

Utjecaj toplinske obrade na mehanička svojstva aluminijeve legure

Živoder, Matija

Master's thesis / Diplomski rad

2022

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:276939>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-03**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Matija Živoder

Zagreb, 2022. godina.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Željko Alar

Student:

Matija Živoder

Zagreb, 2022. godina.

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

Zahvaljujem se mentoru dr. sc. Željku Alaru, koji mi je omogućio svu potrebnu opremu i pomogao svojim savjetima pri izradi ovog diplomskog rada, te što je uvijek imao strpljenja i vremena za moje upite. Također se zahvaljujem asistentu zavoda za materijale, Danielu Pustičkom oko pomoći kod izrade eksperimentalnog dijela rada.

Matija Živoder



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



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

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

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **MARTIJA ŽIVODER**

Mat. br.: 0035207903

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Utjecaj toplinske obrade na mehanička svojstva aluminijske legure**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Influence of heat treatment on Aluminium alloys mechanical properties**

Opis zadatka:

Tehnički aluminij i njegove legure u strojarstvu se većinom koriste zbog njihove niske gustoće, visoke korozivne postojanosti te električne i toplinske vodljivosti. Međutim, često se podvrgavaju toplinskoj obradi radi poboljšanja mehaničkih svojstava koja se ne mogu postići isključivo legiranjem.

U radu je potrebno sljedeće:

- Opisati vrste aluminijskih legura s posebnim naglaskom na legure koje se toplinski obrađuju
- Opisati najčešće vrste toplinskih obrada aluminija i njegovih legura
- U eksperimentalnom radu potrebno je utvrditi sistematični plan provedbe toplinske obrade te izraditi uzorke za toplinsku obradu
- Provesti materijalografsku analizu te određena ispitivanja mehaničkih svojstava
- Na temelju dobivenih rezultata i znanja stečenih tijekom studiranja analizirati dobivene rezultate te donijeti određene zaključke.

Zadatak zadan:
5. svibnja 2022.

Rok predaje rada:
7. srpnja 2022.

Predvideni datum obrane:
18. srpnja do 22. srpnja 2022.

Zadatak zadao:

prof. dr. sc. Željko Klar

Predsjednica Povjerenstva:

prof. dr. sc. Biserka Runje

SADRŽAJ

| | |
|--|----|
| 1. UVOD | 1 |
| 2. ALUMINIJ I ALUMINIJSKE LEGURE..... | 2 |
| 2.1. Aluminij i njegova svojstva..... | 2 |
| 2.2. O Al-legurama | 5 |
| 2.3. Toplinska obrada Al-legura..... | 13 |
| 2.4. Precipitacijsko očvrnuće..... | 15 |
| 3. MEHANIČKA SVOJSTAVA MATERIJALA..... | 17 |
| 3.1. Ispitivanje mehaničkih svojstva..... | 17 |
| 3.2. Statičko vlačno ispitivanje | 19 |
| 3.3. Ispitivanje tvrdoće..... | 21 |
| 4. EKSPERIMENTALNI DIO | 23 |
| 4.1. Plan eksperimenta..... | 23 |
| 4.2. Statičko vlačno ispitivanje | 25 |
| 4.2.1. Rezultati statičko vlačnog ispitivanja epruveta u isporučenom stanju | 27 |
| 4.2.2. Rezultati statičko vlačnog ispitivanja nakon toplinske obrade..... | 28 |
| 4.3. Analiza mikrostrukture | 30 |
| 4.3.1. Brušenje i poliranje | 30 |
| 4.3.2. Nagrizanje..... | 31 |
| 4.3.3. Dobivanje slike mikrostrukture | 32 |
| 4.4. Mjerenje tvrdoće..... | 36 |
| 4.4.1. Rezultati mjerenja tvrdoće..... | 38 |
| 4.5. Analiza rezultata | 39 |
| 4.5.1. Analiza rezultata statičko vlačnog ispitivanja za isporučeno stanje | 39 |
| 4.5.2. Analiza rezultata statičko vlačnog ispitivanja nakon toplinske obrade | 41 |
| 4.5.3. Usporedba rezultata statičko vlačnog ispitivanja | 43 |

| | |
|---|----|
| 4.5.4. Analiza rezultata mjerenja tvrdoće | 45 |
| 5. ZAKLJUČAK..... | 47 |
| 6. LITERATURA | 48 |

POPIS SLIKA

| | |
|--|----|
| Slika 1. Ciklus proizvodnje aluminija [2]..... | 4 |
| Slika 2. Plošno centrirana kubična (FCC) kristalna rešetka [6]..... | 6 |
| Slika 3. Podjela aluminijskih legura prema načinu prerade [8]..... | 7 |
| Slika 4. Ternarni dijagram stanja Al-Si-Mg-projekcija topljivosti [2]..... | 14 |
| Slika 5. Ternarni dijagram stanja Al-Si-Mg-projekcija solidusa [2]..... | 14 |
| Slika 6. Dijagram stanja precipitacijsko očvrsnute aluminijske legure [17] | 16 |
| Slika 7. Prikaz dimenzija ispitne epruvete..... | 20 |
| Slika 8. Dijagram kidanja [20]..... | 20 |
| Slika 9. Prikaz mjerenja tvrdoće Vickersovom metodom [18]..... | 22 |
| Slika 10. Al-Mg binarni fazni dijagram stanja [21] | 24 |
| Slika 11. Ispitna epruveta..... | 24 |
| Slika 12. Kidalica VEB WPM / EUmod / 400 kN | 25 |
| Slika 13. Elektronski ekstenziometar MFA2 | 26 |
| Slika 14. Epruveta 2 nakon ispitivanja | 27 |
| Slika 15. Epruveta 3 nakon ispitivanja | 27 |
| Slika 16. Epruveta 4 nakon ispitivanja | 27 |
| Slika 17. Dijagram kidanja za epruvetu 2..... | 28 |
| Slika 18. Dijagram kidanja za epruvetu 6..... | 29 |
| Slika 19. Epruveta 10 nakon ispitivanja | 30 |
| Slika 20. Epruveta 6 nakon ispitivanja | 30 |
| Slika 21. Epruveta 7 nakon ispitivanja | 30 |
| Slika 22. Uređaj za brušenje i poliranje Mecatech 250 – PRESI..... | 31 |
| Slika 23. Svjetlosni mikroskop Olympus GX51 (1)..... | 32 |
| Slika 24. Svjetlosni mikroskop Olympus GX51 (2)..... | 32 |

| | |
|--|----|
| Slika 25. Uzorak 6, povećanje 100x..... | 33 |
| Slika 26. Uzorak 6, povećanje 500x..... | 33 |
| Slika 27. Uzorak 1, povećanje 100x..... | 34 |
| Slika 28. Uzorak 1, povećanje 500x..... | 34 |
| Slika 29. Uzorak 1 (lijevo) i 6 (desno) za mjerenje tvrdoće i analizu mikrostrukture | 36 |
| Slika 30. Tvrdomjer IDENTEC, model 5030 TKV | 37 |
| Slika 31. Mjerenje tvrdoće..... | 37 |
| Slika 32. Grafički prikaz vrijednosti konvencionalne granice razvlačenja epruveta u isporučenom stanju..... | 39 |
| Slika 33. Grafički prikaz vrijednosti vlačne čvrstoće epruveta u isporučenom stanju..... | 40 |
| Slika 34. Grafički prikaz vrijednosti istežljivosti epruveta u isporučenom stanju..... | 40 |
| Slika 35. Grafički prikaz vrijednosti kontrakcije epruveta u isporučenom stanju | 41 |
| Slika 36. Grafički prikaz vrijednosti konvencionalne granice razvlačenja epruveta nakon toplinske obrade | 42 |
| Slika 37. Grafički prikaz vrijednosti vlačne čvrstoće epruveta nakon toplinske obrade..... | 42 |
| Slika 38. Grafički prikaz vrijednosti istežljivosti epruveta nakon toplinske obrade..... | 43 |
| Slika 39. Grafički prikaz vrijednosti kontrakcije epruveta nakon toplinske obrade | 43 |
| Slika 40. Usporedba srednjih vrijednosti vlačne čvrstoće i konvencionalne granice razvlačenja | 44 |
| Slika 41. Usporedba srednjih vrijednosti istežljivosti i kontrakcije..... | 44 |
| Slika 42. Usporedba iznosa tvrdoće HV5..... | 45 |
| Slika 43. Usporedba iznosa tvrdoće HV10..... | 45 |
| Slika 44. Usporedba srednjih vrijednosti tvrdoća u isporučenom stanju i nakon toplinske obrade | 46 |

POPIS TABLICA

| | |
|---|----|
| Tablica 1. Pregled svojstava aluminijskih legura [4, 5]..... | 2 |
| Tablica 2. Prosječni sastav boksita [1] | 3 |
| Tablica 3. Podjela i osnovne značajke gnječanih aluminijskih legura [4]..... | 9 |
| Tablica 4. Utjecaj pojedinih legiranih elemenata na svojstva pojedinih aluminijskih legura [4,11] | 11 |
| Tablica 5. Osnovne toplinski neobradive legure aluminijskih legura s pripadajućim mehaničkim svojstvima [11]..... | 12 |
| Tablica 6. Osnovne toplinski obradive legure aluminijskih legura s pripadajućim mehaničkim svojstvima [11] | 13 |
| Tablica 7. Različite vrste ispitivanja mehaničkih svojstava materijala [18]..... | 18 |
| Tablica 8. Kemijski sastav ispitnih epruveta | 23 |
| Tablica 9. Dimenzija epruveta | 26 |
| Tablica 10. Rezultati statičko vlačnog ispitivanja epruveta u isporučenom stanju..... | 28 |
| Tablica 11. Rezultati statičko vlačnog ispitivanja nakon toplinske obrade..... | 29 |
| Tablica 12. Rezultati mjerenja tvrdoće za uzorak 1 | 38 |
| Tablica 13. Rezultati mjerenja tvrdoće za uzorak 6 | 38 |

POPIS OZNAKA

| Oznaka | Jedinica | Opis |
|---------------|-------------------|--|
| d_u | mm | konačni promjer epruvete |
| d_0 | mm | početni promjer epruvete |
| S_u | mm ² | konačna ploština poprečnog presjeka epruvete |
| S_0 | mm ² | početna ploština poprečnog presjeka epruvete |
| F_m | kN | maksimalna sila |
| F_k | kN | konačna sila |
| L_u | mm | konačna duljina epruvete |
| L_0 | mm | početna duljina epruvete |
| R_m | N/mm ² | vlačna čvrstoća |
| R_k | N/mm ² | konačno naprezanje |
| $R_{p\ 0,2}$ | N/mm ² | konvencionalna granica razvlačenja |
| A | % | istezljivost |
| Z | % | kontrakcija |
| HV | / | tvrdoća po Vickersu |
| \bar{X} | / | aritmetička sredina |
| $St. dev.$ | / | standardna devijacija |
| E | N/mm ² | modul elastičnosti |
| d | mm | promjer |
| ρ | g/cm ³ | gustoća |
| F | N | sila |
| T | K | temperatura |
| ϑ | °C | temperatura |
| t | s, min, h | vrijeme, trajanje |

SAŽETAK

Aluminij je jedan od najzastupljenijih metala u polju strojarstva koji osim niske gustoće i visoke korozijske postojanosti ima značajna svojstva električne i toplinske vodljivosti. Problem sirovog aluminija leži u vidu niskih vrijednosti čvrstoće i tvrdoće, mehaničkih svojstava koje su presudne prilikom izrada konstrukcijskih i strojnih dijelova. Kombinacijom legiranja te različitim parametrima toplinske obrade moguće je povećati otpornost i deformabilnost aluminija.

U radu su opisana svojstva aluminij i aluminijevih legura, s posebnim naglaskom na toplinsko obradive legure, te pregled postupaka ispitivanja mehaničkih svojstava. U eksperimentalnom dijelu provedena je analiza uzoraka aluminijeve legure u polaznom stanju, te nakon dvije kombinacije toplinske obrade gdje su praćene promjene mehaničkih svojstava i mikrostrukture. Komentirani su rezultati te su doneseni određeni zaključci.

Ključne riječi: aluminij, čvrstoća, tvrdoća, mikrostruktura

SUMMARY

Aluminum is one of the most common metals in the field of mechanical engineering, which, in addition to its low density and high corrosion resistance, has significant properties of electrical and thermal conductivity. The problem of raw aluminum lies in its low values of strength and hardness, mechanical properties that are crucial when making structural and machine parts. By combining alloying and different heat treatment parameters, it is possible to increase the resistance and deformability of aluminum.

The paper describes the properties of aluminum and aluminum alloys, with a special emphasis on heat-treatable alloys, and an overview of the mechanical properties testing procedures. In the experimental part, an analysis of the aluminum alloy samples was carried out in the initial state, and after two combinations of heat treatment, where changes in mechanical properties and microstructure were monitored. The results were analyzed and certain conclusions were made.

Key words: aluminum, strength, hardness, microstructure

1. UVOD

Aluminij, treći po redu najzastupljeniji element u zemljinoj kori, zbog svojstava kao što su niska specifična gustoća, otpornost na koroziju, dobra toplinska i električna vodljivost, dobra strojna obradivost, oblikovljivost i livljivost koristi se u brodogradnji, zrakoplovnoj i automobilskoj industriji, građevinarstvu, informatici, bojama i lakovima, pirotehnici i prehrambenoj industriji. Nedostatak aluminijske legure je niski modul elastičnosti i niska čvrstoća što onemogućuje njegovo korištenje u konstrukcijske i alatne svrhe te su se zbog toga počele koristiti aluminijske legure kod kojih se poboljšavaju određena svojstva, a granica razvlačenja i vlačna čvrstoća dostižu vrijednosti nekih čelika. Zbog svih navedenih svojstava, aluminijske legure se danas koriste u većini industrija, npr. brodogradnji, zrakoplovnoj i automobilskoj industriji, građevinarstvu, informatici i drugima.

Kod kreiranja proizvoda pri izboru materijala posebna pažnja se stavlja na mehanička svojstva materijala. Mehanička svojstva su temelj svih daljnjih procesa obrade materijala do samog završetka procesa, odnosno završnog proizvoda, a posljedica su mikrostrukturnog stanja materijala. Mikrostrukturno stanje materijala određuje se obradom materijala određenog kemijskog sastava određenim tehnološkim postupkom. Za bolje razumijevanje ponašanja materijala u raznim uvjetima provode se ispitivanja. U ovom radu provedena su ispitivanja mehaničkih svojstva Al-legura koja će kasnije biti opisana.

2. ALUMINIJ I ALUMINIJSKE LEGURE

2.1. Aluminij i njegova svojstva

Aluminij je srebrno-bijeli sjajni metal koji pripada trećoj grupi periodnog sustava elemenata. Treći je najzastupljeniji element u zemljinoj kori, odmah iza kisika i silicija, a ima ga od 7,5 do 8,1 %. Temperatura taljenja je na 660 °C, a vrelišta na 2519 °C, kao kovina aluminij je mekan, žilav, male gustoće koja iznosi $2,7 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ i lako je obradiv [1]. Također, ima visoku toplinsku i električnu vodljivost, a zbog niskog modula elastičnosti koristi se kod konstrukcija koje su znatno gipkije i elastičnije od čeličnih [2].

Nema veliku čvrstoću te se zbog toga za čvršće konstrukcije koriste aluminijeve legure, koje postupkom precipitacijskog očvršnuća mogu biti iste čvrstoće kao što su mnogi čelici. Također, zbog izrazito niskog modula elastičnosti, u odnosu na titan i čelik (aluminij ima tri puta niži modul od čelika) aluminijeve konstrukcije su znatno elastičnije. Niska toplinska stabilnost, koja se javlja zbog niskog tališta, velik nedostatak aluminijske granice dugotrajne uporabe aluminijske određena od 120 do 150 °C [3, 4].

Sistematizirani pregled svojstava aluminijske je prikazan u Tablica 1.

