

Mehanizmi poboljšanja čvrstoće aluminija i aluminijских legura

Stubičar, Mihaela

Undergraduate thesis / Završni rad

2020

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:235:207029>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-17**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mihaela Stubičar

Zagreb, 2020.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Vera Rede, dipl. ing.

Student:

Mihaela Stubičar

Zagreb, 2020.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradila samostalno koristeći znanje stečeno tijekom studija na Fakultetu strojarstva i brodogranje u Zagrebu, uz pomoć navedene literature.

Zahvaljujem se svojoj mentorici prof. dr. sc. Veri Rede na pruženoj stručnoj pomoći, trudu, savjetima i utrošenom vremenu.

Posebno se zahvaljujem cijeloj svojoj obitelji, dečku, prijateljima i kolegama na razumijevanju, podršci i iznimnom strpljenju tijekom studiranja.

Mihaela Stubičar



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za završne 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 / 20 - 6 / 3	
Ur. broj: 15 - 1703 - 20 -	

ZAVRŠNI ZADATAK

Studentica: **Mihaela Stubičar**

Mat. br.: 0035210617

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Mehanizmi poboljšanja čvrstoće aluminija i aluminijских legura**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Mechanisms for strengthening aluminium and aluminium alloys**

Opis zadatka:

Od kraja 19. stoljeća kad je otkriven relativno jeftin postupak proizvodnje aluminija iz glinice započela je industrijska proizvodnja i primjena aluminija. U odnosu na druge metale aluminij ima puno prednosti, a njegov osnovni nedostatak je relativno niska čvrstoća. Zato je razvoj materijala na bazi aluminija tekao uglavnom u smislu povećanja čvrstoće osnovnog metala. Danas postoji puno različitih aluminijevih legura kod kojih su korišteni različiti mehanizmi povišenja čvrstoće i kod kojih je postignuta vrlo visoka vrijednost vlačne čvrstoće i granice razvlačenja.

U završnom radu potrebno je navesti i opisati sve mehanizme očvršćuća koji se koriste za povećanje čvrstoće aluminija i njegovih legura. Također je potrebno navesti principe podjele aluminijevih legura te opisati sastav, mikrostrukturu i svojstva svake skupine. Potrebno je navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

15. svibnja 2020.

Zadatak zadala:

Datum predaje rada:

2. rok (izvanredni): 1. srpnja 2020.

3. rok: 17. rujna 2020.

Predviđeni datumi obrane:

2. rok (izvanredni): 3.7.2020.

3. rok: 21.9. - 25.9.2020.

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Vera Rede

Prof. dr. sc. Branko Bauer

SADRŽAJ

POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA	IV
POPIS OZNAKA	V
SAŽETAK	VI
SUMMARY	VII
1. UVOD	1
2. ALUMINIJ	2
2.1. Opća svojstva aluminija	2
3. ALUMINIJEVE LEGURE	6
3.1. Opća svojstva aluminijevih legura	6
4. MEHANIZMI OČVRSNUĆA	8
4.1. Očvrsnuće kristalima mješancima (legiranjem)	8
4.2. Očvrsnuće hladnom deformacijom	11
4.3. Precipitacijsko očvrsnuće	13
5. PODJELA ALUMINIJEVIH LEGURA	20
5.1. Podjela prema načinu proizvodnje (tehnološkoj preradi)	20
5.1.1. Lijevane legure	20
5.1.1.1. Legura aluminij-silicij	22
5.1.1.2. Legura aluminij-magnezij	24
5.1.1.3. Legura aluminij-silicij-magnezij	24
5.1.1.4. Legura aluminij-bakar	25
5.1.1.5. Legura aluminij-silicij-bakar	25
5.1.2. Gnječene legure	26
5.1.2.1. Legura aluminij-mangan	27
5.1.2.2. Legura aluminij-magnezij-silicij (antikorodal).....	28
5.1.2.3. Legura aluminij-bakar-magnezij (dural).....	28
5.1.2.4. Legura aluminij-cink-magnezij	29
5.1.2.5. Legura aluminij-cink-magnezij-bakar (konstruktal)	29

5.1.2.6. Aluminijske legure s litijem	30
5.2. Podjela prema kemijskom sastavu	31
5.3. Podjela prema mogućnosti toplinske obrade	33
6. ZAKLJUČAK.....	35
LITERATURA.....	36

POPIS SLIKA

Slika 1.	Plošno centrirana kubična (FCC) kristalna rešetka [6].....	3
Slika 2.	Proizvodi od aluminija i aluminijevih legura[7]	4
Slika 3.	Prikupljeni proizvodi od aluminija za recikliranje [7]	5
Slika 4.	Fazni dijagram Al-Mg [12].....	9
Slika 5.	TTT dijagram precipitacije Mg_5Al_8 za čvrstu otopinu Al-Mg [12]	10
Slika 6.	Prikaz općeg dijagrama stanja i postupka precipitacijskog očvršćivanja [1].....	15
Slika 7.	Tipovi precipitata [1]	17
Slika 8.	Ovisnost vlačne čvrstoće o temperaturi i vremenu dozrijevanja [1]	18
Slika 9.	Necijepljena (lijevo) i cijepljena (desno) mikrostruktura eutektičke legure Al-Si s 12 % Si [14]	23

