

Utjecaj parametara starenja na svojstva aluminijske legure AlSi1MgMn

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: **2025-03-03**

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 aluminijske legure AlSi1MgMn**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Influence of aging parameters on the properties of AlSi1MgMn aluminium alloy**

Opis zadatka:

Aluminijske 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 aluminijske 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.
3. rok: 21. i 22.9. 2023.

Predviđeni datumi obrane:

2. rok (izvanredni): 14. 7. 2023.
3. rok: 25. 9. – 29. 9. 2023.

Zadatak zdao:

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. Lijewane 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 - Konstruktaali..... | 14 |
| 2.5. Precipitacijsko očvrstnuće 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 očvrnuća [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 očvrnuća [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 mikroskopa: 1 Tijelo mikroskopa, 2 Stolić, 3 Dijelovi za fokusiranje slike, 4 Sustava za iluminaciju, 5 Optičke komponente [24] | 25 |
| Slika 18. Dimenzije uzoraka..... | 27 |

| | | |
|-----------|---|----|
| Slika 19. | Difraktogram uzoraka [25] | 28 |
| Slika 20. | Homogenizacijsko žarenje uzoraka | 29 |
| Slika 21. | Gašenje uzoraka 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 uzoraka..... | 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 – $t_{\text{star.}} = 5 \text{ h}$ | 37 |
| Slika 33. | Ovisnost tvrdoće o temperaturi starenja – $t_{\text{star.}} = 10 \text{ h}$ | 38 |
| Slika 34. | Ovisnost tvrdoće o parametru starenja – $t_{\text{star.}} = 5 \text{ h}$ | 39 |
| Slika 35. | Ovisnost tvrdoće o parametru starenja – $t_{\text{star.}} = 10 \text{ h}$ | 39 |
| Slika 36. | Ispitivanje mikrostrukture uzoraka | 40 |
| Slika 37. | Mikrostrukutra 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_{star} . = 5 h | 45 |
| Slika 42. | Usporedba eksperimentalnih i matematičkih dobivenih vrijednosti tvrdoće za t_{star} . = 10 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 aluminijskih legura [1] | 7 |
| Tablica 4. | Svojstva gnječanih aluminijskih legura [1] | 8 |
| Tablica 5. | Faze za precipitacijsko očvrnuće i aluminijeve legure u kojima se pojavljuje očvrnuće [11]..... | 19 |
| Tablica 6. | Parametri precipitacijskog očvrnuća uobičajeno korištenih aluminijskih 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 |
| ϑ_t | °C | talište |
| ρ | kg/m ³ | gustoća |
| E | MPa | modul elastičnosti |
| G | mΩ/mm ² | električna vodljivost |
| HV | HV1 | tvrdoća |
| ϑ_{star} | °C | temperatura starenja |
| $t_{star.}$ | h | vrijeme starenja |
| P | °C·h | parametar starenja |
| $\vartheta_{zarenja}$ | °C | temperatura žarenja |
| D | m | promjer uzorka |
| t | m | debljina uzorka |
| d | m | duljina dijagonale |
| α | 1/K | toplinska rastezljivost |
| F | N | sila |

SAŽETAK

U radu se istražuje utjecaj parametara starenja na tvrdoću aluminijske legure 6082. U teorijskom dijelu obuhvaćena su općenito svojstva tehničkog aluminija, njegovo legiranje, podjela precipitacijski očvrstljivih legura aluminija, dijagrami stanja aluminijskih legura te metode karakterizacije aluminijskih legura: ispitivanje tvrdoće, EDS/EDX analiza, SEM analiza i svjetlosna mikroskopija. U eksperimentalnom dijelu provedeno je određivanje kemijskog sastava uzoraka aluminijske legure 6082, mjerenje 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 aluminijske legure 6082 u ovisnosti o temperaturi i vremenu starenja.

Ključne riječi: tehnički aluminij, legiranje, precipitacijsko očvrstnuće, 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 mikrostrukтури aluminija pojavljuju se čestice, odnosno precipitati koji očvršćuju leguru te daju poboljšana mehanička svojstva. Procesom starenja mogu se očvrstnuti 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, mjerenje tvrdoće metodom Vickers, mjerenje 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

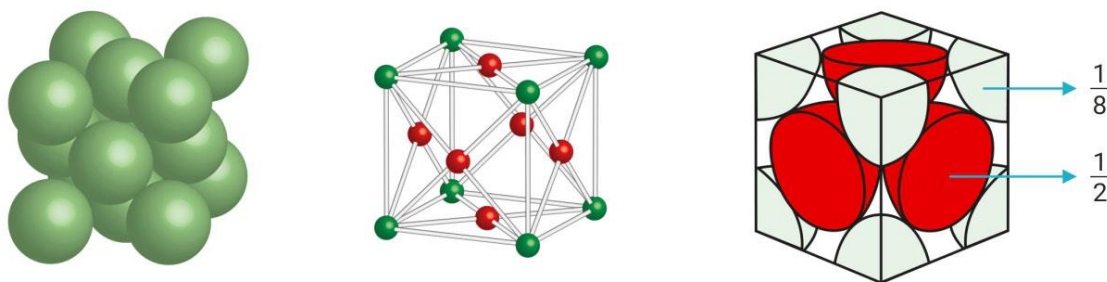
Ovim poglavljem obuhvaćeni su podaci o fizikalnim i mehaničkim svojstvima tehničkog aluminijske legure, legure aluminijske koje se toplinski očvršćuju te općenita podjela toplinsko očvrstljivih aluminijskih legura.

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 aluminijske legure je aluminijski oksid (Al_2O_3), odnosno glinica koja se Bayerovim postupkom odvajaju iz prirodnih sirovina koje sadrže aluminijske 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 aluminijski oksid podvrgnut je elektrolizi u rastopljenom kriolitu postupkom Heroult 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 aluminijske legure treba utrošiti veliku količinu električne i toplinske energije [1, 2].



Slika 1. Minerali za dobivanje aluminijske legure: 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 korozijska 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].

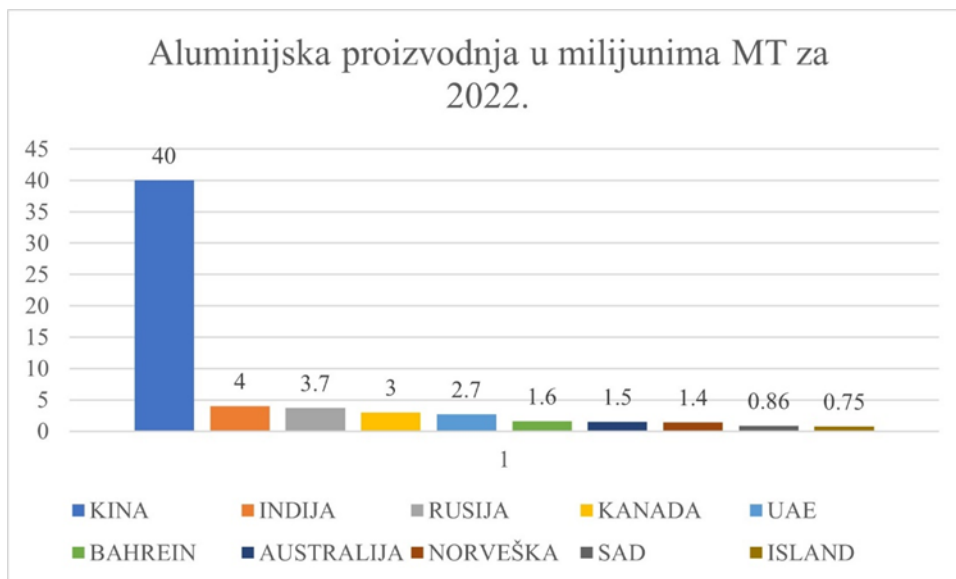
Tablica 1. Fizikalna i mehanička svojstva tehničkog aluminija [1]

| | | |
|----------------------------------|---------------------|-----------|
| Gustoća ρ | kg/m ³ | 2700 |
| Talište T_t | °C | 660 |
| Modul elastičnosti | N/mm ² | 69000 |
| Toplinska | 10 ⁻⁶ /K | 23,8 |
| Električna | m/Ωmm ² | 36...37,8 |
| Granica | N/mm ² | 20...120 |
| Vlačna čvrstoća* | N/mm ² | 40...180 |
| Istezljivost*A | % | 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 gnječenom i u lijevanom stanju. Osim ove podjele legure aluminija se mogu podijeliti na toplinski očvrstljive i toplinski neočvrstljive. Neke od legura prikazane su u tablici 2. [1].

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

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

2.2.1. Lijewane legure

Lijewane 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. Aluminijske legure mogu se ljevati jednako dobro na sva tri osnovna načina: u pijesak, u kokilu i tlačno, ako je izbor dobro izvršen, što je povoljnije nego li kod ostalih metala. Neke od njih mogu se dodatno precipitacijski očvrnuti, 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 korozijska postojanost i žitkost taljevine od veće važnosti nego li čvrstoća [1].

Tablica 3. Svojstva lijevanih aluminijskih legura [1]

| Mehanička otpornost | Livljivost | 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 aluminijskih legura temelji se na kemijskom sastavu i mogućnosti precipitacijskog očvrnuća. Od legura koje očvršćuju hladnim deformiranjem zahtjeva se dovoljna čvrstoća i krutost u hladnom stanju, kao i dobra korozijska postojanost. Većina ovih legura ima mikrostrukturu koja se potpuno sastoji od čvrste otopine. To je dodatni faktor u prilog njihovoj velikoj duktilnosti i velikoj korozijskoj postojanosti. Obično se legure koje su

oblikovane hladnim deformiranjem isporučuju u mekom stanju ili nakon određenog stupnja hladnog ugnječanja. 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. Očvrstnuće postignutog precipitacijom je veće od onog hladnim oblikovanjem pa je precipitacijsko očvrstnuće 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 očvrstnuće [1].

