $T_1 < T_2 < T_3$ ) [14]

Jedna bitna značajka sustava precipitacijski očvršćivanih legura je temperatura ovisna o ravnotežnoj topljivosti čvrstih tvari čije se povećanje topljivosti karakterizira povećanjem temperature.

Glavni sustavi precipitacijski očvrsnutih Al - legura uključuju:

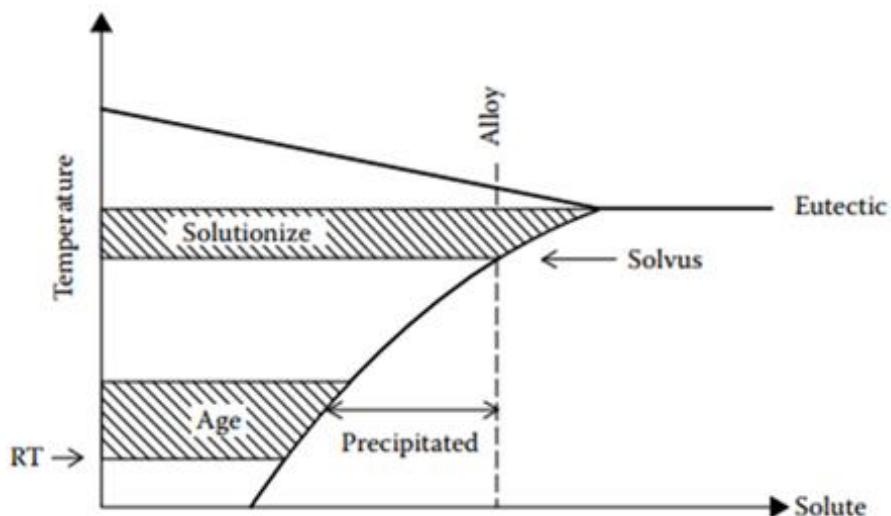
- Al – Cu legure (očvršćenje iz  $\text{CuAl}_2$ )
- Al – Cu – Mg (magnezij jača precipitaciju)
- Al – Mg – Si (očvršćenje iz  $\text{Mg}_2\text{Si}$ )
- Al – Zn – Mg (očvršćenje iz  $\text{MgZn}_2$ )
- Al – Zn – Mg – Cu sustav [15].

Precipitacijsko očvrsnuće sastoji se od tri glavna koraka:

**Homogenizacijsko žarenje** – provodi se pri visokim temperaturama i u lijevanom stanju legura prije toplinskog oblikovanja; temperature homogenizacijskog žarenja su u rasponu  $0,80\dots0,95 T_t$ ; postupak može trajati nekoliko sati do nekoliko dana.

**Gašenje** – temperatura brzo opada blizu sobne, ostavljajući legirne elemente zarobljene u nestabilnoj čvrstoj otopini, odnosno mikrostrukturi.

**Starenje** – s odgovarajućim vremenom i temperaturom, legirni elementi izlaze iz čvrste otopine, odnosno mikrostrukture tvoreći pritom precipitate; razlikujemo prirodno starenje (starenje na sobnoj temperaturi) i umjetno starenje (starenje na povišenoj temperaturi najčešće u rasponu ) [11, 14, 15].



Slika 12. Parametri precipitacijskog očvrsnuća [11]

**Tablica 5.** Faze za precipitacijsko očvrsnuće i aluminieve legure u kojima se pojavljuje očvrsnuće [11]

Faze	Elementi	Intermetalni spoj	Gnječene serije	Lijevane serije
$\theta'$	Al - Cu	Al <sub>2</sub> Cu	2xxx	2xx
S'	Al - Cu - Mg	Al <sub>2</sub> Cu	2xxx	2xx
T <sub>1</sub>	Al - Cu - Li	Al <sub>2</sub> Cu	2xxx(Li)	—
$\beta''$	Mg - Si	Mg <sub>5</sub> Si <sub>6</sub>	6xxx	3xx
Q"	Al - Cu - Mg - Si		2xxx, 6xxx	3xx
$\eta'$	Al - (Cu) - Mg - Zn	(Al, Cu)MgZn <sub>2</sub>	7xxx	7xx

**Tablica 6.** Parametri precipitacijskog očvrsnuća uobičajeno korištenih aluminjevih legura [16]

Legura	Temperatura starenja $\vartheta_{\text{star.}}$ (°C)	Vrijeme starenja $t_{\text{star.}}$ (h)	Temperatura žarenja $\vartheta_{\text{žarenja}}$ (°C)
AlSi1MgMn (6082)	155 - 190	4 - 16	525 - 540
AlCu4Mg1 (2024)	sobna temperatura	5 - 8 dana	495 - 505
AlZn5,5MgCu (7075)	(115 - 125)+(165 - 180)	(12 - 24)+(4 - 6)	470 - 480

### 3. METODE KARAKTERIZACIJE ALUMINIJEVIH LEGURA

Karakterizacija aluminijevih legura sastoji se od ispitivanja tvrdoće metodom Vickers, SEM analize, EDS/EDX analize i optičke mikroskopije.

#### 3.1. Ispitivanje tvrdoće metodom Vickers

Tvrdoća po Vickersu je mjera otpornosti što ga neki materijal pruža prodiranju dijamantne piramide opterećene silom F. Jednaka je omjeru sile i površine oplošja utisnuća što ga ostavlja piramida (s kutom  $136^\circ$ ), izražene pomoću dijagonalne baze d. Izračun tvrdoće prikazan je jednadžbom (1):

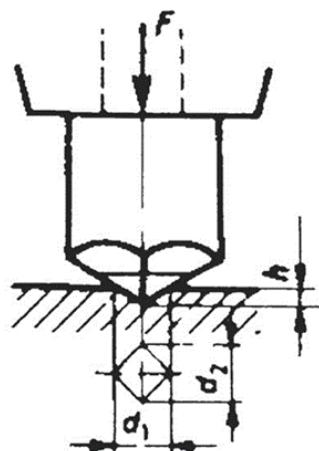
$$HV = 0,189 \cdot \frac{F}{d^2} \quad HV = 0,102 \cdot \frac{F}{A} \quad A = \frac{d^2}{2\sin(\frac{136}{2})} \quad d = \frac{d_1+d_2}{2} \quad (1)$$

Gdje je:  $F$  – sila, N

$d$  – dijagonalna baza utisnuća, mm

$A$  – površina utisnutog plašta priamide,  $\text{mm}^2$

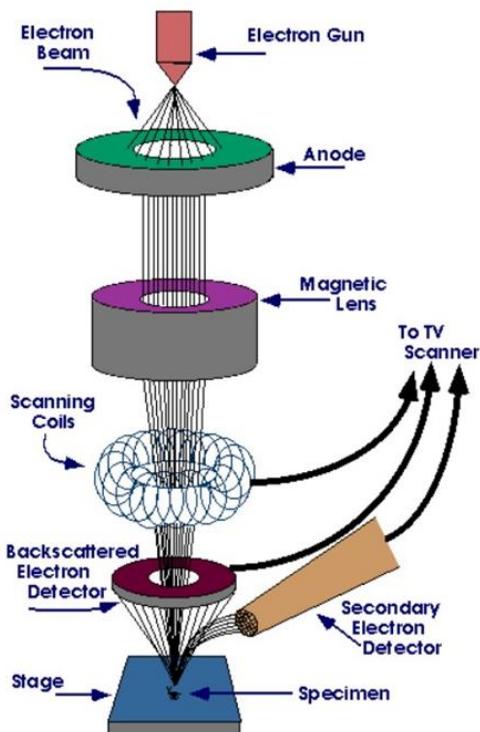
Primjenjuje se za sve metalne konstrukcijske materijale. Primjena Vickersove tvrdoće analogna je primjeni tvrdoće po Brinellu s tim da je područje mjerena znatno prošireno (od olova pa sve do tvrdih metala). Zbog malog otisnuća mogu se mjeriti tvrdoće tankih slojeva, pa čak i pojedinih strukturnih faza. Vickersova metoda je uobičajeni laboratorijsko ispitivanje tvrdoće materijala, ali i pogonska metoda. Izvodi se prema normi HRN EN ISO 6507 – 1: 1999 [17, 18].



Slika 13. Tvrdoća po Vickersu [17]

### 3.2. SEM analiza

Skenirajuća elektronska mikroskopija (SEM) ili SEM analiza je analitička tehnika za izvođenje analize za široki raspon materijala, pri velikim povećanjima, i za proizvodnju slike visoke rezolucije. Omogućuje analizu mnogih različitih vrsta uzorka, dajući razlučivost koja uvelike premašuje onu konvencionalne svjetlosne mikroskopije. SEM se oslanja na detekciju elektrona visoke energije emitiranih s površine uzorka nakon što je bio izložen visoko fokusiranom snopu elektrona iz elektronskog topa. Ovaj snop elektrona fokusira se na malu točku na površini uzorka pomoću SEM objektiva. Varijable poput upotrijebljenog napona ubrzanja, veličine korištenog otvora i udaljenosti između uzorka i elektronskog topa (radna udaljenost) mogu se optimizirati kako bi se postigle slike najbolje kvalitete. Postoje dva načina detekcije elektrona koji omogućuju različite vrste snimanja i analize, a svaki daje vitalne uvide. Backscattered elektroni mogu se otkriti kako bi se dobio kontrast na temelju različitih hemijskih sastava na slici. Sekundarni elektroni, emitirani blizu površine uzorka, daju informacije o topografiji površine [19].