POPIS TABLICA

Tablica 1.	Fizikalna i mehanička svojstva aluminija [1].....	2
Tablica 2.	Oznake za hladno deformirano stanje H [13].....	12
Tablica 3.	Oznake za rastopno žareno i dozrijevano stanje T [13].....	19
Tablica 4.	Osnovna svojstva lijevanih aluminijevih legura [1].....	21
Tablica 5.	Označivanje Al-legura za lijevanje [8].....	25
Tablica 6.	Podjela i osnovne značajke gnječanih aluminijevih legura [1].....	26
Tablica 7.	Označivanje aluminijevih legura za gnječenje [5].....	27
Tablica 8.	Podjela i mehanička svojstva toplinski neobrađivih aluminijevih legura [17]..	33
Tablica 9.	Podjela i mehanička svojstva toplinski obrađivih aluminijevih legura [17].....	34

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
R_m	N/mm^2	Vlačna čvrstoća
R_e	N/mm^2	Granica razvlačenja
$R_{p0,2}$	N/mm^2	Konvencionalna granica razvlačenja

SAŽETAK

U ovom radu opisana su opća svojstva aluminija i njegovih legura. Iako aluminij u odnosu na druge metale ima puno prednosti, poseban je naglasak stavljen na njegov osnovni nedostatak, a to je njegova relativno niska čvrstoća.

Općenito se niska čvrstoća aluminija može poboljšati legiranjem. Danas postoji više od 500 različitih aluminijskih legura. Sve aluminijske legure moguće je podijeliti na toplinski očvrstive i toplinski neočvrstive. Željena svojstva toplinski neočvrstivih legura mogu se postići legiranjem manganom, magnezijem, željezom ili silicijem.

Za očvršćivanje preostalih aluminijskih legura koristi se mehanizam očvršćivanja hladnom deformacijom ili precipitacijom. Precipitacijsko očvršćivanje ostvaruje se postupkom rastvornog žarenja i dozrijevanja.

Ovi mehanizmi očvršćivanja koriste se i u raznim kombinacijama za postizanje čim više vrijednosti čvrstoće.

U radu su također navedeni načini podjele aluminijskih legura i svojstva osnovnih skupina.

Ključne riječi: *aluminij, aluminijske legure, mehanizmi očvršćivanja*

SUMMARY

In this bachelor thesis general properties of aluminium and aluminium alloys were described. Although aluminum has a lot of advantages over other metals, special emphasis is put on its own deficiency and that is low strength.

Low aluminium strength can generally be modified by the alloying process using different elements. Today, we have over 500 different aluminium alloys. Aluminium alloys are classified into two groups: non-heat treatable aluminium alloys and heat treatable aluminium alloys. The optimal properties of non-heat treatable aluminium alloys can usually be obtained by alloying with manganese, magnesium, iron or silicon.

The strength of some aluminium alloys can be improved using cold deformation or precipitation hardening. Precipitation hardening is achieved during homogenization and aging heat treatment.

These strengthening mechanisms are used in various combinations to achieve greater strength.

In this work, the classification of aluminium alloys and properties of basic groups were also described.

Key words: *aluminium, aluminium alloys, strengthening mechanism*

1. UVOD

U prirodi se aluminij nalazi u obliku oksida i smjese oksida iz kojih se skupim elektrolitičkim postupkom izdvaja metal. Općenito, metali se ekstrahiraju iz oksidnih ruda zagrijavanjem s jeftinim redukcijskim sredstvom, a dobiveni sirovi metal se rafinira kako bi se omogućila oksidacija prisutnih nečistoća. Takav postupak redukcije onemogućen je u slučaju aluminija zbog velikog afiniteta aluminija prema kisiku. Redovitim kemijskim postupkom svi se prateći elementi lakše reduciraju od aluminija. Krajem 19. stoljeća otkriven je relativno jeftin postupak proizvodnje aluminija iz glinice. Tim je otkrićem započela industrijska proizvodnja i primjena aluminija [1].

U odnosu na druge metale aluminij ima puno prednosti zbog svoje niske gustoće, visoke električne i toplinske vodljivosti, korozijske postojanosti, niskog modula elastičnosti i lijepog izgleda, a njegov glavni nedostatak je relativno niska tvrdoća s niskom vlačnom čvrstoćom te se u pravilu za inženjersku primjenu koristi u legiranom stanju. Zbog toga je sljedeći korak u razvoju bilo otkriće postupka za povećanje čvrstoće aluminijevih legura čime su stvoreni preduvjeti za korištenje posebnih kemijskih i fizikalnih svojstava aluminija [1].

Danas postoji mnogo različitih aluminijevih legura kod kojih su korišteni različiti mehanizmi povećanja čvrstoće čime su postignute puno visoke vrijednosti vlačne čvrstoće i granice razvlačenja nego što ih ima čisti aluminij.

2. ALUMINIJ

Aluminij zbog svoje niske gustoće pripada lakim metalima, srebrno-bijele je boje, a prema zastupljenosti u Zemljinoj kori zauzima treće mjesto s udjelom od približno 8 %. Ima ga nešto manje od kisika i slijeka, što ga čini najzastupljenijim metalom. Krajem 19-og stoljeća otkriven je relativno jeftin postupak proizvodnje aluminija iz glinice čime je započela industrijska proizvodnja i primjena aluminija. Iako je u upotrebi tek nešto više od jednog stoljeća, već je sada drugi (nakon čelika) najprimjenjiviji metalni materijal u svijetu [1, 2, 3].

