

# Utjecaj toplinske obrade aluminijskih legura na mehanička svojstva

---

**Grizelj, Dominik**

**Undergraduate thesis / Završni 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:235:909387>

*Rights / Prava:* [Attribution 4.0 International](#)/[Imenovanje 4.0 međunarodna](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-01-23**

*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

**Dominik Grizelj**

Zagreb, 2022.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Božidar Matijević

Student:

Dominik Grizelj

Zagreb, 2022.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu, uz pomoć navedene literature.

Zahvaljujem se svom mentoru dr. sc. Božidaru Matijeviću na savjetima, uputstvima i komentarima pri izradi ovog rada. Zahvaljujem se Laboratoriju za analizu metala i Laboratoriju za mehanička ispitivanja Fakulteta strojarstva i brodogradnje. Zahvaljujem se svojoj obitelji na podršci i razumijevanju tijekom studiranja.

Dominik Grizelj



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 i mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 - 04 / 22 - 6 / 1	
Ur.broj: 15 - 1703 - 22 -	

## ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Dominik Grizelj** JMBAG: **0035223734**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Utjecaj toplinske obrade aluminijskih legura na mehanička svojstva**

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

Opis zadatka:

Aluminijske legure obično se podvrgavaju toplinskoj obradi uključujući i precipitacijsko otvrdnjavanje radi poboljšanja mehaničkih svojstava. Precipitacijsko otvrdnjavanje se sastoji od procesa homogenizacije te odgovarajućeg starenja. Proces starenja može se provoditi prirodnim i umjetnim postupkom. Kod umjetnog starenja veoma su važni tehnološki parametri, temperatura i trajanje starenja, jer utječu na mehanička svojstva nakon postupka otvrdnjavanja. U završnom radu potrebno je opisati podjelu aluminijskih legura, navesti vrste legura koje su toplinski očvrstive, a u eksperimentalnom dijelu rada provesti toplinsku obradu odabrane legure te odrediti optimalne parametre toplinske obrade. U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

30. 11. 2021.

Datum predaje rada:

1. rok: 24. 2. 2022.  
2. rok (izvanredni): 6. 7. 2022.  
3. rok: 22. 9. 2022.

Predviđeni datumi obrane:

1. rok: 28. 2. - 4. 3. 2022.  
2. rok (izvanredni): 8. 7. 2022.  
3. rok: 26. 9. - 30. 9. 2022.

Zadatak zadao:

  
Prof. dr. sc. Božidar Matijević

Predsjednik Povjerenstva:

  
Prof. dr. sc. Branko Bauer

## SADRŽAJ

POPIS SLIKA .....	II
POPIS TABLICA.....	III
POPIS OZNAKA .....	IV
SAŽETAK.....	V
SUMMARY .....	VI
1. UVOD .....	1
2. ALUMINIJ I ALUMINIJSKE LEGURE .....	2
2.1 Opća svojstva aluminija i njegovih legura .....	2
2.2 Podjela aluminijskih legura .....	3
2.5 Mehanizmi očvrsnuća.....	5
2.6 Precipitacijsko očvrsnuće .....	6
2.7 Legure za gnječenje .....	13
2.8 Legure za lijevanje.....	17
3. EKSPERIMENTALNI DIO.....	20
3.1 Plan eksperimenta.....	20
3.2 Dobivanje uzoraka .....	20
3.3 Analiza kemijskog sastava.....	20
3.4 Toplinska obrada .....	21
3.4.1 Određivanje parametara homogenizacijskog žarenja i dozrijevanja .....	21
3.4.2 Provođenje homogenizacijskog žarenja, gašenja i umjetnog dozrijevanja.....	23
3.5 Mehanička ispitivanja na kidalici .....	24
3.5.1 Izrada epruveta.....	24
3.5.2 Statičko vlačno ispitivanje .....	26
4. ZAKLJUČAK .....	28
LITERATURA.....	29

**POPIS SLIKA**

Slika 1. Dijagram stanja precipitacijsko očvrsnute aluminijske legure .....	7
Slika 2. Shematska snimka strukturnih promjena .....	8
Slika 3. Tipovi precipitata .....	10
Slika 4. Prirodno dozrijevanje .....	10
Slika 5. Umjetno dozrijevanje .....	11
Slika 6. Različite varijacije dozrijevanja .....	12
Slika 7. Dijagram stanja Al-Cu .....	15
Slika 8. Usporedba lomne žilavosti različitih 7XXX legura .....	16
Slika 9. Dijagram stanja Al-Mg <sub>2</sub> Si legure.....	16
Slika 10. Usporedba legura 6000 sa visokim udjelom mangana i komercijalne 6061 legure .....	17
Slika 11. Cijepljenje eutektičke legure Al-Si s 12%Si .....	19
Slika 12. HHXRF-ručna rendgenska fluorescencija .....	21
Slika 13. Tenarni dijagram stanja Al-Si-Mg-projekcija topljivosti .....	22
Slika 14. Tenarni dijagram stanja Al-Si-Mg-projekcija solidusa .....	22
Slika 15. Peć za toplinsku obradu aluminijskih legura .....	23
Slika 16. Dijagram temperatura-vrijeme peći .....	24
Slika 17. Epruvete za statičko vlačno ispitivanje .....	25
Slika 18. Dimenzije epruvete za statičko vlačno ispitivanje .....	25
Slika 19. Hidraulička kidalica WEB WPM.....	26
Slika 20. Dijagram sila-produljenje epruvete 1 .....	26
Slika 21. Rezultati statičko vlačnog ispitivanja .....	27

---

**POPIS TABLICA**

Tablica 1. Fizikalna i mehanička svojstva čistog aluminija .....	3
Tablica 2. Označavanje Al-legura za gnječenje .....	4
Tablica 3. Označavanje Al-legura za lijevanje .....	4
Tablica 4. Podjela i osnovne značajke gnječenih aluminijskih legura .....	13
Tablica 5. Kemijski sastav aluminijskih legura za gnječenje .....	14
Tablica 6. Osnovna svojstva lijevanih aluminijskih legura .....	18
Tablica 7. Analiza kemijskog sastava .....	21
Tablica 8. Izmjerene vrijednosti promjera epruvete na tri mjesta.....	27



**POPIS OZNAKA**

<b>Oznaka</b>	<b>Jedinica</b>	<b>Opis</b>
$A$	%	Istezljivost
$d_0$	mm	Početni promjer epruvete
$d_u$	mm	Promjer epruvete na mjestu loma
$E$	N/mm <sup>2</sup>	Modul elastičnosti
$F$	N	Sila
$G$	m/Ωmm <sup>2</sup>	Električna vodljivost
$L_0$	mm	Početna duljina epruvete
$L_u$	mm	Duljina epruvete nakon loma
$R_e$	N/mm <sup>2</sup>	Granica razvlačenja
$R_{p0,2}$	N/mm <sup>2</sup>	Konvencionalna granica razvlačenja
$R_m$	N/mm <sup>2</sup>	Vlačna čvrstoća
$R_k$	N/mm <sup>2</sup>	Konačno naprezanje
$S_0$	mm <sup>2</sup>	Površina početnog presjeka
$S_u$	mm <sup>2</sup>	Površina presjeka epruveta na mjestu loma
$t$	s	Vrijeme
$Z$	%	Kontrakcija
$x_1$	mm	Promjer epruvete na udaljenosti od jedne četvrtine
$x_2$	mm	Promjer epruvete na udaljenosti od jedne polovine
$x_3$	mm	Promjer epruvete na udaljenosti od tri četvrtine
$\alpha$	10 <sup>-6</sup> /K	Toplinsko rastezanje
$\rho$	kg/m <sup>3</sup>	Gustoća

## **SAŽETAK**

Aluminijske legure se podvrgavaju toplinskoj obradi radi poboljšanja mehaničkih svojstava. Najvažnija toplinska obrada je precipitacijsko otvrdnjavanje koje se sastoji od homogenizacijskog žarenja i dozrijevanja. U teorijskom dijelu je opisana podjela aluminijskih legura, te su navedene toplinski očvrstive legure. Toplinski očvrstive legure postižu najviše vrijednosti mehaničke otpornosti, a time i mogućnost korištenja aluminijskih legura u konstrukcijske svrhe. U eksperimentalnom dijelu je provedena toplinska obrada jedne aluminijske legure. Zatim se aluminijska legura podvrgla mehaničkim ispitivanjima s ciljem učinka toplinske obrade na mehanička svojstva.

**Ključne riječi:** aluminijska legura, precipitacijsko otvrdnjavanje, mehanička svojstva

**SUMMARY**

Aluminium alloys are subjected to heat treatment to improve mechanical properties. The most important heat treatment is precipitation hardening which consists of homogenizing annealing and maturation. In the theoretical part, the division of aluminium alloys is described and thermally hardened alloys are listed. Thermally hardened alloys achieve the highest values of mechanical resistance and thus the possibility using aluminium alloys for construction purposes. In the experimental part, heat treatment of one aluminium alloy was performed. The aluminium alloy was then subjected to mechanical tests with the aim of the effect of heat treatment on the mechanical properties.

Key words: aluminum alloy, precipitation hardening, mechanical properties

## **1. UVOD**

Aluminij je srebrno-bijeli sjajni metal, te je treći najzastupljeniji element u zemljinoj kori. Talište aluminija je pri 660 °C, a vrelište na 2519 °C. Prekriven je tankim slojem oksida koji brzo nastaje na zraku. Ima nisku gustoću, visoku električnu i toplinsku vodljivost, korozijsku postojanost, te je vrlo lijepog izgleda. Njegov nedostatak je nizak modul elastičnosti uz nisku čvrstoću čime se onemogućuje njegovo korištenje u konstrukcijske i alatne svrhe. Zbog toga su se počele koristiti aluminijske legure kod kojih su poboljšana određena svojstva, te su granica razvlačenja i vlačna čvrstoća dostigle vrijednosti nekih čelika. Pored toga se dobro strojno oblikuje i lijeva. Zbog svih tih svojstava, danas se aluminijske legure koriste u većini industrija; brodogradnji, zrakoplovnoj i automobilskoj industriji, građevinarstvu, informatici itd.