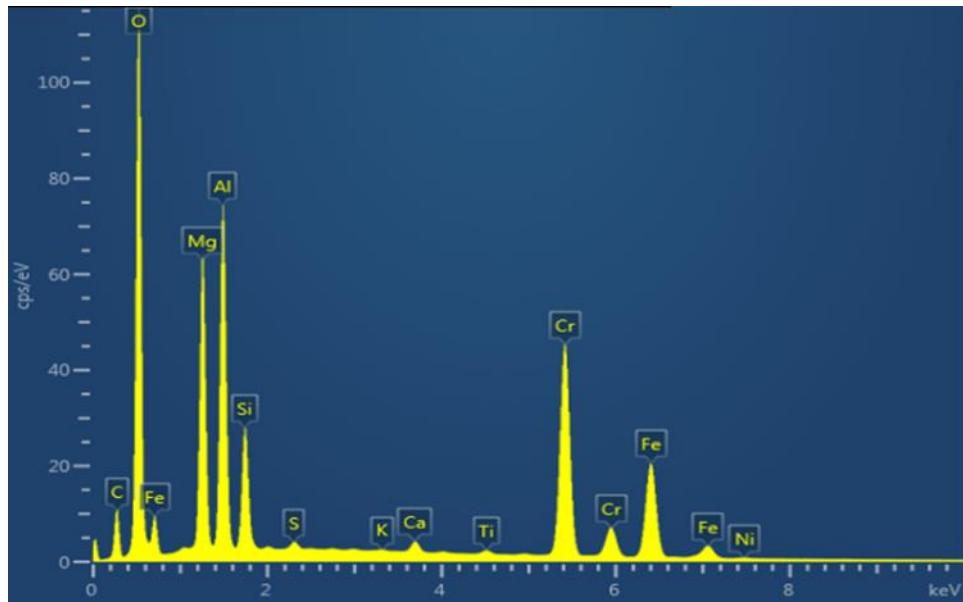
**Slika 14.** SEM analiza [20]

### 3.3. EDS/EDX analiza

EDS analiza je emisijska spektroskopska tehnika koja je našla široku primjenu u identifikaciji i određivanju elemenata. Tehnika ovisi o emisiji karakterističnog x zračenja obično u rasponu od 1 do 60 keV, nakon pobuđivanja energetskih razina atomskih elektrona vanjskim izvorom energije, kao što je snop elektrona, snop nabijenih čestica ili snop x zraka. U većini matrica uzorka, EDS analiza može otkriti elemente u koncentracijama manjim od 1ug/g uzorka (1 ppm) u uzorku tankog filma, može otkriti ukupne količine od jedne desetine mikrograma. EDS je obično integriran sa skenirajućim elektronskim mikroskopima (SEM) koji koriste fokusirani elektronski snop za skeniranje površine uzorka, generirajući različite interakcije između elektrona i atoma uzorka. Kada snop elektrona stupa u interakciju s uzorkom uzrokuje emitiranje x zraka karakterističnih za prisutne elemente. Emitirane x zrake prikupljaju se pomoću detektora, sačinjenih od poluvodiča germanija i silicija dopiranih litijem, postavljenih u blizini uzorka. Detektor mjeri energiju (ili valnu duljinu) x zraka, stvarajući spektar koji predstavlja distribuciju energija x zraka. Položaj i intenzitet spektralnih vrhova pružaju kvalitativne i kvantitativne informacije, a intenziter daje informacije o masenom udjelu matrice uzorka. Ono što je prednost ove spektroskopske tehnike to je pružanje informacija o elementarnom sastavu uzorka, mogu se analizirati vrlo mala područja i nerazorna je metoda što znači da ne ošteće uzorak tijekom analize. Kao ograničenja mogu se izdvojiti polukvantitativnost, odnosno davanje procjene koncentracije, ali ne i precizne kvantitativne podatke i nije prikladan za otkrivanje elemenata duboko u materijalu [21].



Slika 15. EDS analiza [22]



Slika 16. EDS spectrogram [23]

### 3.4. Svjetlosna mikroskopija

Svjetlosna mikroskopija je tehnika koja se koristi za vizualizaciju mikroskopskih objekata. Omogućava znanstvenicima promatranje uzorka na mikro razini.

Postoji više podjela svjetlosnih mikroskopa, a to su:

- S prolaznim svjetlom (polimeri, minerali, kompoziti...)/ S reflektirajućim svjetlom (metali)
- Monokularni/ Binokularni
- Uspravni/ Invertni.



**Slika 17. Sastavni dijelovi svjetlosnog miroskopa: 1 Tijelo mikroskopa, 2 Stolić, 3 Dijelovi za fokusiranje slike, 4 Sustava za iluminaciju, 5 Optičke komponente [24]**

Sustav za iluminaciju najvažniji je dio svakog svjetlosnog mikroskopa koji je odgovoran za dobivanje kvalitetnog prikaza mikrostrukture, primjenom raznih tehnika mikroskopiranja te za dobivanja kvalitetnih fotografija. Zahtjevi sustava za iluminaciju uključuju precizno vođenje svjetla od izvora do oka, bez refleksije i bljeska unutar mikroskopa i što uži snop uz što veću snagu (bez zagrijavanja).

Dijelovi sustava za iluminaciju su:

- Izvor svijetla u koji spadaju halogene žarulje, žarulje sa žarnom niti, žarulje s električnim lukom, laser i LED
- Kondenzor – sastavljen je od leća, a svrha mu je sakupljanje i usmjeravanje svjetla s izvora na uzorak prije nego uđe u objektive
- Zastori (Dijafragme) – zastor aperture koji regulira količinu svjetla (optimalno 60 – 90%); zastor polja regulira vidno polje na slici
- Filteri modificiraju svjetlo, odnosno propuštaju samo određenu valnu duljinu.

U optičke dijelove mikroskopa spadaju:

- Objektivi – formiraju primarnu sliku, tj. sakupljaju što je moguće više svjetla s uzorka i kombinirajući to svjetlo stvaraju sliku (numerička apertura objektiva); Objektivi s konačnim fokusom – konačni optički sustav i fokusna udaljenost od 160 mm; Objektivi s beskonačnim fokusom – beskonačni optički sustav i fokusna udaljenost do 200 mm
- Okulari – povećavaju primarnu sliku (koju mikroskop stvara 250 mm od oka), mjerjenje, brojanje, uspoređivanje, lociranje strukturnih faza, uskladieni sa objektivima (uvijek se koriste objektivi s većim povećanjem i okulari s manjim), udaljenost oka od okulara 10 mm ili manje (neovisno o dioptriji korisnika).

Tehnike mikroskopiranja koje se koriste kod svjetlosne mikroskopije su:

- Svjetlo polje
- Tamno polje
- Polarizirajuća slika – koristi se za optički izotropne (iste optičke karakteristike u svim smjerovima) i anizotropne materijale (optičke karakteristike variraju s orijentacijom upadne svjetlosti)
- Diferencijalni interferencijski kontrast – topografski detalji bez gubitka rezolucije [24].

# EKSPERIMENTALNI DIO

## 4. PLAN POKUSA I PROVEDBA TOPLINSKE OBRADE

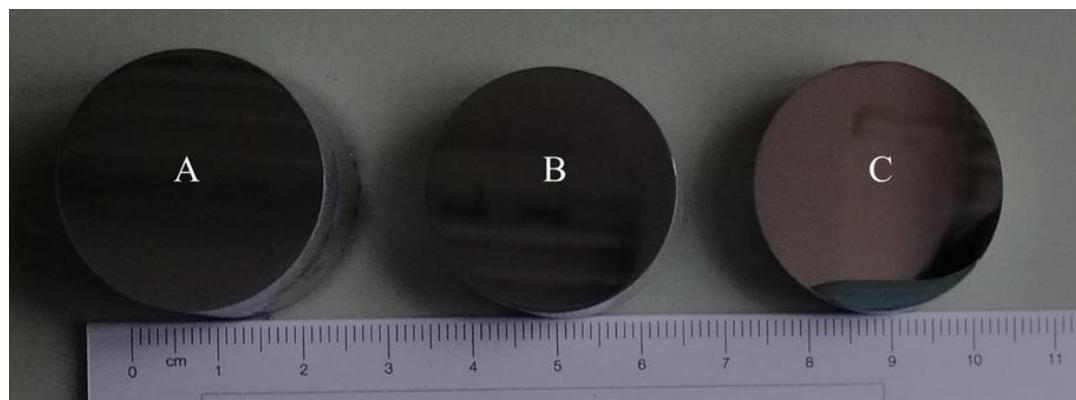
Eksperimentom je obuhvaćeno određivanje kemijskog sastava uzorka, mjerjenje dimenzija, toplinska obrada homogenizacijskog žarenja i starenje uzorka. Ispitana je tvrdoća metodom Vickers i analiza mikrostrukture. Temeljem rezultata tvrdoća određen je matematički model starenja.

### 4.1. Kemijski sastav i dimenzije uzorka

Kemijski sastav uzorka legure 6082 iz serije legura 6xxx aluminija, čiji su glavni legirajući elementi magnezij i silicij, određuje se tehnikom Rendgenske difrakcije kojom se kroz uzorak propuštaju X – zrake. Svaki element unutar uzorka može apsorbirati određenu količinu X – zraka i prema tome se određuje maseni udio elemenata u uzorku. Dimenzije uzorka izmjerenu su pomoću pomicnog mjerila s podijeljenom skalom od 0,01 mm. Dimenzije uzorka prikazani su tablicom 7. i na slici 18. dok je kemijski sastav uzorka prikazan tablicom 8. i difraktogramom na slici 19.

**Tablica 7. Dimenzije uzorka**

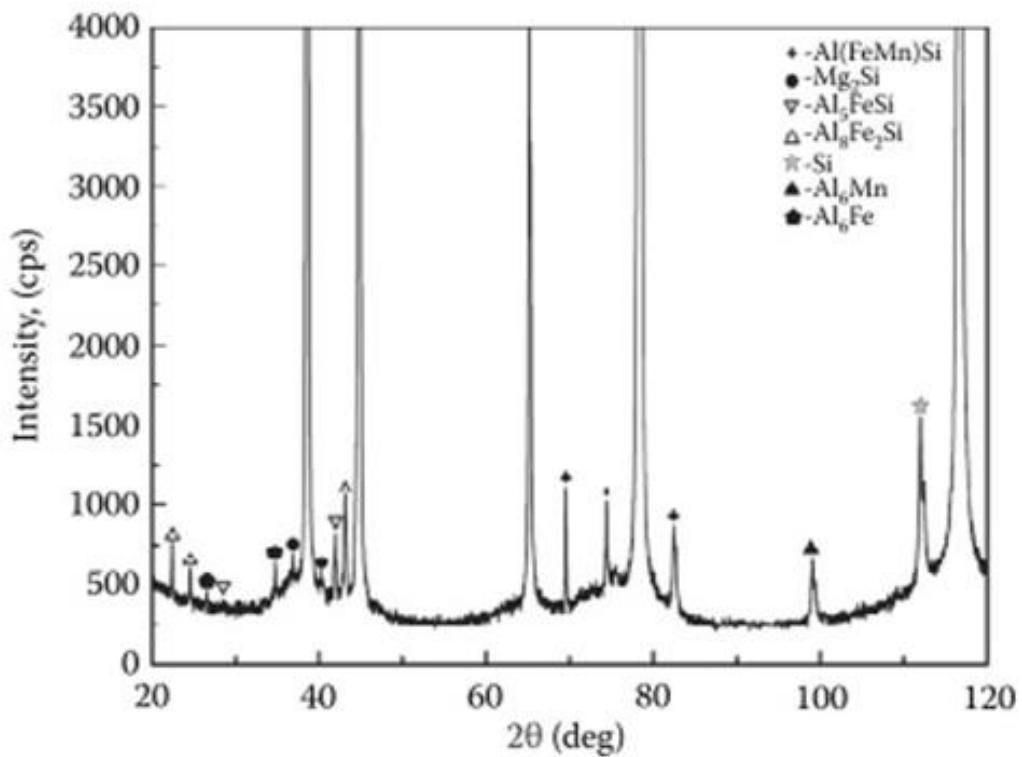
Uzorak	Promjer $D$ (mm)	Debljina $t$ (mm)
A	30	14
B	30	8
C	30	7



**Slika 18. Dimenzije uzorka**

**Tablica 8. Kemijski sastav uzorka**

Kemijski sastav (%)					
Legura/Elementi	Mg	Si	Mn	Cu	Fe
6082	0,76	1,0	0,56	0,022	0,16



Slika 19. Difraktogram uzorka [25]

## 4.2. Toplinska obrada uzorka

Toplinska obrada održana je u Laboratoriju za toplinsku obradu na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. U eksperimentu su korištena tri uzorka: A, B i C. Na svakom od tih uzorka prvotno je provedeno homogenizacijsko žarenje. Uzorci su zatim gašeni u vodi do sobne temperature. Nakon homogenizacijskog žarenja i gašenja u vodi uzorci su podvrgnuti procesu umjetnog starenja (starenje pri povišenim temperaturama). Svaki uzorak podvrgnut je različitim temperaturama umjetnog starenja, ali s istim vremenima starenja. Parametri toplinskih obrada uzorka navedeni su u tablici 9. i na shematskim prikazima (slika 22. – 24.).