2.1. Opća svojstva aluminija

Tehnički aluminij je lagan i korozijski relativno otporan metal, niskog modula elastičnosti koji ujedno ima visoku električnu kao i toplinsku vodljivost. Postojan je u vodi i na zraku, ali je neotporan na tvari koje razaraju zaštitni oksidni sloj, kao što su mineralne kiseline i lužine. Ponajprije se koristi zbog dobre korozijske postojanosti, niske gustoće kao i lijepog izgleda površine [1, 4, 5].

Pregled fizikalnih i mehaničkih svojstava aluminija dan je u Tablici 1.

Tablica 1. Fizikalna i mehanička svojstva aluminija [1]

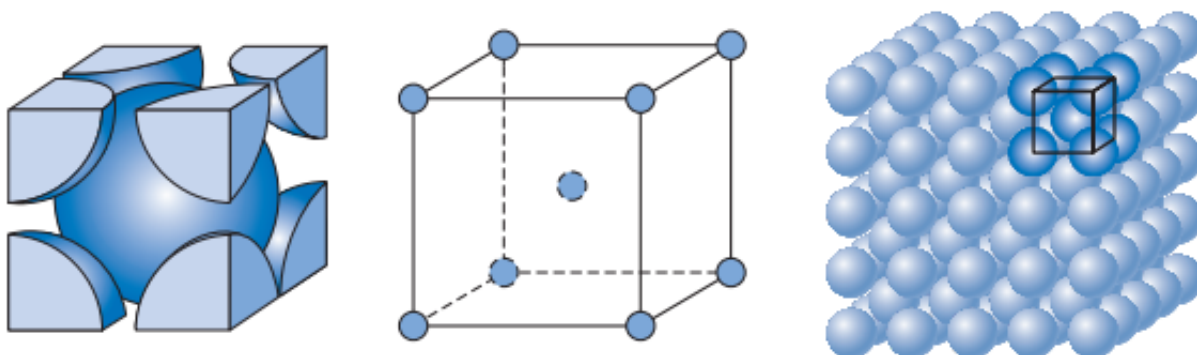
Gustoća	kg/m ³	2700
Talište	°C	660
Modul elastičnosti	N/mm ²	69000
Toplinska rastezljivost	10 ⁻⁶ K	23,8
Električna vodljivost	m/Ωmm ²	36...37,8
Granica razvlačenja	N/mm ²	20...120
Vlačna čvrstoća*	N/mm ²	40...180
Istezljivost*	%	50...4

**ovisno o stanju*

Prema položaju u nizu elektrokemijskih potencijala metala, aluminij nije plemenit metal već se njegova antikorozivnost temelji na postojanju gustog, nepropusnog i tankog oksidnog sloja koji se stvara na zraku i vodenim otopinama na površini metala. U slučaju da se oksidni sloj ošteti, on se oksidacijom odmah nadomješta novim slojem. Što je jače oksidiran, nastali sloj je otporniji. S obzirom da je aluminijev oksid iznimne tvrdoće, njegovim podebljanjem se povećava i otpornost na trošenje [1].

Na svojstva koja ovise o mikrostrukтури aluminija može se dalje utjecati legiranjem i toplinskom obradom. Zbog niskog modula elastičnosti, nosači izrađeni od aluminija znatno su gipkiji u usporedbi s jednakim konstrukcijama izrađenim od čelika. Toplinska rastezljivost je dvostruko veća od toplinske rastezljivosti čelika što je iskoristivo svojstvo za izradu posuda i cjevovoda [1].

Plošno centrirana kubična (FCC) kristalna rešetka aluminija, prikazana na slici 1, omogućuje izvandredno oblikovanje u toplom i hladnom stanju. Tekući aluminij lako se oblikuje u ingote lijevanjem u kalupima [1, 4].



Slika 1. Plošno centrirana kubična (FCC) kristalna rešetka [6]

Zbog navedenih svojstava aluminij i njegove legure nalaze primjenu u gotovo svim područjima života, počevši od kućanstva, izrade kuhinjskog posuđa i metalnih proizvoda široke potrošnje do primjene u graditeljstvu, izrade električnih vodiča, posuda i rezervoara u kemijskoj industriji [1, 7].

Na slici 2 prikazano je nekoliko proizvoda od aluminija i njegovih legura.



Slika 2. Proizvodi od aluminija i aluminijevih legura [7]

Važno je istaknuti da je aluminij moguće reciklirati više puta s čime on ne gubi niti jednu od svojih prirodnih kvaliteta. U procesu recikliranja troši se svega oko 5 % energije koja bi se potrošila za proizvodnju primarnog aluminija iz rude. Pretaljivanjem proizvoda od aluminija i aluminijevih legura koji su već bili u uporabi, dobiva se tzv. sekundarni aluminij koji se koristi uglavnom u izradi odljevaka [7, 8].

Slika 3 prikazuje prikupljene proizvode od aluminija za recikliranje.



Slika 3. Prikupljeni proizvodi od aluminija za recikliranje [7]

Tehnički čisti aluminij relativno je niske tvrdoće i niske vlačne čvrstoće zbog čega se za inženjersku primjenu uglavnom upotrebljava u legiranom stanju [1].