## 2. ALUMINIJ I ALUMINIJSKE LEGURE

### 2.1 Opća svojstva aluminija i njegovih legura

Tehnički aluminij ili nelegirani aluminij većinom se koristi zbog niske gustoće, visoke korozijske postojanosti, električne i toplinske vodljivosti, a ujedno ima i dobar estetski izgled. Njegova antikorozivnost tj. otpornost na koroziju temelji se na postojanju nepropusnog  $\text{Al}_2\text{O}_3$  sloja koji se formira na zraku i vodenim otopinama. Ako se oksidni sloj ošteti, on se odmah nadomjesti oksidacijom. Tako je aluminij otporan pri atmosferskim uvjetima, ali i u koncentriranoj dušičnoj kiselini. Aluminij je neotporan na tvari koje razaraju zaštitni sloj kao npr. lužine. Oksidni sloj je debljine 10 nm i pun je sitnih pora. Čisti aluminij koristi se u gnječenom stanju, u obliku limova, profila i žica gdje njegova mehanička svojstva ipak nešto znače (tablica 1). [1,2]

Nedostaci aluminija su niska mehanička svojstva, pa se zbog toga u konstrukcijske svrhe koriste aluminijeve legure kojima je glavni cilj poboljšanje čvrstoće, tvrdoće, krutosti, rezljivosti, a ponekad žilavosti i livljivosti. Modul elastičnosti aluminija je izrazito nizak u odnosu na titan i čelik (3 puta niži od čelika) pa su aluminijeve konstrukcije znatno elastičnije. Velik nedostatak aluminija je i niska toplinska stabilnost zbog niskog tališta koje iznosi  $660\text{ }^\circ\text{C}$  pa je njihova temperaturna granica dugotrajne uporabe  $120\text{-}150\text{ }^\circ\text{C}$ . [1,2]

Među najvažnije legirne elemente spadaju: bakar (Cu), cink (Zn), magnezij (Mg), silicij (Si) i mangan (Mn). Kao dodaci odnosno primjese prisutni su u manjoj količini željezo (Fe), krom (Cr) i titan (Ti). [2] Međusobnom kombinacijom legirnih elemenata, aluminijeve legure stvaraju prednosti u odnosu na ostale metale [1]:

- a) visoka specifična krutost – gustoća aluminija iznosi  $2700\text{ kg/m}^3$  što je tri puta niže od čelika, te time osigurava dobar omjer čvrstoće i gustoće posebno kod toplinski očvrnutih legura
- b) aluminijske legure imaju odličnu žilavost pri niskim temperaturama
- c) aluminijske legure se najlakše oblikuju i strojno obrađuju od svih metala. To im omogućuje plošno centrirana kubična rešetka (FCC) koja sadrži više kliznih ravnina.

Tako se aluminij i njegove legure izvrsno oblikuju u toplom i hladnom stanju i obrađuju postupcima kovanja, valjanja, prešanja pri čime i očvršćuju.

Određena svojstva prilikom legiranja opadaju, a najvažnije je korozijska postojanost. Većina legirnih elemenata snizuje korozijsku postojanost, a bakar je najznačajniji među njima. Zbog toga se na površini aluminijskih legura provodi platiranje najčistijim aluminijima kako bi se stvorio zaštitni oksidni sloj. Zavarivanje aluminija i njegovih legura je ograničena zbog velike naklonosti

k oksidaciji, ali to se suzbija korištenjem zaštitnih plinova, npr. zavarivanje pod argonom. Očvršćene legure praktički su nezavarljive jer se zavarivanjem poništava očvršnuće. Rezljivost je nepogodna u homogenoj strukturi jer nastaje kovrčasta strugotina, pa su potrebni brzohodni alatni strojevi, dok je rezljivost dobra kod višefaznih struktura tj. toplinski očvršnutih ili gnječenih legura. [3]

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

Gustoća	kg/m <sup>3</sup>	2700
Talište	°C	660
Modul elastičnosti	N/mm <sup>2</sup>	69000
Toplinska rastezljivost	10 <sup>-6</sup> /K	23,8
Električna vodljivost	m/Ωmm <sup>2</sup>	36...37,8
Granica razvlačenja	N/mm <sup>2</sup>	20...120
Vlačna čvrstoća	N/mm <sup>2</sup>	40...180
Istezljivost (ovisno o stanju)	%	50...4

## 2.2 Podjela aluminijских legura

Aluminijske legure mogu se svrstati prema sljedećim kriterijima [1]:

- a) tehnološkoj preradi; razlikuju se legure za gnječenje koje se prerađuju plastičnim deformiranjem i legure za lijevanje koje svoj konačan oblik postižu lijevanjem
- b) kemijskom sastavu; samo nekoliko elemenata ima dovoljnu topljivost u aluminiju da bi izrazito poboljšalo mehanička svojstva, a to su: Cu, Zn, Mg, Si, Mn, te u novije vrijeme i Li. Ovi elementi tvore s aluminijem dvokomponentne legure: Al-Cu, Al-Zn, Al-Mg... Kompleksnije legure nastaju njihovom kombinacijom i uz dodatak drugih elemenata koji poboljšavaju svojstva poput smanjenja zrna, bolju rezljivosti itd. Važno je naglasiti da su svi ti elementi potpuno topljivi u rastaljenom aluminiju, ali da je njihova topljivost ograničena u kristalu mješancu aluminija. Legirni elementi koji prekorače topljivost u kristalu mješancu stvaraju vlastite faze ili intermetalne spojeve
- c) toplinskoj obradi; prema sklonosti toplinskoj obradi aluminijeve legure dijele se na toplinske neočvrstljive i toplinski očvrstljive legure.

## 2.3 Označivanje aluminijских legura

Najčešći način označivanja legura je podjelom na legure za gnječenje i legure za lijevanje. Aluminijske legure za gnječenje se označuju brojčanom četveroznamenkastom oznakom (tablica

2). Prva znamenka definira glavni legirni element u svakoj seriji, a druga označava modifikacije u odnosu na izvornu leguru. Modifikacije se definiraju po razlikama u udjelima legirnih elemenata većim od 0,15-0,5 % ovisno o sadržaju dodanog elementa. Zadnje dvije znamenke nemaju neko specijalno značenje, već označuju specifičnu leguru unutar serije. [1]

**Tablica 2. Označavanje Al-legura za gnječenje [1]**

Oznaka serije	Sadržaj Al ili glavni legirni element
1XXX	Min. 99,00 % Al
2XXX	Cu
3XXX	Mn
4XXX	Si
5XXX	Mg
6XXX	Mg i Si
7XXX	Zn
8XXX	Drugi elementi
9XXX	Neiskorišteno

Kod legura za lijevanje prva znamenka oznake odnosi se na glavni legirni element, a druga i treća kao i kod legura za gnječenje označuju specifičnu leguru (tablica 3). Nakon te tri znamenke slijedi nula koja označuje lijevani proizvod. [1]

**Tablica 3. Označavanje Al-legura za lijevanje [1]**

Oznaka serije	Sadržaj Al ili glavni legirni element
1XX.0	Min. 99,00 % Al
2XX.0	Cu
3XX.0	Si + Cu i/ili Mg
4XX.0	Si
5XX.0	Mg
6XX.0	Neiskorišteno
7XX.0	Zn
8XX.0	Sn
9XX.0	Drugi elementi

Također je važno nakon oznake svake legure naglasiti u kojem se stanju nalazi. Oznake stanja primjenjuju se na sve Al-legure. Sustav oznaka temelji se na mehaničkim i/ili toplinskim obradama kojima se postižu određena metalurška stanja. Oznaka stanja piše se nakon oznake legure i mora biti odvojena crticom (npr. 7001-T6). Osnovna stanja označuju se velikim slovima F, O, H, W i T. Legure u primarnom stanju nose oznaku F, dok one u žarenom slovo O. Žarenje se većinom primjenjuje kod gnječanih poluproizvoda da bi poboljšala duktilnost i smanjila čvrstoća. Oznaka H predstavlja legure očvrsnute hladnom deformacijom kod kojih se toplinska obrada može, a ne mora obaviti naknadno. Oznaka W predstavlja rastopno žareno (homogenizirano) stanje, a to stanje se još naziva i nestabilno stanje jer pri sobnoj temperaturi mogu spontano očvrnuti. Oznaka T predstavlja toplinski obrađeno stanje u kojem se legura podvrgava rastopnom žarenju i dozrijevanju, te je takva legura poprimila svojstva potrebna za eksploataciju. Iza slova T slijedi jedan ili više brojeva koji označuju specifični redoslijed postupaka kojima se ostvaruju različite kombinacije svojstava. [1,2]

Neki od tih postupaka su [1]:

- T1 – hlađeno s povišene temperature preoblikovanja i prirodno dozrijevano
- T2 – hlađeno s povišene temperature praoblikovanja, hladno oblikovano i prirodno dozrijevano
- T3 – rastopno žareno, hladno oblikovano i prirodno dozrijevano
- T4 – rastopno žareno i prirodno dozrijevano
- T5 – hlađeno s povišene temperature preoblikovanja i umjetno dozrijevano
- T6 – rastopno žareno i umjetno dozrijevano
- T7 – rastopno žareno i predozrijevano
- T8 – rastopno žareno, hladno oblikovano i umjetno dozrijevano
- T9 – rastopno žareno, umjetno dozrijevano i hladno oblikovano

## 2.5 Mehanizmi očvrnuća

Aluminijeve legure mogu očvrnuti na tri načina; hladnom deformacijom, legiranjem (očvrnuće kristalima mješancima) i precipitacijom.

Očvrnuće kristalima mješancima – ovaj mehanizam se temelji na otežavanju kretanja dislokacija postojanjem točkastih ili nuldimenzionalnih zapreka. Točkaste zapreke su atomi legiranih elemenata koji otopljeni u rešetci osnovnog metala čine intersticijske ili supstitucijske kristale mješance. U aluminijevim legurama prevladavaju supstitucijski kristali mješanci koji povećavaju čvrstoću, a ne izazivaju znatno smanjenje žilavosti. To povećanje čvrstoće ipak nije veliko i ima najmanji učinak od svih mehanizama očvrnuća. [4]



Očvršnuće hladnom deformacijom – nastaje zbog umnažanja dislokacija tj. zbog linijskih ili jednodimenzionalnih zapreka u kristalnoj strukturi pri čemu se dislokacije isprepliću i time usporavaju gibanje što otežava plastično tečenje. Deformiranje u hladnom stanju može se provesti postupcima poput valjanja, kovanja, vučenja, prešanja itd. Svim tim postupcima zajedničko je da povećavaju granicu razvlačenja, čvrstoću i tvrdoću, a smanjuju istežljivost i žilavost. Aluminijske legure za gnječenje, zbog svoje FCC kristalne strukture, sklone su očvršnuću hladnom deformacijom. Važno je naglasiti da većina aluminijskih legura koja očvršćuju ovim mehanizmom imaju mikrostrukturu koja se sastoji od čvrste otopine bez intermetalnih faza. To su legure Al-Mn, Al-Mg, Al-Mg-Mn. [1,4]

Precipitacijsko očvršnuće – najvažniji mehanizam očvršnuća koji se temelji na izlučivanju prostornih ili trodimenzionalnih zapreka gibanju dislokacija. Prostorne zapreke su zapravo sitni precipitati koji se izlučuju unutar matrice aluminijske. Posljedica stvaranja precipitata je iznimno povećanje čvrstoće i tvrdoće, no ovaj način očvršnuća zaslužuje zasebno poglavlje. [1,4]