Tablica 1. Pregled svojstava aluminijske [4, 5]

| | |
|------------------------------------|----------------------------------|
| Specifična masa | 2,7 kg/dm ³ |
| Gustoća | 2700 kg/m ³ |
| Atomska težina | 26,98 |
| Redni broj | 13 |
| Električna provodljivost | 34,8-38 Sm/mm ² |
| Temperaturni koeficijent istezanja | $24 \times 10^{-6} \text{ 1/K}$ |
| Talište | 660 °C |
| Vrelište | 2519 °C |
| Toplinska vodljivost | 209,3 W/Km ¹ |
| Latentna toplina taljenja | 396 kW/kg |
| Temperaturni koeficijent otpora | $4,2 \times 10^{-3} \text{ 1/K}$ |
| Modul elastičnosti | 69000 N/mm ² |
| Toplinska rezljivost | 23,8 10 ⁻⁶ /K |
| Elastična vodljivost | 36...37,8 m/Ωmm ² |
| Granica razvlačenja | 20...120 N/mm ² |
| Vlačna čvrstoća* | 40...180 N/mm ² |
| Istezljivost | 50...4 % |
| *ovisno o stanju | |

Sami metal je jako reaktivan, no aluminij ima veliki afinitet prema kisiku, zbog čega je zaštićen tankim nepropusnim slojem oksida koji se formira kombinacijom zraka i vodenih otopina. Zaštitni sloj oksida je vrlo tanak (samo nekoliko tisućinki milimetra), ali je toliko gust da vlaga i zrak ne mogu doprijeti do aluminijske površine te ga to čini korozijski postojanim. Također, aluminijev oksid je iznimne tvrdoće te se njegovim podebljanjem povećava i otpornost na trošenje. Pri oštećenju oksidnog sloja, odmah se nadomještuje oksidacijom, a na taj način aluminij je otporan na atmosferske uvjete, ali i na koncentriranu dušičnu kiselinu. No, otpornost mu oslabljuju tvari koje razaraju zaštitni oksidni sloj, poput lužina, građevinsko vapno ili mort.

Aluminij se u prirodi može pronaći u obliku oksida i smjese oksida iz kojih se sami metal izdvaja postupkom elektrolize. Iz oksidne rude se najprije dobiva aluminijev oksid zvan glinica, a zatim daljnjim pročišćavanjem glinice nastaje aluminij. Sirovine za aluminij su boksiti i boksitni lateriti, a prosječni sastav boksita je: Al_2O_3 , Fe_2O_3 , SiO_2 , TiO_2 i konstitucijske vode, prikazan je u Tablica 2 [1].

Tablica 2. Prosječni sastav boksita [1]

| | |
|-----------|-------------------------|
| 45 - 55 % | Al_2O_3 |
| 15 - 20 % | Fe_2O_3 |
| 1 - 7 % | SiO_2 |
| 2 - 3 % | TiO_2 |
| 12 - 30 % | konstitucijske vode |

Aluminijaska ruda ili boksit, je heterogena ruda koja se većinom sastoji od jednog ili više aluminijevih hidroksida. Može sadržavati i silicij dioksid, željezni oksid, te alumosilikate (argetit), a kvaliteta boksita najviše ovisi o količinama primjesa željeza i silicija. Pročišćavanje boksita se najčešće vrši Bayerovim postupkom s NaOH na visokim temperaturama i tlaku, gdje aluminij prelazi u otopinu oblika aluminata (NaAlO_2).

Kako bi se dobila jedne tona glinice potrebno je od 2,2 do 2,5 tona boksita, od 70 do 100 kg alkalija, $14 \cdot 10^6$ kJ toplinske energije, $0,9 \cdot 10^6$ kJ električne energije i od četiri do šest sati rada [1]. Dok je za dobivanje jedne tone aluminijske rade potrebno je približno utrošiti 4,5 tona boksita, 0,5 tona ugljenih elektroda i 14000 kWh električne energije (Slika 1) [2].



Slika 1. Ciklus proizvodnje aluminija [2]

Aluminij i Al-legure primjenjuju se zbog njegovih svojstava kao što su mala gustoća, odlične mehaničke osobine, otpornost na koroziju, visoka električna i toplinska vodljivosti, specifična optička svojstva te dobra obradljivost. Tijekom Starog i Srednjeg vijeka, primjenjivao se samo spoj aluminija zvan alaun ($M''M'''(SO_4)_2 \cdot 12H_2O$), a koristio se u kožarstvu, za bojanje, pri proizvodnji stakla i u medicini. Radi velikog afiniteta prema kisiku, komercijalna proizvodnja aluminija započela je tek krajem 19-tog stoljeća [1]. Danas, aluminij i njegove legure, su važne za izgradnju prometnih sredstava poput automobila, aviona, brodova i drugih), zatim imaju bitnu ulogu u elektrotehnici gdje se koriste kao vodiči i konstrukcijski elementi), u građevinarstvu gdje ih je moguće pronaći na limovima, okvirima za prozore i vrata, kao obloge za fasade te u kemijskoj i prehrambenoj industriji kao ambalaže, razni aparati, spremišta, cjevovodi. Također, aluminij se može primjenjivati u obliku praha u pirotehnici za dezoksidaciju i patiniranje te dr., a aluminij je ujedno i jedini laki metal koji je našao svoje mjesto u nosivim konstrukcijama u građevinarstvu.

Tijekom proizvodnje i prerade aluminija nastaju velike količine otpada, pa se vrlo velika pažnja pridaje njegovoj reciklaži. Aluminijski otpad se sortira prema kvaliteti na grubi otpad nastao lijevanjem i valjanjem, otpad i višak od konstrukcija, strugotine, folije, tube, pepeli, troske, a nakon sortiranja se prodaje na tržištu za pretaljanje. Potrošnja energije tijekom reciklaže može biti i do 20 puta manja od potrošnje energije za dobivanje primarnog aluminija. Također, važno

je istaknuti da je reciklaža aluminijske legure moguća više puta, a time ona ne gubi niti jednu od svojih prirodnih kvaliteta.

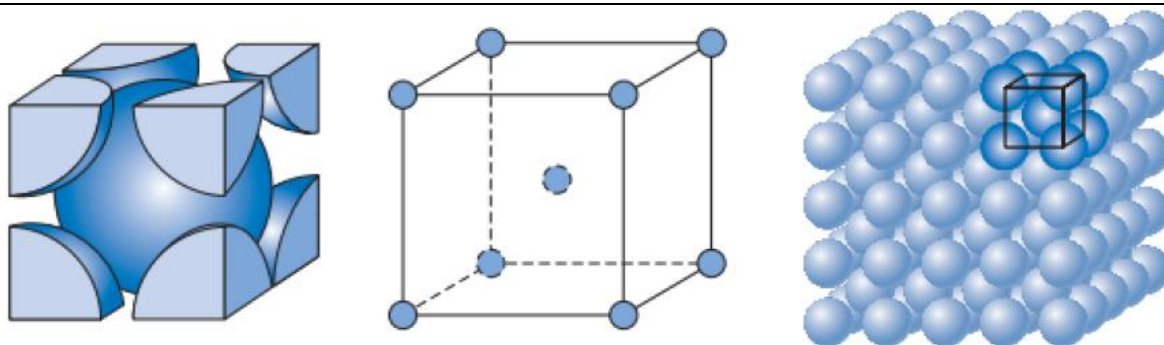
2.2. O Al-legurama

Na mikrostrukturna svojstva aluminijske legure, može se utjecati legiranjem i toplinskom obradom. Legiranjem aluminijske legure se prvenstveno poboljšavaju mehanička svojstva, ponajprije svojstva vlačne čvrstoće i tvrdoće, zatim krutosti i rezljivosti, pa i žilavosti ili livljivosti.

Najvažnija prednost aluminijskih legura je visoka specifična čvrstoća. S gustoćom tri puta nižom od čelika, aluminij ima dobar omjer između čvrstoće i gustoće, a to je posebno izraženo kod toplinski očvrstnutih legura, time aluminijske legure mogu konkurirati čelicima visoke čvrstoće, a i titanijevim legurama [3, 4].

Nadalje, modul elastičnosti aluminijskih legura otprilike je tri puta niži u usporedbi sa čelikom, zbog čega nosači izrađeni od aluminijske legure su znatno elastičniji i gipkiji. Toplinska rastezljivost, također, je dvostruko veća od nego kod čelika što je iskoristivo svojstvo boljeg oblikovanja tijekom izrade posuda i cjevovoda.

Plošno centrirana kubična (FCC) kristalna rešetka aluminijske legure omogućuje da se aluminijske legure jednako dobro oblikuju u toplom i u hladnom stanju te tijekom postupaka valjanja, prešanja, kovanja i sl. (Slika 2). Snižanim temperaturama Al-legure ne postaju naglo krhke, već se time postiže čvrstoća bez značajnog gubitka žilavosti. Aluminijske ljevačke legure karakterizira i dobra livljivost tj. sposobnost popunjavanja tankih presjeka kalupne šupljine, niska temperatura taljenja u odnosu na druge materijale, osobito one na bazi željeza. Izvršna livljivost aluminijske legure, u odnosu na ostale legure u ljevačkoj industriji, je razlog velike potražnje aluminijskih ljevačkih legura [4].



Slika 2. Plošno centrirana kubična (FCC) kristalna rešetka [6]

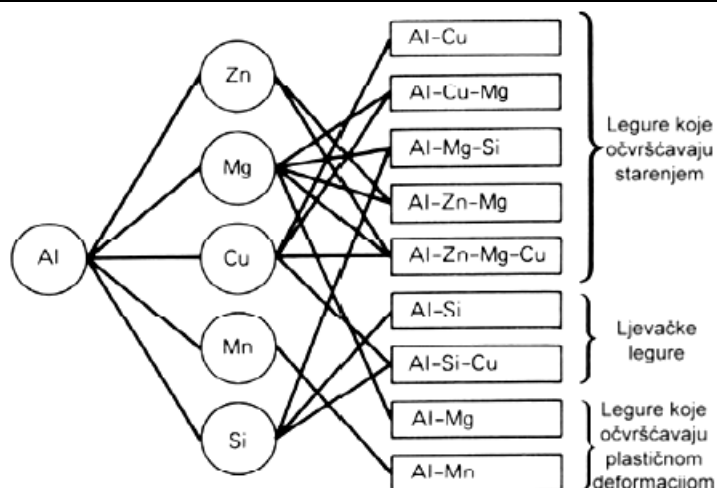
Glavni nedostaci aluminijских legura su nizak modul elastičnosti i niska krutost, loša zavarljivost, poprilično niska toplinska stabilnost te osjetljivost na neke oblike korozije. Korozijska postojanost visokočvrstih Al-legura se rješava premazom načinjenim od tankog sloja čistog aluminija, koji čini površinsku zaštitu uz visoku čvrstoću osnovnog materijala [4].

Potrebno je uzeti u obzir da se procesom legiranja snižava toplinska i električna vodljivost te svojstva aluminijevih materijala mogu varirati u širokom rasponu zbog mikrostrukturnog stanja i kemijskog sastava na koje je moguće utjecati toplinskom obradom. Zbog svojstva niske temperature tališta aluminija (660 °C), primjena Al-legura ograničena te je uporaba dozvoljena samo na temperaturama od 150 °C do 200 °C [3, 4].

Aluminijske legure se dijele u tri glavne skupine: prema načinu proizvodnje (tehnološkoj preradi), kemijskom sastavu i mogućnosti toplinske obrade [3].

1. Podjela prema način proizvodnje

Jedna od osnovnih podjela je prema načinu proizvodnje, prikazana na Slika 3, i to na ljevačke i gnječive legure aluminija, dok se primarni aluminij koristi samo u gnječenom stanju [3, 4]. Gnječive legure dijele se prema mogućnosti naknadne toplinske obrade na one koje očvršćuju starenjem i one koje očvršćuju plastičnom deformacijom [7].



Slika 3. Podjela aluminijских legura prema načinu prerade [8]

a) *Lijeivane legure*

Lijeivanje je jedna od tehnologija oblikovanja metalnih predmeta kojom se taljevina oblikuje ulijeivanjem u određene kalupe te metal poprima oblik i dimenzije tog kalupa, kakav zadržava i nakon skrućivanja. Ovaj postupak je prikladan za serijsku i masovnu proizvodnju, zbog visoke produktivnosti i lake mogućnosti izrade replika, a ponekad je to i jedini način za proizvodnju vrlo složeni predmeti sa šupljinama, npr. blokovi motora ili velika masivna kućišta [9].

Tehnologije lijeivanja koje se mogu koristiti za aluminijске ljeivačke legure su tlačno lijeivanje, lijeivanje u trajne kalupe, lijeivanje u pijesak (uključujući suhu i svježnu kalupnu mješavinu), lijeivanje pod vakuumom, centrifugalni, precizni lijev. U novije vrijeme koriste se i suvremeni postupci poput lijeivanja u polučvrstom stanju.

Tri osnovne skupine lijeivanih legura su Al-Si, Al-Mg i Al-Cu, a međusobnom kombinacijom se mogu dobiti legure sa poboljšanim osnovnim svojstvima [4].

Najčešće korištena legura za lijeivane se koriste Al-Si legure, budući da imaju izvanrednu livljivost, koja je poboljšana silicijem, što omogućava izradu odljevaka složene geometrije te ispunjavaju visoke zahtjeve na mehanička svojstva. Također, Al-Si legure imaju i dobru korozivsku otpornost i sposobnost zavarivanja. Najviše se koriste legure s 10 % do 13 % silicija i rijeko manjim udjelom bakra u svome sastavu, a te približno su eutektičkog sastava koji ima vrlo uski interval skrućivanja što ih čini prikladnima za tlačni lijev [4, 10].

Dodavanjem magnezija u Al-Si legure stvorena je nova vrsta legura koja ima odlična ljevačka svojstva te odlična svojstva nakon toplinske obrade. Najvažnija značajka je joj je dobra korozijska postojanost, ponajprije postojanost prema morskoj vodi i zraku [8]. Također, u Al-Mg-Si legure dodaju se i bakar, nikal te ostali elementi koji povišuju čvrstoću i tvrdoću legure. Za postizanje najbolje kombinacije žilavosti i čvrstoće ima legura s 10 % magnezija, no glavni nedostatak te legure je loša livljivost zbog pojave poroznosti i stvaranja troske. Iz tog razloga najveću komercijalnu uporabu imaju legure s 3 % i 5 % magnezija [4].

Al-Mg legure su legure srednje do visokom tvrdoće i čvrstoće visokog sjaja koji se postiže zbog dobre korozijske postojanosti. Ova karakteristika omogućava primjenu Al-Mg legura za široku upotrebu u prehrambenoj industriji, a neke od njih imaju veću otpornost na udarce pa se koriste u pomorstvu. Lako se obrađuju, relativno dobro se zavaruju, te su dosta atraktivnog izgleda, bilo da su obrađene, polirane ili anodizirane [4, 8].

Legure Al-Cu su toplinski očvrstljive, a bakar kao legirni element, također, smanjuje otpornost na opću koroziju. Otporne su na povišenim temperaturama i mogu podnijeti radne temperature do 300 °C imaju dobru kombinaciju vlačnih svojstava i rezljivosti te srednju ili slabu udarnu otpornost i slabe su livljivosti. Pri skrućivanju podložne su pucanju stoga kako bi se to izbjeglo potrebno je koristiti točno određene tehnike lijevanja. Također, su sklone i pogrubljenju zrna zbog čega im se dodaje magnezij (do 0,3 %) i/ili titanij (do 0,2 %) [4, 8, 10].

Legura Al-Si-Cu je legura poboljšane rezljivosti i čvrstoće, no dodavanje bakra u Al-Si leguru utječe na smanjenje otpornosti na koroziju i livljivosti. Kod ovih legura, pomoću rastvornog žarenja i prirodnog ili umjetnog dozrijevanja mogu se poboljšati čvrstoća i tvrdoća, a toplinskom obradom ovih legura moguće je dostići vrijednosti konvencionalne granice razvlačenja $Rp_{0,2}$ i do 200 N/mm². Al-Si-Cu legure dobre su žilavosti i obradljivost, otporne na udarce, a dodavanjem titanija i odvajanjem čestica postiže se sitnozrnata mikrostruktura [4].

b) Gnječene legure

Osnovna podjela gnječenih aluminijevih legura prikazana je u Tablica 3, a temelji se na mogućnosti precipitacijskog očvršćivanja i kemijskom sastavu. Legure, koje se očvršćuju procesom hladnog deformiranja moraju imati dovoljnu čvrstoću i krutost u hladnom stanju, te

dobru korozijsku postojanost. Mikrostruktura većine ovih legura u potpunosti se sastoji od čvrste otopine, zbog velike duktilnosti i korozijskoj postojanosti legura [4].

Tablica 3. Podjela i osnovne značajke gnječenih aluminijskih legura [4]

| Vrsta legure | Način očvršnuća | R_m , N/mm ² | | |
|----------------|--------------------------------|---------------------------|----------------|-------|
| 1. Al-Mn | Deformiranjem u hladnom stanju | 200...350 | | |
| 2. Al-Mg | | | | |
| 3. Al-Mg-Mn | | | | |
| 4. Al-Mg-Si | | | | |
| 5. Al-Cu-Mg | | | | |
| 6. Al-Zn-Mg | | | Precipitacijom | ~ 330 |
| 7. Al-Zn-Mg-Cu | | | | ~ 450 |
| 8. Al-Li-Cu-Mg | | | | ~ 400 |
| | | ~ 550 | | |
| | | ~ 500 | | |

Željena mehanička svojstva postižu se u zadnjoj fazi hladnog oblikovanja određenim stupnjem ugnječenja. Glavni nedostatak gnječenih legura je da se mehanička svojstva materijala, koji je proizveden na svoje konačne dimenzije, se mogu se mijenjati samo postupkom mekšanja odnosno postupkom žarenja [4].