3. ALUMINIJEVE LEGURE

Metali u čistom, nelegiranom stanju imaju svojstva koja ograničavaju njihova područja primjene. Legiranjem, odnosno dodavanjem određenih legirnih elemenata osnovnim metalima poboljšavaju se prvenstveno mehanička svojstva, ponajprije vlačna čvrstoća i tvrdoća, ali i krutost, rastezljivost, katkada i žilavost te livljivost. Nažalost, legiranjem se neka dobra svojstva aluminija pogoršavaju, prije svega smanjuju se toplinska i električna vodljivost [1, 8].

3.1. Opća svojstva aluminijevih legura

Aluminijeve legure upotrebljavaju se u lijevanom i u gnječenom stanju. Brojne legure koriste se bez bilo koje dodatne toplinske obrade, no mnogima od njih mehanička svojstva mogu se i dalje poboljšati precipitacijskim očvrnućem ili nekim drugim postupkom toplinske obrade [1].

Valja naglasiti da u najvažnije prednosti aluminijevih legura spada visoka specifična čvrstoća. Aluminij, s gustoćom tri puta nižom od čelika, ima dobar omjer čvrstoće i gustoće, posebice kada je u pitanju toplinski očvrtnuta legura. Visokočvrste legure aluminija svojom specifičnom čvrstoćom konkuriraju čelicima visoke čvrstoće i titanijevim legurama. Aluminijeve legure zbog svoje kristalne građe, pri sniženim temperaturama ne postaju naglo krhke, već snižavanjem temperature postaju čvršće bez značajnog gubitka žilavosti. Dobru oblikovljivost i strojnu obradivost duguju plošno centriranoj kubičnoj (FCC) kristalnoj rešetki, koja sadrži više kliznih ravnina. Lako se oblikuju kako u toplom tako i u hladnom stanju, postupcima valjanja, prešanja, kovanja i sl. Neke legure moguće je oblikovati u relativno mekom stanju i naknadno obraditi nekim od postupaka toplinske obrade do visokih iznosa čvrstoće [1, 8].

U glavne nedostatke ovih legura ubrajamo nizak modul elastičnosti i nisku krutost, lošu zavarljivost, poprilično nisku toplinsku stabilnost kao i osjetljivost na neke oblike korozije [1].

Modul elastičnosti aluminijevih legura otprilike je 3 puta niži u odnosu na čelike što za posljedicu ima znatno veću elastičnost od ostalih konstrukcijskih materijala. Iako površinu tehnički čistog aluminija štiti tanki sloj oksida, problem korozijske postojanosti javlja se kod

visokočvrstih Al-legura zbog čega se često njihov površinski sloj prekriva tankim slojem čistog aluminijsa čime se ostvaruje dovoljna površinska zaštita uz visoku čvrstoću osnovnog materijala. Zbog niske temperature tališta aluminijsa (660 °C), primjena aluminijskih legura ograničena je pri povišenim temperaturama. Njihova uporaba dozvoljena je do temperature od 150 °C do najviše 200 °C [1, 8].

4. MEHANIZMI OČVRSNUĆA

Tehnički aluminij je metal koji ima relativno nisku čvrstoću. U čistom obliku vlačna čvrstoća mu je oko 40 N/mm^2 i konvencionalna granica razvlačenja oko 10 N/mm^2 što je prenisko za većinu tehničkih primjena. Zbog toga su razvijene aluminijske legure sa značajno boljim mehaničkim svojstvima od svojstava čistog aluminija [1, 9].

Čvrstoću aluminijskih legura moguće je modificirati kroz različite kombinacije deformiranja u hladnom stanju, legiranja i toplinske obrade. Sve je legure moguće očvrstnuti procesima deformiranja u hladnom stanju kao što je hladno valjanje i dr. Primjenjeni mehanizam očvrstnuća ovisi o samoj leguri na koju se primjenjuje [1, 5, 8, 10].

4.1. Očvrstnuće kristalima mješancima (legiranjem)

Ovaj mehanizam očvrstnuća temelji se na postojanju točkastih ili nul-dimenzionalnih zapreka, odnosno atoma legiranih elemenata (stranih atoma), koji deformiraju kristalnu rešetku i time otežavaju gibanje dislokacija. Atomi legiranih elemenata otopljeni su u kristalnoj rešetki osnovnog metala, a time nastaju intersticijski ili supstitucijski kristali mješanci. Supstitucijski (ili zamjenski) atomi pridonose poboljšavanju čvrstoće, kao i žilavosti, dok intersticijski (ili uključinski) atomi pridonose poboljšavanju čvrstoće, ali smanjuju žilavost [10, 11].

Otapanjem legiranih elemenata u osnovnom metalu formira se čvrsta otopina. Ti otopljeni atomi razlikuju se od atoma osnovnog metala u električnom naboju, veličini i krutosti pa zbog toga atomi legiranih elemenata koji su nasumično raspoređeni, u dodiru s dislokacijama uzrokuju očvrstnuće i to tako što otežavaju i spriječavaju gibanje dislokacija [8].