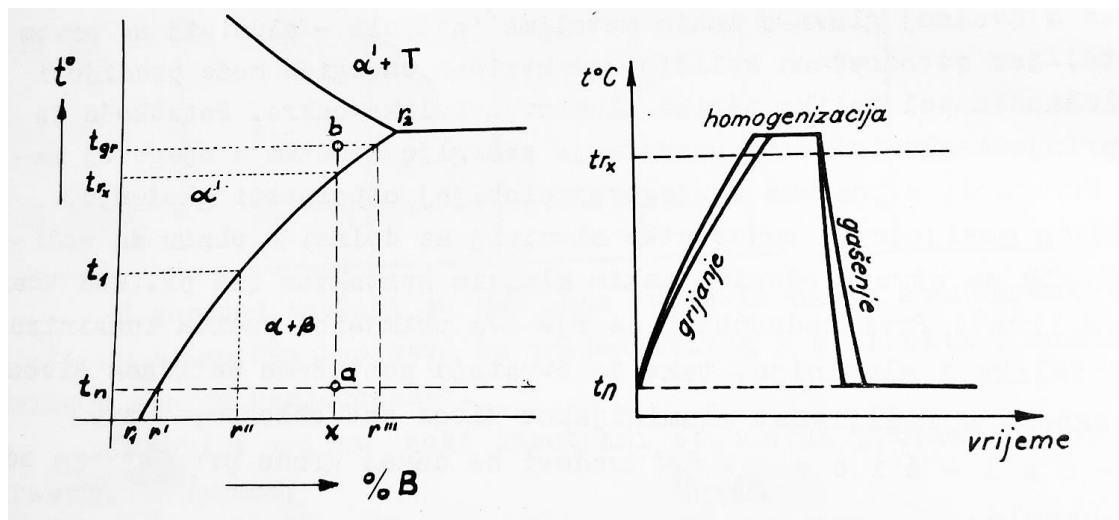
## 2.6 Precipitacijsko očvršnuće

Za precipitacijsko očvršnuće aluminijskih legura moraju biti ispunjeni određeni polazni uvjeti. Legura mora sadržavati barem jedan legirni element u onom području dijagrama stanja u kojem njegova topivost u aluminiju raste s porastom temperature (krivulja  $r_1 - r_2$  na slici 1). Maseni udio legirnog elementa mora biti što viši, ali ne smije prekoračiti granicu maksimalne topljivosti u kristalu mješancu aluminijske  $r_2$ , kako bi došlo do potpune apsorpcije stranih atoma rastopnim žarenjem. Također, legirni elementi moraju imati visoku topljivost pri visokim temperaturama, a malu topljivost pri okolišnoj temperaturi. Elementi koji se tako ponašaju su Cu, Zn, Si, Mg i Mn. Zato legura u polaznom stanju mora biti takvog sastava da sadrži heterogenu strukturu koja se sastoji od  $\alpha$ -kristala mješancu i  $\beta$ -kristala druge faze u obliku intermetalnog spoja ( $\text{CuAl}_2$ ,  $\text{Mg}_2\text{Si}$ ,  $\text{MgZn}_2$ ) kako bi tijekom promjena koje se zbivaju došlo do ponovnog izlučivanja intermetalnog spoja, ali sada u koherentnom obliku. Takvi sitni fino raspršeni precipitati će postupno otvrdnjavati leguru sve do postizanja maksimalne tvrdoće i čvrstoće. Povećanje čvrstoće i tvrdoće se postiže otežavanjem gibanja dislokacija tvoreći prepreke. [1,3]

Tako postupak precipitacijskog očvršnuća možemo svrstati u tri faze [1]:

1. zagrijavanje legure na temperaturu rastopnog žarenja i držanja dovoljno dugo vremena do potpunog otapanja legirnih elemenata
2. gašenja do okolišne temperature kako bi legirni elementi ostali prisilno otopljeni u čvrstoj otopini čime nastaje prezasićena otopina

3. dozrijevanja na temperaturi okoline (prirodno dozrijevanje) ili pri povišenoj temperaturi (umjetno dozrijevanje) s ciljem izlučivanja vrlo sitnih precipitata unutar aluminijske matrice.



Slika 1. Dijagram stanja precipitacijsko očvršnute aluminijske legure [3]

Nakon što su se za precipitacijsko očvršćivanje naveli polazni uvjeti i raspodjela toplinske obrade u tri faze, potrebno je pobliže objasniti svaku fazu. Na slici 1 polaznim uvjetima odgovara koncentracija  $X$  nekog legirnog elementa kojem je polazno stanje točka "a". Legura se zatim zagrijava do točke "b" koja se nalazi na temperaturi grijanja  $t_{gr}$ . Vrijeme držanja na  $t_{gr}$  mora biti dovoljno dugo da bi se postigla homogenizacija, a zatim slijedi naglo hlađenje ponovno do početnog stanja "a". Promatrano s gledišta strukturnih promjena, u polaznoj točki "a" je heterogena struktura  $\alpha + \beta$ . Strukturne promjene mogu se pokazati shematskom mikrosnimkom na slici 2. Oko primarnog  $\alpha$ -mješanca nalazi se druga faza  $\beta$  koja mora biti neki intermetalni spoj (shema "a" na slici 2). Važna je okolnost da primarni  $\alpha$ -mješanac ima malu koncentraciju  $r'$ , osjetno manju od ukupne koncentracije  $X$ . Koncentracija  $r'$  predstavlja ravnotežnu topljivost legirnog elementa (jednog ili više njih) u  $\alpha$ -mješancu pri normalnoj temperaturi  $t_n$ . Porastom temperature topljivost legirnog elementa u  $\alpha$ -mješancu povećava se po krivulji  $r_1 - r_2$ , tako da pri temperaturi  $t_{rx}$  topljivost dostiže koncentraciju  $X$ . Time se omogućuje potpuno rastvaranje  $\beta$  faze u  $\alpha$ -kristalu mješancu. U praksi se legura zagrijava malo iznad  $t_{rx}$  odnosno do temperature grijanja  $t_{gr}$  kako bi se osiguralo potpuno otapanje  $\beta$  faze. Strukturu nakon te homogenizacije prikazuje shema "b" na slici 2, u kojoj je s oznakom "x" istaknuto povećanje koncentracije legirnog elementa sa  $r'$  na  $X$  u  $\alpha$ -kristalu mješancu. Kako je to ravnotežna koncentracija,  $\alpha$ -mješanci zadržavaju neizvitoperenu FCC rešetku. Prilikom grijanja do točke "b", osim homogenizacije, zbog povećanja difuzijske pokretljivosti atoma kristalna rešetka se zasićuje prazninama. [3]

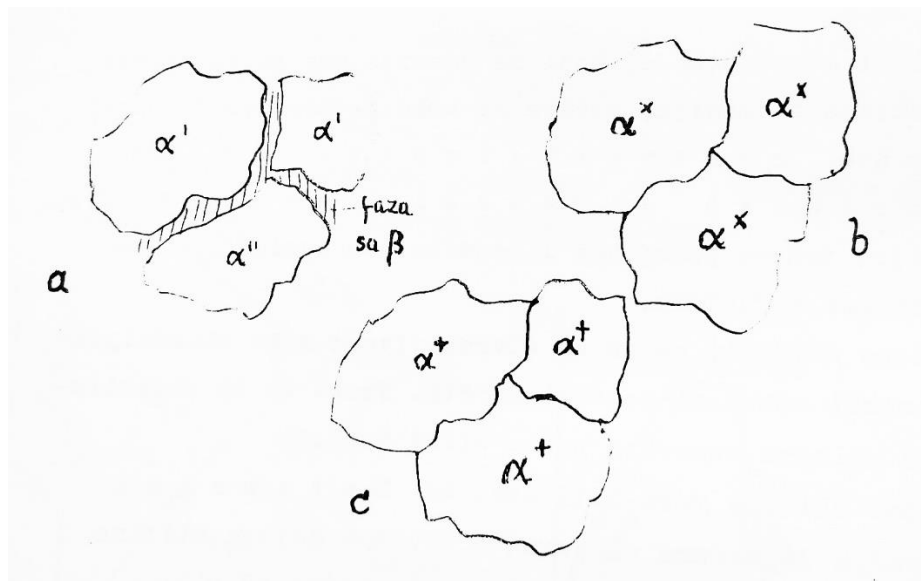
Na taj način grijanjem do temperature  $t_{gr}$  dobije se trostruki efekt [3]:

- prelazak heterogene strukture u homogenu strukturu; postoje samo  $\alpha$ -mješanci
- $\alpha$ -mješanci su se zasitili atomima legirnih elemenata
- $\alpha$ -mješanci su se zasitili prazninama

Ako se iz tog stanja leguru ohladi, dobit će se različiti rezultati ovisno o brzini kojom se gasi. Ukoliko se gasi polako, legura će se vratiti u početno stanje tj. heterogenu strukturu. No, ukoliko se provede naglo gašenje, difuzija će se spriječiti u potpunosti i zadržat će se homogena struktura sve do sobne temperature. Međutim, ti  $\alpha$ -mješanci neće biti istovjetni s  $\alpha$ -mješancima prije početka obrade. [3]

Oni će biti dvojako prezasićeni [3]:

- legirnim elementom; nakon brzog gašenja u  $\alpha$ -mješancu udio legirnog elementa jednak je  $X$ , dok je za ravnotežno stanje udio legirnog elementa  $r'$ . Prezasićenje je jednako  $X-r'$ .
- prazninama; naglim gašenjem velik broj praznina ostaje zarobljen u  $\alpha$ -mješancu

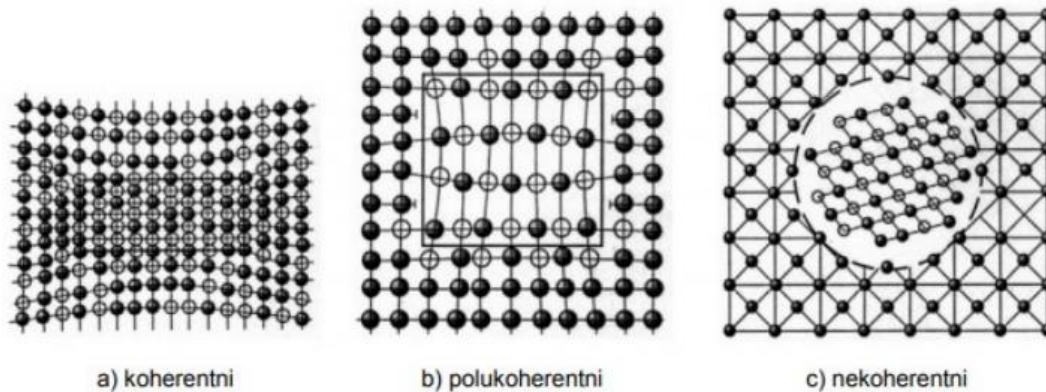


**Slika 2. Shematska snimka strukturnih promjena [3]**

Ovakvo prezasićenje (prikazano na shemi "c" slika 2 sa eksponentom +) polazna je točka očvršćivanja aluminijevih legura. Već u ovom stadiju prezasićenje utječe na karakteristike legure jer izaziva izvitoperenost rešetke  $\alpha$ -mješanaca. S obzirom na razmjernu homogenost prezasićenja, izvitoperenost nije znatna pa se karakteristike ne mijenjaju osjetljivo tj. čvrstoća i tvrdoća povećaju se oko 10 %. No, veliku razliku susrećemo u pogledu istezljivosti, koja se znatno povećala u usporedbi s polaznim stanjem. Uzrok tomu je nestanak  $\beta$  krhke faze. Ovaj stadij je pogodan za

deformaciju i oblikovanje zbog mogućeg očvršnuća hladnom deformacijom. Strukturne promjene ne prestaju u ovom stadiju nego se one nastavljaju i nakon toga, tijekom nekog vremenskog perioda. Te strukturne promjene prouzrokuju nove promjene u mehaničkim i drugim svojstvima, a sama pojava naziva se dozrijevanje. Pri normalnoj temperaturi strukturne promjene nastaju spontano i traju duže vrijeme (nekoliko dana do nekoliko mjeseci, godina), a ta vrsta dozrijevanja naziva se prirodno dozrijevanje. Umjetno dozrijevanje odvija se pri povišenim temperaturama i traje kraće (trideset minuta do nekoliko dana). Osnova dozrijevanja je difuzija koja se ubrzava porastom temperature, pa umjetno dozrijevanje ostvaruje veći porast čvrstoće i tvrdoće nego prirodno dozrijevanje. [1,3]