Tablica 4. Svojstva gnječenih aluminijevih legura [1]

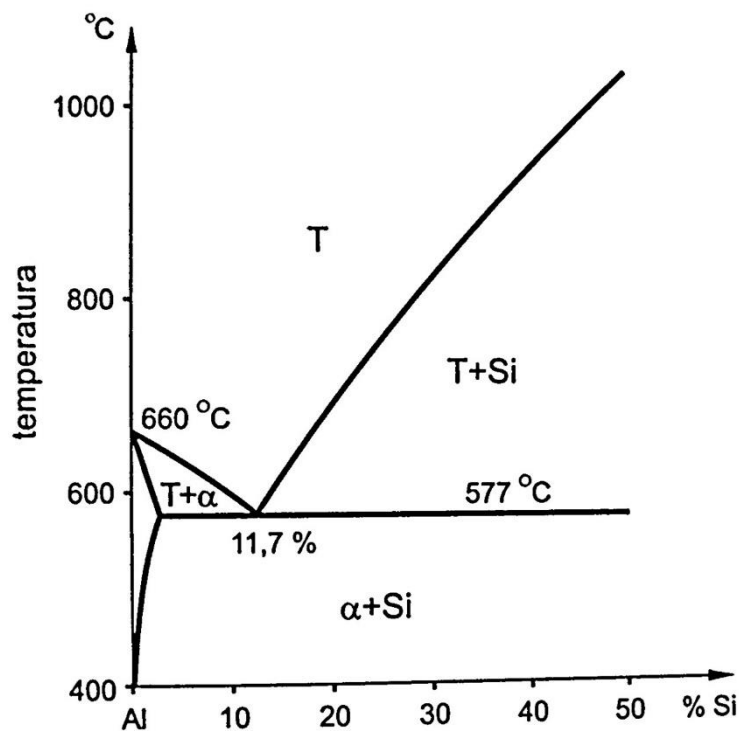
| Oznaka legure | Toplinsko očvrstljive | Eloksal kvalitete | Otpornost u morskoj | Za statički opterećene | Dobro zavarljiv | Za obradu na automatima |
|---------------|-----------------------|-------------------|---------------------|------------------------|-----------------|-------------------------|
| 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

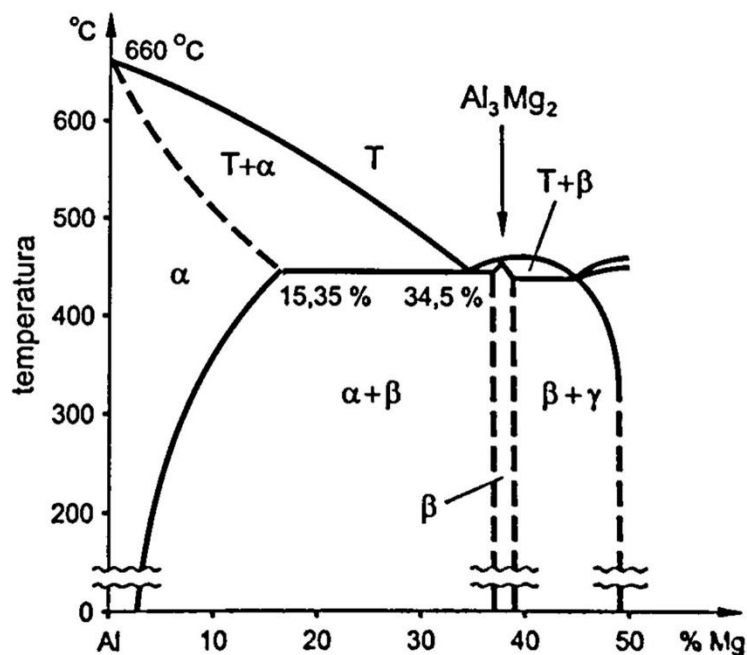
Silicij je eutektičkog tipa s eutektikom pri 11,7 % Si i temperaturi 577 °C. Pri toj temperaturi se u kristalima mješancima aluminija (alfa) otapa 1,65 % Si, a pri temperaturi 300 °C još samo 0,07 %Si. Primjenom polužnog pravila izlazi da se eutektik sastoji oko 90 % kristala mješanca aluminija, a ostatak je čisti silicij. Prema tome svojstva pretežno ovise o žilavim mješancima aluminija, a manje o krhkom 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

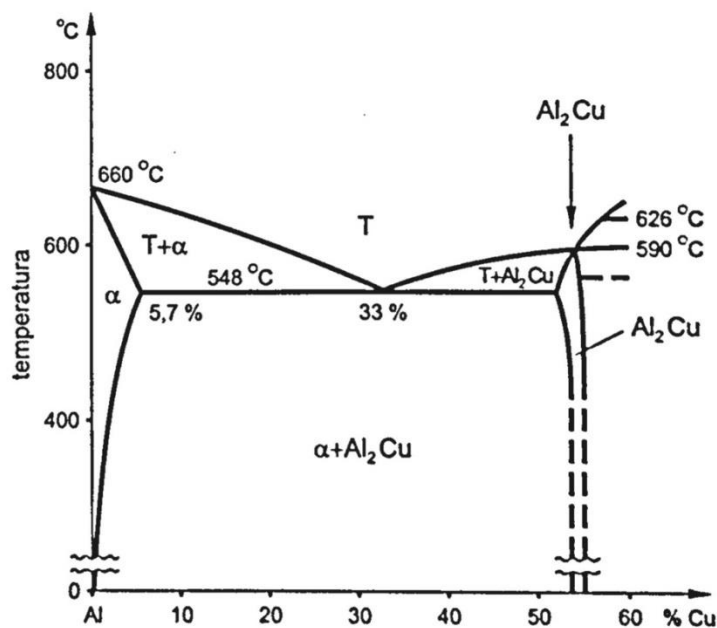
Magnezij pokazuje da aluminij i magnezij tvore intermetalni spoj Al_3Mg_2 (beta) kod 37,5 % Mg. Ta faza je u legurama aluminija s magnezijem nepoželjna iz dva razloga. Vrlo je tvrda i zato slabo oblikovljiva deformiranjem, a kod djelovanja korozivnog medija prelazi prva u otopinu zbog visokog udjela 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_3Mg_2 . 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 očvršnuće je beznačajan. Intermetalni spoj Al_3Mg_2 izlučuje se u obliku krupnih čestica, ponajprije po granicama zrna. Kod legura s više od 7 % Mg nastaje oko aluminijevih zrna mreža precipitata Al_3Mg_2 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_2Cu 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. Lijewane legure eutektičkog (33 % Cu) imaju slabu žitkost i nisu u uporabi. Zbog svega toga u svim legurama nastoji se izbjeći primarne kristale Al_2Cu . 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_2Cu . To je temeljni preduvjet za toplinsko očvršnuće 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 legiranih 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 očvrnuća. Najviše čvrstoće postižu se sustavima koji imaju iste mogućnosti precipitacijskog očvrnuća, 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 očvrnuće može se primijeniti i na druge legure pogodnog sastava drugih sustava u kojima se mijenja topljivost legiranih elemenata s temperaturom [1].

2.4. Svojstva i primjena toplinsko očvrstljivih aluminijskih legura

Od toplinsko očvrstljivih legura na raspolaganju su osnovne skupine legura s mnogostrukim varijantama. Toplinske očvrstljive aluminijske legure podvrgavaju se homogenizacijskom žarenju, gašenju te starenju (dozrijevanju) legure. Toplinsko očvrstljive aluminijske 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 legiranim 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 niskougličnih 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 korozijsku postojanost kao ostale aluminijske 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/mm² i R_m do 450 N/mm², 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 (Mg₂Si), čine ga toplinski obradljivim. Iako ne puno čvršći u odnosu na 2xxx i 7xxx legure, 6xxx

legure imaju dobru oblikovljivost, zavarljivost, obradljivost, i korozijsku postojanost, s srednjom čvrstoćom. Imaju $R_m < 330 \text{ N/mm}^2$, umjetnim starenjem $R_{p0,2}$ oko 240 N/mm^2 , a prirodnim starenjem oko 110 N/mm^2 . Ove legure otporne su na koroziju, uvjetno pogodne za zavarivanje, anodizaciju i poliranje. U hladno očvrnutom stanju i precipitacijski očvrnutom 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.

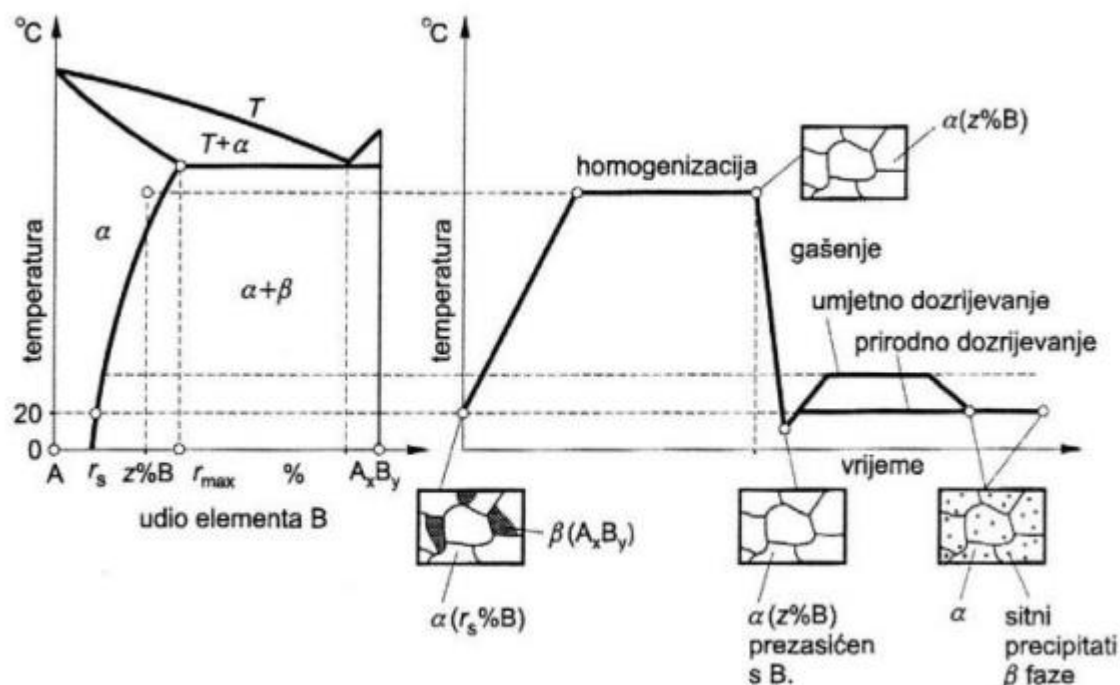
2.4.3. 7xxx legure aluminija - Konstruktaali

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 očvrnutom stanju od oko 550 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].

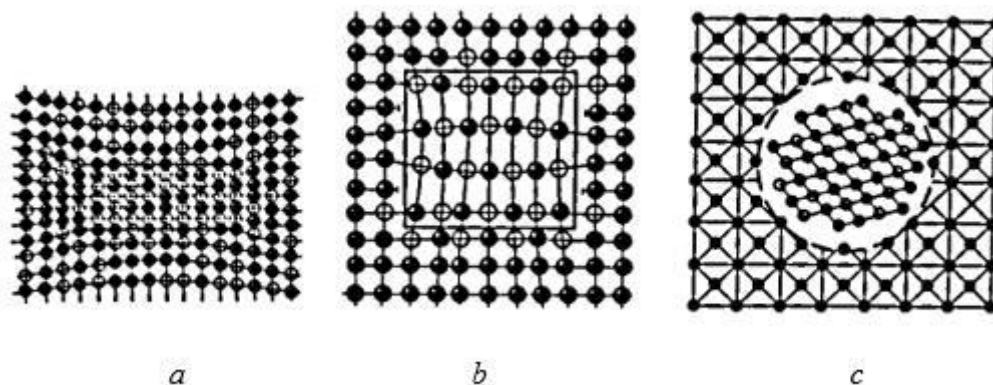
2.5. Precipitacijsko očvršnuće aluminijevih legura

Precipitacijsko očvršnuće 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 temperature od oko 500 °C očvrstne 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 očvršnuća 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 °C. Takva obrada bila prozvana je precipitacijsko očvršćivanje“ ili „precipitacijsko otvrdnjavanje“. 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 koherentnih precipitata unutar rešetke osnovnog kristala mješanca [1].