Prirast granice razvlačenja ostvaren ovim mehanizmom računa se prema izrazu [11]:

$$(\Delta R_e)_M = A \cdot G \cdot c^{1/2} \quad (1)$$

gdje su:

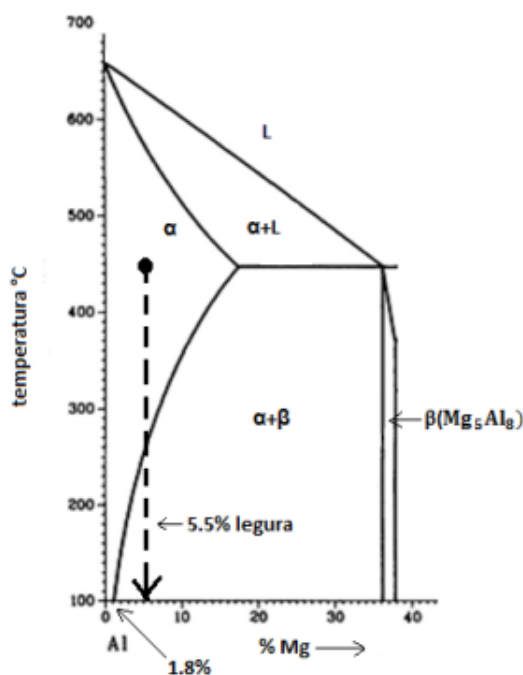
A – koeficijent ovisan o razlici modula smika te o razlici polumjera atoma između osnovnog i legiranog elementa

G – modul smika za aluminij

c – atomna koncentracija legirajućeg elementa

Postoji samo nekoliko legirnih elemenata koji imaju dovoljnu topljivost u aluminiju. To su: bakar, silicij, magnezij, mangan i litij. Navedeni elementi s aluminijem tvore dvokomponente legure tipa: Al-Cu, Al-Si, Al-Mg, Al-Mn, Al-Li. Njihovom međusobnom kombinacijom i uz dodatak drugih legirnih elemenata nastaju složenije legure. Svi navedeni legirni elementi potpuno su topivi u rastaljenom aluminiju ali njihova topljivost u FCC rešetki aluminija (kristalima mješancima) je ograničena. Neotopljeni legirni elementi formiraju s aluminijem ili međusobno nove faze ili intermetalne spojeve. Sposobnost otapanja legirnih elemenata u aluminiju ovisi o veličini njihovih atoma, a njihov udio i raspodjela određuju mehanička, fizikalna, proizvodna i kemijska svojstva aluminijevih legura [8].

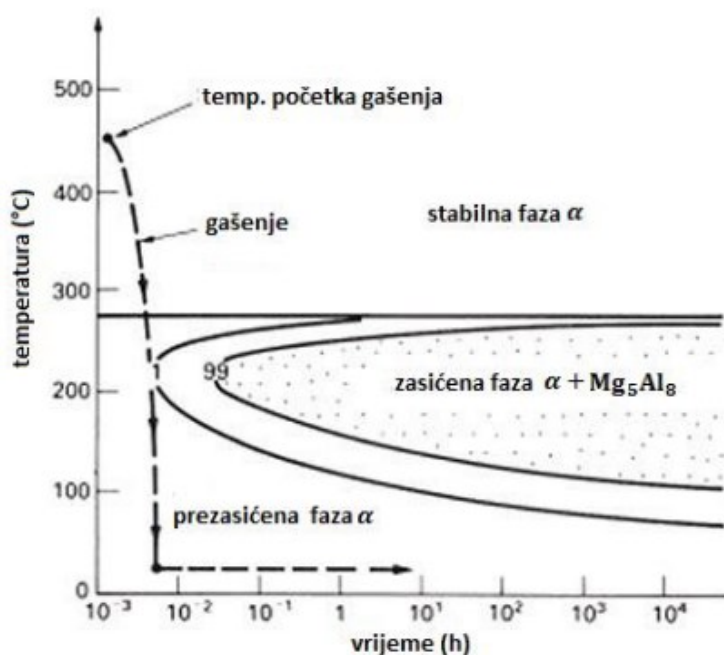
Od svih skupina aluminijevih legura, legure s magnezijem (serija 5000) svoju čvrstoću generiraju upravo iz ovog mehanizma. Na slici 4 prikazan je fazni dijagram Al-Mg sustava. Na sobnoj temperaturi u aluminiju se može otopiti do 1,8 % magnezija u ravnotežnom stanju dok u praksi legure aluminij-magnezij mogu u sadržaju imati do 5,5 % magnezija u čvrstoj otopini pri sobnoj temperaturi. U tom slučaju, stupanj prezasićenosti iznosi 5,5-1,8, odnosno 3,7 % mase [12].



Slika 4. Fazni dijagram Al – Mg [12]

Za postizanje ovog prezasićenja potrebno je provesti dvije faze toplinske obrade [12]:

- 1) homogenizacija tj. rastopno žarenje pri temperaturi od 450 °C – Ovim postupkom legura koja sadrži 5,5 % magnezija prelazi u jednofazno (α) područje u kojem se sav magnezij otapa u aluminiju formirajući supstitucijske kristale mješance.
- 2) hlađenje do sobne temperature umjerenom brzinom – U faznom dijagramu vidljivo je da legura sa 5,5 % magnezija ispod temperature od 275 °C ima dvofaznu strukturu ($\alpha+\beta$, pri čemu je $\beta = \text{Mg}_5\text{Al}_8$). Polaganim hlađenjem ispod temperature od 275 °C, atomi aluminija i magnezija međusobno difundiraju te tako tvore precipitate intermetalnog spoja Mg_5Al_8 . Ispod 275 °C difuzija je spora pa je krivulja precipitacijske reakcije pomaknuta u desno kao što je prikazanom na slici 5.