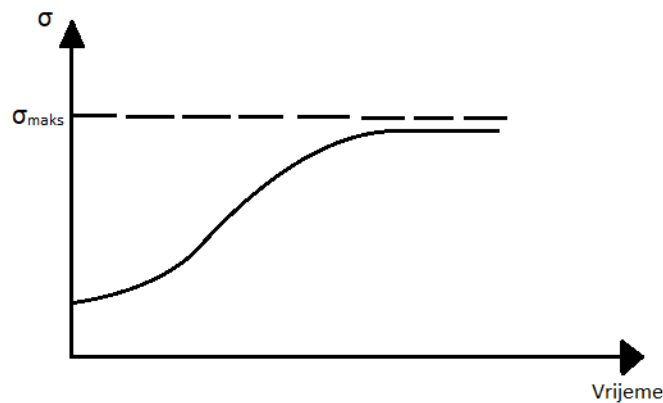
U prvom stadiju dozrijevanja atomi legirnih elemenata nastoje izaći iz čvrste otopine tako da zaposjedaju položaje unutar kristalne rešetke  $\alpha$ -mješanca tvoreći klice (nukleuse) budućih čestica. Atomi legirnih elementa sele se iz područja veće napetosti rešetke u područja prezasićenosti prazninama i pri tome formiraju nakupine rastvorenih atoma unutar rešetke  $\alpha$ -mješanca. Te klice prisutne su kao koherentni precipitati koji imaju istovjetan raspored atoma kao matrica te nema prekida veze u kristalnoj rešetki. Međutim, atomski razmaci su dovoljno različiti da deformiraju rešetku na način prikazan na slici 3a. Zbog takve izvitoperenosti rešetke dolazi do pojave unutarnjih napreznja koja ometaju i usporavaju gibanje dislokacija što za posljedicu ima porast čvrstoće i tvrdoće, dok se istezljivost smanjuje. Kod umjetnog dozrijevanja može doći do mjestimičnog prekida veze između matrice i precipitata čime nastaju polukoherentni precipitati koji su povezani s matricom samo na nekim čvorovima rešetke (slika 3b). Ova vrsta izlučivanja nije moguća prilikom prirodnog dozrijevanja. Zbog veće izvitoperenosti rešetke dolazi do većih unutarnjih napreznja čime se čvrstoća i tvrdoća dalje povećavaju. No, ukoliko se legura zagrije na još veću temperaturu, zbog ubrzane difuzije mikrostruktura se vraća u ravnotežno stanje i nastali precipitati prelaze u nekoherentne precipitate koji su potpuno izdvojeni od matrice (slika 3c). Time iščezava deformacija kristalne rešetke tj. nema unutarnjih napreznja jer su precipitati narasli i sjedinili se, a kao posljedica dolazi do pada čvrstoće i tvrdoće uz nisku istezljivosti. [1,3]



Slika 3. Tipovi precipitata [1]

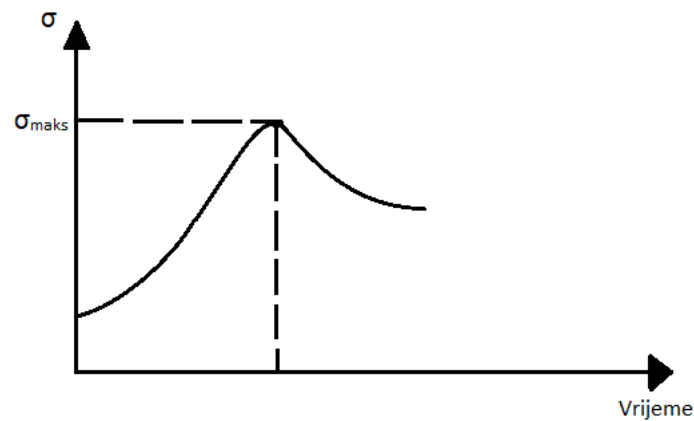
Važno je navesti još neke karakteristike prirodnog i umjetnog dozrijevanja.

Prirodno dozrijevanje je samородna promjena, koja neovisno koliko dugo trajala ne dovodi do slabljenja proizvoda (slika 4). Stoga, kod prirodnog dozrijevanja moguće je jedino izlučivanje koherentnih precipitata. Dolazi do povećanja čvrstoće i tvrdoće, dok istezljivost pomalo opada. Zbog toga što se prirodno dozrijevanje događa pri sobnim temperaturama, maksimalna radna temperatura ne smije biti viša jer bi povećanje temperature dovelo do jačanja difuzije. [3]



Slika 4. Prirodno dozrijevanje [3]

Umjetno dozrijevanje je nametnuta promjena koja dovodi do stvaranja polukoherentnih precipitata pri povišenim temperaturama. Time dolazi do još većeg povećanja tvrdoće i čvrstoće i do daljnjeg pada istezljivosti. No, umjetno dozrijevanje osim o temperaturi dozrijevanja ovisi i o vremenu dozrijevanja jer predugo držanje na temperaturi dozrijevanja može dovesti do stvaranja nekoherentnih precipitata, a time i do smanjenja mehaničkih svojstava (slika 5). Ono što karakterizira umjetno dozrijevanje jest da vrijeme dozrijevanja nije isto za postizanje maksimuma mehaničkih svojstava poput; vlačne čvrstoće, granice razvlačenja, tvrdoće i dr. [3]

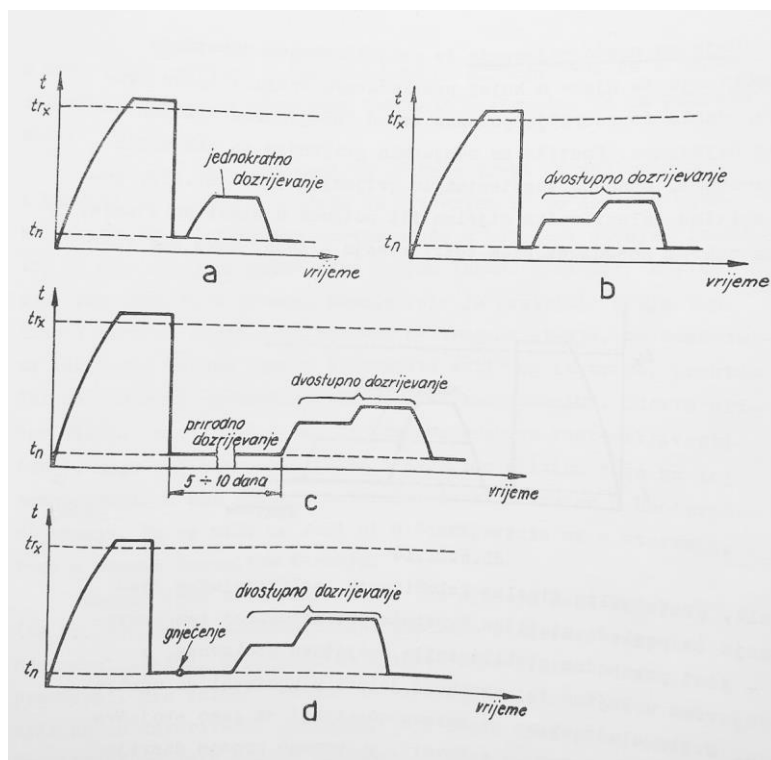


**Slika 5. Umjetno dozrijevanje [3]**

Umjetno naddozrijevanje ili predozrijevanje pregrijavanjem je nametnuto izlučivanje nekoherentnih precipitata radi neke određene namjene. Iako smanjuje čvrstoću, ono značajno poboljšava otpornost na koroziju, dimenzijsku stabilnost i lomnu žilavost. Ovo stanje se označava sa T7 i danas ima mnogo različitih T7 stanja kako bi se postigla najbolja mehanička i korozijska svojstva za daljnju eksploataciju. Starenje treba razlikovati od predozrijevanja iako su ta dva postupka u pogledu strukturnih promjena jednaka. Razlika je u tome da li se te promjene izazivaju namjerno samim postupkom umjetnog dozrijevanja ili se one zbivaju naknadno u upotrebi proizvoda. Ukoliko se zbivaju naknadno onda se radi o nepoželjnim promjenama i time dolazi do kvarenja tj. starenja proizvoda. [3]

Važno je reći da se danas koriste i mnoge druge varijacije dozrijevanje (slika 6):

- postupno umjetno dozrijevanje
- kombinacija prirodnog i umjetnog dozrijevanja
- kombinacija prirodnog ili umjetnog dozrijevanja s gnječenim postupcima tzv. termomehanički postupci



**Slika 6. Različite varijacije dozrijevanja [3]**

Na slici 6a prikazan je općenito jednokratno umjetno dozrijevanje. Postupno dvostupanjsko umjetno dozrijevanje (slika 6b) nije potrebno s gledišta čvrstoće i tvrdoće jer se iste vrijednosti mogu dobiti i uz obično umjetno dozrijevanje. Međutim, jednokratnim dozrijevanjem pojavljuju se kod legure iste grupe slabe otpornosti na koroziju, a posebno tenzokoroziju. Osim toga i u pogledu ostalih svojstava poput otpornosti na puzanje i dinamičke izdržljivosti, jednokratno dozrijevanje daje slabije rezultate. Ove vrste dozrijevanja se većinom koriste za Al-Zn-Mg legure. Slika 6c prikazuje ograničeno prirodno dozrijevanje nakon kojega slijedi postupno umjetno dozrijevanje. Prethodno prirodno dozrijevanje od 6 do 10 dana prekratko je za taj tip legure da bi nastupilo veće očvrnuće, ali je nastupilo predrazlučivanje koje je još uvijek vrlo dispergirano, pa će to stanje služiti umjetnom dozrijevanju kao gusta podloga klica. Zbog toga će daljnje dozrijevanje biti isto dispergirano tj. precipitati će biti sitniji i gušće raspoređeni nego u slučaju da nije bilo prirodnog dozrijevanja. Na slici 6d prikazan je termomehanički postupak. Nakon gašenja izvodi se gnječenje i zatim postupno umjetno dozrijevanje. Gnječenje prouzrokuje usitnjenje zrna, ali i nagomilanost dislokacija unutar zrna. Takve dislokacije stvaraju također dispergiranu bazu za daljnje dozrijevanje. [1,3]