Precipitacijski očvrstljive legure imaju povoljniji omjer gustoće i čvrstoće, njihovu osnovu čine legirni elementi, poput cinka, magnezija, silicija i bakara, koji stvaraju intermetalne spojeve s aluminijem ili međusobno. Očvršnuće precipitacijom je osnovni postupak koji se koristi za povećanje tvrdoće i čvrstoće prethodno gnječenih legura. Očvršnuće postignuto postupkom precipitacije veće je od očvršnuća postignutog postupkom hladnog oblikovanja [4].

Ostali legirni elementi također se koriste za poboljšavanje određenih svojstava, tako na primjer krom se koristi za uspješnije precipitacijsko očvršnuće, titanij je kao dodatak za sitnije zrno, dok olovo i bizmut poboljšavaju rezljivost materijala.

Aluminij-mangan legure, s udjelom do najviše 1,5 % mangana, imaju umjerenu čvrstoću i dobru otpornost prema koroziji, vrlo niske topljivosti Mn u prisutnosti željeza kao nečistoće. Brzina hlađenja nakon lijevanja dovoljno je velika da dio mangana ostane "zarobljen" u zasićenoj otopini, a daljnjom obradom u gnječenoj leguri izlučuje se spoj sastava $FeMnAl_6$ koji poboljšava čvrstoću mangana zbog očvršćivanja stvaranjem dispergiranih čestica [11].

Legura Al-Mg-Si ili antikorodal ima posebno visoki omjer električne vodljivosti i čvrstoće ima u precipitacijski očvrstnutom i hladno deformiranom stanju, otporne su na koroziju i pogodne

za anodizaciju, poliranje i zavarivanje. Umjetnim dozrijevanjem, konvencionalna granica razvlačenja legura poprima približnu vrijednost od 240 N/mm^2 , a prirodnim dozrijevanjem se postiže nešto niža granica razvlačenja od 110 N/mm^2 . Rastezna čvrstoća ovih legura iznosi manje od 330 N/mm^2 [3, 4].

Legure iz Al-Cu-Mg skupine nazivaju se "durali", a vrijednost mehaničkih svojstava prvenstveno ovisi o vrsti i udjelu legirnih elemenata, zatim o mehaničkim i/ili toplinskim postupcima kojima se postiže određeno mikrostrukturno stanje. Konvencionalna granica razvlačenja seže im do vrijednosti od 290 N/mm^2 , a mogu postići vrijednost granice razvlačenja do 450 N/mm^2 . Za postizanje optimalne mehaničke otpornosti ove legure se obrađuju rastvornim žarenjem i dozrijevanjem. Precipitacijsko očvrnuće je primarni postupak za povećanje čvrstoće i tvrdoće durala jer je očvrnuće postignuto precipitacijom veće od onoga dobivenog hladnim deformiranjem, dok kod kombinacije ovih dvaju mehanizama potrebno leguru dodatno hladno oblikovati prije ili nakon dozrijevanja. Magnezij stvara intermetalne spojeve te time omogućeno ubrzano očvrnuće, dok kod povećanog udjela bakra ove legure imaju povećanu rezistentnost na koroziju, ali taj nedostatak se može otkloniti postupkom platiranja. Platiranje je postupak, koji se izvodi tijekom proizvodnje limova ili profila nanošenjem čistog aluminija ili legura otpornih na koroziju na valjane limove ili prešane profile [3, 4].

U Al-Zn-Mg-Cu legurama ili konstruktal legurama je glavni legirni element cink, masenog udjela do 8 % i s dodatkom male količine magnezija koji pridonosi porastu čvrstoće ove legure. Od ostalih legirnih elemenata najčešće je prisutan bakar, dok dodavanje kroma pospješuje precipitacijsko očvrnuće, te ove legure imaju najvišu čistoću među aluminijskim legurama. U precipitacijski očvrnutom stanju, srednja vrijednost čvrstoće ove legure može dosegnuti do 550 N/mm^2 . Visoku granicu tvrdoće i čvrstoće te razvlačenja, ova legura postiže umjetnim dozrijevanjem nakon rastvornog žarenja, a ovisno o metalurškom stanju i kemijskom sastavu ove legure mogu dostići čvrstoću i do 676 N/mm^2 . Glavni nedostatak je njihova osjetljivost na napetosnu koroziju. Razvijen je niz termomehaničkih postupaka čija je zadaća spriječavanje osjetljivosti na koroziju, s ciljem pouzdane primjene nakon rastvornog žarenja mogu se umjetno predozrijevati te se postiže bolja otpornost na koroziju, bolja čvrstoća i lomna žilavost, a može im se poboljšati i otpornost na koroziju ljuštenja [3, 4].

2. Podjela prema kemijskom sastavu

Najvažniji legirni elementi su bakar (Cu), silicij (Si), magnezij (Mg), mangan (Mn) i cink (Zn), te u manjoj količini željezo (Fe), titanij (Ti) i krom (Cr) kao dodaci, primjese ili nečistoće. Kombinacijom ovih elemenata, uz mogućnost dodavanja drugih legirnih elemenata, koji poboljšavaju svojstva osnovne legure, nastaju kompleksnije legure. Pospješuju usitnjenje zrna, poboljšavaju rastezljivost i omogućuju toplinsko očvrnuće. Kao dodatni legirni elementi ubrajaju se kobalt (Co), srebro (Ag), kositar (Sn), bizmut (Bi), nikal (Ni), vanadij (V), kadmij (Cd), olovo (Pb), litij (Li) i cirkonij (Zr) te natrij (Na), bor (B), berilij (Be) i stroncij (Sr) u vrlo malim količinama [3, 4, 12].

Svi gore navedeni legirni elementi su potpuno topljivi u rastaljenom aluminiju na dovoljno visokim temperaturama, no topljivost elemenata ograničena je u kristalima mješancima pri čemu dolazi do stvaranja vlastite faze ili intermetalnog spoja neotopljenog elementa. Fizikalna, kemijska i proizvodna svojstva legura određena su svojstvima poput topljivosti u aluminiju, kao i njihov udio, veličina, oblik i raspodjela intermetalnih spojeva. Mehanička svojstva, korozijska postojanost i deformabilnost značajno se razlikuju između serija legura, a ovise o načinu proizvodnje i sadržaju legirnih elemenata [3, 4]. Utjecaj pojedinih legirnih elemenata na svojstva pojedinih aluminijevih legura prikazan je u Tablica 4.

Tablica 4. Utjecaj pojedinih legirnih elemenata na svojstva pojedinih aluminijevih legura
[4,11]

| | |
|---------------|---|
| Magnezij (Mg) | Povećava čvrstoću mehanizmom hladne deformacije i kristalima mješancima, usitnjava zrno. |
| Mangan (Mn) | Povećava čvrstoću mehanizmom hladne deformacije i kristalima mješancima. |
| Bakar (Cu) | Smanjuje otpornost na koroziju, duktilnost i zavarljivost, povećava čvrstoću, rezljivost, omogućuje precipitacijsko očvrnuće. |
| Silicij (Si) | Značajno poboljšava livljivost, čvrstoću i duktilnost, uz prisutnost magnezija omogućava precipitacijsko očvrnuće. |
| Cink (Zn) | Može izazvati napetosnu koroziju, poboljšava čvrstoću, omogućuje precipitacijsko očvrnuće. |
| Željezo (Fe) | Povećava čvrstoću tehničkog aluminija. |
| Krom (Cr) | Povećava otpornost na napetosnu koroziju. |
| Nikal (Ni) | Poboljšava čvrstoću na povišenim temperaturama. |
| Titanij (Ti) | Usitnjava zrno. |
| Cirkonij (Zr) | Koristi se za smanjenje veličine zrna. |
| Litij (Li) | Značajno povećava čvrstoću, smanjuje gustoću, omogućuje precipitacijsko očvrnuće. |

| | |
|-------------------------|---|
| Skandij (Sc) | Koristi se za smanjenje veličine zrna, povećava čvrstoću dozrijevanjem. |
| Olovo (Pb) i Bizmu (Bi) | Poboljšavaju obradu odvajanjem čestica. |

3. Podjela prema mogućnosti toplinske obrade

Ovisno o vrsti toplinske obrade, aluminijske legure se raspodjeljuju na toplinski obradive i toplinski neobradive. Osnovne toplinski neobradivih legure aluminija s pripadajućim mehaničkim svojstvima prikazane su u Tablica 5.

Tablica 5. Osnovne toplinski neobradivih legure aluminija s pripadajućim mehaničkim svojstvima [11]

| Serijski broj EN 573 | Tip | Oznaka | R_e , N/mm ² | R_m , N/mm ² |
|-------------------------|-------|---|---------------------------|---------------------------|
| 1000 | Al | 1050 A 1070 A 1100 1200 1080 | 20 - 140 | 50-180 |
| 3000 | Al-Mn | 3003 3004 3005 3105 | 50 - 220 | 120 - 300 |
| 5000 | Al-Mg | 5086 5083 5056 A 5456 5052 5005 5053 5754 5254 5182 | 30 - 320 | 110 - 380 |

Osnovu precipitacijskog očvršćivanja čine toplinski obradive aluminijske legure s osnovnim legirnim elementima: bakar, magnezij, cink i silicij. Očvršćivanje se postiže žarenjem na temperaturama između 450 i 550 °C, zatim brzim hlađenjem te prirodnim (na sobnoj temperaturi) ili umjetnim (na povišenim temperaturama) dozrijevanjem. Ovakvim oblikom očvršćivanja postižu se bolje vrijednosti mehaničkih svojstava nego postupkom plastične deformacije, pa je zbog toga precipitacijsko očvršćivanje osnovni postupak za povećanje čvrstoće i tvrdoće aluminijskih legura za gnječenje [13]. Osnovne toplinski obradivih legure aluminija s pripadajućim mehaničkim svojstvima prikazane su u Tablica 6.

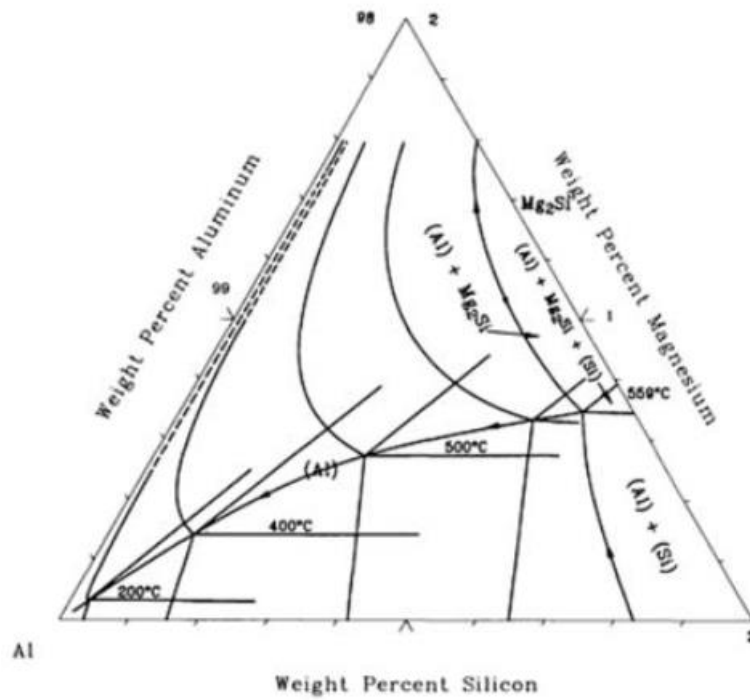
Tablica 6. Osnovne toplinski obradivih legure aluminija s pripadajućim mehaničkim svojstvima
[11]

| Serijski broj EN 573 | Tip | Oznaka | $R_e, \text{N/mm}^2$ | $R_m, \text{N/mm}^2$ |
|-------------------------|-------------------|-------------|----------------------|----------------------|
| 2000 | Al-Cu Al-Cu-Mg | 2011 | 250 - 500 | 360 - 530 |
| | | 2017 A 2030 | | |
| | | 2024 2618 | | |
| | | 2219 | | |
| 6000 | Al-Si-Mg | 6005 | 140 - 360 | 180 - 380 |
| | | 6061 6106 | | |
| | | 6082 6351 | | |
| | | 6081 6060 | | |
| | | 7020 | | |
| 7000 | Al-Zn-Mg | 7021 | 230 - 430 | 360 - 500 |
| | | 7039 | | |
| | | 7049 A 7050 | | |
| | Al-Zn-Mg-Cu | 7075 7175 | 350 - 720 | 440 - 760 |
| | | 7475 7130 | | |
| | | 7010 | | |

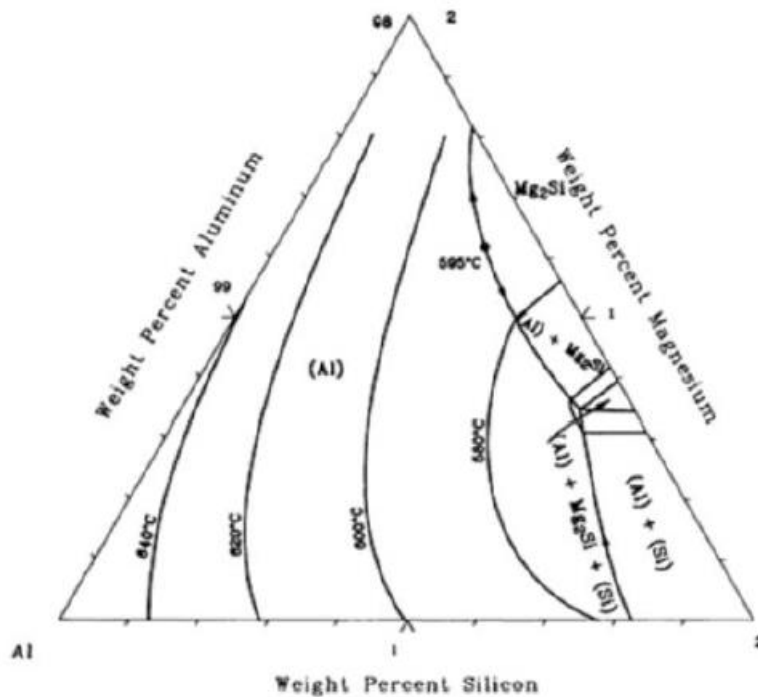
2.3. Toplinska obrada Al-legura

Toplinska obrada metala je postupak u kojem se predmet namjerno podvrgava temperaturno-vremenskim ciklusima kako bi se postigla željena mikrostruktura, a time i željena mehanička, fizička i kemijska svojstva [14]. Toplinskom obradom moguće je utjecati na mikrostrukturno stanje i kemijski sastav te na taj način postići željena svojstva [15]. Sastoji se od homogenizacijskog žarenja (rastvorno žarenje), gašenja i dozrijevanja. Na osnovu kemijskog sastava dobivaju se parametri potrebni za pravilno izvršavanje toplinske obrade [16]. Temeljni parametri postupaka toplinske obrade su temperatura, T (K), ϑ ($^{\circ}\text{C}$) i trajanje, t (s, min, h) [14].

Parametri homogenizacijskog žarenja određuju se uz pomoć ternarnog dijagrama stanja sustava Al-Si + Mg. Kako bi došlo do potpune homogenizacije temperatura homogenizacijskog žarenja mora biti iznad krivulje topljivosti u čvrstom stanju (Slika 4), ali pri tom procesu ne smije doći do taljenja materijala stoga temperatura mora biti niža od solidus temperature (Slika 5). Na previsokim temperaturama izradak će biti trajno uništen jer će doći do taljenja granica zrna, dok na pre niskim temperaturama, otapanje neće biti potpuno i legura dozrijevanjem neće ostvariti očekivanu čvrstoću [2].