Slika 5. TTT dijagram precipitacije Mg_5Al_8 za čvrstu otopinu Al-Mg [12]

Dovoljno brzim hlađenjem legure s 5,5 % magnezija moguće je izbjeći izbočenje krivulje. U tom slučaju, magnezij neće imati dovoljno vremena da izađe iz čvrste otopine i izluči se u obliku Mg_5Al_8 precipitata, nego će na sobnoj temperaturi nastati prezasićena čvrsta otopina. Prezasićenje magnezija značajno djeluje na porast granice razvlačenja [12].

Ovaj mehanizam očvršnuća nije isključivo vezan za aluminijske legure serije 5000, već je primjenjiv i na legure iz drugih serija. Glavna razlika je u tome što većina aluminijskih legura čvrstoću dobiva od sitnih precipitata intermetalnih spojeva, pa stoga očvršćivanje kristalima mješancima nije dominantno kao kod aluminijskih legura serije 5000 [12].

Od svih mehanizama očvršnuća, očvršćivanje kristalima mješancima daje najslabije efekte.

4.2. Očvršnuće hladnom deformacijom

Očvršnuće hladnom deformacijom temelji se na povećanju gustoće dislokacija. Povećanjem gustoće dislokacija (linijskih ili jednodimenzionalnih zapreka) u strukturi materijala zbog izvitoperenja (distorzije) kristalne rešetke dislokacije se međusobno ometaju u gibanju što se prema van očituje kao porast granice razvlačenja [8, 11].

Povećanje gustoće dislokacija u materijalu uzrokuje prirast smičnog naprezanja koji se računa prema izrazu [11]:

$$\Delta\tau_D = a \cdot m \cdot G \cdot b \cdot \rho^{1/2} \quad (2)$$

gdje su:

a – koeficijent interakcije između postojećih i novounošanih dislokacija ($a \approx 2$)

m – faktor orijentacije

b – Burgersov vektor

ρ – gustoća dislokacija u mm/mm^3 , koja iznosi:

$$\rho > 10^8 \text{ mm}/\text{mm}^3 \text{ za hladno deformirano stanje}$$

Povećanjem stupnja plastične deformacije, povećava se i gustoća dislokacija pa je time otežano njihovo kretanje. Zbog toga će i granica razvlačenja biti viša. Ako se gustoća dislokacija povisi do te mjere da su razmaci među dislokacijama jednaki razmacima između atoma, postignuta je gornja granica ovog mehanizma očvršnuća. Pri takvoj graničnoj gustoći

dislokacija, zbog velike koncentracije napetosti, lako može doći do nastanka napuklina i do loma [1, 8, 10, 11].

Deformiranje u hladnom stanju moguće je provesti postupcima poput valjanja, vučenja, prešanja, kovanja i sl. Tim je postupcima zajedničko da uzrokuju porast granice razvlačenja, tvrdoće i čvrstoće [1].

Aluminijeve legure za gnječenje su zbog svoje plošno centrirane kubične (FCC) kristalne strukture sklone očvršćivanju plastičnim oblikovanjem u hladnom stanju. Većina aluminijevih legura, koje su očvrstljive ovim mehanizmom, imaju mikrostrukturu koja se sastoji od čvrste otopine u kojoj nema intermetalnih faza. Upravo to pridonosi njihovoj visokoj duktilnosti. Reguliranjem stupnja ugnječenja u posljednjoj fazi oblikovanja postižu se željena mehanička svojstva [1, 8, 10].

Poznato je da čvrstoća ovisi o stupnju deformacije pa su stoga tehnički aluminij i neke aluminijeve legure za gnječenje dostupne u nekoliko deformacijski očvrnutih stanja. Glavni nedostatak hladno očvrnutih aluminijevih legura koje su proizvedene na konačne dimenzije jest da se njihova mehanička svojstva mogu mijenjati jedino žarenjem kada materijal omekša [8].

Očvršnuće na hladnu deformaciju je vrlo značajan mehanizam očvršnuća za aluminij i njegove legure, pa se često u oznakama normiranih vrsta može vidjeti dio oznake koji se odnosi na stupanj hladne deformacije (EN 515) [13].

U tablici 2 navedene su oznake za hladno deformirano stanje aluminija i aluminijevih legura za gnječenje.

Tablica 2. Oznake za hladno deformirano stanje H [13]

H1	hladno deformirano
H2	hladno deformirano i djelomično žareno
H3	hladno deformirano i stabilizirano na niskoj temperaturi
H4	hladno deformirano i zaštićeno prevlakom
HX2	obrađeno na $\frac{1}{4}$ najviše tvrdoće
HX4	obrađeno na $\frac{1}{2}$ najviše tvrdoće
HX6	obrađeno na $\frac{3}{4}$ najviše tvrdoće
HX8	obrađeno na najvišu tvrdoću

4.3. Precipitacijsko očvršnuće

Precipitacijsko očvršnuće je zajednička pojava kod mnogih legura u kojima dolazi do promjene topljivosti nekih konstituenata u osnovnom metalu promjenom temperature, ali najviše se koristi u odgovarajućim aluminijskim legurama. Prvu praktičnu primjenu precipitacije je 1906. godine primjetio njemački znanstvenik Alfred Wilm, koji je uočio da se legura koja sadrži 4,5 % bakra i 0,5 % magnezija, gašena u vodi s temperature od oko 500 °C očvršne stajanjem na okolišnoj temperaturi. Na taj način postignuta vrijednost čvrstoće svoj maksimum postiže za tjedan dana. Ta prva legura patentirana je pod nazivom "dural" ili "duraluminij" i njezina je prva značajna uporaba bila tijekom Prvog svjetskog rata za konstrukcijske elemente zračnog broda. Također se masovno koristila za izradu konstrukcijskih elemenata borbenih zrakoplova [1, 8, 10, 11].