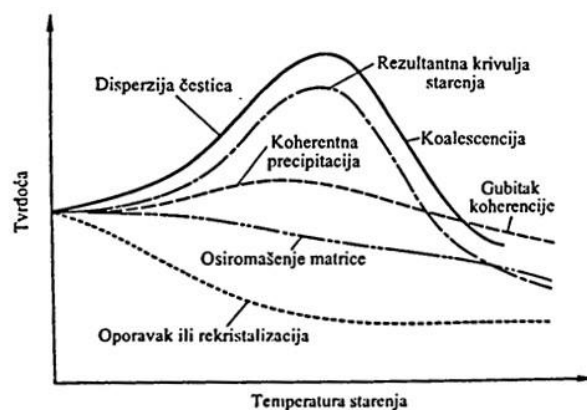


Slika 8. Shematski prikaz precipitacijskog očvršnuća [13]

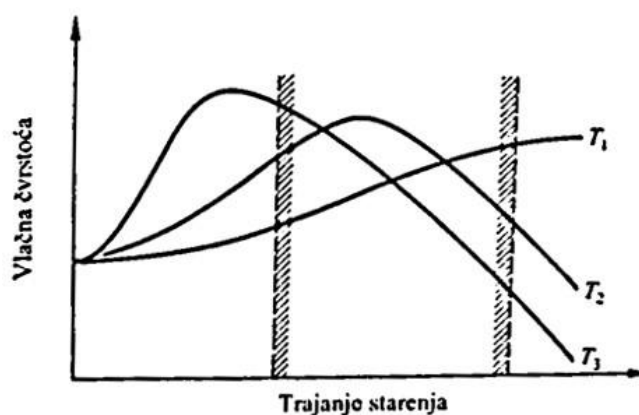


Slika 9. Tipovi precipitata: a Koherentni, b Polukoherentni, c Nekoherentni [1]

Ako se taljevina hladi 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 očvršćenih Al - legura uključuju:

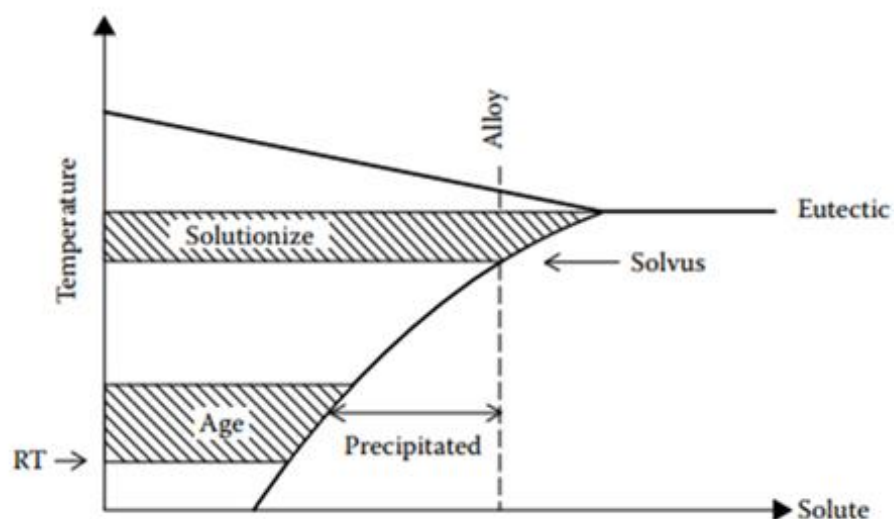
- Al – Cu legure (očvršćenje iz CuAl_2)
- Al – Cu – Mg (magnezij jača precipitaciju)
- Al – Mg – Si (očvršćenje iz Mg_2Si)
- Al – Zn – Mg (očvršćenje iz MgZn_2)
- Al – Zn – Mg – Cu sustav [15].

Precipitacijsko očvršnuće 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 $0,80 \dots 0,95 T_i$; 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 očvršnuća [11]

Tablica 5. Faze za precipitacijsko očvrnuće i aluminijske legure u kojima se pojavljuje očvrnuće [11]

| Faze | Elementi | Intermetalni spoj | Gnječene serije | Lijewane serije |
|----------------|---------------------|-------------------|-----------------|-----------------|
| θ' | Al - Cu | Al_2Cu | 2xxx | 2xx |
| S' | Al - Cu - Mg | Al_2Cu | 2xxx | 2xx |
| T ₁ | Al - Cu - Li | Al_2Cu | 2xxx(Li) | — |
| β'' | Mg - Si | Mg_5Si_6 | 6xxx | 3xx |
| Q'' | Al - Cu - Mg - Si | | 2xxx, 6xxx | 3xx |
| η' | Al - (Cu) - Mg - Zn | $(Al, Cu)MgZn_2$ | 7xxx | 7xx |

Tablica 6. Parametri precipitacijskog očvrnuća uobičajeno korištenih aluminijevih legura [16]

| Legura | Temperatura starenja $\vartheta_{star.}$ (°C) | Vrijeme starenja $t_{star.}$ (h) | Temperatura žarenja $\vartheta_{zarenja}$ (°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 dijamentne piramide opterećene silom F . Jednaka je omjeru sile i površine oplošja utisnuća što ga ostavlja piramida (s kutom 136°), izražene pomoću dijagonalne baze d . Izračun tvrdoće prikazan je jednačbom (1):

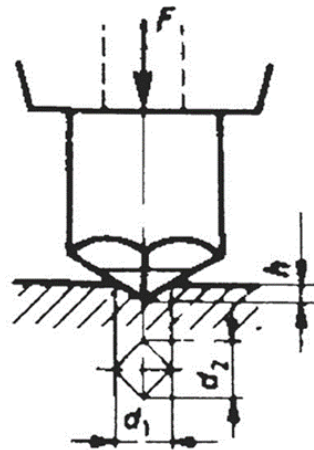
$$HV = 0,189 \cdot \frac{F}{d^2} \quad HV = 0,102 \cdot \frac{F}{A} \quad A = \frac{d^2}{2\sin\left(\frac{136}{2}\right)} \quad d = \frac{d_1+d_2}{2} \quad (1)$$

Gdje je: F – sila, N

d – dijagonala baze utisnuća, mm

A – površina utisnutog plašta priamide, mm²

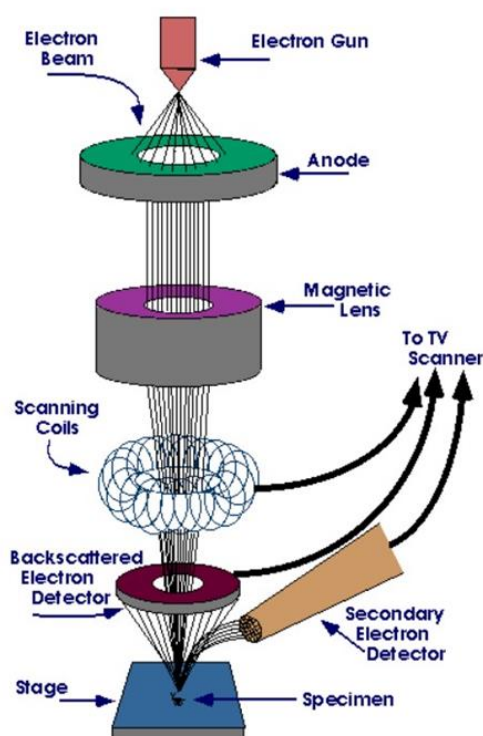
Primjenjuje se za sve metalne konstrukcijske materijale. Primjena Vickersove tvrdoće analogna je primjeni tvrdoće po Brinellu s tim da je područje mjerenja znatno prošireno (od olova pa sve do tvrdih metala). Zbog malog otisnuća mogu se mjeriti tvrdoće tankih slojeva, pa čak i pojedinih strukturnih faza. 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 slika visoke rezolucije. Omogućuje analizu mnogih različitih vrsta uzoraka, 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 objektivna. 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 kemijskih sastava na slici. Sekundarni elektroni, emitirani blizu površine uzorka, daju informacije o topografiji površine [19].



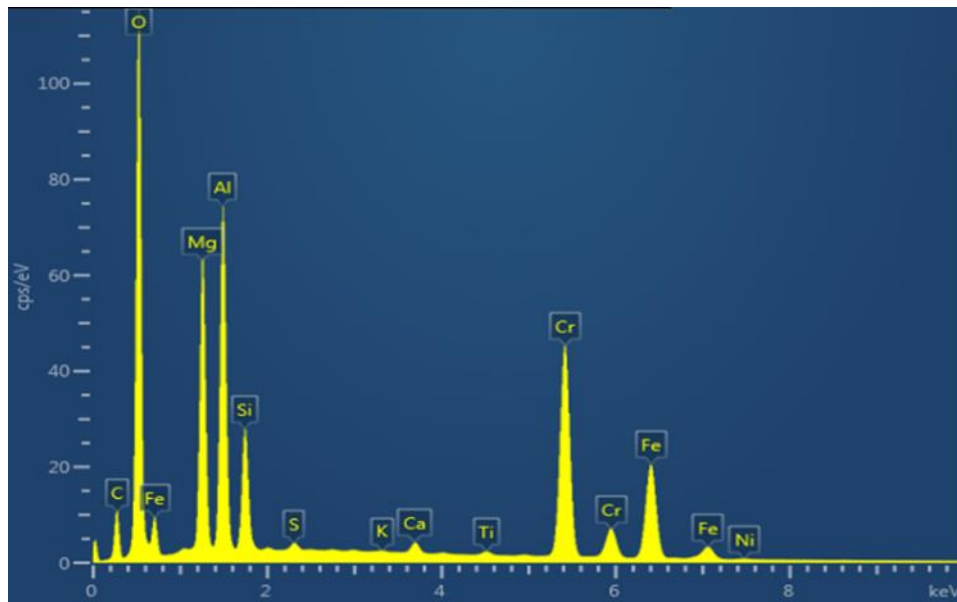
Slika 14. SEM analiza [20]

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 uzoraka, EDS analiza može otkriti elemente u koncentracijama manjim od 1 μ g/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 intenzitet 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 oštećuje 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 uzoraka 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 mikroskopa: 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 svjetla 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 objektivne
- 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:

- Objektivni – formiraju primarnu sliku, tj. sakupljaju što je moguće više svjetla s uzorka i kombinirajući to svjetlo stvaraju sliku (numerička apertura objektiva); Objektivni s konačnim fokusom – konačni optički sustav i fokusna udaljenost od 160 mm; Objektivni s beskonačnim fokusom – beskonačni optički sustav i fokusna udaljenost do 200 mm
- Okulari – povećavaju primarnu sliku (koju mikroskop stvara 250 mm od oka), mjerenje, brojanje, uspoređivanje, lociranje strukturnih faza, usklađeni sa objektivima (uvijek se koriste objektivni 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