Slika 4. Ternarni dijagram stanja Al-Si-Mg-projekcija topljivosti [2]



Slika 5. Ternarni dijagram stanja Al-Si-Mg-projekcija solidusa [2]

Drugi važan parametar homogenizacijskog žarenja je vrijeme držanja na temperaturi homogenizacije kako bi se postiglo potpuno otapanje intermetalnih faza te njihova apsorpcija u

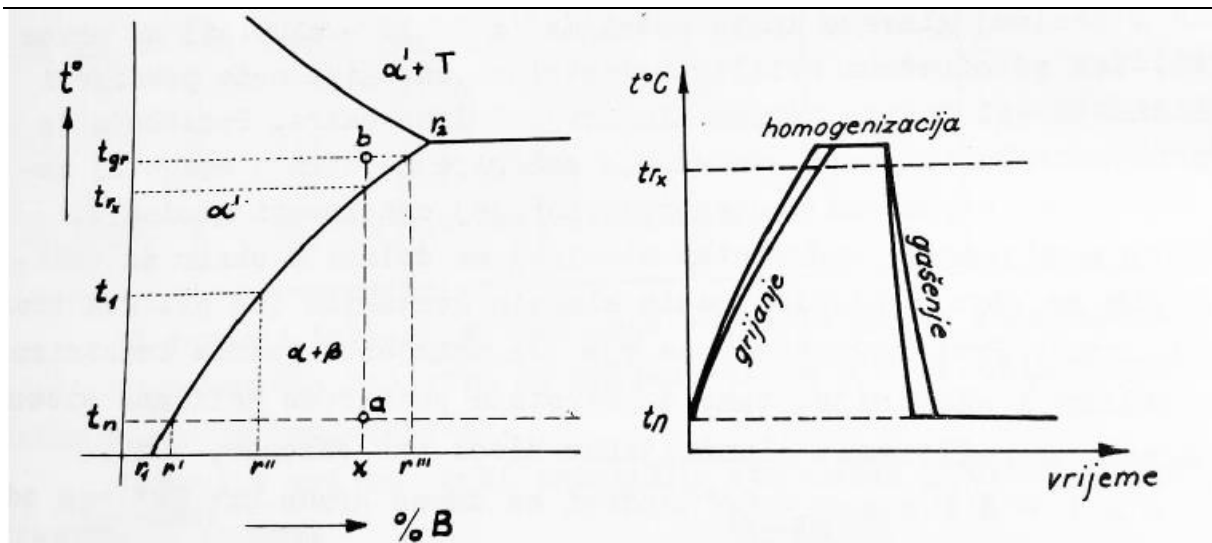
kristalu mješancu aluminijske (α -mješanac). Kako bi se otapanjem čestica intermetalne faze postigla potpuna apsorpcija stranih atoma u kristalu mješancu aluminijske, vrijeme mora biti dovoljno dugo, tj. toliko dugo dok legura difuzijom ne postigne ravnomjerno stanje [2].

Da se legirni elementi zadrže u otopini, gašenje mora biti dovoljno brzo, u isto vrijeme potrebno je minimizirati zaostala naprezanja koja nastaju gašenjem, kako ne bi došlo do pojave deformacija i napuklina. Nakon vađenja iz peći potrebno je što prije uroniti uzorke u vodu kako bi se onemogućilo sporo hlađenje u području kritičnih temperatura, gdje dolazi do brze precipitacije. Miješanjem se dodatno može povećati brzina gašenja, kojim se razbija parni omotač nastao oko uzorka u ranoj fazi gašenja [2].

Proces dozrijevanje se zasniva na procesu difuzije, a za umjetno dozrijevanje Al-legura to znači zagrijavanje na temperaturu od 100 do 200 °C kroz određeni vremenski period u rasponu od pola sata do maksimalno nekoliko dana. Umjetnim se dozrijevanjem, koje podrazumijeva držanje na povišenoj temperaturi, postiže veći porast čvrstoće i tvrdoće nego prirodnim dozrijevanjem na sobnoj temperaturi [2].

2.4. Precipitacijsko očvrnuće

Kako bi precipitacijsko očvrnuće aluminijskih legura bilo moguće, moraju se ispuniti određeni polazni uvjeti. U leguri mora biti sadržan barem jedan legirni element u onom dijelu faznog dijagrama stanja u kojem njegova topivost u aluminijsku raste s porastom temperature (krivulja $r_1 - r_2$ na Slika 6). Kako bi došlo do potpune apsorpcije stranih atoma rastvornim žarenjem, maseni udio legirnog elementa mora biti što viši, no granica maksimalne topljivosti u kristalu mješancu aluminijske r_2 ne smije biti prekoračena. Topljivost legirnih elemenata mora biti visoka pri visokim temperaturama, a mala na okolišnoj temperaturi. Elementi koji zadovoljavaju te uvjete su Cu, Zn, Si, Mg i Mn te iz tog razloga legura u polaznom stanju mora biti takvog sastava da sadrži heterogenu strukturu. Kako bi tijekom promjena koje se zbivaju došlo do ponovnog izlučivanja intermetalnog spoja, struktura se mora sastojati od α -kristala mješanaca i β -kristala druge faze u obliku intermetalnog spoja (CuAl_2 , Mg_2Si , MgZn_2), no ovaj put u koherentnom obliku. Sitni, fino raspršeni precipitati će postupno otvrdnjavati leguru sve do postizanja maksimalne tvrdoće i čvrstoće, a povećanje čvrstoće i tvrdoće uzrokovano je otežanim gibanjem dislokacija tvoreći prepreke za njihova gibanja [3, 7].



Slika 6. Dijagram stanja precipitacijsko očvrsnute aluminijske legure [17]

Postupak se sastoji od tri faze [3]:

1. Legura se zagrijava na temperaturu rastvornog žarenja te se zadržava na toj temperaturi toliko dugo do potpunog otapanja legiranih elemenata.
2. Zatim se gasi do okolišne temperature kako bi legirni elementi ostali prisilno otopljeni u čvrstoj otopini i time nastaje prezasićena otopina.
3. U trećoj fazi dolazi do prirodnog dozrijevanja na temperaturi okoline ili umjetnog dozrijevanja pri povišenoj temperaturi, s ciljem izlučivanja vrlo sitnih precipitata unutar aluminijske matrice.

3. MEHANIČKA SVOJSTAVA MATERIJALA

3.1. Ispitivanje mehaničkih svojstva

Velika primjena metalnih materijala, kao materijala u konstrukcijama, pripisuje se ponajviše vrlo dobrim mehaničkim svojstvima koja se određuju pomoću pojedinih mehaničkih ispitivanja. Mehanička svojstva su karakteristike materijala koje se očituju kada na materijal djeluje određena sila, a obično se izražava elastičnošću ili plastičnošću materijala. Prikazuju pojam za mehaničku otpornost materijala koja govori o ponašanju i otpornosti materijala u raznim uvjetima. Prema svojstvima se mogu podijeliti na plastične kao na primjer aluminij, na lomljive, tvrde ili krte kao što su staklo, kreda i silicij te čvrste ili žilave kakav je čelik. Iako mnogi materijali na neki način sadrže sva tri svojstva, svrstavamo ih u jednu od navedenih kategorija ovisno o tome koje ponašanje prevladava [18].

Općenito, mehanička svojstva i mnogo ostalih svojstava materijala posljedica su mikrostrukture materijala, koja se dobiva obradom određenog kemijskog sastava, određenim tehnološkim postupcima. Time se postiže željena mikrostruktura koja daje ciljana svojstva pa tako utječe i na mehanička. Poznavanjem korelacije struktura materijala može se unaprijed izračunati mehanička svojstva, no nažalost to vrijedi samo za idealne tvari jer u realnom materijalu su prisutne mnoge različite nepravilnosti i nesavršenosti u strukturi koje onemogućavaju takav izračun. U takvim materijalima mehanička svojstva se mogu odrediti samo eksperimentalnim putem te iz tog razloga je na području ispitivanja mehaničkih svojstava materijala razvijena različita laboratorijska oprema poput kidalice, tvrdomjera, Charpyjevog bata itd [18].

Ispitivanje materijala se radi kako bi se utvrdila svojstva prilikom proizvodnje, prerade ili upotrebe, s ciljem određivanja načina upotrebe i s ciljem poboljšavanja i optimizacije svojstava kako bi se dobili bolji materijali za nove proizvode, odnosno nova područja primjene [18].

Temeljni zadaci ispitivanja su:

- određivanje prikladnih veličina, odnosno vrijednosti svojstava temeljem kojih materijali mogu biti klasificirani,
- kontinuirana i široko automatizirana kontrola svojstva tijekom proizvodnog procesa, prerade i obrade materijala s ciljem otkrivanjem potencijalnih grešaka,

- kontinuirana kontrola stanja materijala nakon određenog vremena trajanja eksploatacije,
- istraživanje uzroka raznih oštećenja i lomova strojnih dijelova i elemenata konstrukcija,
- razvoj novih materijala [18].

Pri ispitivanjima najčešće se nastoje ostvariti uvjeti kojima će određeni materijal biti izložen prilikom korištenja. Ispitivanja mehaničkih svojstava materijala provodi se na posebno pripremljenim uzorcima poput epruveta ili ostalih ispitnih uzoraka. Također, ispitivanja se mogu provoditi i na gotovim strojnim elementima ili na sklopovima. Prema vrsti opterećenja tijekom eksploatacije, epruvete se najčešće opterećuju na savijanje, uvijanje vlak, tlak, i smik [18].

Općenito sistematizacija mehaničkih ispitivanja je:

- prema načinu djelovanja opterećenja,
- prema brzini djelovanja opterećenja,
- prema temperaturi ispitivanja,
- prema trajanju djelovanja opterećenja [19].

Samo opterećenje može biti statičko - stalno tijekom vremena ili s malim prirastom opterećenja u jedinici vremena, odnosno dinamičko ukoliko se njegov intenzitet mijenja u vremenu [18]. Vrste ispitivanja mehaničkih svojstava materijala prikazane su u Tablica 7.

Tablica 7. Različite vrste ispitivanja mehaničkih svojstava materijala [18]

| Način djelovanja opterećenja | Trajanje djelovanja opterećenja | |
|------------------------------|---|---------------------|
| | Kratkotrajno | Dugotrajno |
| Statičko | Vlačno ispitivanje Tlačno ispitivanje Savojno ispitivanje Uvojno ispitivanje Smično ispitivanje | Ispitivanje puzanja |
| Dinamično/udarno | Ispitivanje udarnog rada loma | Ispitivanje umora |

Prilikom ispitivanja, materijal se također dovodi pod razna opterećenja, poput povećanja ili smanjenja temperature, dodavanje agresivnih atmosfera i drugih utjecaja u toj okolini ili na

samome uzorku. Time ciljano možemo saznati kako će materijal reagirati u tim uvjetima, te na temelju dobivenih rezultata približno definirati njegovo ponašanje [19].

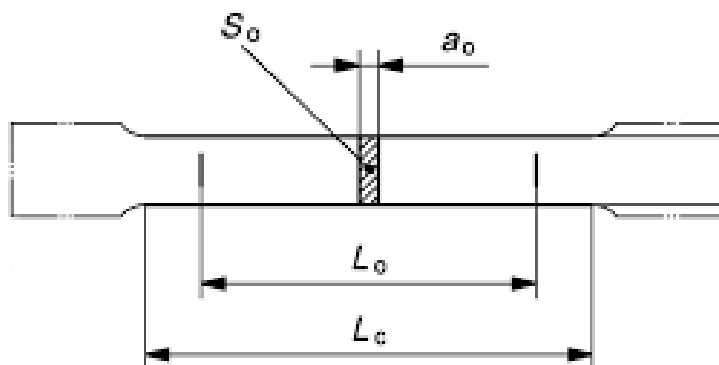
Zbog potrebe za usporedbom izmjerenih svojstava i performansi različitih materijala te dobivanje rezultata i donošenja zaključaka, korisnici i proizvođači materijala razvili su normirane metode ispitivanja. Neke takve norme su primjerice one Američkog društva za ispitivanje i materijale (ASTM - *American Society for Testing and Materials*) i međunarodne organizacije za standardizaciju (ISO - *International Organization for Standardization*) [18].

3.2. Statičko vlačno ispitivanje

Statičko vlačno ispitivanje je postupak kojim se utvrđuju osnovna mehanička svojstva materijala, te sama mehanička svojstva. Provodi se u svrhu uvida u ponašanje materijala u uvjetima jednoosnog statičkog vlačnog naprezanja, točnije ovim se ispitivanjem ispituju granica razvlačenja, rastezna čvrstoća, sila loma, istežljivost i kontrakcija [18].

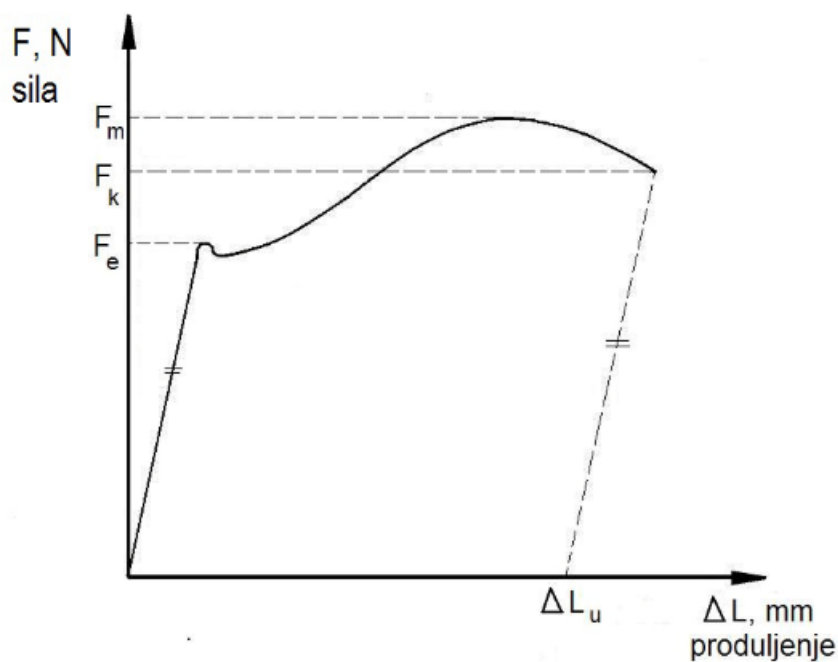
Uređaj koji se koristi za statičko vlačno ispitivanje naziva se kidalica ili univerzalna ispitivalica. Pomoću uređaja može se ostvariti vlačno ili tlačno statičko opterećenje, a obzirom kako se pogone, postoje mehaničke i hidrauličke kidalice. Ispitivanje se provodi na epruvetama koje se učvrste u čeljusti kidalice i koje se tada podvrgavaju vlačnom kontinuiranom naprezanju sve do puknuća odnosno loma, zatim se pisačem ili računalom iscrtava dijagram kidanja (sila – produljenje). U dijagramu se vidi ponašanja materijala tijekom procesa ispitivanja (Slika 8) [18].

Iz materijala koji se ispituje, izrezuje se epruveta normom propisanog oblika i dimenzija, kao što je prikazano na Slika 7. Uzorak je u većini slučajeva cilindričnog oblika, koji se izrađuje prema normi za statički rastezni pokus. Obzirom na dimenzije, cilindrične epruvete mogu biti normalne ($d_0 = 20$ mm) i proporcionalne ($d_0 \neq 20$ mm), a kada je riječ o početnoj mjernoj duljini razlikujemo duge ($L_0 = 11,3 \cdot \sqrt{S_0}$ mm) i kratke ($L_0 = 5,65 \cdot \sqrt{S_0}$ mm). Dok, plosnate epruvete (četvrtastog poprečnog presjeka) s obzirom na početnu mjernu duljinu, dijele se na duge i kratke [18].



Slika 7. Prikaz dimenzija ispitne epruvete

Slika 8 prikazuje dijagram kidanja. Prvi dio dijagrama prikazuje da je ovisnost između sile i produljenja epruvete linearna, a takav linearni odnos vrijedi sve do postizanja sile razvlačenja F_e . drugi dio dijagrama prikazuje da odnos sile i produljenja postaje nelinearan. Pri tome se opterećenje povećava sve do dostizanja maksimalne sile F_m , nakon čega se opterećenje smanjuje, a epruveta se nastavlja rastezati, zbog smanjenja površine poprečnog presjeka. Prilikom dostizanja konačne sile F_k dolazi do loma epruvete.



Slika 8. Dijagram kidanja [20]

Produljenje epruvete ΔL_u nakon kidanja iznosi:

$$\Delta L_u = L_u - L_0 \quad (1.1)$$

gdje L_u predstavlja mjeru duljina epruvete nakon kidanja, a L_0 je početna mjerna duljina epruvete [20].