Gašenje je vrlo važno za aluminijske legure jer nekada gašenje u vodi dovodi do neprihvatljive distorzije zbog visokih toplinskih gradijenata koji se induciraju hlađenjem. Kada gašenje hladnom vodom dovodi do problema s distorzijom, onda do izražaja dolazi topla voda. Karakteristika gašenjem toplom vodom je tzv. "odgođeno gašenje". Iako se gašenje toplom vodom koristi dugi

niz godina za smanjenje izobličenja pri gašenju aluminijskih legura, često je to nedovoljno da se postigne optimalna minimizacija distorzije koja u isto vrijeme zadovoljava minimalna konstrukcijska svojstva. U takvim slučajevima može se koristiti vodeni poli (alkilen glikol)-PAG kopolimer. PAG daje značajne prednosti u smanjenju distorzije, pucanja i stvaranja nepoželjnog zaostalog naprezanja. [5]

## 2.7 Legure za gnječenje

U tablici 2 prikazana je podjela legura za gnječenje na osnovu glavnog legirnog elementa. Ove legure su vrlo pogodne, kao što im samo ime govori, za očvršnuće gnječenjem (deformiranjem), ali i za precipitacijsko očvršnuće. Na osnovu ta dva mehanizma očvršnuća može se napraviti daljnja podjela legura za gnječenje (tablica 4).

**Tablica 4. Podjela i osnovne značajke gnječenih aluminijskih legura [1]**

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

Od legura koje očvršćuju hladnim deformiranjem zahtijeva se dovoljna čvrstoća i krutost u hladnom stanju, ali i dobra korozivna postojanost. Većina ovih legura ima mikrostrukturu koja se sastoji od čvrste otopine bez ili s vrlo malo intermetalnih spojeva. To je dodatni faktor koji ide u prilog njihovoj visokoj duktilnosti i korozivnoj postojanosti. Legure s višim udjelom magnezija imaju visoku korozivnu postojanost u morskoj vodi pa se koriste za brodsku nadgradnju, dok legura sa manganom nemaju visoka mehanička svojstva, ali imaju visoku korozivnu postojanost i visoki stupanj ugnječenosti pa se koriste za limenke, tube i dr. [1,3]

Precipitacijsko očvrstljive legure imaju odličnu specifičnu čvrstoću, te se primjenjuju kao primarne konstrukcije, posebno u zrakoplovstvu gdje je važna što niža masa uz visoka mehanička svojstva. Legure koje mogu očvrstnuti su legure sa legirnim elementima; Cu, Zn, Mg i Si. To su legure serija; 2XXX, 6XXX, 7XXX. U današnje vrijeme se pojavljuje legure serije 8XXX legirane sa litijem. [1]

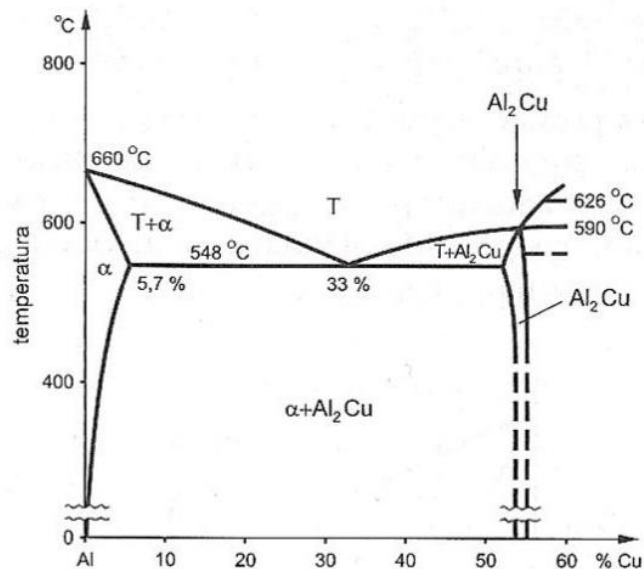


Tablica 5. Kemijski sastav aluminijskih legura za gnječenje [1]

Vrsta legure	Sadržaj legiranih elemenata, maseni %										
	Zn	Mg	Cu	Mn	Cr	Zr	Fe	Si	Li	O	Ostali
2024	-	1,5	4,4	0,6	-	-	0,50*	0,50*	-	-	-
2224	-	1,5	4,1	0,6	-	-	0,15*	0,12*	-	-	-
2324	-	1,5	4,1	0,6	-	-	0,12*	0,10*	-	-	-
7050	6,2	2,25	2,3	-	-	0,1	0,15*	0,12*	-	-	-
7150	6,4	2,35	2,2	-	-	0,1	0,15*	0,12*	-	-	-
7175	5,6	2,5	1,6	-	0,23	-	0,20*	0,15*	-	-	-
6013	-	1,0	0,8	0,35	-	-	0,30*	0,80	-	-	-
8090	-	0,9	1,3	-	-	0,1	0,30*	0,20*	2,4	-	-

\*maksimalno; većina aluminijskih legura dodatno sadrži oko 0,05-0,1 % Ti

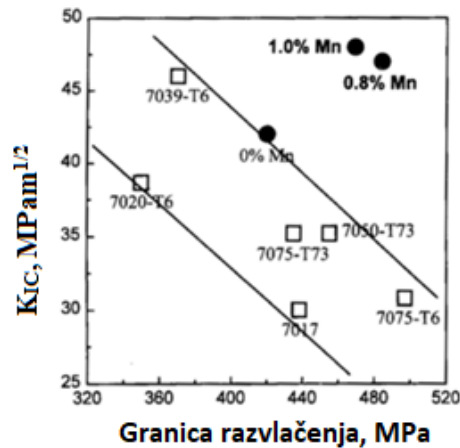
Legure serija 2XXX općenito uz Cu kao glavni legirni element sadrže i Mg koji omogućuje prirodno ili umjetno dozrijevanje. Ove legure su poznate pod imenom "durali". Drugi značajni legirni dodaci su Ti koji utječe na veličinu zrna prilikom lijevanja ingota, ali i metali poput Mn, Cr i/ili Zr koji formiraju čestice važne za reguliranje zrnatosti gnječene strukture. Željezo i silicij su nečistoće jer tvore intermetalne spojeve koji smanjuju lomnu žilavost i otpornost umoru. U dijagramu stanja Al-Cu vidi se da je maksimalna topljivost Cu u  $\alpha$ -kristalu mješancu 5,7 % pri eutektičkoj temperaturi, dok se u praksi koriste legure s manje od 4,5 % (slika 7). Najčešća legura iz ove serije je 2024 koja se najčešće isporučuje u T3 stanju (rastopno žarenje, hladno oblikovanje i prirodno dozrijevanje). Iako prirodnim dozrijevanjem nije dostigla maksimalnu čvrstoću, vrlo je otporna na širenje pukotina i pojavu umora. Legure 2324 i 2224 imaju gotovo identičan kemijski sastav kao legure 2024, ali zbog manjeg volumnog udjela intermetalnih spojeva (tablica 5) imaju povećanu lomnu žilavost. Sadržaj Fe u 2224 leguri je ograničen maksimalno na 0,12 %, a Si na 0,1 %, dok je u leguri 2024 sadržaj ovih nečistoća i do 0,5 %. Fe i Si stvaraju intermetalne spojeve  $Al_7Cu_2Fe$  i  $Mg_2Si$ . Može se zaključiti da je velika ovisnost nečistoća na smanjenje lomne žilavosti. Vrijednost granice razvlačenja koje mogu postići su od 280 – 400 N/mm<sup>2</sup> ovisno o vrsti legure i tipu toplinske obrade. [1,2]



Slika 7. Dijagram stanja Al-Cu [2]

Legure serije 7XXX uz Zn kao glavni legirni element sadrže i Mg, a u nekim tipovima legura sadrže i Cu. Takve Al-Zn-Mg-Cu legure poznate su kao "konstruktali". Od ostalih legirnih dodataka sadrže Cr koji pospješuje očvršnuće precipitacijom. Ove legure imaju najviše vrijednosti čvrstoće od svih aluminijevih legura. Podvrgavaju se umjetnom dozrijevanju jer u suprotnom nisu stabilne. U očvršnutom stanju srednja čvrstoća iznosi  $550 \text{ N/mm}^2$ , a ovisno o kemijskom sastavu mogu dosezati čvrstoće i do  $680 \text{ N/mm}^2$  kao kod legure 7001-T6. Razvijene su legure kojima je poboljšana lomna žilavost reguliranjem sadržaja nečistoća odnosno smanjenjem Fe i Si do maksimalno 0,22 % (7050, 7150, 7175..). U T6 stanju (rastopno žarenje i umjetno dozrijevanje) mnoge legure su osjetljive na napetosnu (SCC) koroziju. Zbog toga su razvijeni termomehanički postupci koji uklanjaju predispozicije za pojavu ovog oblika korozije, a to su većinom različita T7 stanja koja obično snižavaju čvrstoću, ali višestruko povećavaju otpornost prema napetosnoj koroziji. [1,2]

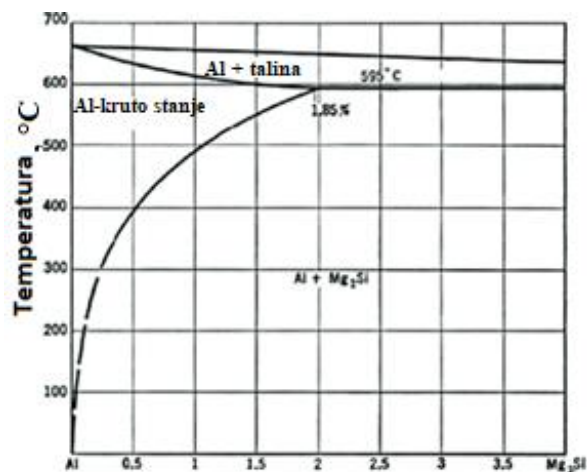
Dodatkom mangana u iznosu od 0,8 do 1,0 % kod ovih legura vidljiva je visoka lomna žilavost. Na slici 8 prikazana je lomna žilavost različitih legura 7XXX serija. Aluminijeve legure teže smanjenju lomne žilavosti s povećanjem čvrstoće. Međutim, legure koje sadrže 0,8 – 1,0 % mangana pokazuju suprotnu tendenciju tj. povećanje lomne žilavosti s povećanjem čvrstoće. Ovo abnormalno ponašanje posljedica je fino zrnate strukture, precipitacijskog očvršnuća i homogene deformacije pripisane manganovim precipitatima. [6]