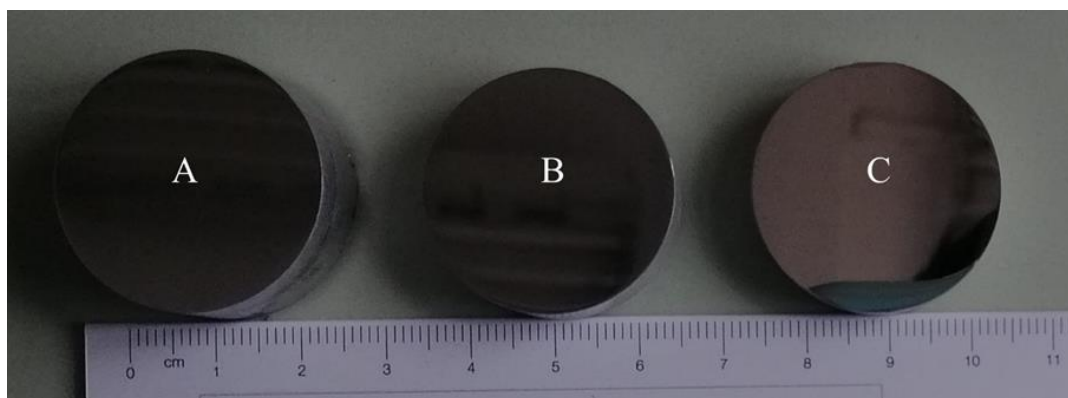
Eksperimentom je obuhvaćeno određivanje kemijskog sastava uzoraka, mjerenje dimenzija, toplinska obrada homogenizacijskog žarenja i starenje uzoraka. Ispitana je tvrdoća metodom Vickers i analiza mikrostrukture. Temeljem rezultata tvrdoća određen je matematički model starenja.

4.1. Kemijski sastav i dimenzije uzoraka

Kemijski sastav uzoraka legure 6082 iz serije legura 6xxx aluminijska, 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 uzoraka izmjerenu su pomoću pomičnog mjerača s podijeljenom skalom od 0,01 mm. Dimenzije uzoraka prikazani su tablicom 7. i na slici 18. dok je kemijski sastav uzoraka prikazan tablicom 8. i difraktogramom na slici 19.

Tablica 7. Dimenzije uzoraka

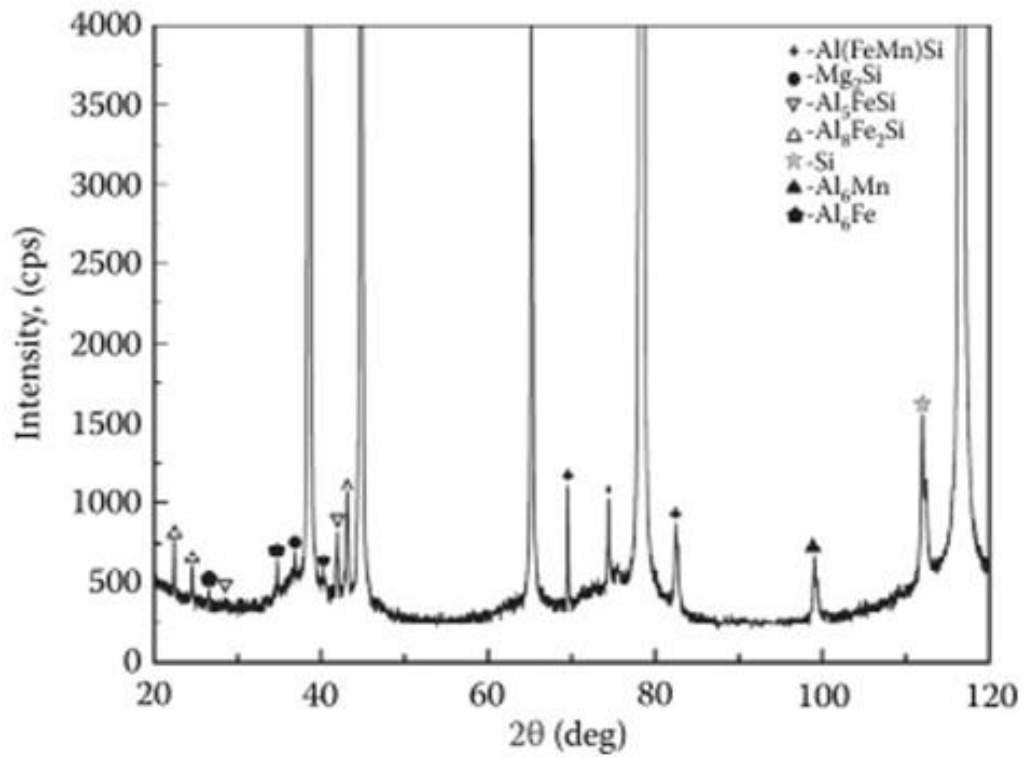
| Uzorak | Promjer D (mm) | Debljina t (mm) |
|--------|------------------|-------------------|
| A | 30 | 14 |
| B | 30 | 8 |
| C | 30 | 7 |



Slika 18. Dimenzije uzoraka

Tablica 8. Kemijski sastav uzoraka

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



Slika 19. Difraktogram uzoraka [25]

4.2. Toplinska obrada uzoraka

Toplinska obrada odrađena 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 uzoraka 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 uzoraka navedeni su u tablici 9. i na shematskim prikazima (slika 22. – 24.).



Slika 20. Homogenizacijsko žarenje uzoraka

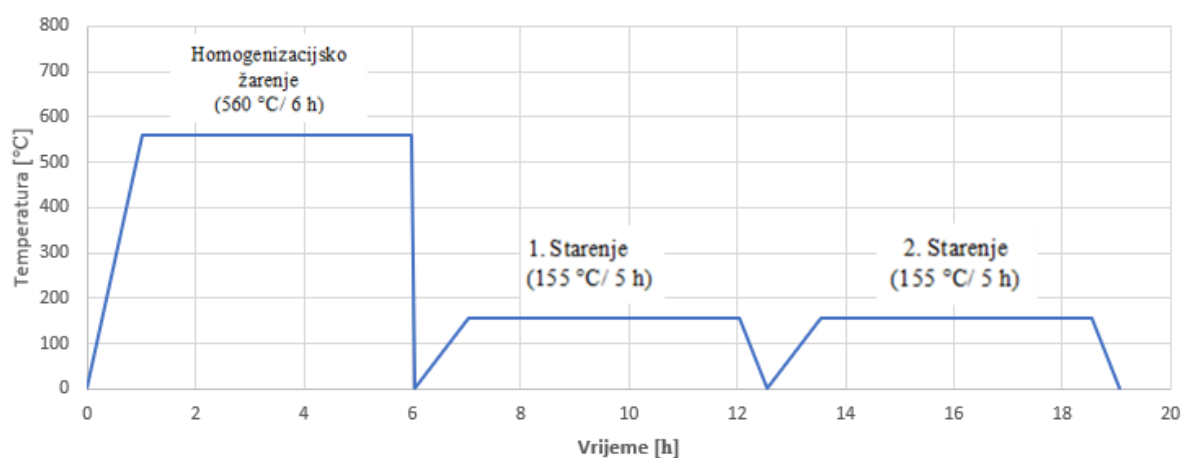


Slika 21. Gašenje uzoraka u vodi

Tablica 9. Parametri pojedinih toplinskih obradi

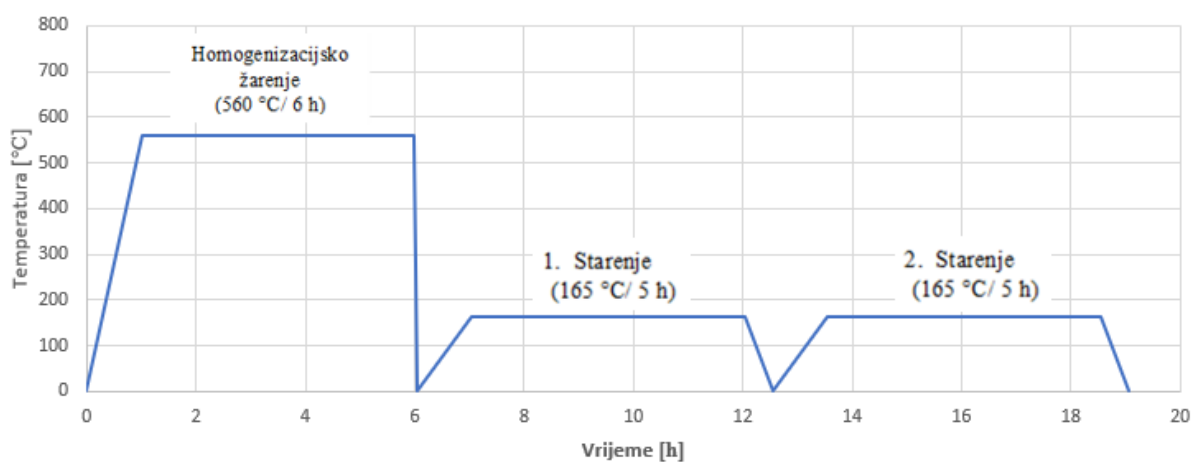
| Uzorci/Stanje | Homogenizacijsko žarenje | Prvo starenje | Drugo starenje |
|---------------|--------------------------|---------------|----------------|
| A | 560 °C/ 6 h | 155 °C/ 5 h | 155 °C/ 5 h |
| B | 560 °C/ 6 h | 165 °C/ 5 h | 165 °C/ 5 h |
| C | 560 °C/ 6 h | 175 °C/ 5 h | 175 °C/ 5 h |

Shematski prikaz procesa (Uzorak A)

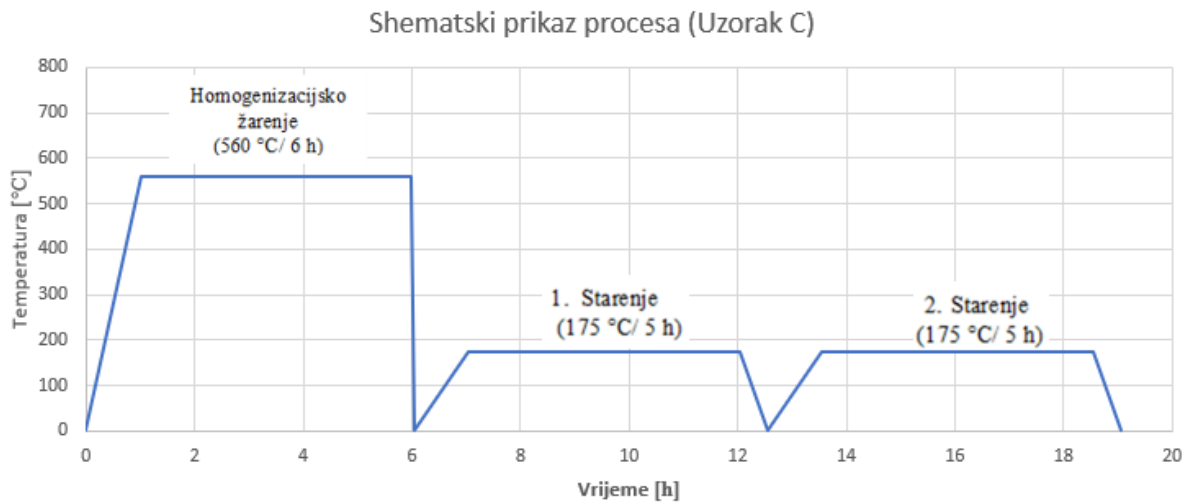


Slika 22. Shematski prikaz toplinskih obrada – uzorak A

Shematski prikaz procesa (Uzorak B)



Slika 23. Shematski prikaz toplinskih obrada – uzorak B



Slika 24. Shematski prikaz toplinskih obrada – uzorak C

4.3. Ispitivanje tvrdoće uzoraka

Tvrdoća uzoraka 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 uzoraka nakon završetka svake toplinske obrade prikazan je u tablici.