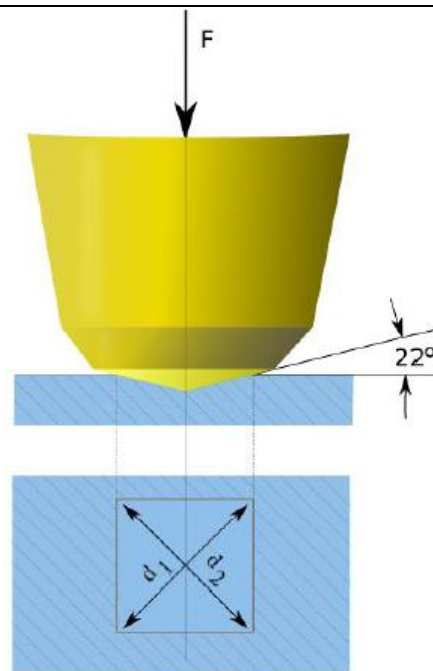
3.3. Ispitivanje tvrdoće

Tvrdoća je svojstvo materijala koje predstavlja otpornost materijala prema prodiranju nekog drugog, tvrdog tijela, a može se prikazati i kao otpor materijala prema plastičnom deformiranju. Mjerenje tvrdoće jedan je od najrasprostranjenijih postupaka kod ispitivanja mehaničkih svojstava materijala, razlog tome je što je tvrdoća povezana s pojedinim ostalim mehaničkim svojstvima (npr. vlačnom čvrstoćom). Mjerenje tvrdoće jednostavnije je i brže od ispitivanja nekih drugih mehaničkih svojstava. Nadalje, za ovo ispitivanje, ponekad nisu potrebni posebno izrađeni i pripremljeni uzorci već je ispitivanje moguće raditi na poluproizvodima ili čak na gotovim proizvodima [18].

Tvrdoća predstavlja otpornost materijala prema prodiranju nekog drugog, znatno tvrdog tijela, a može se izraziti i kao otpor materijala prema plastičnoj deformaciji. Razvijene su različite metode mjerenja tvrdoće: mjerenje prema Vickersu, mjerenje prema Rockwellu, mjerenje prema Brinellu i mjerenje po Shoreu [18].

Vickersova metoda (oznaka:HV)

Tvrdoća prema Vickersu je mjera otpornosti prema prodiranju dijamantne, četverostrane piramide s vršnim kutom od 136° , opterećene silom F (N) [18]. Opterećenje je moguće prilagoditi, kao primjere imamo HV5 i HV10, gdje broj pet ili deset označava primjenu opterećenja od pet ili deset kilograma. Penetrator ovakve geometrije ostavlja u materijalu otisak koje ima oblik piramide kvadratne baze, kako je prikazano na Slika 9.



Slika 9. Prikaz mjerenja tvrdoće Vickersovom metodom [18]

Za određivanje egzaktnog iznosa tvrdoće, potrebno je uz pomoć mjernog mikroskopa izmjeriti dvije međusobno okomite dijagonale kvadrata (d_1 i d_2) te izračunati srednju vrijednost d , a tvrdoća tada slijedi iz formule, gdje F predstavlja primijenjenu silu (N), a d predstavlja srednju vrijednost dijagonala ($d=(d_1+d_2)/2$, u mm) [18].

$$HV = \frac{F \cdot 0,1891}{d^2} \quad (1.2)$$

Vickersovom metodom uklanjaju su najveći nedostaci Brinellove metode, te je ovom metodom moguće mjeriti tvrdoću svih materijala, a vrijednosti izmjerene tvrdoće ne ovise o primjenjivanoj sili F . Primjenom malih sila utiskivanja, također moguće je mjeriti tvrdoću jako tankih uzoraka odnosno tvrdoću zrna (kristala) u mikrostrukturi materijala, no nedostaci ove metode su potreba za mikroskopom i zahtjevnija i duža priprema površine koja zahtijeva brušenje i poliranje [18].

4. EKSPERIMENTALNI DIO

4.1. Plan eksperimenta

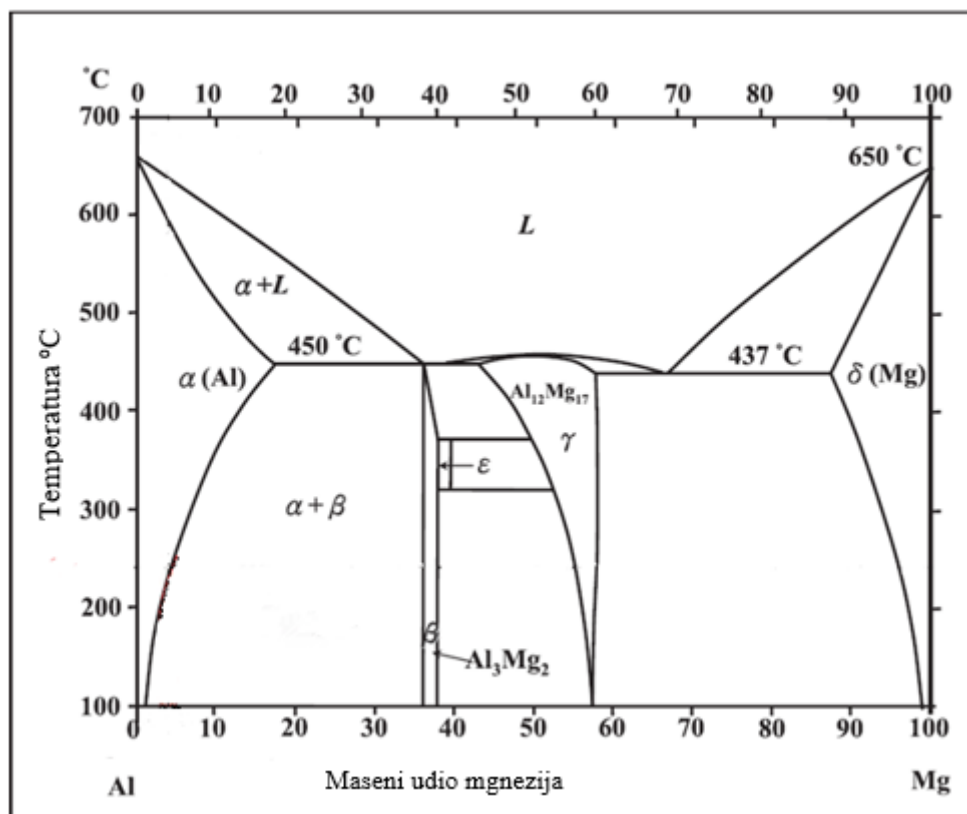
Eksperimentalni dio rada započeo je zaprimanjem serije od deset ispitnih epruveta u isporučenom stanju (odžareno stanje), nepoznatog kemijskog sastava.

Kemijski sastav je određen pomoću optičkog emisijskog spektrometra GDS 850 A, LECO u Laboratoriju za analizu metala Fakulteta strojarstva i brodogradnje te je prikazan je u Tablica 8.

Tablica 8. Kemijski sastav ispitnih epruveta

| Prosječni kemijski sastav epruveta | |
|------------------------------------|----------|
| Element | Udio (%) |
| Mg | 9,02 |
| Al | 82,47 |
| Si | 0,65 |
| Fe | 0,48 |
| Cu | 5,91 |
| Zr | 0,0027 |
| Pb | 0,78 |
| Bi | 0,69 |

Zaključeno je da se radi o Al – Mg leguri, udjela Mg od oko 9 %, te je na Slika 10 prikaz faznog dijagrama Al – Mg na temelju kojeg je odlučen tijek i postupak toplinske obrade. Toplinska obrada sastojala se od homogenizacijskog žarenja u trajanju od 6 sati na temperaturi od 500 °C i starenja u trajanju od 6 sati na temperaturi od 175 °C, uzorci su u oba slučaja hlađeni na zraku.



Slika 10. Al-Mg binarni fazni dijagram stanja [21]

Seriya je podijeljena u dvije šarže na kojima su se provodila ispitivanja. Prva šarža je ispitivana u isporučenom (odžarenom stanju) i sadrži pet epruveta, a druga šarža je ispitivana nakon provedene toplinske obrade i sadrži pet epruveta. Ispitna epruveta prikazana je na Slika 11.



Slika 11. Ispitna epruveta

Prvo je odrađeno statičko vlačno ispitivanje na obje šarže uzoraka, te su zatim iz pokidanih epruveta izrezani uzorci za analizu mikrostrukture i ispitivanje tvrdoće. Nakon izrezivanja uzoraka oni su brušeni, polirani i nagriženi te je slijedila analiza mikrostrukture. Zatim je na kraju, na istim uzorcima, odrađeno ispitivanje tvrdoće Vickersovom metodom – HV5 i HV10.

4.2. Statičko vlačno ispitivanje

Statičko vlačno ispitivanje provedeno je prema normi HRN EN ISO 6892-1:2016 na kidalici tipa EU 40 mod, serijskog broja 990.06/35 / 201/Eumod prikazanoj na Slika 12, u Laboratoriju za ispitivanje mehaničkih svojstva materijala Fakulteta strojarstva i brodogradnje. Mjerno područje kidalice je 0 – 400 kN, brzina ispitivanja je bila $0,001\text{s}^{-1}$ te je provedeno pri temperaturi $22,4\text{ }^{\circ}\text{C}$.



Slika 12. Kidalica VEB WPM / Eumod / 400 kN

Za provedbu ispitivanja korišten je i elektronski ekstenziometar MFA2 mjernog područja od 0,02 do 2 mm, prikazan na Slika 13.



Slika 13. Elektronski ekstenziometar MFA2

Ispitivanje je provedeno na:

- pet epruveta iz šarže u isporučenom stanju, redom označene brojevima 1, 2, 3, 4 i 5
- pet epruveta iz šarže toplinsko obrađene, redom označene brojevima 6, 7, 8, 9 i 10

Dimenzije epruveta prikazane su u Tablica 9.

Tablica 9. Dimenzija epruveta

| Oznaka/Veličina | d_0 [mm] | S_0 [mm ²] | L_0 [mm] |
|--------------------|------------|--------------------------|------------|
| Epruveta 1 | 12,02 | 113,54 | 60,00 |
| Epruveta 2 | 12,00 | 113,10 | 60,00 |
| Epruveta 3 | 12,16 | 116,13 | 60,00 |
| Epruveta 4 | 12,11 | 115,18 | 60,00 |
| Epruveta 5 | 12,03 | 113,66 | 60,00 |
| Epruveta 6 | 12,07 | 114,42 | 60,00 |
| Epruveta 7 | 11,91 | 111,41 | 60,00 |
| Epruveta 9 | 12,06 | 114,23 | 60,00 |
| Epruveta 10 | 11,80 | 109,36 | 60,00 |

Na Slika 14, Slika 15, Slika 16 prikazane su neke od epruveta nakon provedenog statičko vlačnog ispitivanja.



Slika 14. Epruveta 2 nakon ispitivanja



Slika 15. Epruveta 3 nakon ispitivanja



Slika 16. Epruveta 4 nakon ispitivanja

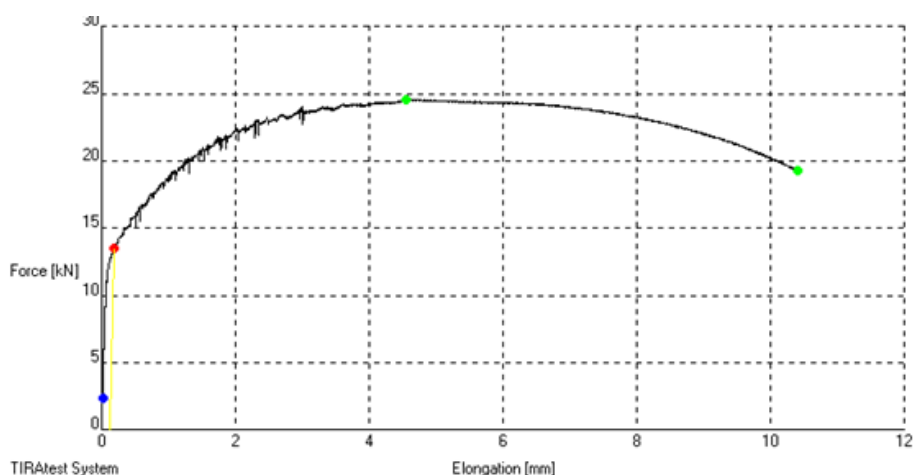
4.2.1. Rezultati statičko vlačnog ispitivanja epruveta u isporučenom stanju

Statičko vlačno ispitivanje je provedeno na epruvetama 1, 2, 3, 4 i 5 te su rezultati pokusa prikazani u

Tablica 10. Prijelom na epruvetama prilikom izvođenja pokusa nije se dogodio u drugoj trećini epruvete zbog neujednačenog početnog promjera d_0 po cijeloj početnoj dužini l_0 , odnosno konusnog oblika epruvete što je vidljivo na Slika 14, Slika 15, Slika 16. Dijagram kidanja epruvete 2 prikazan je na slici Slika 17.

Tablica 10. Rezultati statičko vlačnog ispitivanja epruveta u isporučenom stanju

| Oznaka/ veličina | d_u [mm] | S_u [mm ²] | L_u [mm] | F_m [kN] | F_k [kN] | $R_{p0,2}$ [N/mm ²] | R_k [N/mm ²] | R_m [N/mm ²] | $A_{5,65}$ [%] | Z [%] |
|---------------------|---------------|-----------------------------|---------------|---------------|---------------|------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------|--------------|
| Epruveta 1 | 8,14 | 52,04 | 74,01 | 24,68 | 19,46 | 118,45 | 171,2 | 217,1 | 23,35 | 54,22 |
| Epruveta 2 | 7,93 | 49,39 | 73,33 | 24,57 | 19,16 | 117,83 | 167,5 | 214,7 | 22,22 | 56,83 |
| Epruveta 3 | 8,22 | 53,07 | 72,84 | 24,39 | 19,67 | 115,47 | 176,6 | 218,9 | 21,40 | 52,37 |
| Epruveta 4 | 8,13 | 51,91 | 71,43 | 24,35 | 19,16 | 122,03 | 167,7 | 213,2 | 21,05 | 51,25 |
| Epruveta 5 | 8,11 | 51,66 | 71,68 | 23,19 | 18,56 | 119,78 | 169,7 | 212,1 | 22,47 | 56,96 |
| \bar{X} | / | / | / | 24,24 | 19,2 | 118,71 | 170,5 | 215,2 | 22,1 | 54,33 |
| St. dev. | / | / | / | 0,54 | 0,37 | 2,17 | 3,3 | 2,5 | 0,8 | 2,3 |



Slika 17. Dijagram kidanja za epruvetu 2

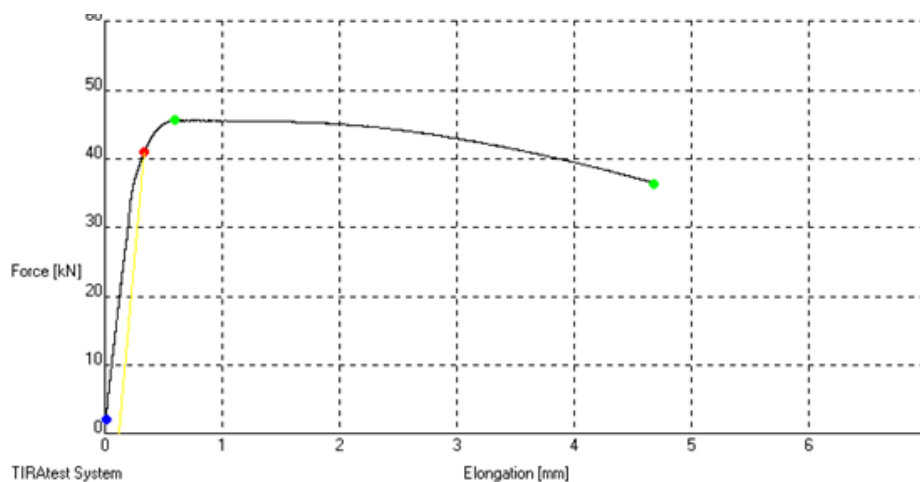
4.2.2. Rezultati statičko vlačnog ispitivanja nakon toplinske obrade

Statičko vlačnog ispitivanje uzoraka nakon provedene toplinske obrade provedeno je na epruvetama 6, 7, 8, 9 i 10 te su rezultati pokusa prikazani u

Tablica 11, dok su neke od epruveta nakon ispitivanja prikazane na Slika 19, Slika 20, Slika 21. Prijelom na epruvetama prilikom izvođenja pokusa, isto kao i kod uzoraka u isporučenom stanju, nije se dogodio u drugoj trećini epruvete zbog neujednačenog početnog promjera d_0 po cijeloj početnoj dužini l_0 , odnosno konusnog oblika epruvete kao i kod epruveta u isporučenom stanju. Dijagram kidanja epruvete 6 prikazan je na Slika 18 Slika 17.