Uzrok učinka precipitacije vezan je uz činjenicu da jedan ili više elemenata mogu formirati čestice, odnosno intermetalne spojeve koji uzrokuju izvitoperenja (defekte) kristalne rešetke. Ovisno o raspodjeli tih čestica, njihovom udjelu i veličini one uzorkuju veći ili manji porast čvrstoće i tvrdoće [8,10].

Prirast granice razvlačenja izazvan precipitacijskim očvršnućem računa se prema izrazu [11]:

$$(\Delta R_c)_{Pr} = (3 \cdot G \cdot b) / \lambda \quad (3)$$

gdje su:

G – modul smika

b – Burgersov vektor

λ – međusobna udaljenost središta precipitiranih čestica, nm

Za precipitacijsko očvršćivanje neke aluminijske legure potrebno je ispuniti određene polazne uvjete koji slijede iz dijagrama stanja [1, 8].

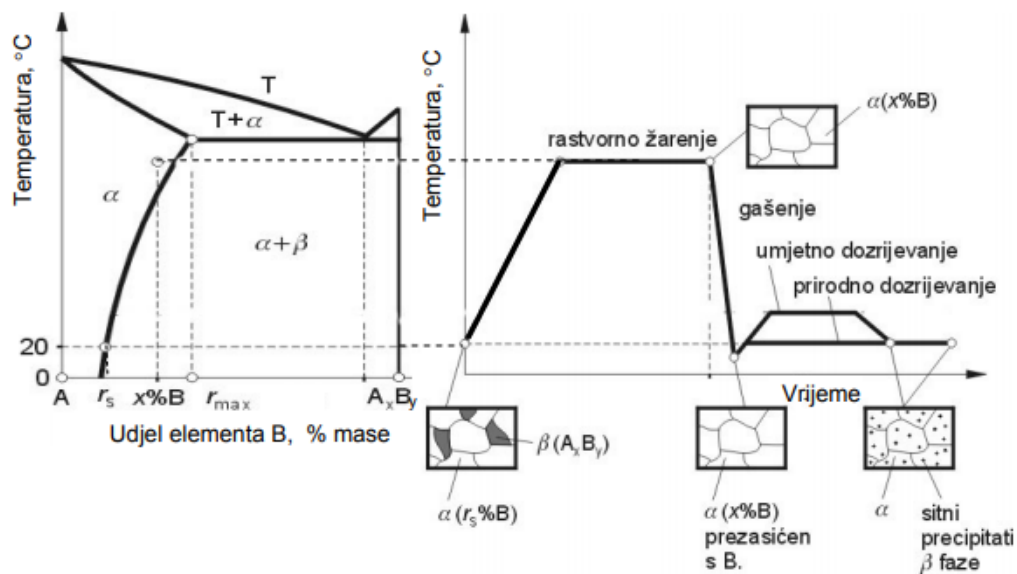
- 1) Nužno je da legura sadrži barem jedan legirni element ili konstituent čija topljivost u aluminiju raste s porastom temperature.

- 2) Potrebno je odabrati sastav legure takav da legura bude iz heterogenog područja dijagrama stanja, odnosno da je struktura sačinjena od α -kristala mješanaca aluminijske i kristala druge faze koja je intermetalni spoj (poput CuAl_2 , Al_3Mg_2 , Al_2CuMg , Mg_2Si , MgZn_2). Druga faza je nužna kako bi tijekom promjena koje se zbivaju došlo do ponovnog postupnog izlučivanja intermetalnog spoja, ali ovoga puta u koherentnom obliku zato što ako nema postupnog izlučivanja, neće biti ni očvršnuća. Nekim aluminijskim legurama dovoljno je nekoliko dana na sobnoj temperaturi da očvrstnu. Taj postupak je poznat pod nazivom prirodno dozrijevanje, a može se ubrzati povišenjem temperature.
- 3) Maseni udio legirnog elementa ne smije prekoračiti granicu maksimalne topljivosti u α -kristalu mješancu, kako bi se atomi legirnih elemenata potpuno otopili u α -kristalu mješancu.
- 4) Potrebno je da legirni elementi koji tvore intermetalni spoj imaju što višu topivost u α -kristalu mješancu na povišenim temperaturama, a što manju na okolišnoj temperaturi. Među tim legirnim elementima su Zn, Si, Mg i Cu, a oni tvore konstituente kao što su CuAl_2 , Al_3Mg_2 , Al_2CuMg , Mg_2Si , MgZn_2 .

Navedene uvjete zadovoljavaju toplinski očvrstljive legure s bakrom, magnezijem i silicijem, cinkom i nekim drugim elementima. (2XXX, 6XXX, 7XXX, 8XXX) [5,8].

Očvršnuće mehanizmom precipitacije ostvaruje se kroz postupak rastvornog žarenja i dozrijevanja. Za ovaj mehanizam očvršnuća karakteristično je da nema alotropskih modifikacija kristalne rešetke, kao kod kaljenja čelika, nego je porast tvrdoće i čvrstoće direktno povezan sa stvaranjem koherentnih precipitata unutar kristalne rešetke α -kristala mješanca aluminijske. Precipitati se izlučuju zbog promjene topljivosti atoma legirnih elemenata u α -kristalu mješancu [1,8].