Tablica 10. Vrijednosti tvrdoća uzoraka nakon toplinske obrade

| Uzorak | | Tvrdoća uzoraka HV1 | | | | | | | | |
|--------|--------|---------------------|------|-------|------|------|-----|------|-------|------|
| | | 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

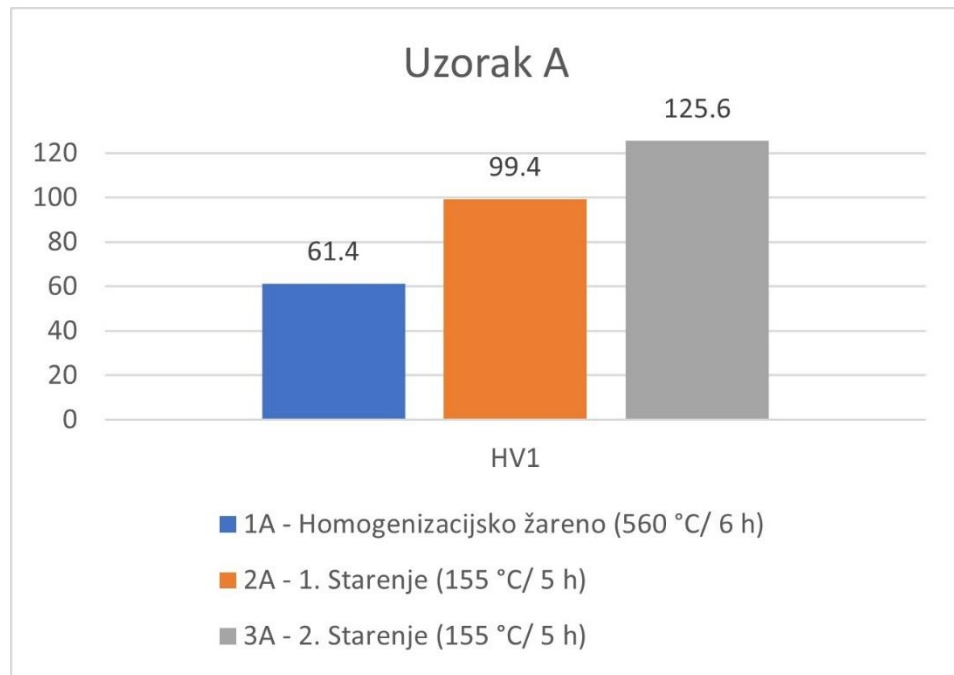
2B – uzorak nakon prvog starenja na 165 °C/ 5 h

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

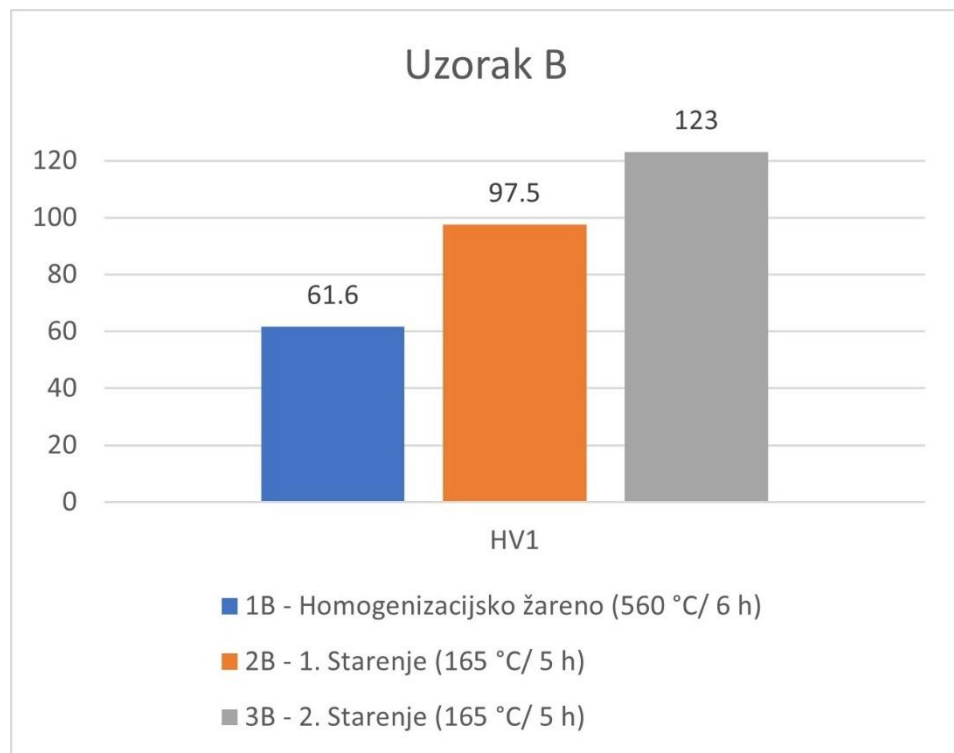
3A – uzorak nakon drugog starenja na 155 °C/ 5 h

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

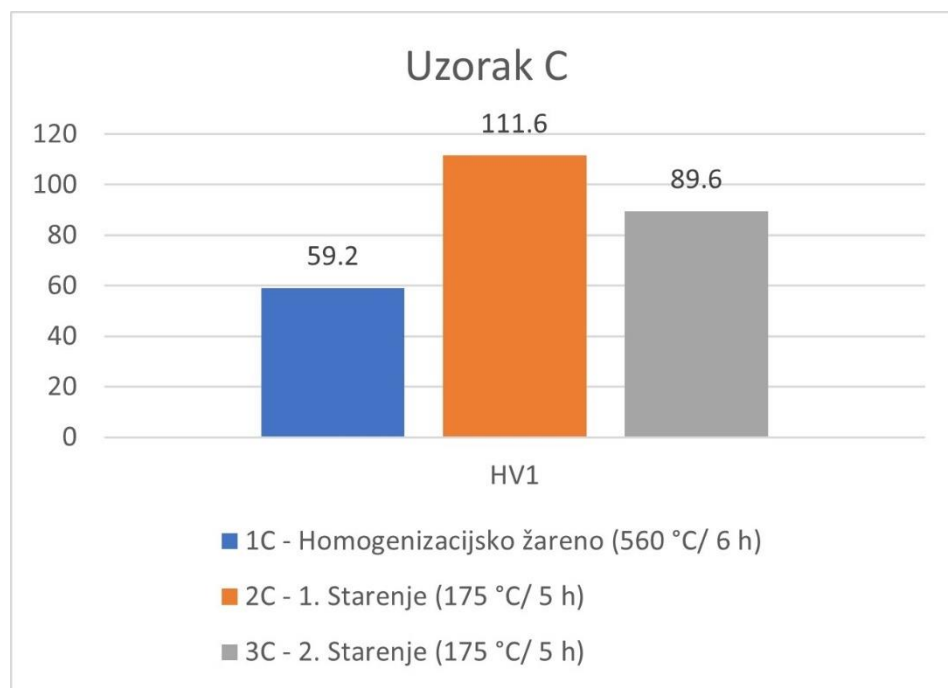
3C – uzorak nakon drugog starenja na 175 °C/ 5 h



Slika 25. Histogram tvrdoća – uzorak A



Slika 26. Histogram tvrdoća – uzorak B



Slika 27. Histogram tvrdoća – uzorak C



Slika 28. Ispitivanje tvrdoće uzoraka

4.4. Model starenja

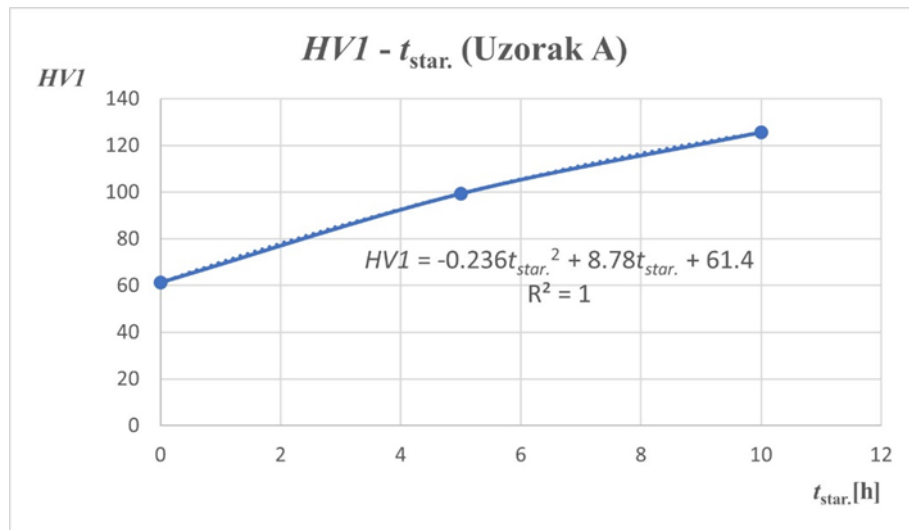
Parametri koji određuju toplinski proces starenja su temperatura i vrijeme starenja, odnosno proces ovisi o temperaturi i vremenu. Osim vremena i temperature, postoji još jedan parametar o kojem ovisi proces starenja, a to je parametar starenja P i dan je jednadžbom (2):