Tablica 11. Rezultati statičko vlačnog ispitivanja nakon toplinske obrade

| Oznaka/ veličina | d_u [mm] | S_u [mm ²] | L_u [mm] | F_m [kN] | F_k [kN] | $R_{p0,2}$ [N/mm ²] | R_k [N/mm ²] | R_m [N/mm ²] | $A_{5,65}$ [%] | Z [%] |
|---------------------|---------------|-----------------------------|---------------|---------------|---------------|------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------|--------------|
| Epruveta 6 | 9,19 | 66,54 | 69,80 | 45,75 | 36,58 | 312,24 | 322,1 | 403,1 | 14,25 | 41,52 |
| Epruveta 7 | 9,21 | 66,62 | 69,90 | 45,55 | 36,37 | 312,04 | 321,6 | 402,8 | 14,50 | 41,09 |
| Epruveta 8 | 9,2 | 66,48 | 68,60 | 47,16 | 38,14 | 320,68 | 328,4 | 406,1 | 14,33 | 42,76 |
| Epruveta 9 | 9,29 | 67,78 | 68,25 | 46,12 | 37,62 | 324,18 | 326,6 | 400,4 | 13,75 | 41,15 |
| Epruveta 10 | 9,25 | 67,26 | 68,01 | 45,89 | 38,02 | 327,18 | 326,8 | 401,5 | 13,95 | 41,27 |
| \bar{X} | / | / | / | 46,09 | 37,35 | 319,26 | 319,1 | 402,8 | 14,16 | 41,56 |
| <i>St. dev.</i> | / | / | / | 0,56 | 0,73 | 6,17 | 2,7 | 1,9 | 0,27 | 0,62 |



Slika 18. Dijagram kidanja za epruvetu 6



Slika 19. Epruveta 10 nakon ispitivanja



Slika 20. Epruveta 6 nakon ispitivanja



Slika 21. Epruveta 7 nakon ispitivanja

4.3. Analiza mikrostrukture

4.3.1. Brušenje i poliranje

Iz ispitne epruvete 1 (isporučeno stanje) i 6 (toplinski obrađeno) izrezani su uzorci za analizu mikrostrukture (kasnije korišteni i za ispitivanje tvrdoće), uzorci su prikazani na Slika 29. Priprema uzoraka za analizu mikrostrukture započela je brušenjem izrezanih segmenata na uređaju Mecatech 250 – PRESI prikazanog na Slika 22. Brušenje je provedeno u pet koraka odnosno korišteno je pet vrsta brusnih papira različitih veličina brusnih zrnaca. Redom od najgrubljeg prema najfinijem, korišteni su brusni papiri oznake P320, P600, P1000, P2400 i P4000. Brzina okretaja glavne ploče u svakom koraku brušenja bila je jednaka i iznosila je 300 o/min. Prilikom brušenja korišteno je vodeno hlađenje i podmazivanje, te je dovod tekućine za hlađenje i podmazivanje osiguran pomoću bijele cjevčice vidljive na Slika 22.



Slika 22. Uređaj za brušenje i poliranje Mecatech 250 – PRESI

Nakon brušenja na ispitnim uzorcima bili su vidljivi tragovi brušenja stoga je provedeno i poliranje. Poliranje je provedeno na istom uređaju kao i brušenje. Brzina okretaja glavne ploče prilikom poliranja iznosila je 150 o/min u svakom koraku poliranja i umjesto vode, za hlađenje i podmazivanje korišten je lubrikant čiji je dovod osiguran pomoću dviju crnih cjevčica vidljivih na Slika 22. Za poliranje je korištena tkanina, a u prvom koraku poliranja je korištena dijamantna pasta sa veličinom zrnaca 3 μm , dok je u drugom koraku poliranja korištena tekućina za poliranje s veličinom zrnaca 0,03 μm .

4.3.2. Nagrizanje

Nakon poliranja rađeno je i nagrizanje na svim uzorcima. Za nagrizanje je korištena otopina za nagrizanje Keller's Reagent, standardna otopina za nagrizanje aluminijske i aluminijeve legure.

Sastav otopine je sljedeći:

- 2,5 mL HNO_3
- 1,5 mL HCl
- 1,5 mL HF
- 95 mL destilirana voda

Postupak nagrizanja se sastoji od uranjanja svakog uzorka u otopinu za nagrizanje, držanje u trajanju od 20 sekundi u otopini, te ispiranje u vodi i sušenja.

4.3.3. Dobivanje slike mikrostrukture

Pomoću svjetlosnog mikroskopa Olympus GX51 prikazanog na slikama Slika 23 i Slika 24, dobiven je prikaz mikrostrukture uzoraka 1 i 6 pri povećanjima 50x, 100x, 200x i 500x. Prikaz slike mikrostrukture osiguran je pomoću kamere spojene na svjetlosni mikroskop koja prenosi sliku na računalo.

Mikrostruktura je promatrana pri povećanjima 100x i 500x. Na Slika 25 i Slika 26 prikazana je mikrostruktura uzorka 6, a na Slika 27 i Slika 28 mikrostruktura uzorka 1.



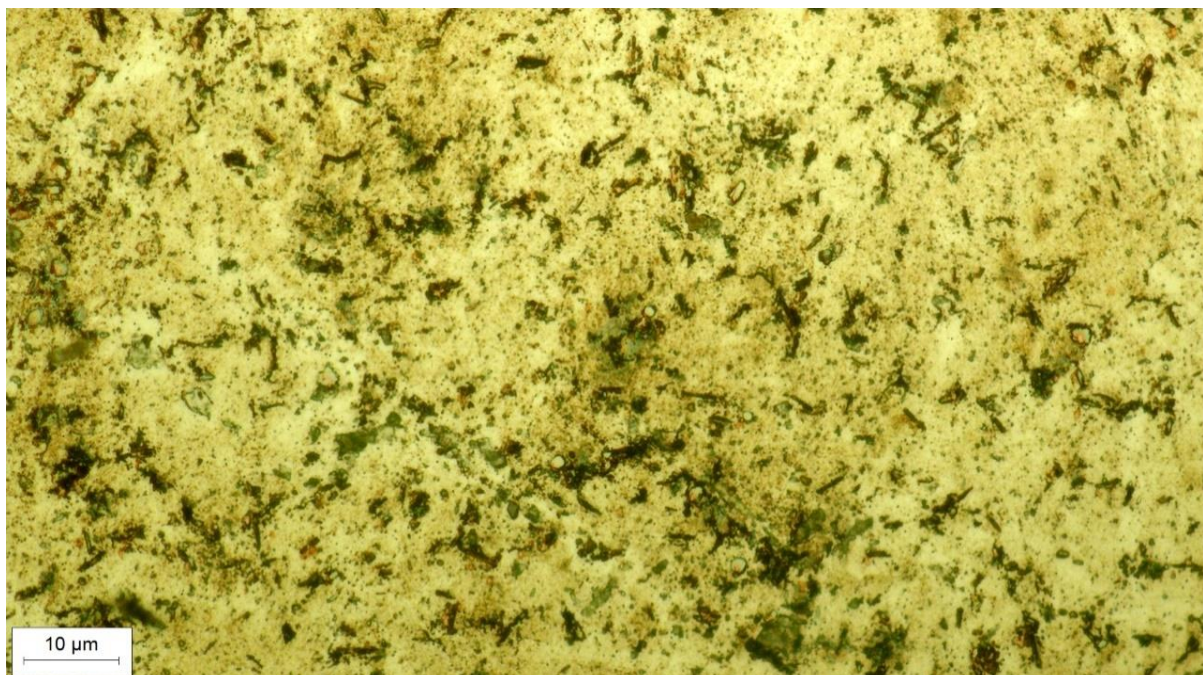
Slika 23. Svjetlosni mikroskop Olympus GX51 (1)



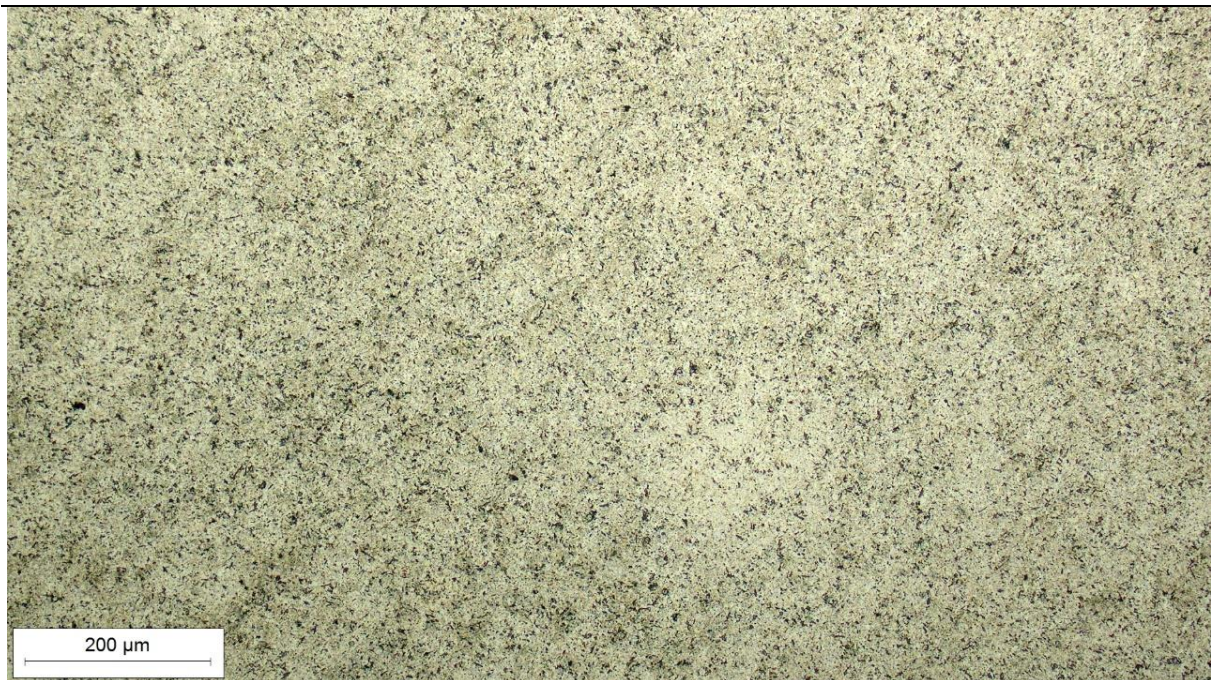
Slika 24. Svjetlosni mikroskop Olympus GX51 (2)



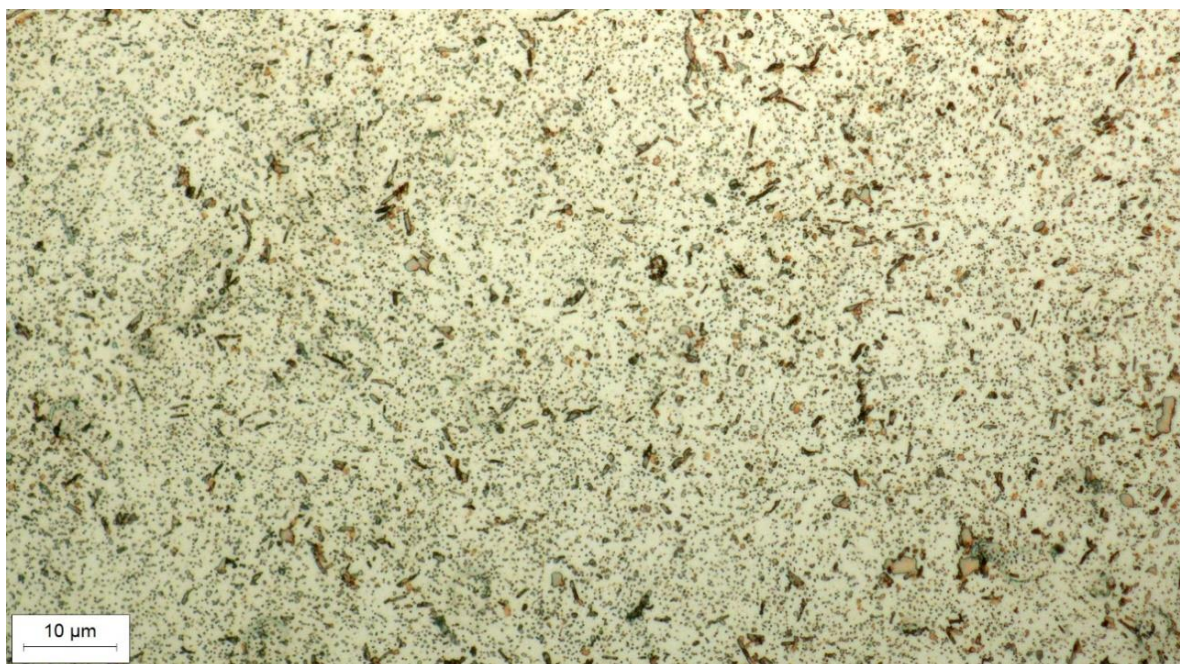
Slika 25. Uzorak 6, povećanje 100x



Slika 26. Uzorak 6, povećanje 500x



Slika 27. Uzorak 1, povećanje 100x



Slika 28. Uzorak 1, povećanje 500x

Dobivena mikrostruktura nakon toplinske obrade je sitnozrnata s vidljivim jednoliko raspršenim precipitatima intermetalne faze magnezija i aluminija izlučenim po granicama zrna.

4.4. Mjerenje tvrdoće

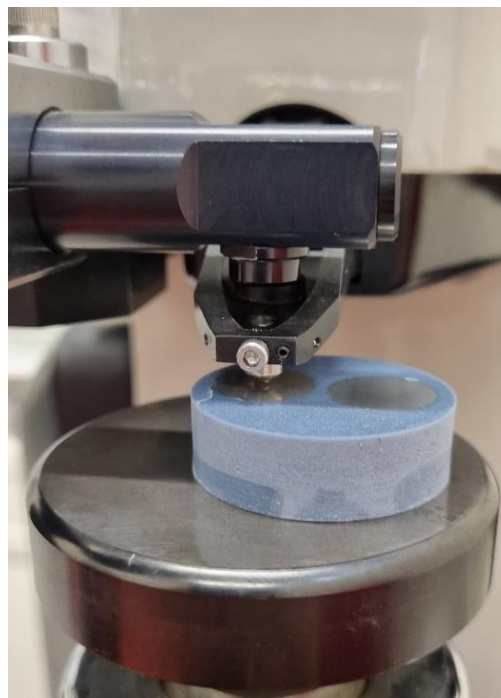
Ispitivanje tvrdoće provedeno je Vickers metodom – HV5 i HV10 na ispitnim uzorcima 1 (isporučeno stanje) i 6 (toplinski obrađeno) prikazanim na Slika 29. Za provedbu eksperimenta korišten je tvrdomjer proizvođača IDENTEC, model 5030 TKV, prikazan na Slika 30. Mjerno područje tvrdomjera je od HV1 do HV50, a razlučivost je 0,1 HV. Na svakom uzorku tvrdoća se mjerila 5 puta prema HV5 i 5 puta prema HV10. Postupak mjerenja tvrdoće prikazan je na Slika 31.



Slika 29. Uzorak 1 (lijevo) i 6 (desno) za mjerenje tvrdoće i analizu mikrostrukture



Slika 30. Tvrdomjer IDENTEC, model 5030 TKV



Slika 31. Mjerenje tvrdoće

4.4.1. Rezultati mjerenja tvrdoće

Rezultati mjerenja tvrdoće za ispitni uzorak 1 prema HV5 i HV10 prikazani su u Tablica 12. Rezultati mjerenja tvrdoće za uzorak 1.