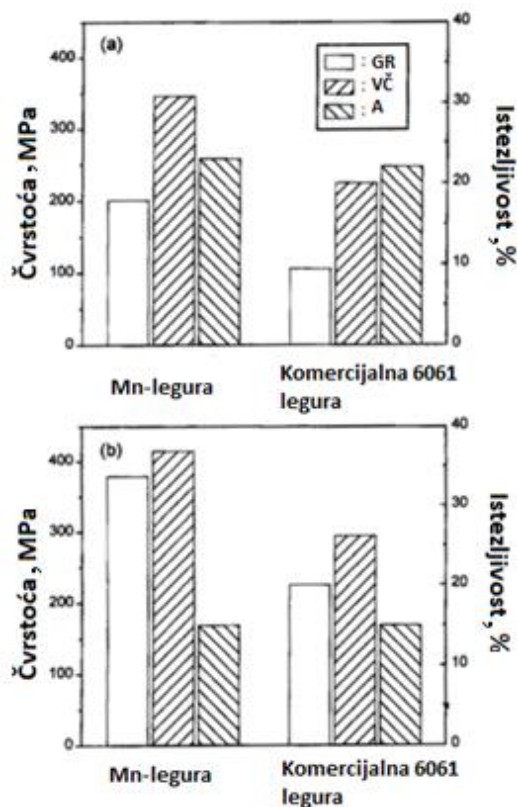
Slika 8. Usporedba lomne žilavosti različitih 7XXX legura [6]

Legure serije 6XXX poznate kao "pantali" imaju mnogo bolju korozivsku otpornost od Al-Cu legura, ali u pravilu ne postižu kombinacije mehaničkih svojstava kao kod legura 2XXX. Na slici 9 prikazan je dijagram stanja Al-Mg-Si sa težinskim udjelom Mg<sub>2</sub>Si intermetalnog spoja. No, danas su razvijene legura poput 6013-T6 koje imaju 12 % veću čvrstoću od 2024-T3 uz podjednaku lomnu žilavost. [1]

Također, dodatkom mangana u iznosu od 0,8 do 1,2 % kod ovih legura, granica razvlačenja i vlačna čvrstoća se znatno povećavaju, a istežljivost ostaje nepromijenjena. Na slici 10 prikazana je usporedba legure 6000 sa visokim udjelom mangana i komercijalne 6061 legure u ekstrudiranom i T6 toplinski obrađenom stanju. Legura 6000 u ekstrudiranom, toplinski neobrađenom stanju ima gotovo jednaku granicu razvlačenja kao i legura 6061-T6 čime se omogućuje korištenje legura sa visokim udjelom mangana u neočvrnutom stanju kod dugačkih ekstrudiranih dijelova koji se ne mogu toplinski obraditi zbog njihove duljine. Dodatak mangana kod ovih legura stvara fine nesmične nekoherentne manganove precipitate koji usporavaju gibanje dislokacija. [6]



Slika 9. Dijagram stanja Al-Mg<sub>2</sub>Si legure [2]



**Slika 10. Usporedba legura 6000 sa visokim udjelom mangana i komercijalne 6061 legure [6]**

Legure serije 8XXX odnose se na aluminijeve legure s drugim legirnim elementima, kao što su Fe, Ni i Li. Legure Al-Fe-Ni su očvrstljive deformiranjem u hladnom stanju, a imaju neznatan utjecaj na gubitak električne vodljivosti pa se koriste kao legure namijenjene izradi vodiča. Legure Al-Li su precipitacijsko očvrstljive legure koje s dodatkom Mg i Cu imaju visoka mehanička svojstva. Kod ovih legura je karakteristična niža gustoća u odnosu na ostale aluminijeve legure jer je Li najlakši materijal, s gustoćom od  $534 \text{ kg/m}^3$  pa se dodatkom litija snižava gustoća, a istovremeno povećava krutost aluminijevih legura. Svaki maseni postotak litija povećava modul elastičnosti za otprilike 6 %, a snižava gustoću za oko 3 %. Unatoč poboljšanju mehaničkih svojstava, ove legure imaju ozbiljnih tehničkih problema poput velike neujednačenosti mehaničkih svojstava, nedovoljne lomne žilavosti te osjetljivost na napetosnu koroziju. [1,2]

## 2.8 Legure za lijevanje

Zbog lošijih svojstava i veće varijabilnosti u odnosu na gnječene proizvode aluminijske legure za lijevanje koriste se kod manje opterećenih sekundarnih dijelova. Prednost aluminijskih ljevova je značajna ušteda jer se lijevaju cijeli komadi pa su sniženi troškovi montaže. Većinom se legiraju elementima poput silicija koji poboljšavaju žitkost rastaljenog metala i omogućuju dobro popunjavanje kalupne šupljine, sprečavaju stvaranje napuklina tijekom skrućivanja itd.

Aluminijeve legure mogu se ljevati jednako dobro na sva tri osnovna načina; u pijesku, u kokilu i tlačno. Najčešće korištene legura za lijevanje su Al-Cu, Al-Si, Al-Mg te Al-Si + Cu i/ili Mg. Neke od legura mogu se toplinski očvrnuti, dok se legure koje ne mogu toplinski očvrnuti primjenjuju kada je važna krutost, dobra korozivna postojanost te žitkost taljevine, a čvrstoća je od sporedne važnosti. [2]

U tablici 5 prikazana su osnovna svojstva najvažnijih serija legura za lijevanje, a kao što je navedeno gore, to su legure Al-Cu, Al-Si, Al-Mg te njihove kombinacije.

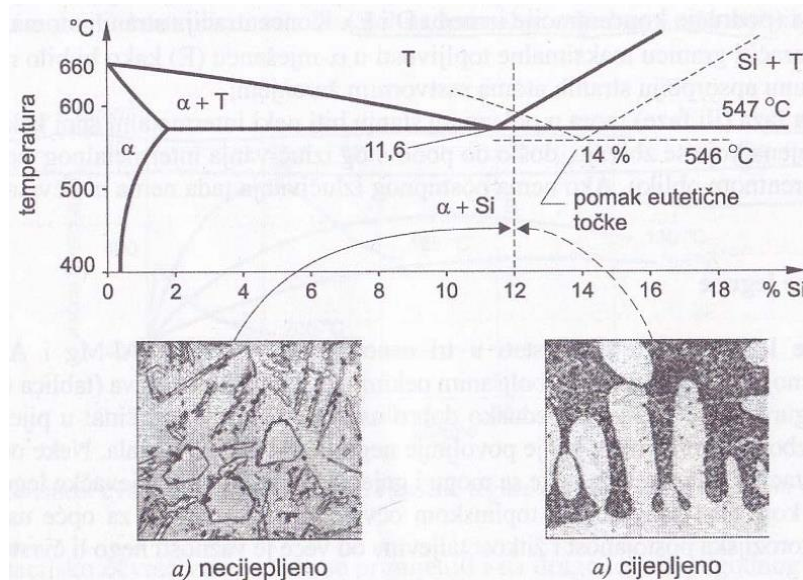
**Tablica 6. Osnovna svojstva lijevanih aluminijskih legura [2]**

Mehanička otpornost	Livljivost	Rezljivost	Otpornost na koroziju	Tip legure	Predstavnik	
mala	srednja	dobra	vrlo dobra	Al-Mg	AlMg <sub>3</sub> , AlMg <sub>5</sub>	
				Al-Si-Mg	AlSi10Mg AlSi7Mg1	Mg omogućuje toplinsko očvrnuće
mala	vrlo dobra	slaba	dobra	Al-Si	AlSi12	
				Al-Si-Cu	AlSi5Cu1 AlSi6Cu2	Si negativno utječe na rezljivost, Cu smanjuje otpornost na koroziju
osrednja	slaba	dobra	vrlo slaba	Al-Cu	AlCu4MgTi	Ti i Mg usitnjuju zрно

Legure za lijevanje serije 2XX.0 u kojima je Cu glavni legirni element su teže livljive u odnosu na ostale legure, ali se mogu toplinski očvrnuti te zbog toga imaju osrednja mehanička svojstva. Ove legure imaju dobro rezljivost, ali najnižu otpornost na koroziju te se radi toga često predozrijevaju na T7 stanje da bi se poboljšala otpornost na napetosnu koroziju. Maksimalne radne temperature su do 300 °C. [1]

Legure za lijevanje serije 4XX.0 sadrže Si, a silicij je ujedno i najvažniji legirni dodatak aluminijskim ljevovima. On značajno poboljšava žitkost taljevine, a legure Al-Si još nazivaju "silumini". To su najrasprostranjenije legure među svim aluminijskim ljevovima zbog izvrsne livljivosti, relativno dobre korozivne postojanosti. Ove legure imaju slabu rezljivost i niska mehanička svojstva jer se ne mogu toplinski obraditi. Većinom se ljevaju legure eutektičkog ili blizu eutektičkog sastava (slika 11) jer imaju najuži interval skrućivanja (10-13 %Si). Zbog vrlo grube eutektičke mikrostrukture ove se legure usitnjuju postupkom cijepjenja. Cijepjenje se

izvodi neposredno prije ulijevanja taljevine u kalup dodatkom male količine natrija u obliku soli. Natrij nastoji odgoditi nukleaciju silicija kada se dostigne eutektička temperatura te on pomiče eutektičku koncentraciju u desno u dijagramu stanja. Postupkom cijepjenja povisuje se vlačna čvrstoća legure od 120 N/mm<sup>2</sup> na oko 200 N/mm<sup>2</sup>, a istezljivost se povećava s 5 na 15 %. Maksimalne radne temperature su do 200 °C. [1,2]



**Slika 11. Cijepljenje eutektičke legure Al-Si s 12%Si [2]**

Legure za lijevanje serije 5XX.0 kao glavni legirni element sadrže Mg i imaju vrlo dobru korozivsku postojanost, a neke od legure otporne su i na udarce pa se mogu rabiti i za manje opterećene dijelove izložene agresivnoj atmosferi. Najbolju kombinaciju čvrstoće i žilavosti ima legura s 10 %Mg, no ova legura ima jednu od najgorih livljivosti zbog pojave poroznosti i stvaranje troske. Zbog toga su u uporabi najviše legure s 3-5 %Mg. [2]

Legure za lijevanje serije 4XX.0 kojima je glavni legirni element Si uz dodatak Mg i/ili Cu čine oko 80 % svih pješčanih i tlačnih aluminijskih ljevova. Bakar se dodaje radi poboljšanja čvrstoće i rezljivosti uz gubitak livljivosti i otpornosti na koroziju. Precipitacijsko očvrsnute Al-Si-Cu legure postižu granicu razvlačenja i do 200 N/mm<sup>2</sup>. Eutektičke Al-Si-Mg legure su precipitacijsko očvrsnute uz dodatak 0,2-0,5 %Mg. Dobro su livljive, imaju mali interval skrućivanja i malo linearno skupljanje. Radne temperature Al-Si-Mg odljevaka iznose do 200 °C. [2]

Kod aluminijskih ljevova općenito je važna kontrola veličine zrna jer sitnije zrno daje veću čvrstoću i žilavost. Veličina zrna, među ostalim, ovisi o temperaturi lijevanja, brzini skrućivanja i prisutnosti legirnih dodataka za usitnjenje zrna. Stoga, za što sitnija zrna potrebno je imati niže temperature lijevanja, veće brzine skrućivanja i dodatak elemenata kao što su Ti i B.