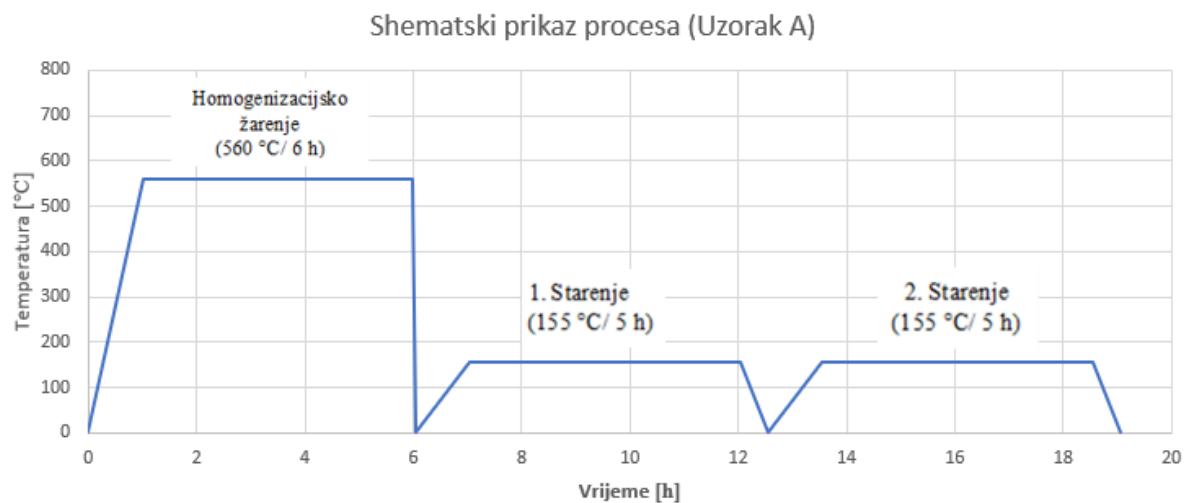
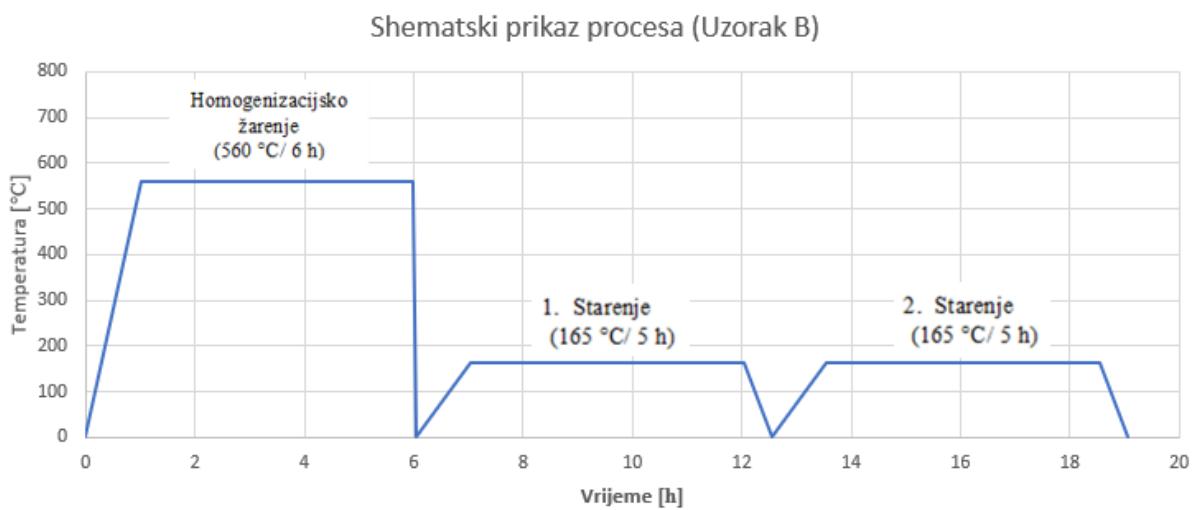
Slika 20. Homogenizacijsko žarenje uzorka

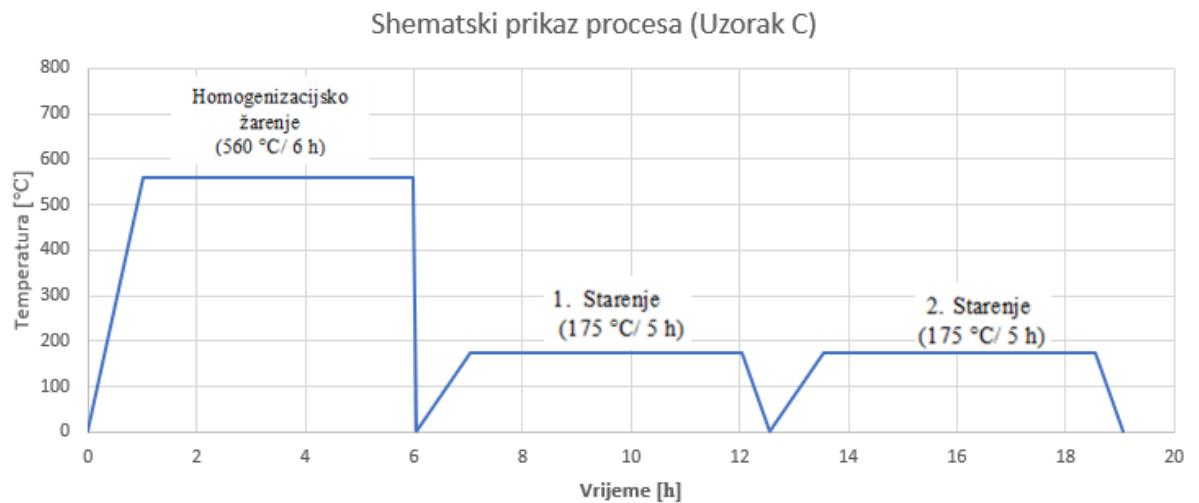


Slika 21. Gašenje uzorka u vodi

**Tablica 9.** Parametri pojedinih toplinskih obradi

Uzorci/Stanje	Homogenizacijsko žarenje	Prvo starenje	Drugo starenje
A	560 °C/ 6 h	155 °C/ 5 h	155 °C/ 5 h
B	560 °C/ 6 h	165 °C/ 5 h	165 °C/ 5 h
C	560 °C/ 6 h	175 °C/ 5 h	175 °C/ 5 h

**Slika 22.** Shematski prikaz toplinskih obrada – uzorak A**Slika 23.** Shematski prikaz toplinskih obrada – uzorak B



Slika 24.

Shematski prikaz toplinskih obrada – uzorak C

### 4.3. Ispitivanje tvrdoće uzorka

Tvrdoća uzorka ispitivana je na tvrdomjeru Wilson – Wolpert Tukon 2100B. Mjerenja su provedena nakon završetka pojedine toplinske obrade, tj. poslije homogenizacijskog žarenja, poslije prvog starenja i poslije drugog starenja. Ispitivanje je provedeno metodom HV1 koja označava silu pritiska od 9,81 N, a kao indentor koristi se dijamantna piramida s kutom od 136°. Svakim otiskom na uzorku mjere se duljina dijagonala pomoću softvera koji uz pomoć duljina dijagonala izračunava tvrdoću po metodi HV1. Nakon završetka pojedine toplinske obrade provedeno je pet mjerenja na uzorcima te za pet mjerenja je uzeta srednja vrijednost. Vrijednosti tvrdoća uzorka nakon završetka svake toplinske obrade prikazan je u tablici.