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

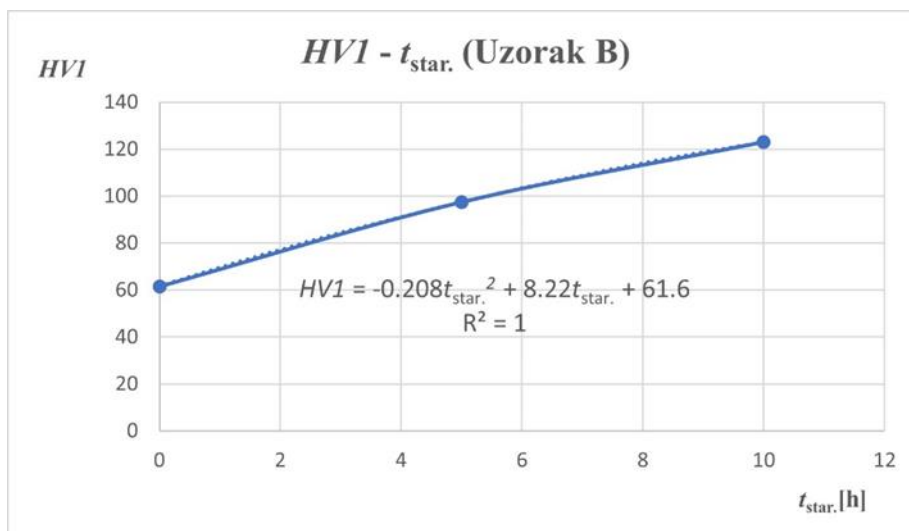
Parametar P također ovisi o temperaturi i vremenu. Model starenja se povezuje sa temperaturom, vremenom i parametrom starenja kao vrijednost tvrdoće HV1 u obliku funkcija. Te funkcije nam daju predodžbu kako će se ponašati tvrdoća pri određenim temperaturama, vremenima ili parametrima starenja. Važni 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 uzoraka

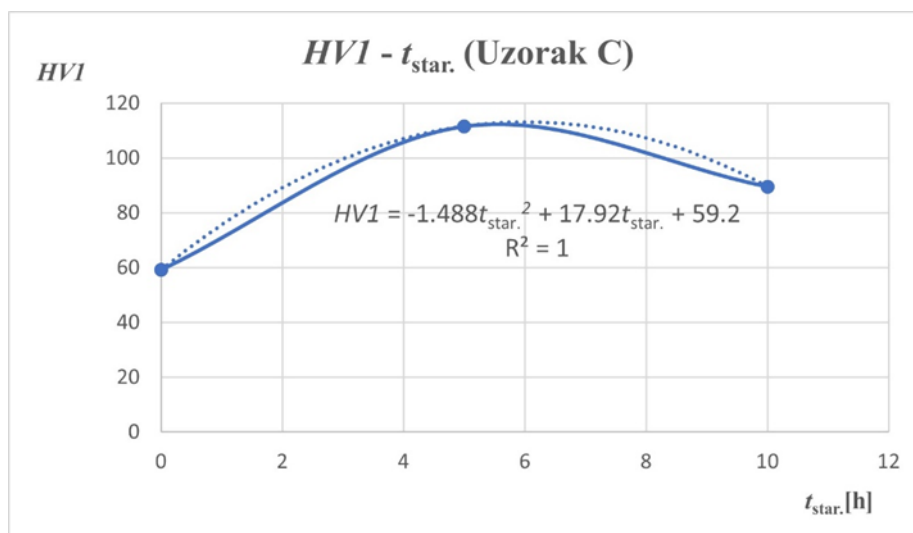
| Uzorak | HV1 _{max} | t_{max} (h) | $\vartheta_{star.}$ (°C) |
|--------|--------------------|---------------|--------------------------|
| A | 143 | 18,6 | 155 |
| B | 142,8 | 19,8 | 165 |
| C | 113,2 | 6,02 | 175 |



Slika 29. Ovisnost tvrdoće o vremenu starenja – uzorak A



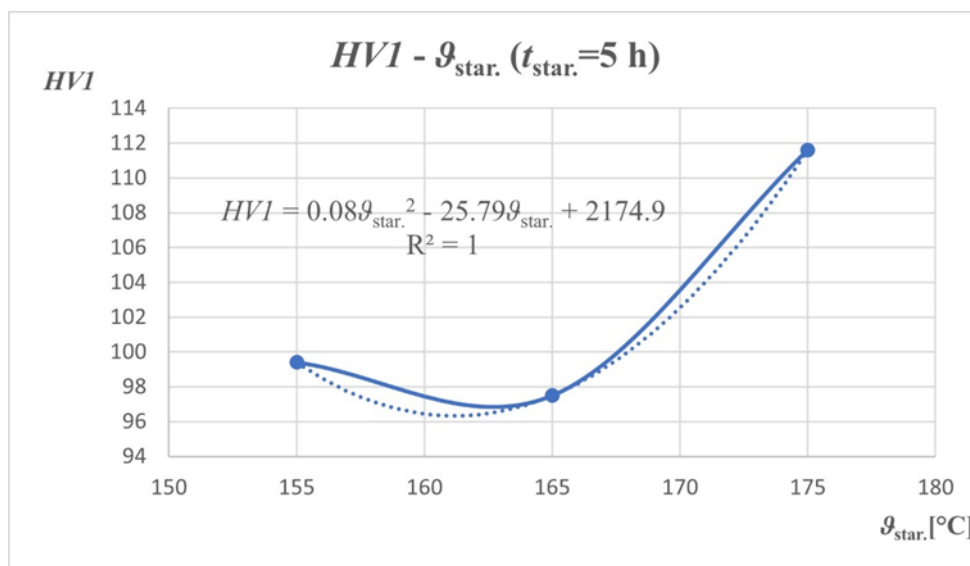
Slika 30. Ovisnost tvrdoće o vremenu starenja – uzorak B



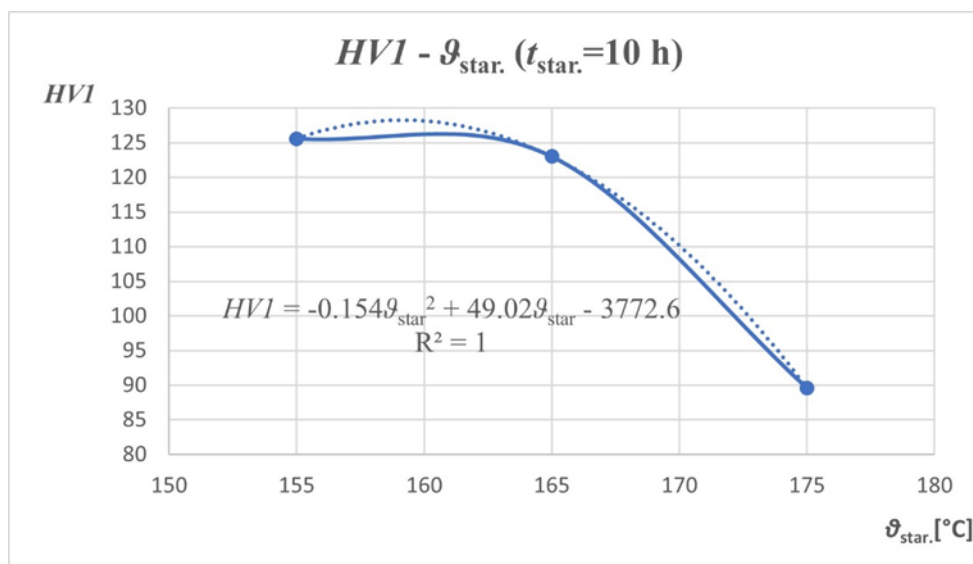
Slika 31. Ovisnost tvrdoće o vremenu starenja – uzorak C

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.

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



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



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

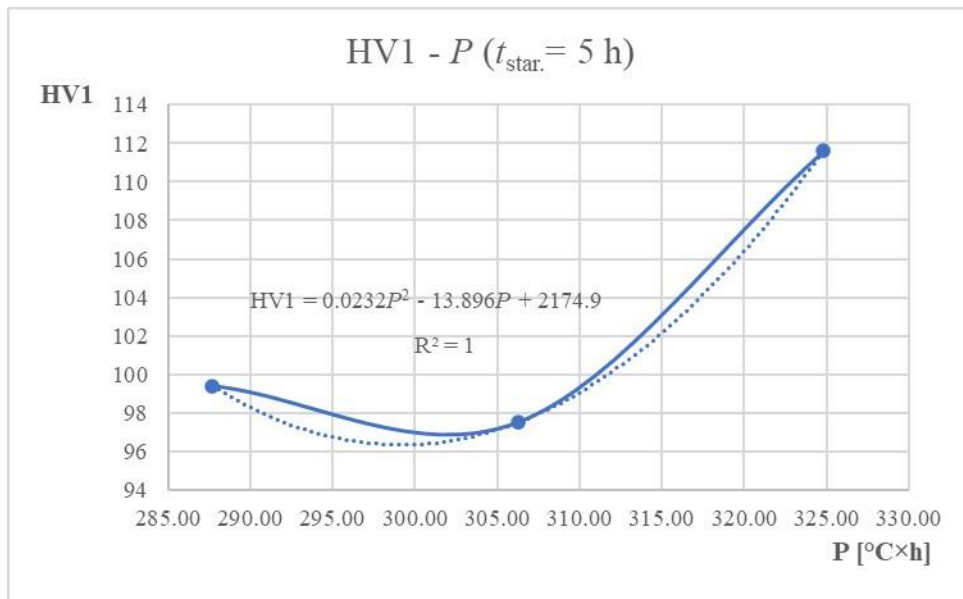
$$\vartheta_1 = 171,5 \text{ }^{\circ}\text{C} \approx 172 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

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

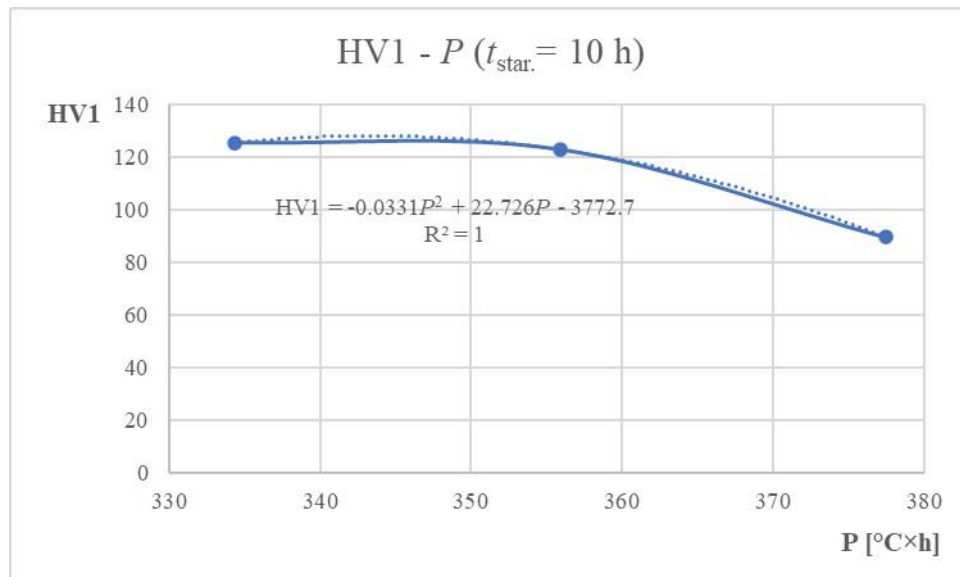
Izjednačavanjem parametara P za vrijeme starenja od 5 h za temperaturu od 172 °C i za vrijeme starenja od 10 h za temperaturu od 148 °C:

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

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



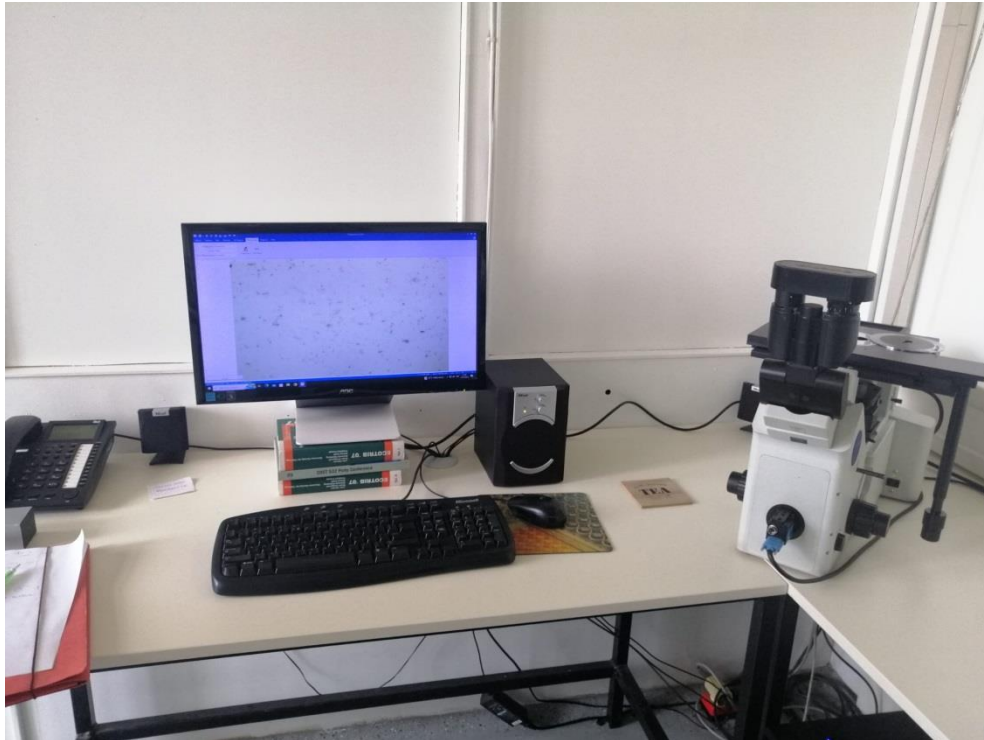
Slika 34. Ovisnost tvrdoće o parametru starenja – $t_{\text{star.}} = 5 \text{ h}$



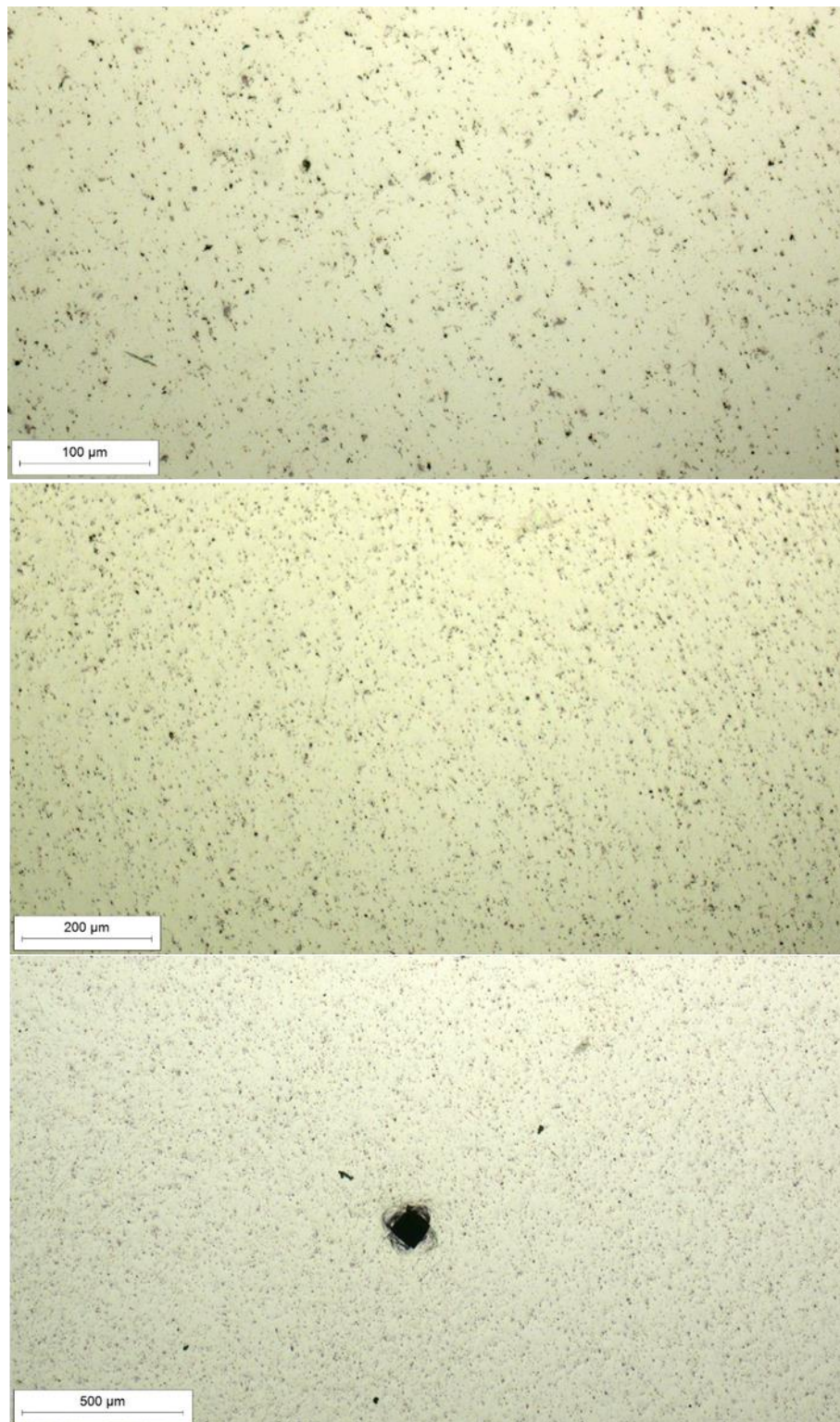
Slika 35. Ovisnost tvrdoće o parametru starenja – $t_{\text{star.}} = 10 \text{ h}$

4.5. Mikrostruktura uzoraka

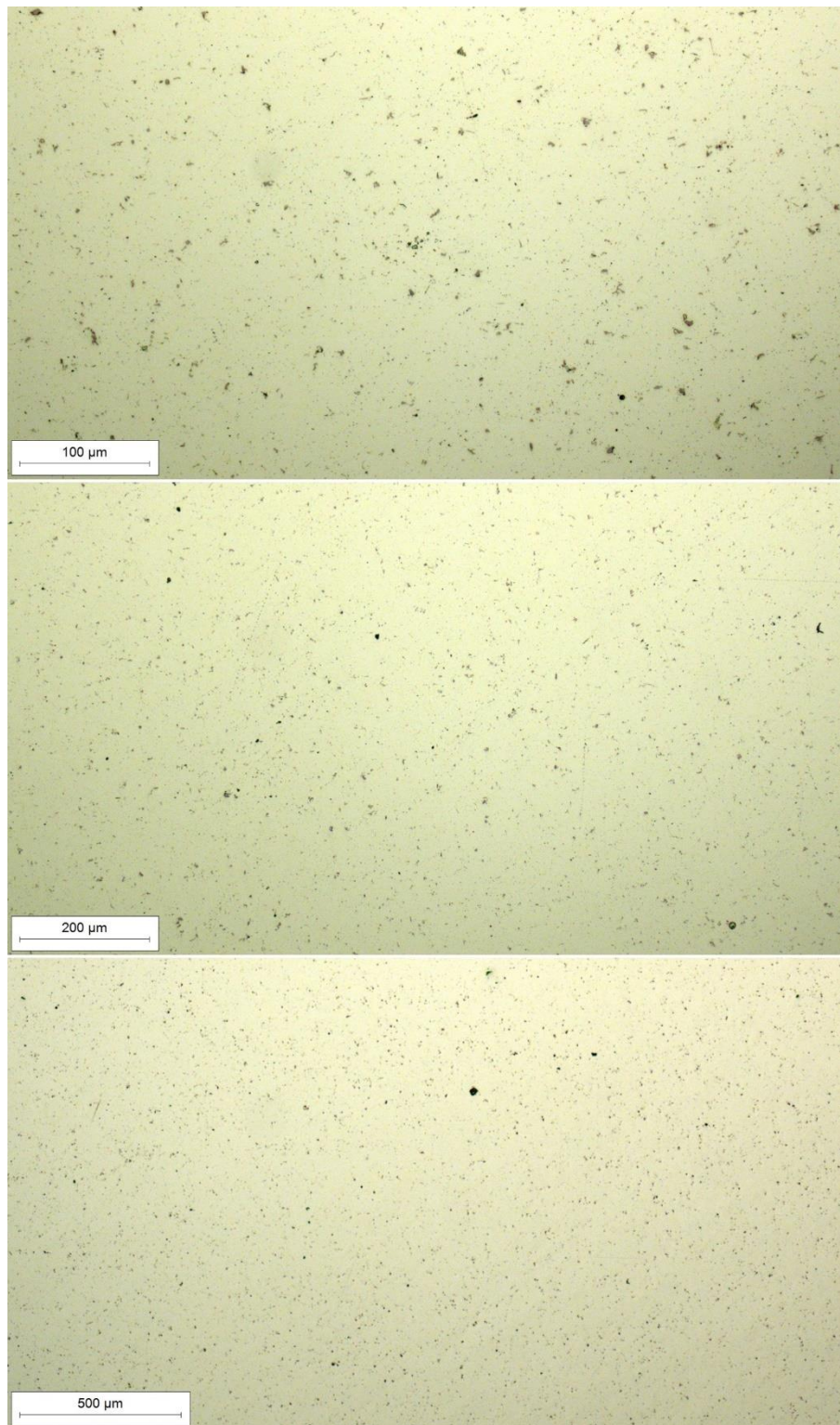
Proučavanje mikrostrukture napravljeno je u Laboratoriju za materijalografiju na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. Za proučavanje mikrostrukture koristi se svjetlosni mikroskop marke Olympus koji je povezan s računalnim programom ImageJ na računalu koji omogućava pregled mikrostrukture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