### **3. EKSPERIMENTALNI DIO**

U eksperimentalnom dijelu provedeno je precipitacijsko očvršćivanje aluminijske legure. Precipitacijsko očvršćivanje sastoji se od zagrijavanja na temperaturu homogenizacijskog žarenja, držanja legure na temperaturi homogenizacijskog žarenja, gašenja u vodi i na kraju umjetnog dozrijevanja. Nakon precipitacijskog očvršćivanja uzorci su podvrgnuti mehaničkim ispitivanjima.

#### **3.1 Plan eksperimenta**

Plan eksperimenta se sastoji od:

- Analize kemijskog sastava materijala
- Određivanja parametara homogenizacijskog žarenja i dozrijevanja
- Provođenje homogenizacijskog žarenja i gašenja
- Umjetno dozrijevanje
- Pripreme uzoraka za ispitivanje vlačne čvrstoće
- Ispitivanje vlačne čvrstoće

#### **3.2 Dobivanje uzoraka**

Uzorci su lijevani u tvrtki Aluminium Rheinfelden Alloys GmbH u Njemačkoj.

#### **3.3 Analiza kemijskog sastava**

Za određivanje parametara toplinske obrade, najprije treba odrediti kemijski sastav aluminijske legure koja se ispituje. Ispitivanje je provedeno u Laboratoriju za analizu metala Fakulteta strojarstva i brodogradnje pomoću ručne rendgenske fluorescencije (HHXRF) od tvrtke Olympus. To je brza tehnika nedestruktivnog ispitivanja koja mjeri sastav legure. HHXRF je prikazan na slici 12.



Slika 12. HXRF-ručna rendgenska fluorescencija

Tablica 7. Analiza kemijskog sastava

Elementi	Mg	Al	Si	Fe	Pb
%	2,22	88,73	8,86	0,16	0,024
+/-	0,34	0,25	0,07	0,01	0,002

Iz tablice se vidi da legura sadrži oko 9 %Si i 2 %Mg. Ostali elementi nemaju velikog utjecaja na svojstva legure. Ova legura pripada 3XX.0 skupini gdje Mg omogućuje precipitacijsko očvršnuće.

### 3.4 Toplinska obrada

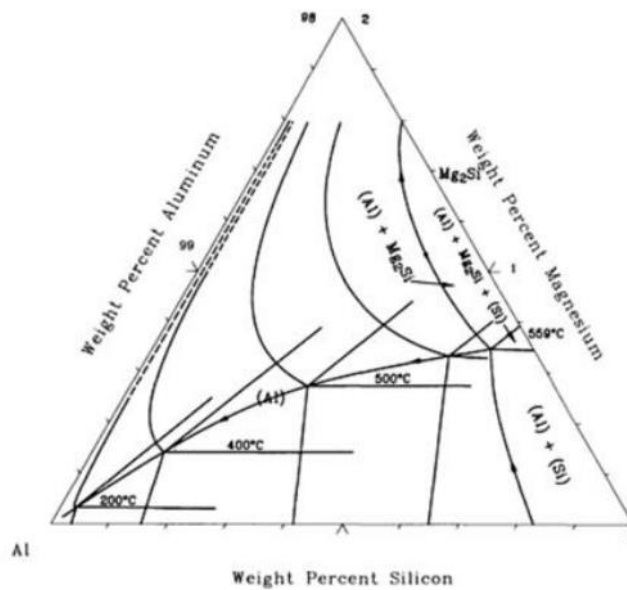
Toplinska obrada aluminijskih legura se sastoji od homogenizacijskog žarenja, gašenja te dozrijevanja. Na osnovu kemijskog sastava odredit će se parametri potrebni za pravilno izvršavanje toplinske obrade.

#### 3.4.1 Određivanje parametara homogenizacijskog žarenja i dozrijevanja

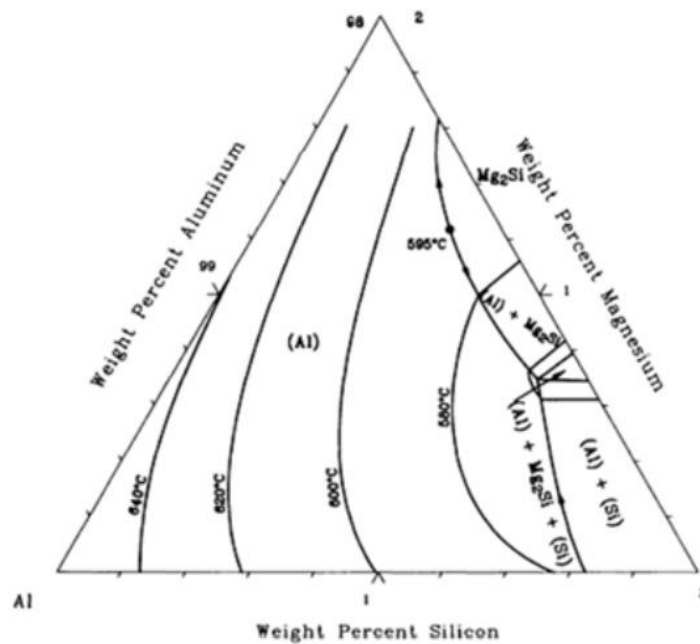
Parametri homogenizacijskog žarenja određeni su uz pomoć ternarnog dijagrama stanja sustava Al-Si + Mg. Temperatura homogenizacijskog žarenja mora biti iznad krivulje topljivosti u čvrstom stanju (slika 13) kako bi došlo do potpune homogenizacije, ali pri tome ne smije doći do taljenja materijala pa temperatura mora biti niža od solidus temperature (slika 14). Na temelju navedenog, temperatura homogenizacijskog žarenja iznosi 525 °C. 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 aluminija ( $\alpha$ -mješanac). Vrijeme držanja iznosi 6 sati. Na osnovu prethodnih pokusa za ovu leguru je najefikasnije dozrijevanje na temperaturi 165 °C u trajanju od 6 h.



Slika 13. Ternarni dijagram stanja Al-Si-Mg-projeksija topljivosti [7]



Slika 14. Ternarni dijagram stanja Al-Si-Mg-projeksija solidusa [7]

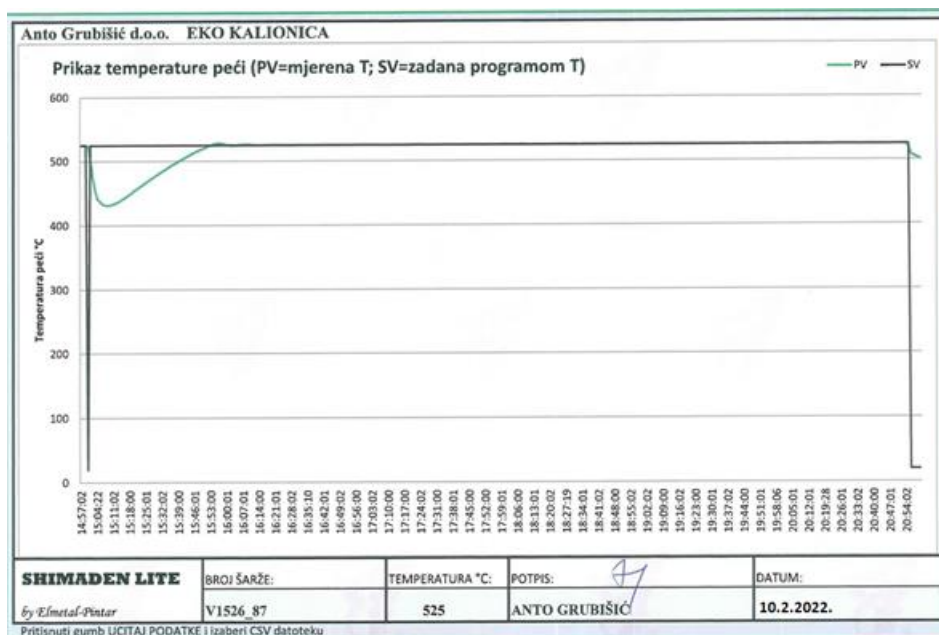
Kod ove legure ne dolazi do potpune homogenizacije kao kod ostalih legura, jer je udio Si znatno veći od maksimalne granice topljivosti, pa će u homogenizacijskom stanju osim određenog %Si otopljenog u  $\alpha$ -kristalu mješancu biti i primarni silicij.

### 3.4.2 Provođenje homogenizacijskog žarenja, gašenja i umjetnog dozrijevanja

Na osnovu gore navedenih parametara, homogenizacijsko žarenje je provedeno u EKO KALIONICI Anto Grubišić d.o.o (slika 15). Na slici 16 prikazan je dijagram temperatura-vrijeme koji prikazuje temperaturu peći nakon stavljanja uzoraka u peć. Na slici se može vidjeti da je potrebno određeno vrijeme da bi temperatura uzoraka dostigla namještenu temperaturu peći. Nakon homogenizacijskog žarenja slijedi gašenje. Gašenje je vrlo važno jer je kod aluminijskih legura specifično to što bi se nakon otvaranja peći, uzorci trebali trenutno gasiti kako bi se izbjegla preuranjena precipitacija. Gašenje se provelo u vodi. U EKO KALIONICI je napravljena peć isključivo za aluminijske legure gdje je vrijeme između otvaranja peći i gašenja svedeno na minimum. To je postignuto tako da vrijeme koje protekne da se izradak prenese iz peći u sredstvo za gašenje što kraće kako bi se onemogućilo sporo ohlađivanje u području kritičnih temperatura gdje nastupa vrlo brza precipitacija, a osim toga važno je da spremnik za gašenje bude dovoljno velikog volumena kako bi se izbjegao osjetniji porast temperature sredstva za gašenje.



Slika 15. Peć za toplinsku obradu aluminijskih legura



Slika 16. Dijagram temperatura-vrijeme peći

Nakon gašenja uzorci zadržavaju monofaznu strukturu s udjelom primarnog silicija, ali su sada u neravnotežnom stanju. Kako bi se iskoristilo to stanje provodi se umjetno dozrijevanje na temperaturi od 165 °C i vremenu trajanja od 6 h. Osnova dozrijevanja je difuzija, te nakon dozrijevanja Al-Si-Mg legura dolazi do izlučivanja  $Mg_2Si$  sitnih precipitata. Takvi sitni precipitati dovode do povećanja čvrstoće, tvrdoće i istežljivosti.