**Tablica 10. Vrijednosti tvrdoća uzorka nakon toplinske obrade**

		Tvrdoća uzorka HV1								
Uzorak		A			B			C		
R.B.	Stanje	1A	2A	3A	1B	2B	3B	1C	2C	3C
1.		63	98	132	62	96	116	58	113	90
2.		60	100	120	60	95	123	58	107	86
3.		61	99	127	63	95	125	60	110	95
4.		62	99	129	60	98	125	59	111	88
5.		61	101	120	63	99	126	61	117	89
Xsred.		61,4	99,4	125,6	61,6	96,6	123	59,2	111,6	89,6

**1A, 1B i 1C** – uzorci koji su homogenizacijski žareni na 560 °C/ 6 h

**2A** – uzorak nakon prvog starenja na 155 °C/ 5 h

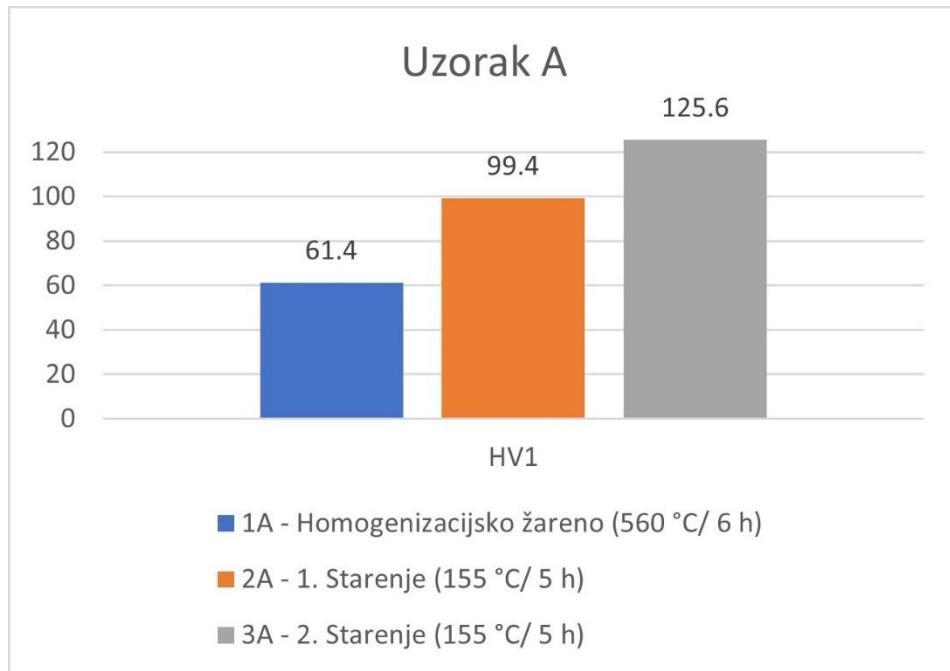
**2B** – uzorak nakon prvog starenja na 165 °C/ 5 h

**2C** – uzorak nakon prvog starenja na 175 °C/ 5 h

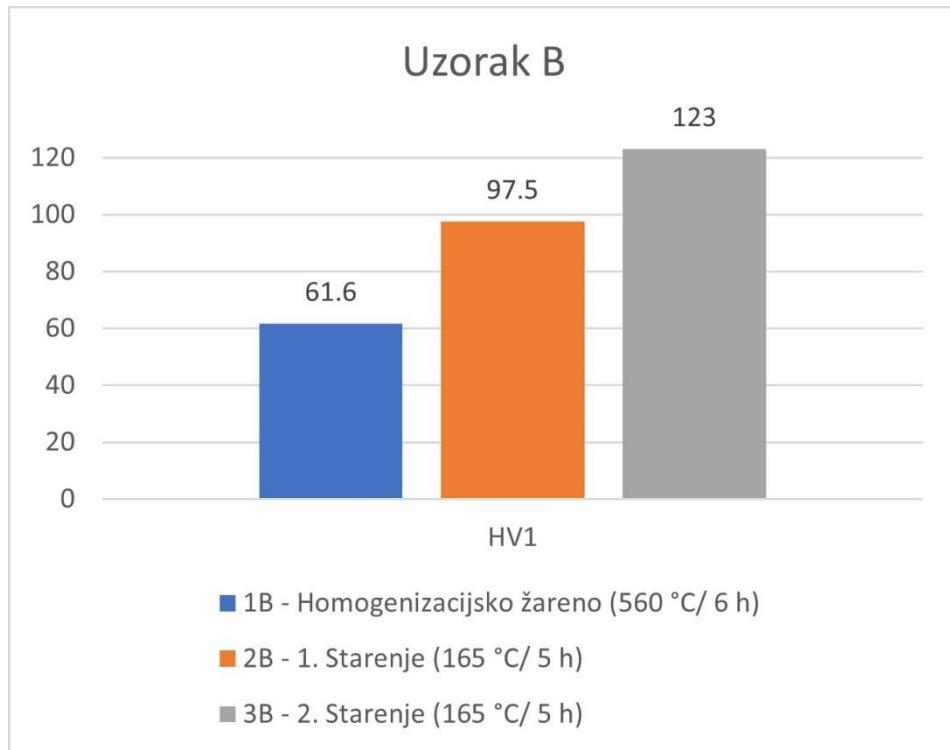
**3A** – uzorak nakon drugog starenja na 155 °C/ 5 h

**3B** – uzorak nakon drugog starenja na 165 °C/ 5 h

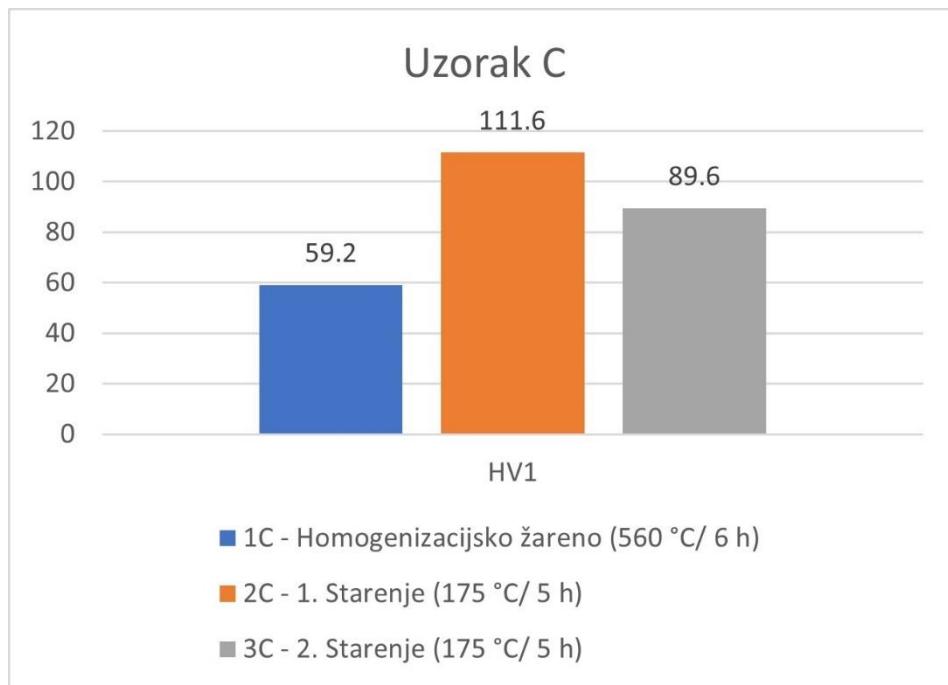
**3C** – uzorak nakon drugog starenja na 175 °C/ 5 h



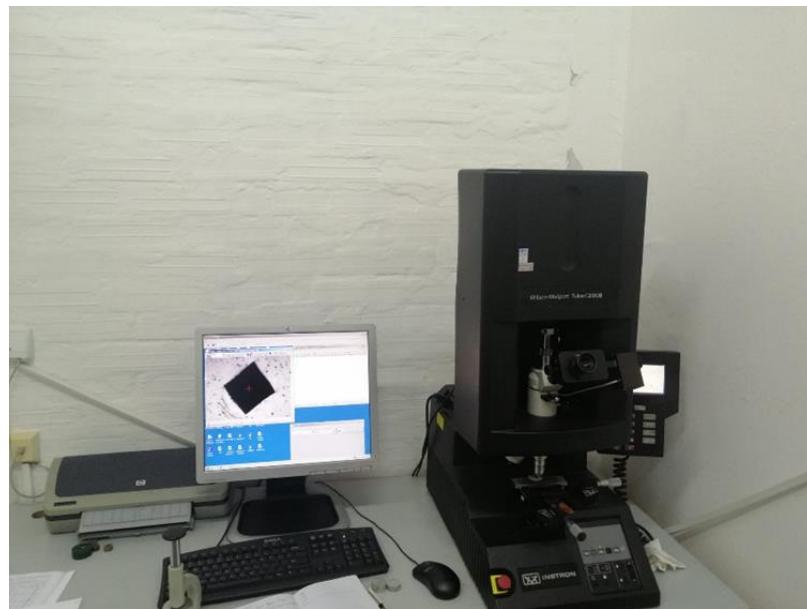
**Slika 25. Histogram tvrdoća – uzorak A**



**Slika 26. Histogram tvrdoća – uzorak B**



Slika 27. Histogram tvrdoća – uzorak C



Slika 28. Ispitivanje tvrdoće uzorka

#### 4.4. Model starenja

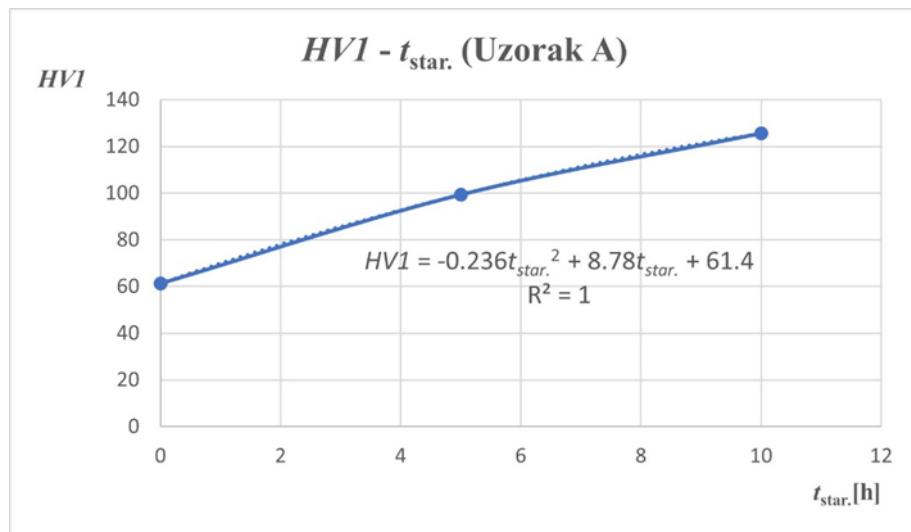
Parametri koji određuju toplinski proces starenja su temperatura i vrijeme starenja, odnosno proces ovisi o temperaturi i vremenu. Osim vremena i temperature, postoji još jedan parametar o kojem ovisi proces starenja, a to je parametar starenja  $P$  i dan je jednadžbom (2):

$$P = \vartheta_{star.} \cdot (C + \log(t_{star.})) \quad (2)$$

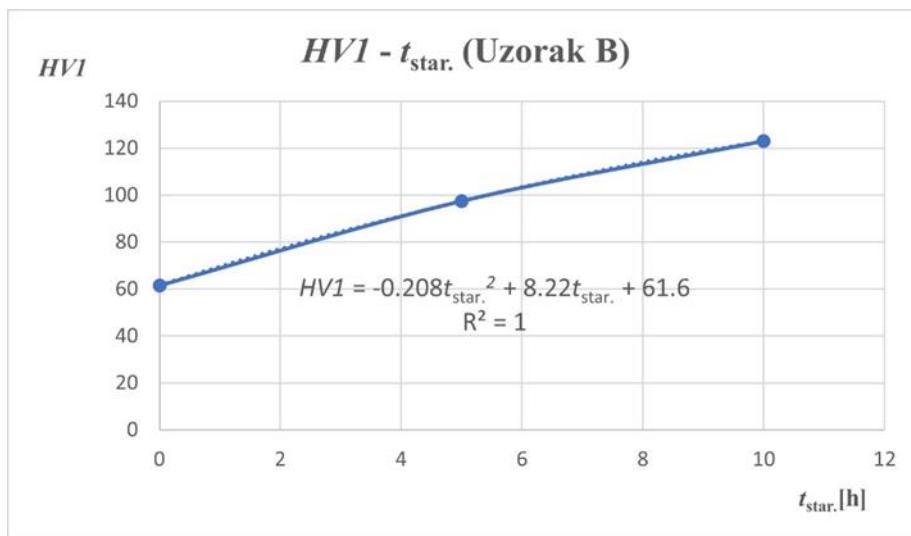
Parametar  $P$  također ovisi o temperaturi i vremenu. Model starenja se povezuje sa temperaturom, vremenom i parametrom starenja kao vrijednost tvrdoće HV1 u obliku funkcija. Te funkcije nam daju predodžbu kako će se ponašati tvrdoća pri određenim temperaturama, vremenima ili parametrima starenja. Važni podaci koji su vidljivi iz jednadžbi su maksimalna postignuta tvrdoća te maksimalno vrijeme starenja za određenu temperaturu. Maksimalne tvrdoće dobivaju se iz ovisnosti tvrdoće uzorka u odnosu na vrijeme starenja, tj. iz tih jednadžbi se traže maksimumi za svaki uzorak.