Tablica 12. Rezultati mjerenja tvrdoće za uzorak 1

| Mjerenje | HV5 | HV10 |
|-----------------|-------------|-------------|
| 1. | 64,8 | 66,2 |
| 2. | 64,3 | 66,1 |
| 3. | 65,5 | 66,7 |
| 4. | 65,6 | 65,8 |
| 5. | 66,4 | 67,0 |
| \bar{X} | 65,3 | 66,4 |
| <i>St. dev.</i> | 0,7 | 0,4 |

Rezultati mjerenja tvrdoće za ispitni uzorak 6 prema HV5 i HV10 prikazani su u Tablica 13. Rezultati mjerenja tvrdoće za uzorak 6

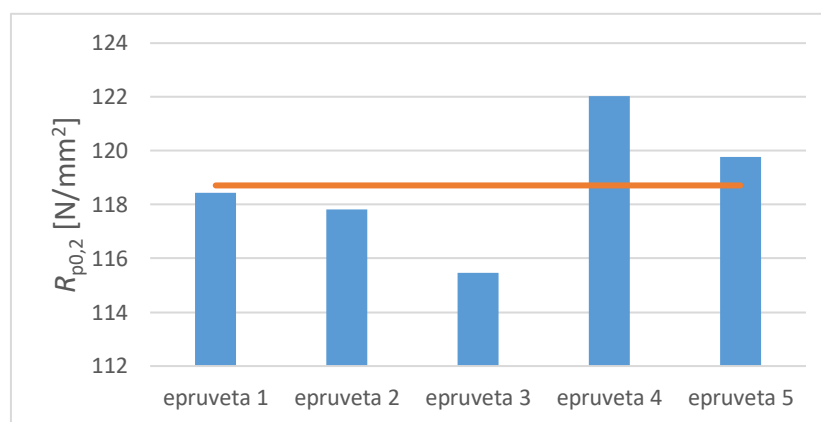
Tablica 13. Rezultati mjerenja tvrdoće za uzorak 6

| Mjerenje | HV5 | HV10 |
|-----------------|--------------|--------------|
| 1. | 124,8 | 125,0 |
| 2. | 122,7 | 126,0 |
| 3. | 125,8 | 125,1 |
| 4. | 124,1 | 126,6 |
| 5. | 128,5 | 126,7 |
| \bar{X} | 125,2 | 125,9 |
| <i>St. dev.</i> | 1,9 | 0,7 |

4.5. Analiza rezultata

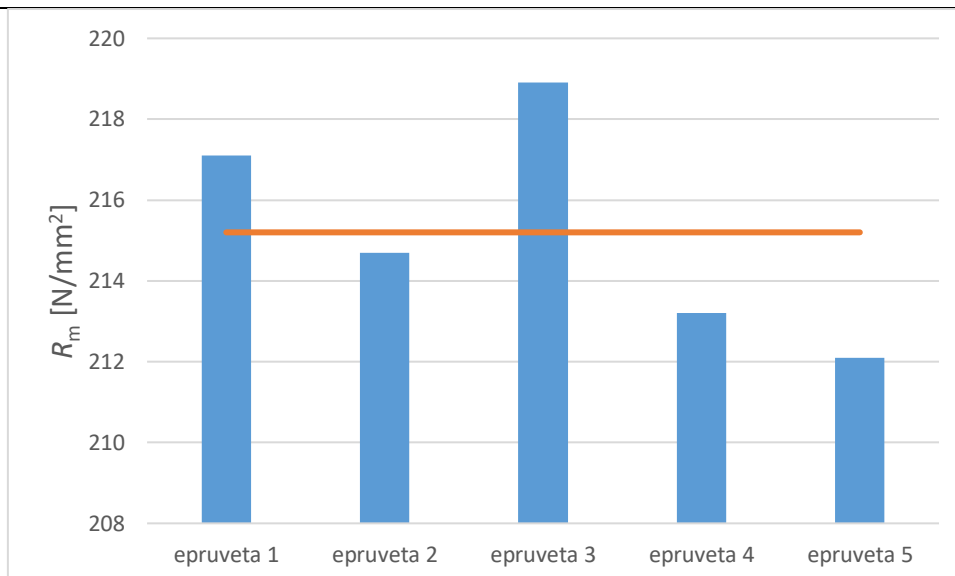
4.5.1. Analiza rezultata statičko vlačnog ispitivanja za isporučeno stanje

Na Slika 32. Grafički prikaz vrijednosti konvencionalne granice razvlačenja epruveta u isporučenom stanju prikazane su vrijednosti konvencionalne granice razvlačenja epruveta u isporučenom stanju u usporedbi sa srednjom vrijednosti svih epruveta.



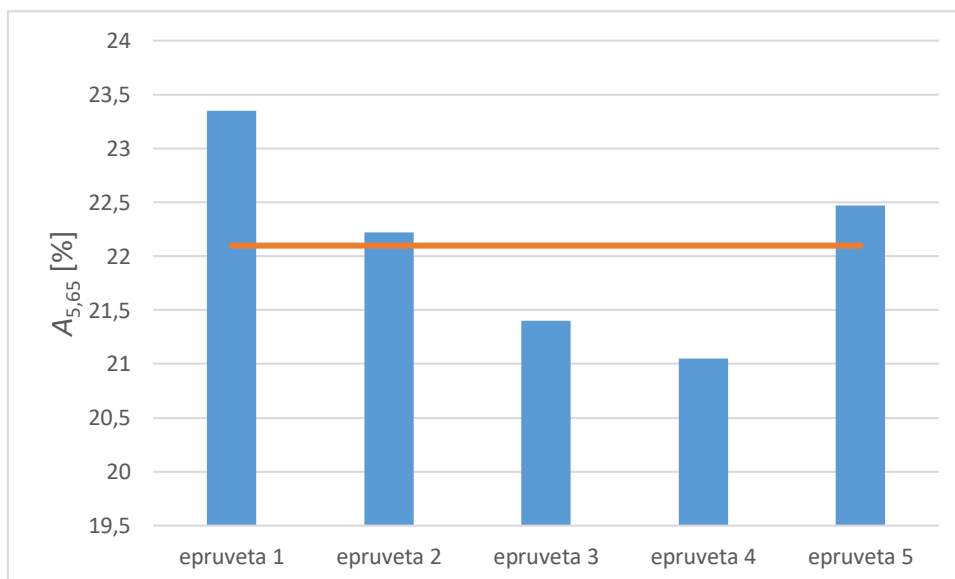
Slika 32. Grafički prikaz vrijednosti konvencionalne granice razvlačenja epruveta u isporučenom stanju

Na Slika 33. Grafički prikaz vrijednosti vlačne čvrstoće epruveta u isporučenom stanju prikazane su vrijednosti vlačnih čvrstoća epruveta u isporučenom stanju u usporedbi sa srednjom vrijednosti svih epruveta.



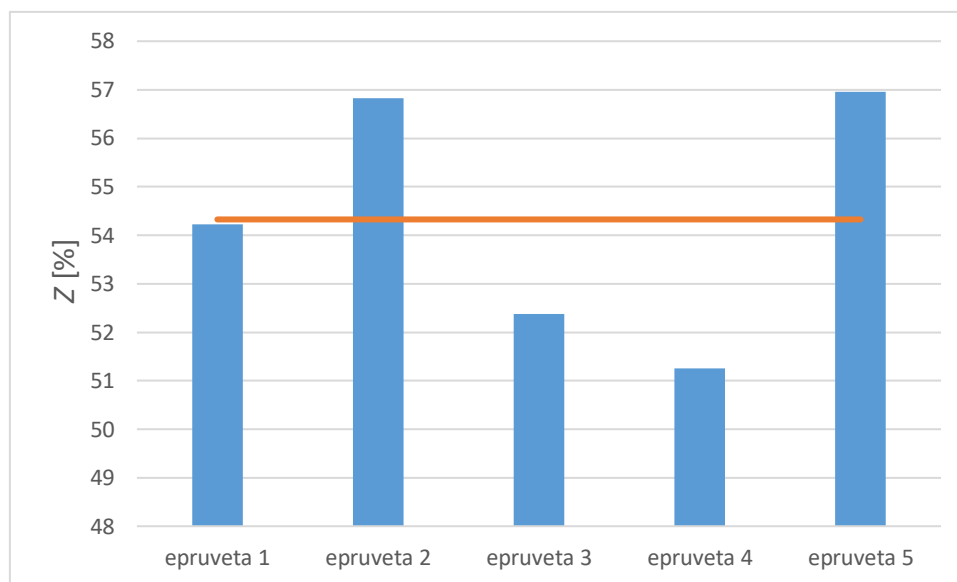
Slika 33. Grafički prikaz vrijednosti vlačne čvrstoće epruveta u isporučenom stanju

Na Slika 34. Grafički prikaz vrijednosti istežljivosti epruveta u isporučenom stanju prikazane su vrijednosti istežljivosti epruveta u isporučenom stanju u usporedbi sa srednjom vrijednosti svih epruveta.



Slika 34. Grafički prikaz vrijednosti istežljivosti epruveta u isporučenom stanju

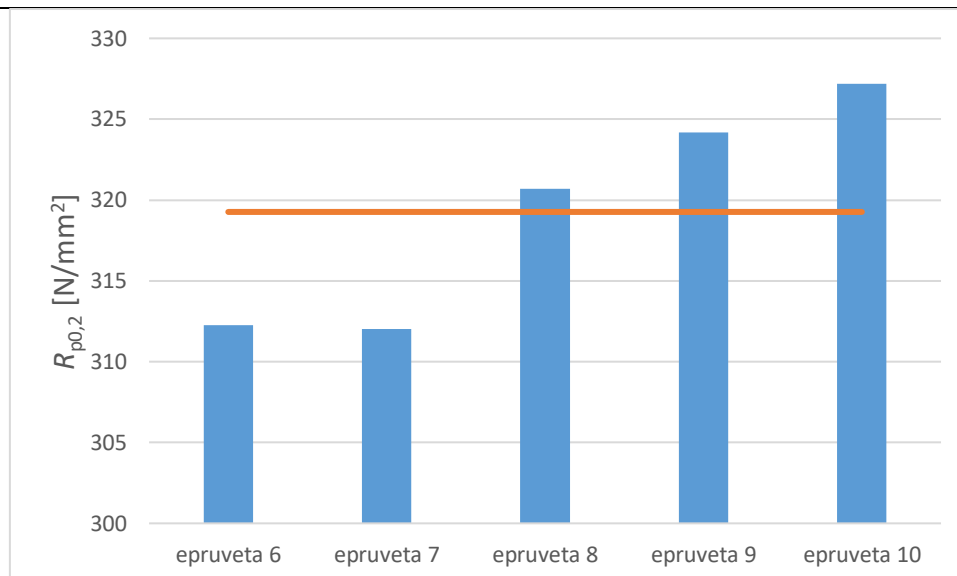
Na Slika 35. Grafički prikaz vrijednosti kontrakcije epruveta u isporučenom stanju prikazane su vrijednosti kontrakcije epruveta u isporučenom stanju u usporedbi sa srednjom vrijednosti svih epruveta.



Slika 35. Grafički prikaz vrijednosti kontrakcije epruveta u isporučenom stanju

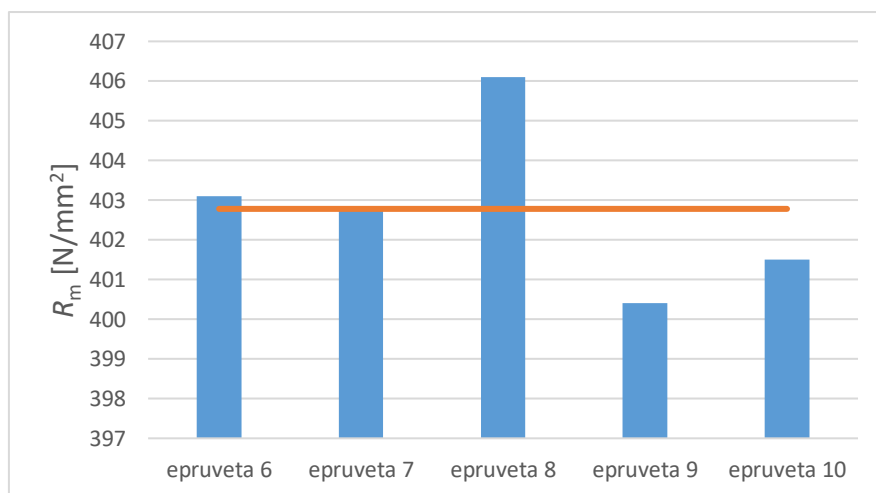
4.5.2. Analiza rezultata statičko vlačnog ispitivanja nakon toplinske obrade

Na Slika 36. Grafički prikaz vrijednosti konvencionalne granice razvlačenja epruveta nakon toplinske obrade prikazane su vrijednosti konvencionalne granice razvlačenja epruveta nakon toplinske obrade u usporedbi sa srednjom vrijednosti svih epruveta.



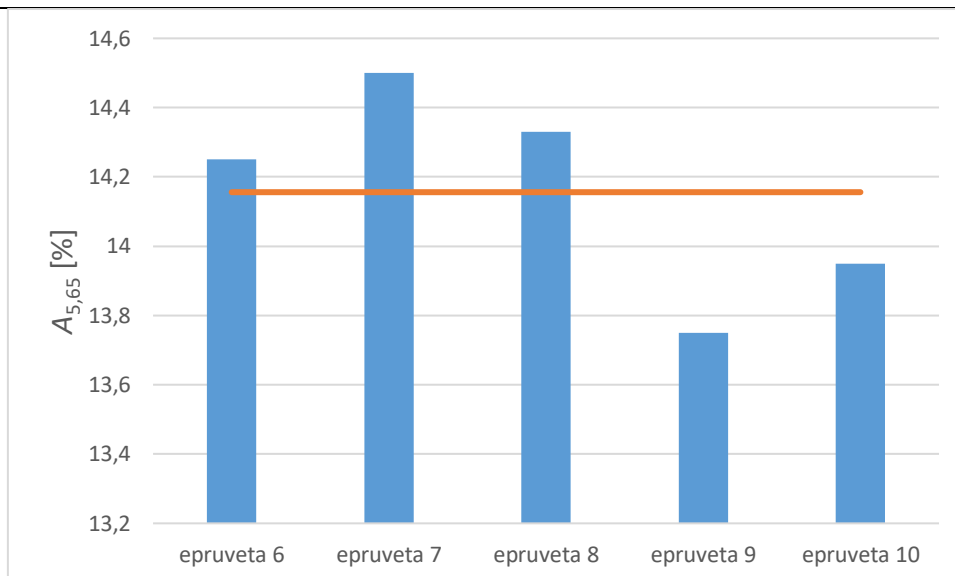
Slika 36. Grafički prikaz vrijednosti konvencionalne granice razvlačenja epruveta nakon toplinske obrade

Na Slika 37. Grafički prikaz vrijednosti vlačne čvrstoće epruveta nakon toplinske obrade prikazane su vrijednosti vlačne čvrstoće epruveta nakon toplinske obrade u usporedbi sa srednjom vrijednosti svih epruveta.



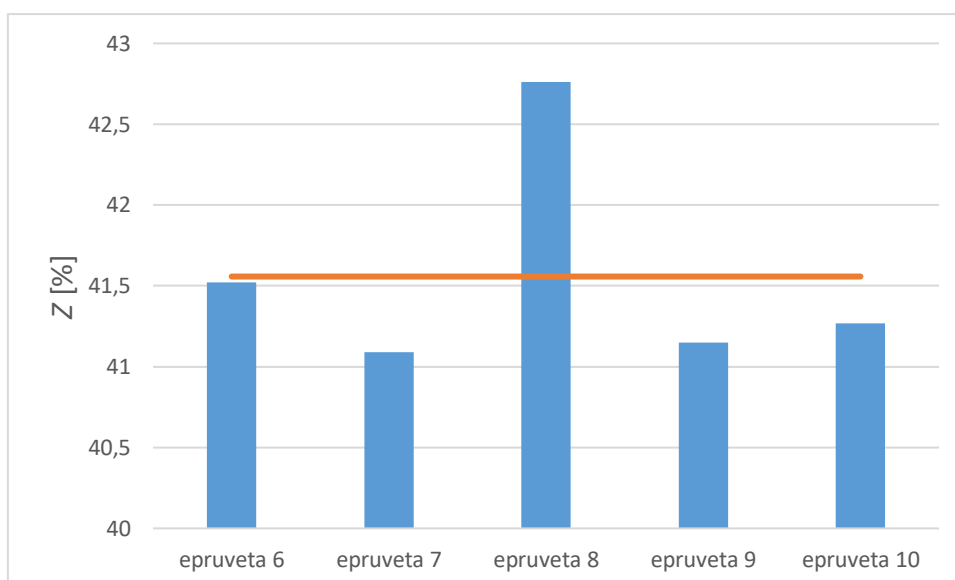
Slika 37. Grafički prikaz vrijednosti vlačne čvrstoće epruveta nakon toplinske obrade

Na Slika 38. Grafički prikaz vrijednosti istežljivosti epruveta nakon toplinske obrade prikazane su vrijednosti istežljivosti epruveta nakon toplinske obrade u usporedbi sa srednjom vrijednosti svih epruveta.