### 3.5 Mehanička ispitivanja na kidalici

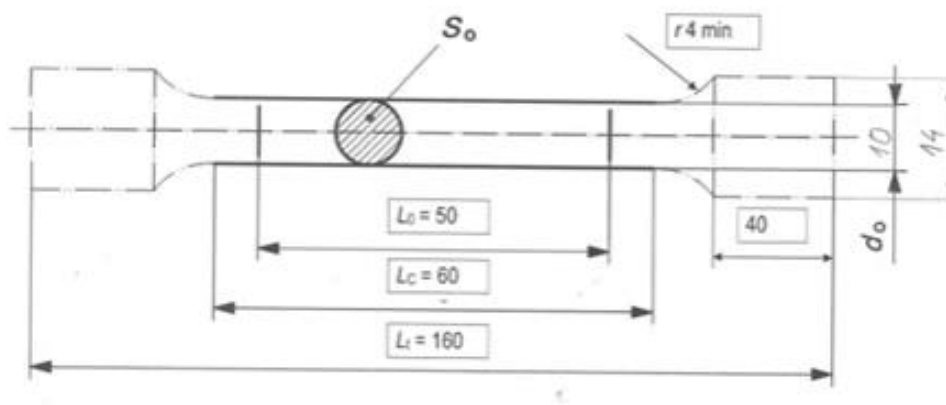
Mehanička ispitivanja na kidalici provedena su u Laboratoriju za ispitivanje mehaničkih svojstava na Fakultetu strojarstva i brodogradnje. Statičkim vlačnim ispitivanjem dobije se uvid u elastično i plastično ponašanje materijala u uvjetima jednoosnog statičkog vlačnog napreznja. Ovim ispitivanjem utvrđuju se osnovna mehanička svojstva materijala kao što su granica razvlačenja, vlačna čvrstoća, istežljivost i kontrakcija. [8]

#### 3.5.1 Izrada epruveta

Na slici 17 je prikaz epruveta za statičko vlačno ispitivanje, a na slici 18 njihove dimenzije.



Slika 17. Epruvete za statičko vlačno ispitivanje



Slika 18. Dimenzije epruvete za statičko vlačno ispitivanje [8]

Epruvete su izrađene strojnom obradom iz odljevka. Korištena je kratka epruveta okruglog presjeka kod koje je početna mjerna duljina  $L_0$  jednaka peterostrukom početnom promjeru  $d_0$  ili općenito [8]:

$$L_0 = 5,65 * \sqrt{S_0} \quad (1)$$

gdje je:

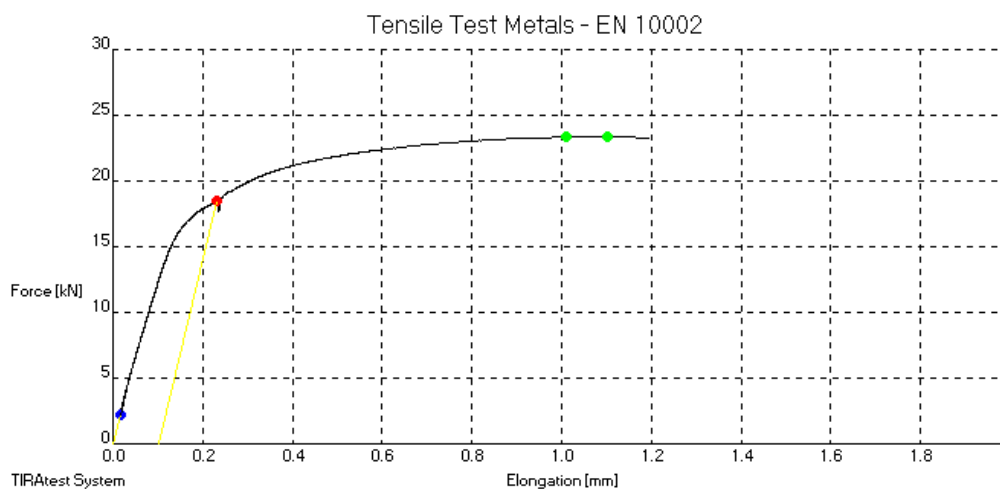
$S_0$  - površina poprečnog presjeka,  $\text{mm}^2$

### 3.5.2 Statičko vlačno ispitivanje

Nakon izrade epruvete provodi se statičko vlačno ispitivanje na hidrauličkoj kidalici „WEB WPM“ (slika 19), nazivne sile 400kN, na kojima se epruveta kontinuirano vlačno opterećuje do loma. Pri ispitivanju se kontinuirano mjere sila i produljenje (slika 20). Produljenje se mjerilo pomoću ekstenziometra. Na slici 21 su rezultati ispitivanja četiri epruvete koji prikazuju mehanička svojstva koja karakteriziraju otpornost materijala (granica razvlačenja, vlačna čvrstoća, modul elastičnosti) i deformabilnost materijala (istezljivost, kontrakcija).



Slika 19. Hidraulička kidalica WEB WPM



Slika 20. Dijagram sila-produljenje epruvete 1

Naručitelj:	Završni Grizelj			mm	mm	mm	KONTRAKCIJA	
Materijal:				a	b	axb	du mm	Su
Uzorak:	EPRUVETA - okrugla <input checked="" type="checkbox"/>	4	kom			0,00	9,42	69,69
	EPRUVETA - plosnata <input type="checkbox"/>		kom			0	9,43	69,84
	POLUPROIZVOD <input type="checkbox"/>		kom			0	9,42	69,69
	PROIZVOD <input type="checkbox"/>		kom			0	9,45	70,14
Napomena:								
Norma ispitivanja:	HRN EN ISO 6892-1							
Ispitna oprema:	Kidalcica:	VEB WPM/ EUmod / 400		Ekstenzimetar:	elektronski / 2mm		Brzina ispitivanja:	200 N/s
	Dinamometar:			Pojačalo:			Temperatura:	23

R.br.	Velicina Oznaka	$a_0$ mm	$b_0$ mm	$d_0$ mm	$S_b$ mm <sup>2</sup>	$L_0$ mm	$E$ N/mm <sup>2</sup>	$F_m$ kN	$F_k$ kN	$S_u$ mm	$L_u$ mm	$R_m$ N/mm <sup>2</sup>	$R_k$ N/mm <sup>2</sup>	$R_{p0.2}$ N/mm <sup>2</sup>	A %	Z %	Napomena
1	1			10,08	79,80	50,00	87557	23,33	23,3	69,69	55,25	292,4	292,0	231,54	10,50	12,67	
2	2			10,07	79,64	50,00	72817	23,29	23,29	69,84	54,86	292,4	292,4	241,42	9,72	12,31	
3	3			10,07	79,64	50,00	84850	22,94	22,92	69,69	53,37	288,0	287,8	229,91	6,74	12,49	lom izvan L <sub>0</sub>
4	4			10,07	79,64	50,00	81384	22,85	22,85	70,14	53,95	286,9	286,90	221,8	7,90	11,93	
5																	
6																	
7																	
8																	
9																	
10																	
Aritmetičke sredine							81652	23,10	23,09			289,9	289,8	231,2	8,99	12,49	

Mjeritelj:	Roman Divjak	Datum:	5 02 202	Potpis:	
Provjerio:		Datum:		Potpis:	

Slika 21. Rezultati statičko vlačnog ispitivanja

Srednja vrijednost konvencionalne granice razvlačenja iznosi  $231,1 \text{ N/mm}^2$ , a vlačne čvrstoće  $289,8 \text{ N/mm}^2$ . Izračunavanjem srednje vrijednosti rezultata istežljivosti, dobije se iznos od 9 %, izračunavanjem srednje vrijednosti rezultata kontrakcije, dobije se iznos od 12,49 %.

U tablici 8 prikazane su izmjerene vrijednosti  $x_1$ ,  $x_2$ ,  $x_3$  koje prikazuju promjer epruvete na svakoj četvrtini, pa je tako promjer  $x_1$  izmjeren na udaljenosti od jedne četvrtine epruvete, promjer  $x_2$  izmjeren je na polovini epruvete, a promjer  $x_3$  izmjeren je na udaljenosti od tri četvrtine epruvete. Oznaka  $d_0$  predstavlja početni promjer epruvete izračunat kao srednja vrijednost  $x_1$ ,  $x_2$  i  $x_3$ , a  $L_0$  predstavlja početnu duljinu epruvete. Ostale su dimenzije također ručno izmjerene, te oznaka  $d_u$  predstavlja promjer epruvete nakon loma, a oznaka  $L_u$  predstavlja duljinu epruvete nakon loma.

Tablica 8. Izmjerene vrijednosti promjera epruvete na tri mjesta

Uzorak	$x_1$ , mm	$x_2$ , mm	$x_3$ , mm	$d_0$ , mm	$d_u$ , mm	$L_0$ , mm	$L_u$ , mm
1	10,08	10,08	10,07	10,08	9,42	50	55,25
2	10,06	10,07	10,07	10,07	9,43	50	54,86
3	10,06	10,07	10,06	10,06	9,42	50	53,37
4	10,06	10,07	10,06	10,06	9,45	50	53,95

## 4. ZAKLJUČAK

Precipitacijsko očvršćivanje AlSiMg legure rezultiralo je porastom granice razvlačenja i vlačne čvrstoće do vrijednosti koje odgovaraju nekim konstrukcijskim čelicima. Najoptimalnije je dozrijevati ovu leguru na temperaturi od 165 °C u trajanju od 6 h. Porast mehaničkih svojstava nastao je uslijed izlučivanja sitnih jednoliko raspršenih Mg<sub>2</sub>Si precipitata unutar α-kristala mješanca aluminija. To su vjerojatno koherentni i polukoherentni precipitati. Ukoliko bi uzorke držali dulji vremenski period na istoj temperaturi, vjerojatno bi došlo do smanjenja čvrstoće zbog izlučivanja nekoherentnih precipitata koji su izdvojeni od matrice čime nestaje izvitoperenje kristalne rešetke. Zato je važno kontrolirati parametre toplinske obrade, odnosno dozrijevanja, ukoliko se žele postići optimalne vrijednosti mehaničkih svojstava.

---

**LITERATURA**

- [1] Ćorić D., Filetin T.: Materijali u zrakoplovstvu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Ivana Lučića 5, Zagreb, 2012
- [2] Filetin T., Kovačiček F., Indof J.: Svojstva i primjena materijala, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Ivana Lučića 5, Zagreb, 2002
- [3] Malešević N.: Osnovi nauke o metalima IV, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Ivana Lučića 5, Zagreb, 1965
- [4] Ćorić D., Alar Ž.: Odabrana poglavlja iz mehaničkih svojstava materijala, Ivana Lučića 5, Zagreb, 2016
- [5] G. Totten and D. Mackenzie, "Aluminum Quenching Technology: A Review," *Mater. Sci. Forum - MATER SCI FORUM*, vol. 331–337, pp. 589–594, May 2000, doi: [10.4028/www.scientific.net/MSF.331-337.589](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.331-337.589).
- [6] S. W. Nam and D. H. Lee, "The effect of Mn on the mechanical behavior of Al alloys," *Met. Mater. Int.*, vol. 6, pp. 13–16, Feb. 2000.
- [7] Pulić M., "Utjecaj toplinske obrade na mikrostrukturu i mehanička svojstva aluminijske legure", Diplomski rad, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2017
- [8] Franz M.: Mehanička svojstva materijala, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Ivana Lučića 5, Zagreb, 1998.