**Tablica 11. Maksimalna postignuta tvrdoća uzorka**

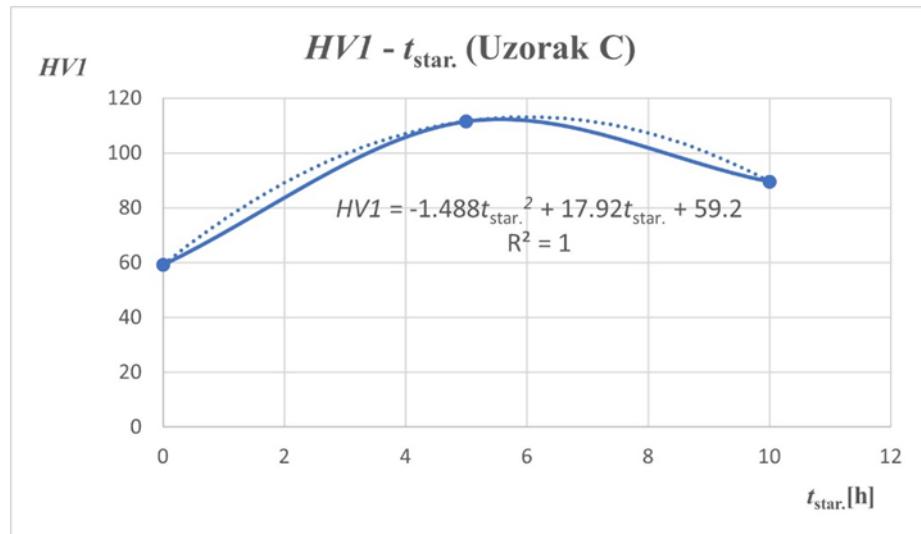
Uzorak	HV1 <sub>max</sub>	t <sub>max</sub> (h)	θ <sub>star.</sub> (°C)
A	143	18,6	155
B	142,8	19,8	165
C	113,2	6,02	175



**Slika 29.** Ovisnost tvrdoće o vremenu starenja – uzorak A



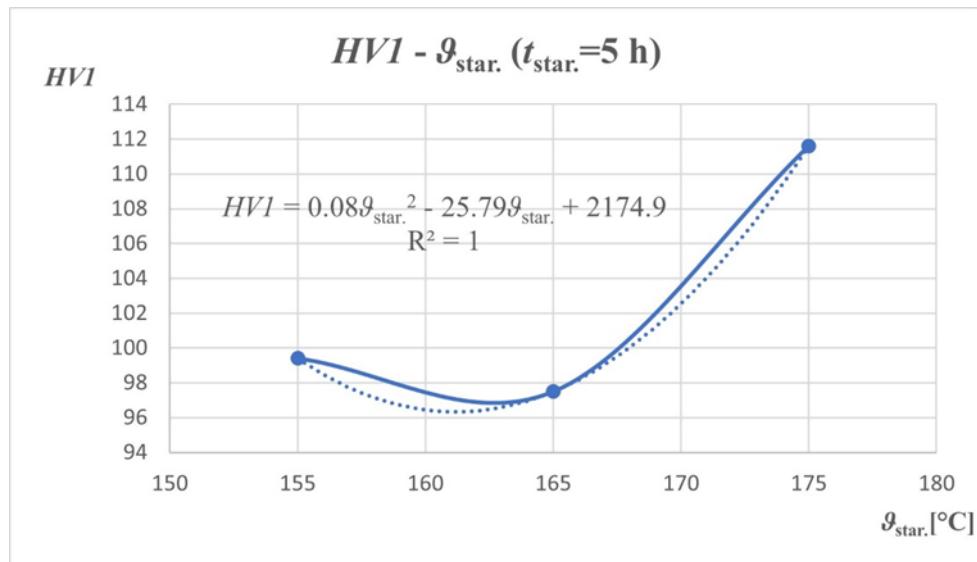
**Slika 30.** Ovisnost tvrdoće o vremenu starenja – uzorak B



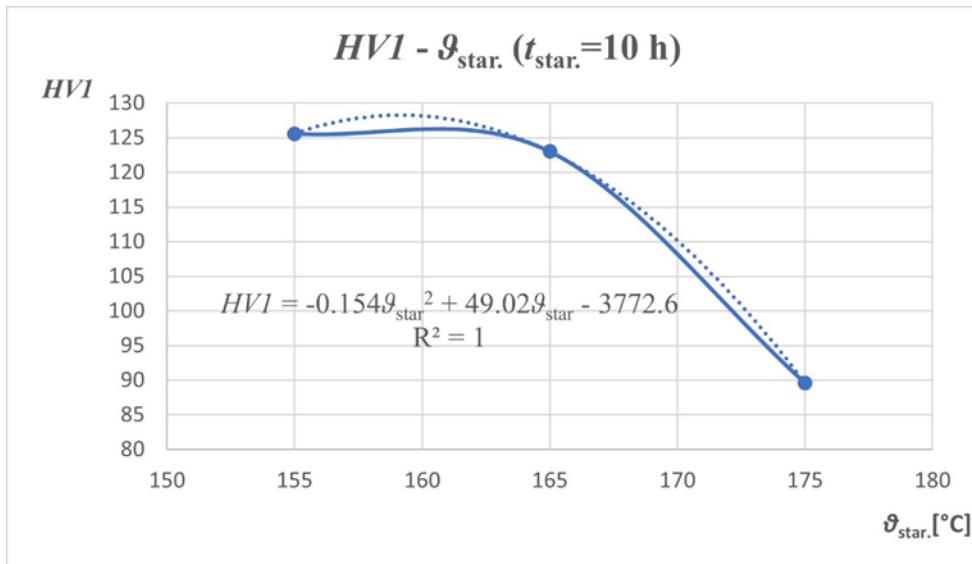
**Slika 31.** Ovisnost tvrdoće o vremenu starenja – uzorak C

Iz gore jednadžbe (2) nepoznanica je konstanta  $C$ . Ona se dobiva tako da se funkcija tvrdoće u ovisnosti o temperaturi za vrijeme starenja od 5 h izjednači sa jednadžbom tvrdoće u ovisnosti o temperaturi za vrijeme starenja od 10 h.

$$HV1(\vartheta_{star.}; t_{star.} = 5 \text{ h}) = HV1(\vartheta_{star.}; t_{star.} = 10 \text{ h}) \quad (3)$$



**Slika 32.** Ovisnost tvrdoće o temperaturi starenja –  $t_{star.} = 5 \text{ h}$



**Slika 33. Ovisnost tvrdoće o temperaturi starenja –  $t_{\text{star.}} = 10 \text{ h}$**

Rješavanjem tog problema proizlaze dvije temperature pošto je problem polinom drugog stupnja. Te dvije temperature uparuju se sa vremenima starenja na način da viša temperatura ide u kombinaciji sa kraćim vremenom starenja (5 h) dok niža temperatura ide u kombinaciju sa dužim vremenom starenja (10 h).

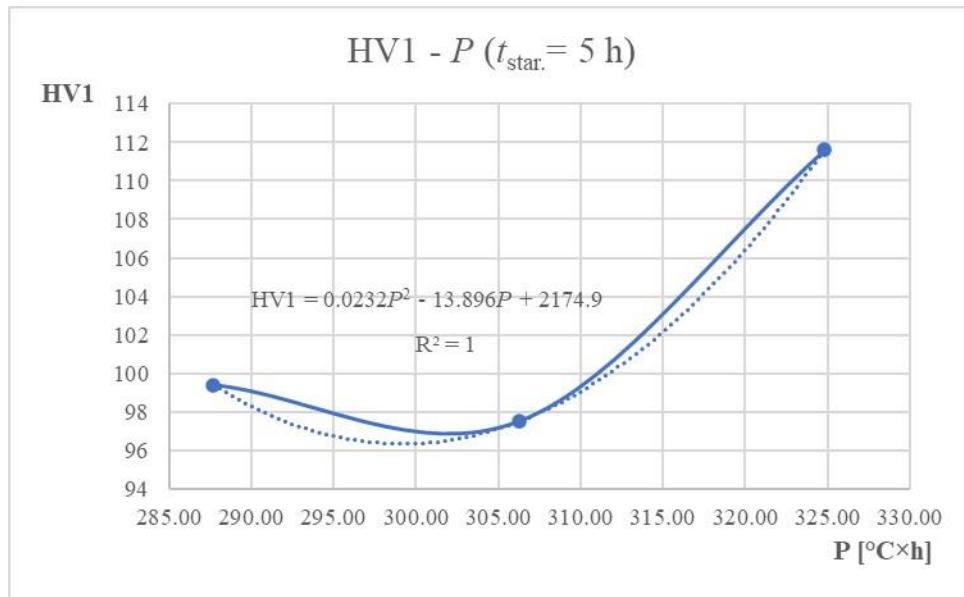
$$\vartheta_1 = 171,5 \text{ °C} \approx 172 \text{ °C}$$