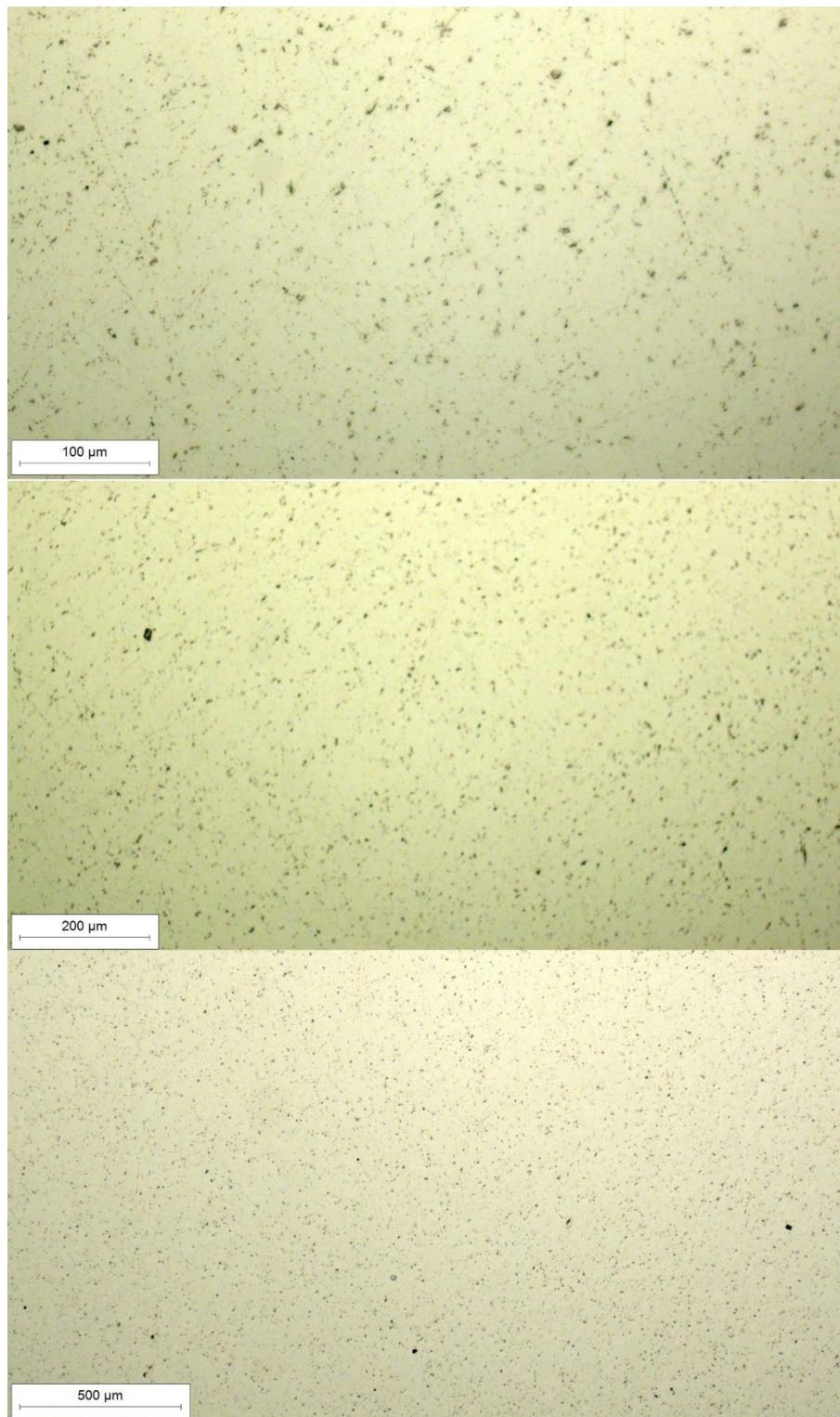
Slika 36. Ispitivanje mikrostrukture uzoraka



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



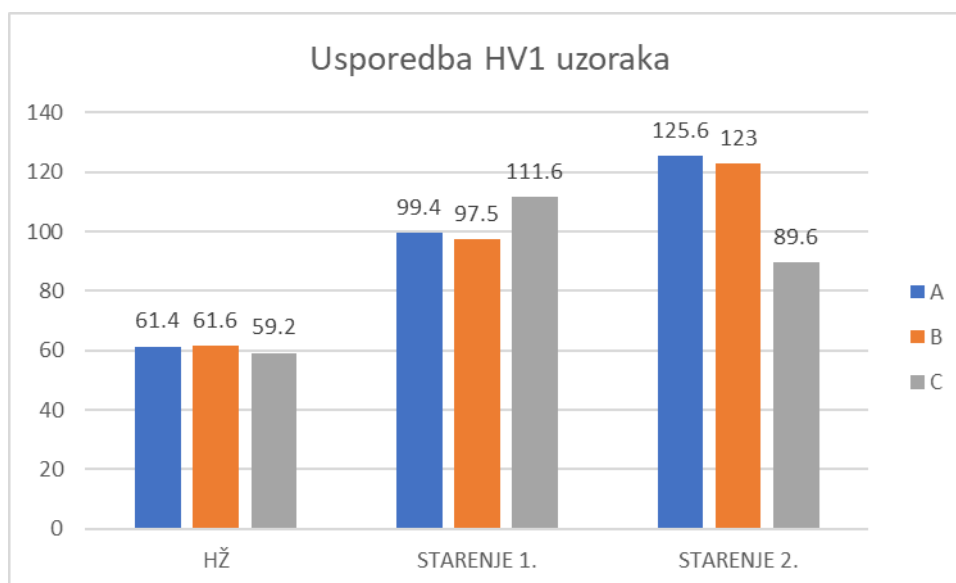
Slika 38. Mikrostruktura uzorka B pod različitim povećanjima u početnom stanju



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

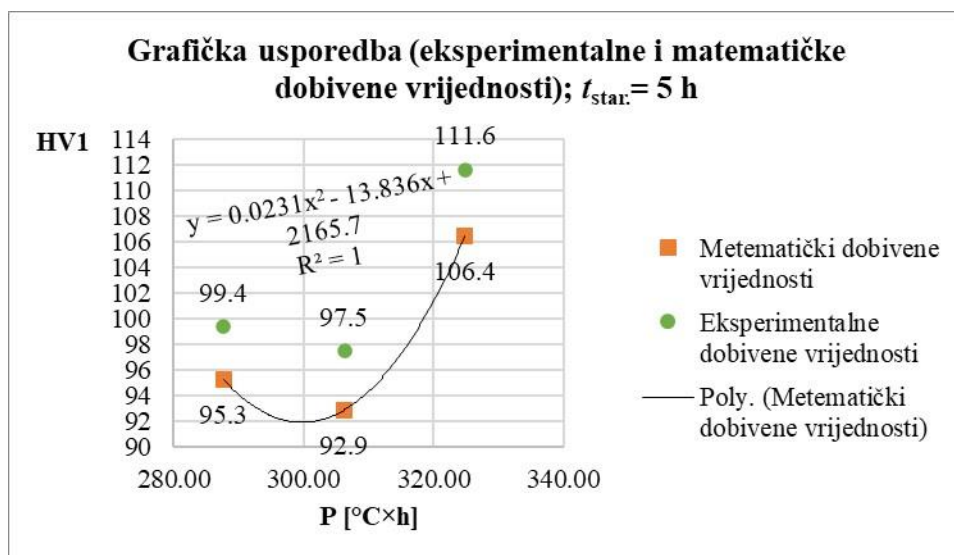
5. REZULTATI I DISKUSIJA

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 uzoraka A i B nakon pojedinih toplinskih obradi, nema značajne razlike među tvrdoćama. Za uzorak A provedena je temperatura starenja od 155 °C dok za uzorak je ta temperatura 165 °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 °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.

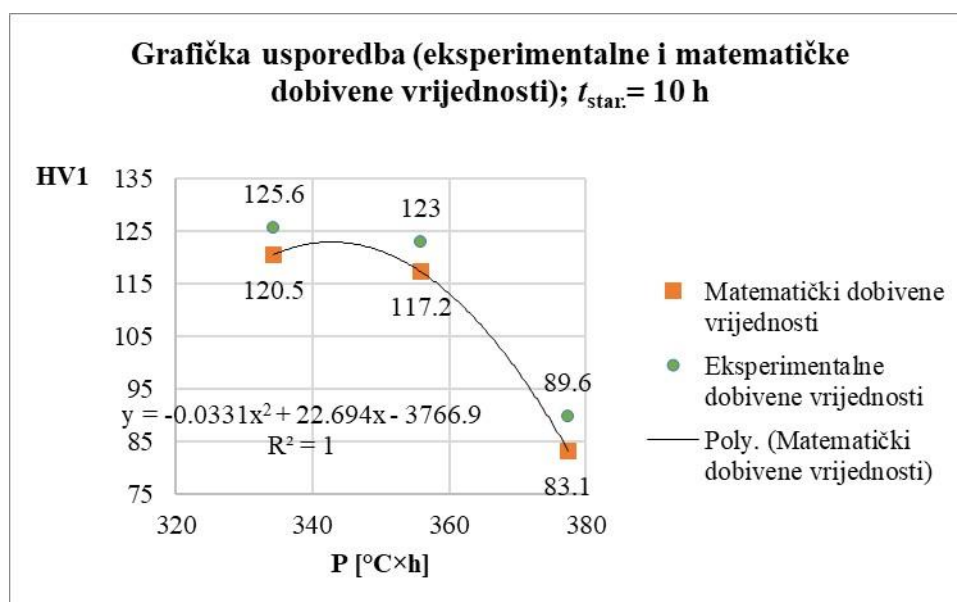


Slika 40. Usporedba tvrdoća uzoraka

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 $t_{star.} = 5$ h



Slika 42. Usporedba eksperimentalnih i matematičkih dobivenih vrijednosti tvrdoće za $t_{star.} = 10$ 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 $t_{\text{star.}} = 5 \text{ h}$

| $t_{\text{star.}} = 5 \text{ h}$ | | | | |
|--|---------------------|---------------------|--------------------|------------------------|
| $\vartheta_{\text{star.}} (\text{°C})$ | HV1 _{exp.} | HV1 _{mat.} | ΔHV1 | 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 $t_{\text{star.}} = 10 \text{ h}$

| $t_{\text{star.}} = 10 \text{ h}$ | | | | |
|--|---------------------|---------------------|--------------------|------------------------|
| $\vartheta_{\text{star.}} (\text{°C})$ | HV1 _{exp.} | HV1 _{mat.} | ΔHV1 | 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 očvrnutih aluminijskih 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, automobilska 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 aluminijsku koja je većim udjelom u mikrostrukturi dok crna faza označuje uključke (čestice) intermetalnih spojeva. Za leguru 6082 koja je bila podvrgnuta procesu starenja dolazi do izlučivanja koherentnih precipitata koji su spojevi aluminijski i magnezij te magnezij i silicij. 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 postižu 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%20Equipme nt/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] Schauerl, Z. *Karakterizacija materijala - podloge sa predavanja*, FSB 2020
- [25] Mrowka – Nowotnik, G. *6xxx Alloys: Chemical Composition and Heat Treatment*, Boca Raton, 2018