Slika 38. Grafički prikaz vrijednosti istezljivosti epruveta nakon toplinske obrade

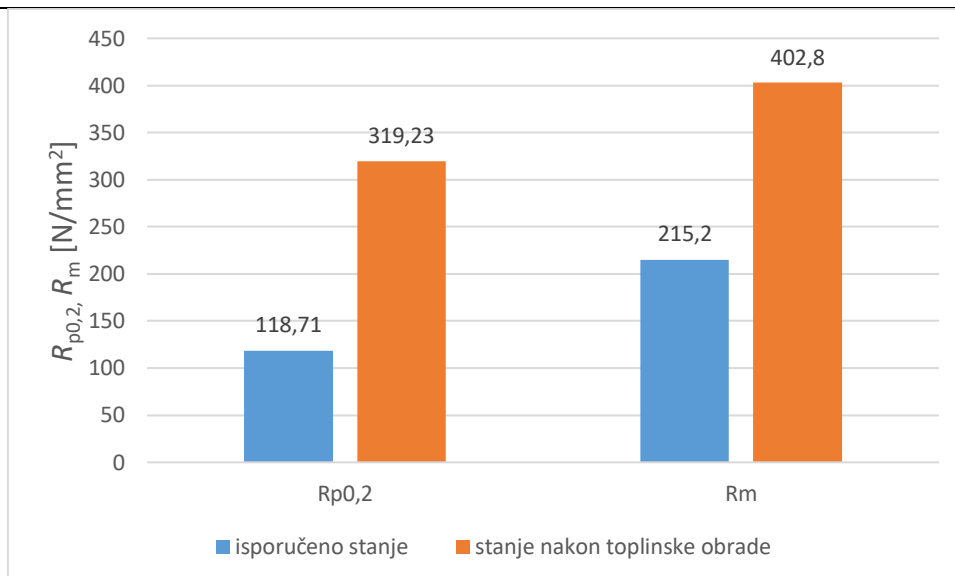
Na Slika 39. Grafički prikaz vrijednosti kontrakcije epruveta nakon toplinske obrade prikazane su vrijednosti kontrakcije epruveta nakon toplinske obrade u usporedbi sa srednjom vrijednosti svih epruveta.



Slika 39. Grafički prikaz vrijednosti kontrakcije epruveta nakon toplinske obrade

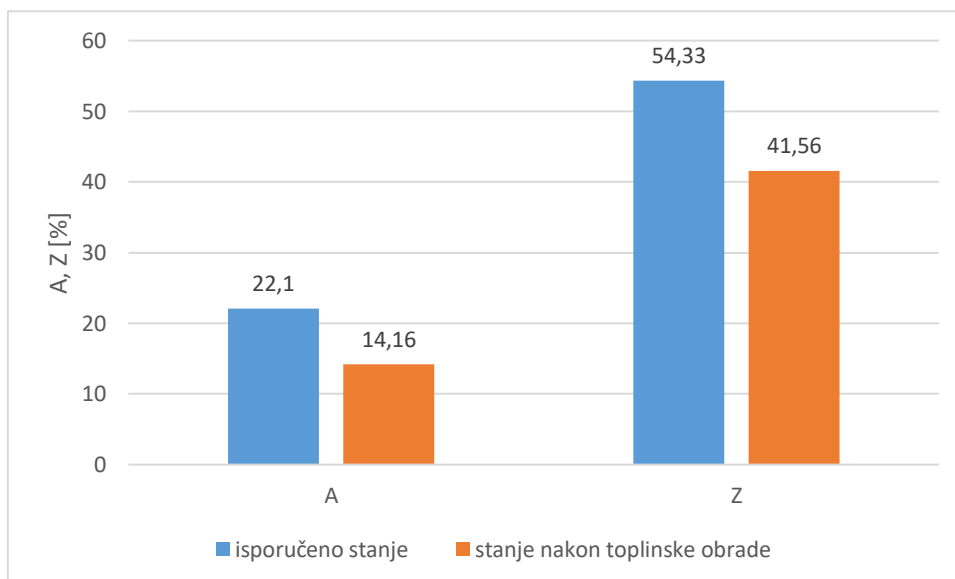
4.5.3. Usporedba rezultata statičko vlačnog ispitivanja

Na Slika 40. Usporedba srednjih vrijednosti vlačne čvrstoće i konvencionalne granice razvlačenja prikazana je usporedba srednjih vrijednosti vlačne čvrstoće i konvencionalne granice razvlačenja. Iz dijagrama je vidljiv porast vlačne čvrstoće i konvencionalne granice razvlačenja nakon provedene toplinske obrade.



Slika 40. Usporedba srednjih vrijednosti vlačne čvrstoće i konvencionalne granice razvlačenja

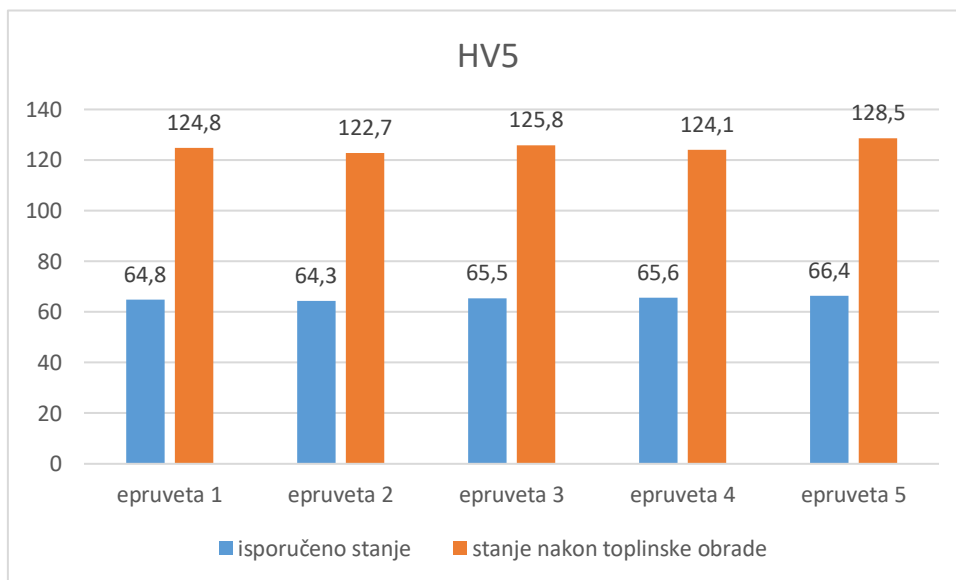
Na Slika 41. Usporedba srednjih vrijednosti istezljivosti i kontrakcije prikazana je usporedba srednjih vrijednosti istezljivosti i kontrakcije. Iz dijagrama je vidljivo smanjenje istezljivosti i kontrakcije nakon provedene toplinske obrade.



Slika 41. Usporedba srednjih vrijednosti istezljivosti i kontrakcije

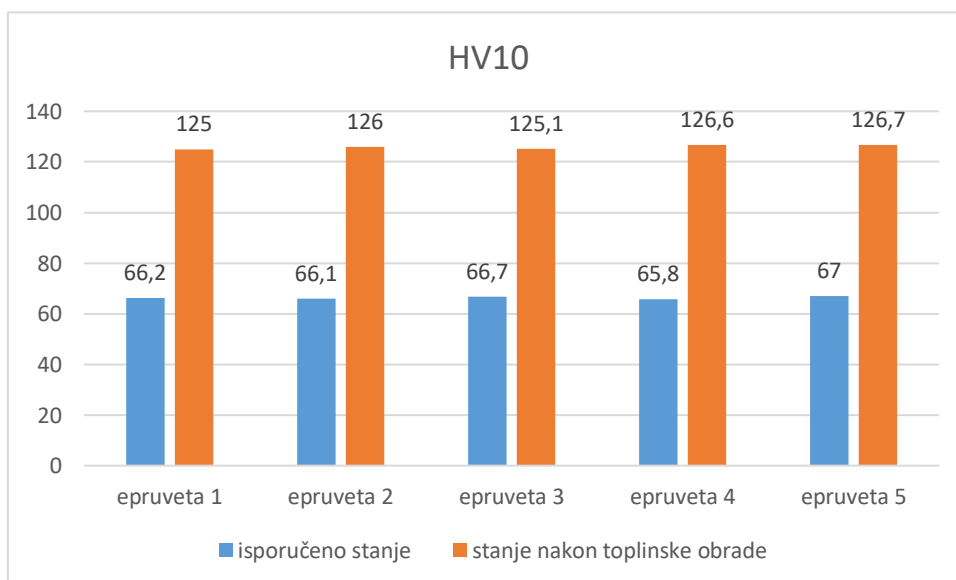
4.5.4. Analiza rezultata mjerenja tvrdoće

Na Slika 42. Usporedba iznosa tvrdoće HV5 prikazan je iznos tvrdoće HV5 epruveta u isporučenom stanju i nakon toplinske obrade.



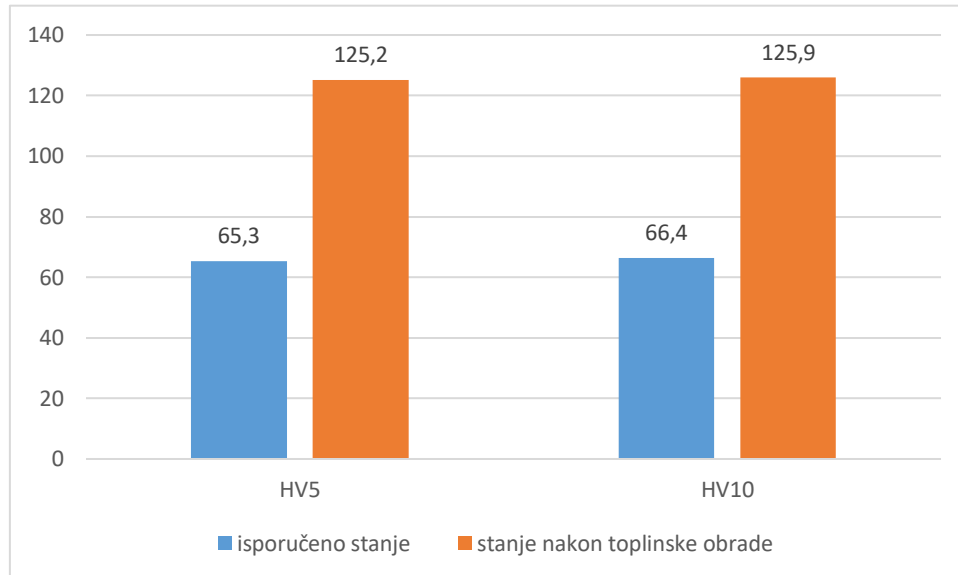
Slika 42. Usporedba iznosa tvrdoće HV5

Na Slika 43 prikazan je iznos tvrdoće HV10 epruveta u isporučenom stanju i nakon toplinske obrade.



Slika 43. Usporedba iznosa tvrdoće HV10

Na Slika 44 prikazana je usporedba srednjih vrijednosti tvrdoća u isporučenom stanju i nakon toplinske obrade.



Slika 44. Usporedba srednjih vrijednosti tvrdoća u isporučenom stanju i nakon toplinske obrade

Iz prethodnih dijagrama je vidljiv porast tvrdoće nakon provedene toplinske obrade.

5. ZAKLJUČAK

U teorijskom dijelu dan je pregled aluminijskih legura s naglaskom na toplinski obradive legure, opisan je način precipitacijskog očvrnuća i prikazani su postupci ispitivanja mehaničkih svojstava. U eksperimentalnom dijelu od uzoraka nepoznatog sastava preko kemijske analize definirana je vrsta aluminijske legure na temelju koje smo postavili parametre toplinske obrade te proveli ispitivanja čvrstoće i tvrdoće.

Na temelju provedenih eksperimentalnih ispitivanja doneseni su sljedeći zaključci:

- Analizom mikrostrukture utvrđena je prisutnost sitnih jednoliko raspršenih precipitata unutar α – kristala mješanca aluminijske legure koji su nastali procesom toplinske obrade.
- Odgovarajućom toplinskom obradom aluminijskih legura moguće je postići značajne promjene njihovih mehaničkih svojstava što nam omogućava širi spektar primjene aluminijskih legura.
- Na temelju rezultata eksperimentalnih ispitivanja na određenoj aluminijskoj leguri i provedbom odgovarajuće toplinske obrade postignuto su sljedeće promjene mehaničkih svojstava u odnosu na polazno stanje:
 - povećanje konvencionalne granice razvlačenja $R_{p0,2}$ za 168,86 %
 - povećanje vlačne čvrstoće R_m za 87,17 %
 - smanjenje istežljivosti $A_{5,65}$ za 35,93 %
 - smanjenje kontrakcije Z za 23,50 %
 - povećanje tvrdoće za 91,73 %

Ovom promjenom mehaničkih svojstava značajno su proširene sposobnosti ove aluminijske legure a time njezino ponašanje u eksploatacijskim uvjetima.

- Odgovarajućom toplinskom obradom moguće je postići točno ciljana mehanička svojstva aluminijskih legura što se može vidjeti kroz literaturne podatke o velikom broju istraživanja koja se provode na različitim aluminijskim legurama.
- Otpornost na koroziju, dobra zavarljivost i obradivost Al – Mg legura u kombinaciji s toplinskom obradom čime se dodatno poboljšavaju mehanička svojstva čine ih pogodnim za izradu konstrukcijskih dijelova u brodogradnji, automobilskoj i građevinskoj industriji.

6. LITERATURA

- [1] Z. Lenhard, "METALURGIJA OBOJENIH METALA II." Sisak, 2008.
- [2] M. Pulić, "Utjecaj toplinske obrade na mikrostrukturu i mehanička svojstva aluminijeve legure," Diplomski rad, Sveučilište u Zagrebu, Diplomski rad, 2017. [Online]. Available: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:079959>
- [3] Ćorić D. and Filetin T., "Materijali u zrakoplovstvu." Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2012.
- [4] Filetin T., Kovačiček F., and Indof J., "Svojstva i primjena materijala." Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2002.
- [5] G. Lesoult, "Basic Conceptin Crystal Growth and Solidification," *ASM Handbook*. ASM International, Casting, 2002.
- [6] Callister W. D. Jr. and Rethwisch D. G., *Fundamentals of Materials Science and Engineering: An Integrated Approach, 3e*, Third edition. United States: John Wiley & sons, inc., 2007.
- [7] B. Tubić, "UTJECAJ TEHNOLOŠKE OBRADJE TALINE NA RAZVOJ MIKROSTRUKTURE I MEHANIČKIH SVOJSTAVA ALSI12 LEGURE," Diplomski rad, Sveučilište u Zagrebu, Metalurški fakultet, Sisak, 2019.
- [8] J. G. Kaufman, "Aluminum Alloy Castings: Properties, Processes and Applications," *ASM International*. 2004.
- [9] D. Branko Bauer, "LJEVARSTVO PROIZVODNI POSTUPCI".
- [10] Davis J. R., "ASM International Handbook Committee: Aluminum and aluminum alloys," *ASM International*. 2007.
- [11] Gojić M., "Tehnike spajanja i razdvajanja materijala." Metalurški fakultet, Sisak, 2003.

- [12] “Mechanisms for Strengthening Aluminum - metallurgy article.” <https://www.imetllc.com/mechanisms-strengthening-aluminum/> (accessed Jun. 18, 2022).
- [13] Sinanović A., “Primjena keramičkih podloga kod MIG zavarivanja aluminija,” Diplomski rad, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2016.
- [14] Stupnišek M. and Cajner F., *Osnove toplinske obrade metala*. Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2017.
- [15] “Coric, Filetin - Materijali U Zrakoplovstvu | PDF.” <https://www.scribd.com/doc/64729283/Coric-Filetin-Materijali-u-Zrakoplovstvu> (accessed Jun. 19, 2022).
- [16] D. Grizelj, “Utjecaj toplinske obrade aluminijskih legura namehanička svojstva,” Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, 2022.
- [17] Malešević N., “Osnovi nauke o metalima IV, Fakultet strojarstva i brodogradnje.” 1965.
- [18] M. Perković, “Utjecaj uvjeta ispitivanja na udarni rad loma,” Diplomski rad, Fakultet Strojarsstva i brodogradnje, Zagreb, 2013.
- [19] M. Novak, “UTJECAJ DIMENZIJA EPRUVETA NA MEHANIČKA SVOJSTVA MATRIJALA,” Sveučilište u Karlovcu, Karlovac, 2019. [Online]. Available: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:128:613883>
- [20] R. Renjo, “Utjecaj predopterećenja na rezultate vlačnog umjeravanja kidalice,” Diplomski rad, Sveučilište u zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2010. Accessed: Jun. 19, 2022. [Online]. Available: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:448522>
- [21] R. Y. Chen, H. Y. Chu, C. C. Lai, and C. T. Wu, “Effects of annealing temperature on the mechanical properties and sensitization of 5083-H116 aluminum alloy,” in *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*, Aug. 2015, vol. 229, no. 4, pp. 339–346. doi: 10.1177/1464420713512249.