$$\vartheta_2 = 148,21 \text{ °C} \approx 148 \text{ °C}$$

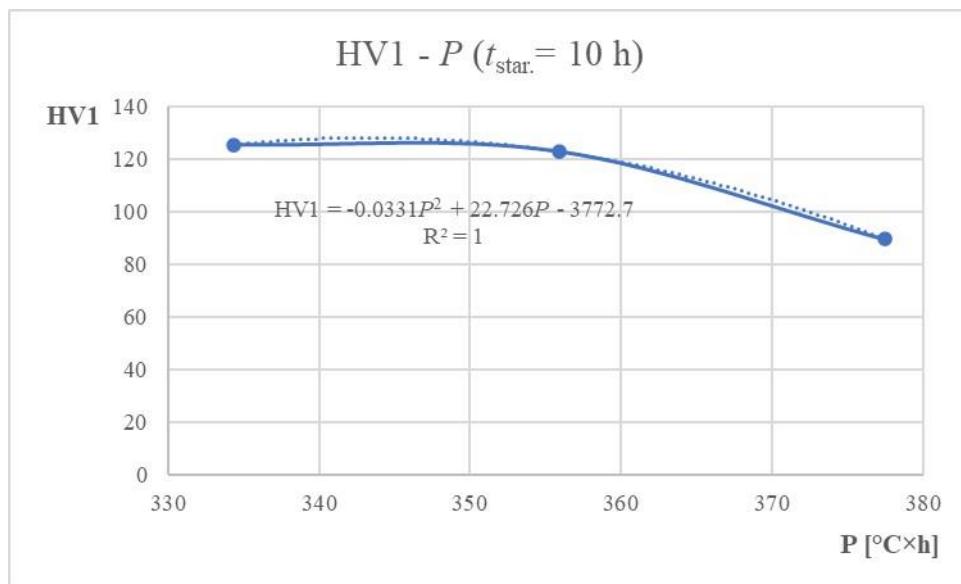
Izjednačavanjem parametara  $P$  za vrijeme starenja od 5 h za temperaturu od  $172 \text{ °C}$  i za vrijeme starenja od 10 h za temperaturu od  $148 \text{ °C}$ :

$$\begin{aligned}
 P_1(t_{\text{star}}=5 \text{ h}) &= P_2(t_{\text{star.}}=10 \text{ h}) \\
 172 \times (C + \log(5)) &= 148 \times (C + \log(10)) \\
 172C - 148C &= 148 - 172 \times \log(5) \\
 C &= (148 - 172 \times \log(5)) / 24 \\
 C &= 1,157
 \end{aligned} \tag{4}$$

Dobivanjem konstante  $C$  određuju se parametri starenja za navedene tri temperature:  $155 \text{ °C}$ ,  $165 \text{ °C}$  i  $175 \text{ °C}$ . Zatim se tvrdoća može prikazati kao funkcija parametra starenja, odnosno  $HVI = f(P)$ .



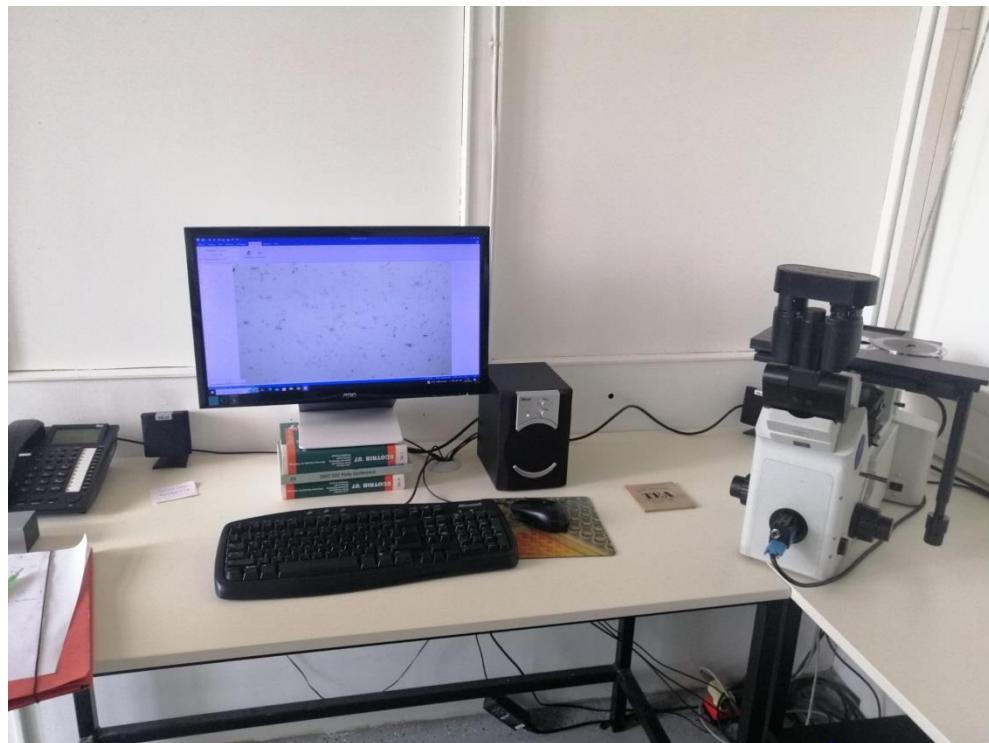
Slika 34. Ovisnost tvrdoće o parametru starenja –  $t_{\text{star.}} = 5 \text{ h}$



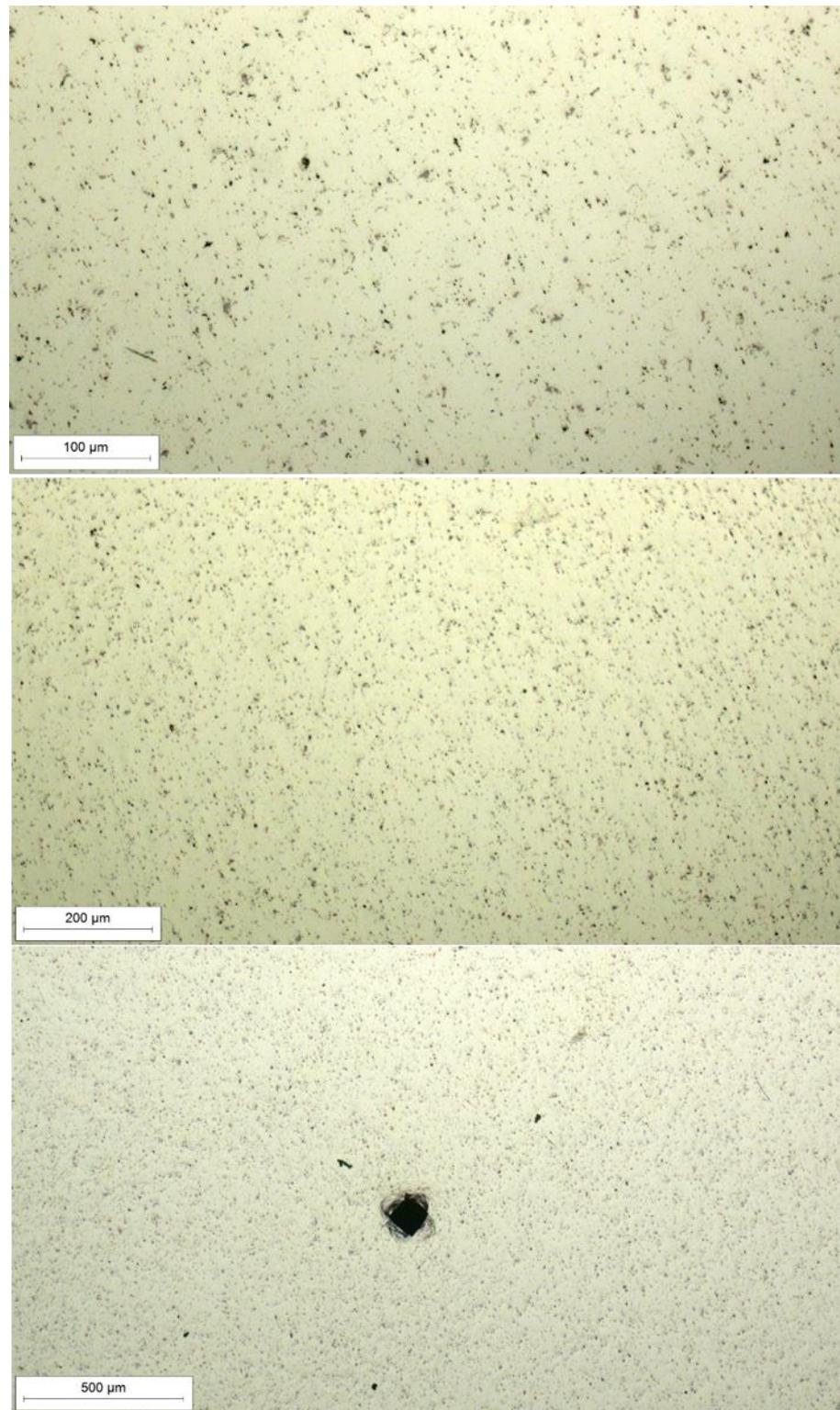
Slika 35. Ovisnost tvrdoće o parametru starenja –  $t_{\text{star.}} = 10 \text{ h}$

#### 4.5. Mikrostruktura uzorka

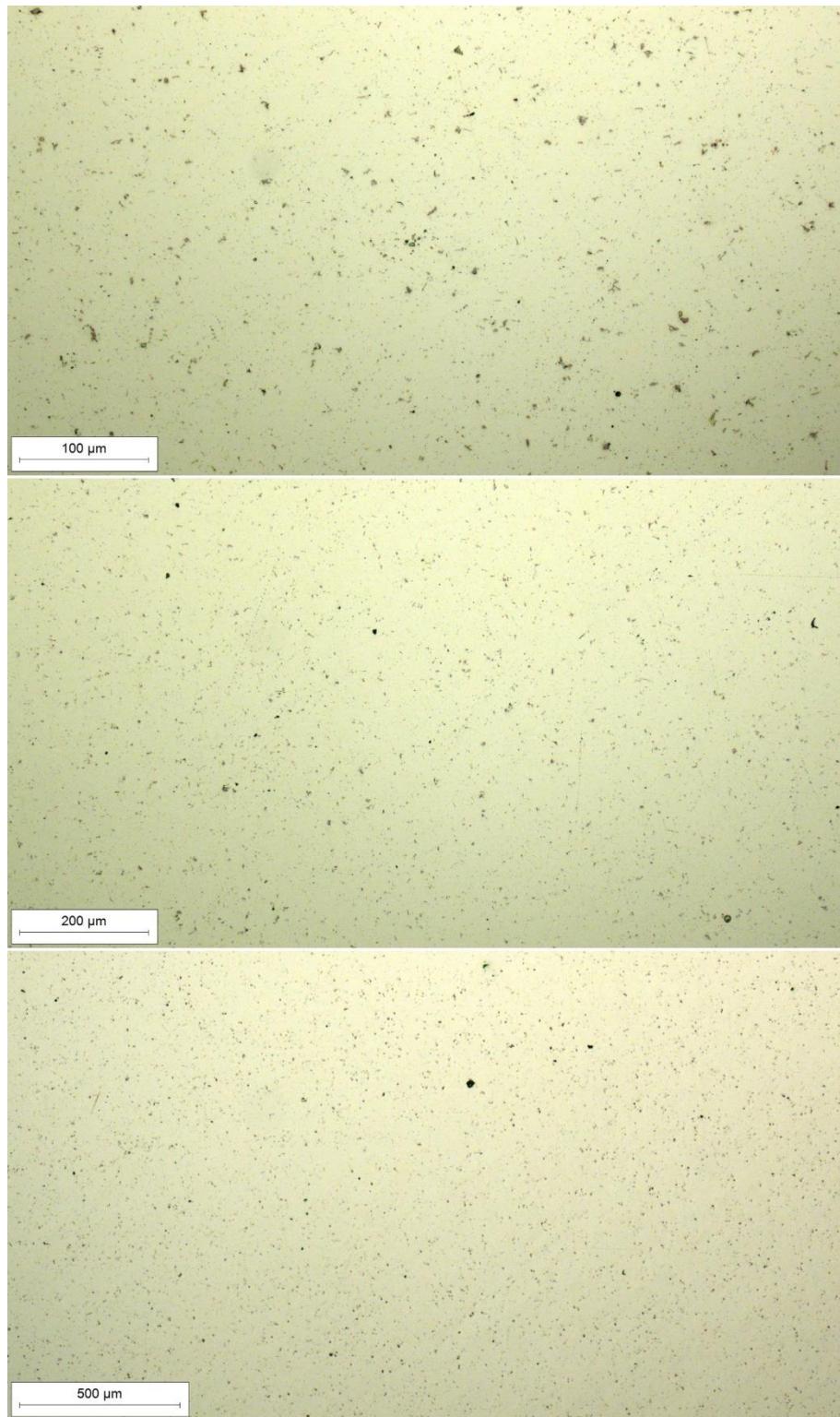
Proučavanje mikrostrukture napravljeno je u Laboratoriju za materijalografiju na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. Za proučavanje mikrostrukture koristi se svjetlosni mikroskop marke Olympus koji je povezan s računalnim programom ImageJ na računalu koji omogućava pregled mikrostrukture pod različitim povećanjima.



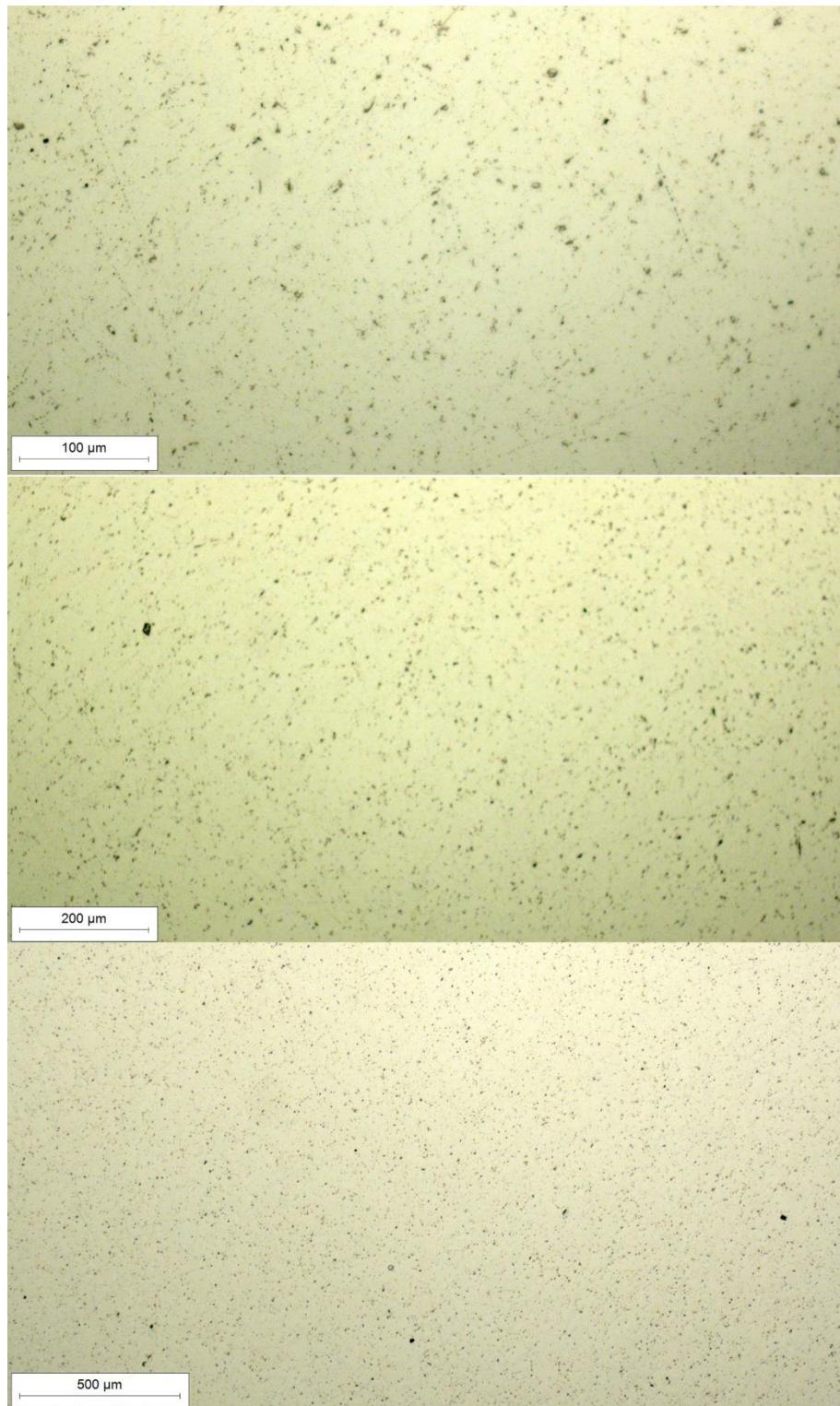
**Slika 36. Ispitivanje mikrostrukture uzorka**



**Slika 37. Mikrostrukutra uzorka A pod različitim povećanjima u početnom stanju**



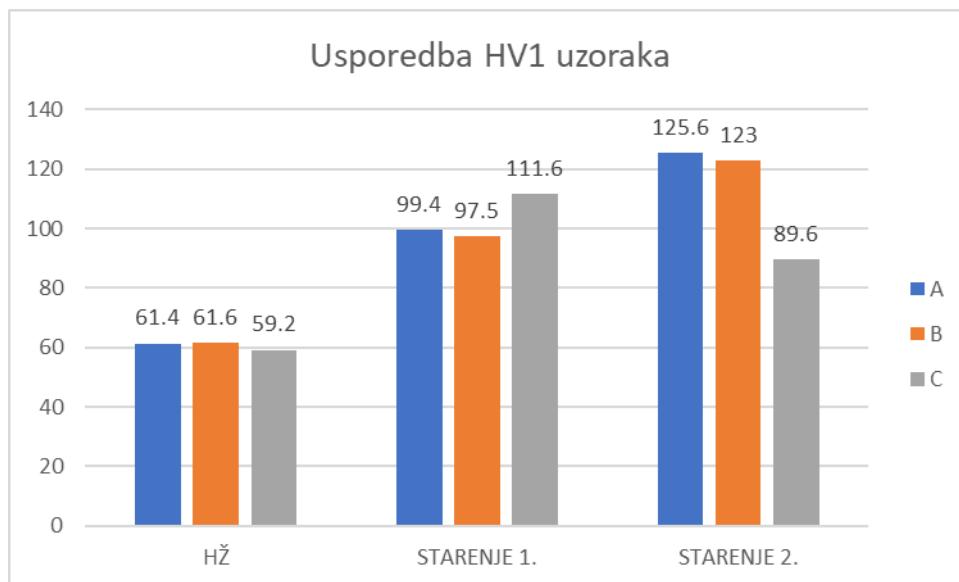
**Slika 38. Mikrostruktura uzorka B pod različitim povećanjima u početnom stanju**



**Slika 39.** Mikrostruktura uzorka C pod različitim povećanjima u početnom stanju

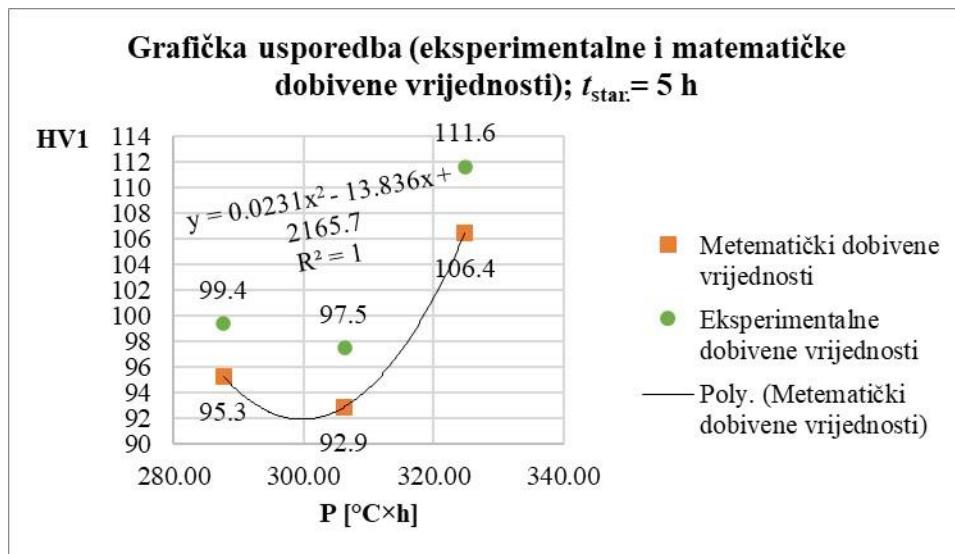
## 5. REZULTATI I DISKUSIJA

Usporedbom tvrdoća nakon pojedinih toplinskih obrada, vidi se iz histograma na slici 40 da se tvrdoća svih uzoraka nakon prvog starenja značajno povećala u odnosu na ono poslije homogenizacijskog žarenja. Nakon drugog starenja uzorci A i B imaju također značajan prirast tvrdoće dok kod uzorka C dolazi do značajnog pada tvrdoće. Promatrajući tvrdoću uzorka A i B nakon pojedinih toplinskih obradi, nema značajne razlike među tvrdoćama. Za uzorak A provedena je temperatura starenja od  $155\text{ }^{\circ}\text{C}$  dok za uzorak je ta temperatura  $165\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Razlika između tih temperatura nije velika što znači da i između tvrdoća neće biti velika razlika pošto su vremena starenja za uzorak A i B jednake vrijednosti. Razlog zašto kod uzorka C dolazi do pada tvrdoće pri temperaturi  $175\text{ }^{\circ}\text{C}$  i vremenu starenja od 10 h je to što atomi koji se nalaze unutar kristalne rešetke aluminija i koji uzrokuju distorziju te iste rešetke žele doći iz stanja neravnoteže u stanje ravnoteže, odnosno žele se otopiti. Još jedan bitan faktor je i difuzija atoma unutar kristalne rešetke koja je brža u odnosu na prvo starenje.

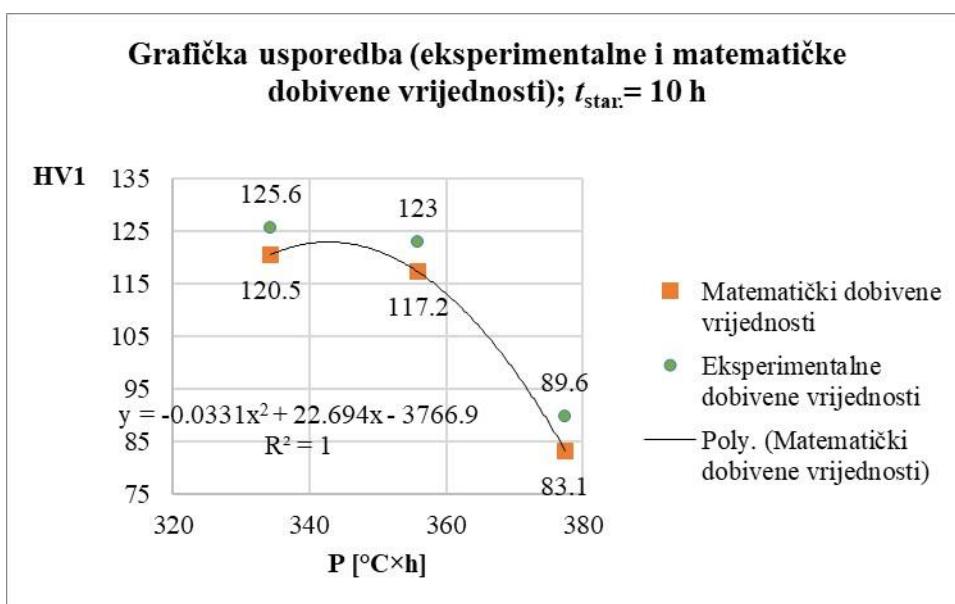


**Slika 40. Usporedba tvrdoća uzoraka**

Na slikama 41 i 42 uspoređeni su rezultati tvrdoće koje predviđen modelom i ostvarene pokusima.



**Slika 41.** Usporedba eksperimentalnih i matematičkih dobivenih vrijednosti tvrdoće za  $t_{star.} = 5 \text{ h}$



**Slika 42.** Usporedba eksperimentalnih i matematičkih dobivenih vrijednosti tvrdoće za  $t_{star.} = 10 \text{ h}$

Što se tiče valjanosti modela starenja, rezultati tog modela ukazuju na različitost eksperimentalnih i matematičkih vrijednosti. Vrijednosti relativnih pogreški prikazani su tablicom 12. i tablicom 13.

**Tablica 12. Relativne pogreške vrijednosti tvrdoća za  $t_{\text{star.}} = 5 \text{ h}$** 

$t_{\text{star.}} = 5 \text{ h}$				
$g_{\text{star.}} (\text{°C})$	$\text{HV1}_{\text{exp.}}$	$\text{HV1}_{\text{mat.}}$	$\Delta \text{HV1}$	Relativna pogreška (%)
155	99,4	95,3	4,1	4,30%
165	97,5	92,9	4,6	4,95%
175	111,6	106,4	5,2	4,89%

**Tablica 13. Relativne pogreške vrijednosti tvrdoća za  $t_{\text{star.}} = 10 \text{ h}$** 

$t_{\text{star.}} = 10 \text{ h}$				
$g_{\text{star.}} (\text{°C})$	$\text{HV1}_{\text{exp.}}$	$\text{HV1}_{\text{mat.}}$	$\Delta \text{HV1}$	Relativna pogreška (%)
155	125,6	120,4	5,2	4,14%
165	123	117,2	5,8	4,72%
175	89,6	83,1	6,5	7,25%

## 6. ZAKLJUČAK

Procesom starenja kod toplinsko očvrsnutih aluminijevih legura dobiva se viša tvrdoća, a i poboljšavaju se druga mehanička svojstva kao što su granica razvlačenja  $R_e$  i vlačna čvrstoća  $R_m$ . Zbog takvih poboljšanja mogu se primjenjivati u različitim područjima kao što su zrakoplovna industrija, automobiliška industrija, u sportu, u naftnim postrojenjima, u domaćinstvu itd. Razlog više tvrdoće i drugih mehaničkih svojstava je postojanje koherentnih precipitata koji se izlučuju tijekom procesa starenja. Pri različitim povećanjima na svim uzorcima uočene su dvije faze: crna i bijela faza. Bijela faza se odnosi na matricu aluminija koja je većim udjelom u mikrostrukturi dok crna faza označuje uključke (čestice) intermetalnih spojeva. Za leguru 6082 koja je bila podvrgнутa procesu starenja dolazi do izlučivanja koherentnih precipitata koji su spojevi aluminija i magnezija te magnezija i silicija. Ti precipitati poboljšavaju tvrdoću, granicu razvlačenja i vlačnu čvrstoću. Zaključak je da za svaku temperaturu u procesu umjetnog starenja postoji maksimalno vrijeme starenja pri kojoj se postiže maksimalna mehanička svojstva. Ako se prijeđe maksimalno vrijeme starenja, dolazi do pada vrijednosti mehaničkih svojstava. Kod uzoraka A i B koji su ispitivani eksperimentom, maksimalno vrijeme starenja tijekom procesa umjetnog starenja nije dostignuto, što se očituje još uvijek poboljšanim mehaničkim svojstvima. Kod uzorka C, maksimalno vrijeme starenja je prekoračeno što se očituje padom vrijednosti tvrdoće, a i vjerojatno i ostalih mehaničkih svojstava. Relativne pogreške vrijednosti tvrdoća izračunatih matematički i onih dobivenih eksperimentom za vrijeme starenja od 5 h su oko 5%, dok su relativne pogreške za vrijeme starenja od 10 h oko 7%. Različitost matematičkih i eksperimentalnih vrijednosti tvrdoća razlog su postojanja anomalija, odnosno nesavršenosti tijekom toplinske obrade. Uvidom u relativne pogreške, može se zaključiti da je model starenja vrlo dobar za proračunavanje tvrdoća.

## 7. LITERATURA

- [1] Filetin, T; Kovačiček, F; Indof, J. *Svojstva i primjena materijala*. Zagreb: FSB, 2019
- [2] Podhorsky, Rikard. *Tehnička enciklopedija*. 1963, 1.sv. (p.223-247)
- [3] <https://en.wikipedia.org/wiki/Nepheline> (Pristupljeno 02.09.2023.)
- [4] <https://en.wikipedia.org/wiki/Kaolinite> (Pristupljeno 02.09.2023.)
- [5] <https://en.wikipedia.org/wiki/Leucite> (Pristupljeno 02.09.2023.)
- [6] <https://en.wikipedia.org/wiki/Bauxite> (Pristupljeno 02.09.2023.)
- [7] <https://en.wikipedia.org/wiki/Alunite>. (Pristupljeno 02.09.2023.)
- [8] <https://edutorij.e-skole.hr/share/proxy/alfresco-noauth/edutorij/api/proxy-guest/e78bfca5-654d-4dcc-b431-7b505feb6fa4/kemija-1/m03/j08/index.html> (Pristupljeno 02.09.2023.)
- [9] <https://www.hnkyal.com/en/media/aluminum-application-industries-and-daily-life-2568>  
(Pristupljeno 22.08.2023.)
- [10] <https://investingnews.com/daily/resource-investing/industrial-metals-investing/aluminum-investing/aluminum-producing-countries/> (Pristupljeno 25.08.2023.)
- [11] Liščić, Božidar; Tensi, Hans M; Canale, Lauralice CF; Totten, George E. *Quenching Theory and Technology*. CRC Press, 2010
- [12] Davis, JR. *Alloying: Understanding the basics*. Ohio: ASM International, Materials Park, 2001
- [13] Cajner, F; Stupnišek, M. *Osnove toplinske obradbe metala*, FSB Zagreb: 2001

- [14] Štefanović, Duško. *Tehnička enciklopedija*. 1997, 13.sv. (p.105-117)
- [15] ASM Handbook. *Heat Treating*. Ohio: ASM International, 1991
- [16] Keßler, O. *Precipitation Hardening of Alminum Alloys - Part 1 qnd Part 2*
- [17] Kraut, B. *Strojarski priručnik*. Ljubljana: Tehnička knjiga Zagreb, 1987
- [18] Filetin, T; Franz, M; Španiček, Đ; Ivušić, V. *Svojstva i karakteristike materijala (Katalog opisa)*. Zagreb: 2012
- [19] <https://www.twi-global.com/what-we-do/services-and-support/failure-analysis-and-repair/microscopy/scanning-electron-microscopy-sem-analysis-and-imaging> (Pristupljeno 22.05.2023.)
- [20] <https://www.purdue.edu/ehps/rem/laboratory/equipment%20safety/Research%20Equipment/sem.html> (Pristupljeno 05.09.2023.)
- [21] ASM Handbook. *Materials characterization*. Ohio: ASM International, Metals Park, 1986
- [22] <https://www.iitk.ac.in/dordoldn/energy-dispersive-spectroscopye> (Pristupljeno 05.09.2023.)
- [23] <https://nano.oxinst.com/campaigns/what-is-eds/edx> (Pristupljeno 05.09.2023.)
- [24] Schauperl, Z. *Karakterizacija materijala - podloge sa predavanja*, FSB 2020
- [25] Mrowka – Nowotnik, G. *6xxx Alloys: Chemical Composition and Heat Treatment*, Boca Raton, 2018