Kako bi se ostvarilo precipitacijsko očvršnuće, leguru je potrebno zagrijati do temperature na kojoj prelazi u homogeno stanje, zadržati je na toj temperaturi do potpune homogenizacije te naglo hladiti (gasiti) na okolišnu temperaturu. Taj opći postupak precipitacijskog očvršćivanja prikazan je na slici 6 [1,8].



Slika 6. Prikaz općeg dijagrama stanja i postupka precipitacijskog očvršćivanja [1]

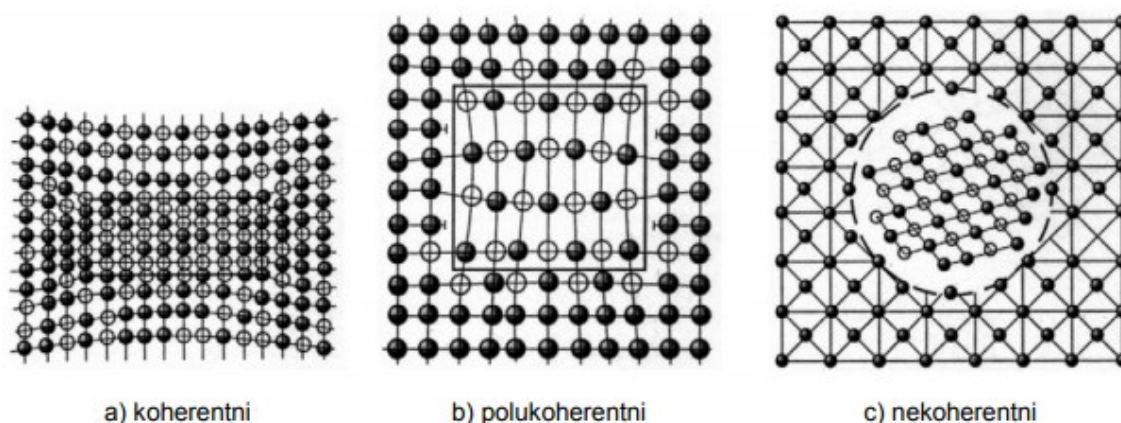
Legura u čijem se sadržaju nalazi neki legirani element B zagrijava se postupkom rastvornog žarenja na temperaturu pri kojoj se legirni element otapa u čvrstoj otopini. Čestice intermetalnog spoja postupno će se potpuno apsorbirati u kristalu mješancu aluminija ako se legura koja sadrži X % elementa B, polazne strukture sačinjene od α -kristala mješanaca u kojima je otopljeno r_s % elementa B i čestica nekog intermetalnog spoja $\beta (A_xB_y)$ zagrije na dovoljno visoku temperaturu. Tim procesom prelaska u homogeno stanje, stvara se homogena čvrsta otopina koja sadrži samo α -kristale mješance u kojima je otopljeno X % elementa B. Zbog blizine solidus linije dolazi do velike difuzijske pokretljivosti atoma koja omogućava zasićenje rešetke α -mješanaca s atomima legirnog elementa B i prazninama. Temperatura rastvornog žarenja mora biti iznad krivulje topljivosti u čvrstom stanju kako bi došlo do zasićenja, ali nikako ne smije doći do taljenja jer bi se time počele taliti i granice zrna čime bi uzorak bio uništen. Isto tako, temperatura ne smije biti ni preniska jer tada otapanje neće biti potpuno i legura dozrijevanjem neće dostići vrijednost očekivane čvrstoće. Bitan parametar rastvornog žarenja je i vrijeme koje mora biti dovoljno dugo da legura difuzijom stigne uspostaviti ravnotežno stanje. Trajanje žarenja može varirati od jedne minute za tanke limove pa do 20 sati za velike lijevane proizvode. Žarenje se provodi u pećima koje moraju biti čiste i suhe jer prisutnost vlage može rezultirati apsorpcijom vodika u aluminijev izradak, a spojevi sumpora mogu povećati difuziju vodika otapanjem površinskog oksidnog sloja. Vlagu je moguće ukloniti sušenjem i čišćenjem odljevaka prije odlaganja u peć. Najveću osjetljivost pokazuju legure s cinkom [8].

Ako bi se ova legura sporo hladila do okolišne temperature, na svakoj bi se temperaturi uspostavila ravnoteža pa bi se čestice intermetalnog spoja izlučivale kao nekoherentni precipitati. Na taj bi se način ponovno formirala dvofazna $\alpha+\beta$ mikrostruktura s velikim česticama intermetalne faze koje bi uzrokovale krhkost i općenito slaba mehanička svojstva. To je razlog zbog kojeg je leguru potrebno gasiti (brzo hladiti) s temperature rastvornog žarenja čime se legirni element B zadržava otopljen u α -kristalu mješancu i tako tvori prezasićenu čvrstu otopinu. Nakon gašenja legura zadržava monofaznu α -strukturu, ali zbog prezasićenja, odnosno značajno višeg udjela B legirnog elementa u α -čvrstoj otopini nego je ravnotežna koncentracija, nalazi se u neravnotežnom stanju. U gašenom stanju je u α -kristalima mješancima otopljeno X % elementa B dok je maksimalna topljivost atoma ovog elementa za ravnotežno stanje i okolišnu temperaturu iznosa r_s . Zbog toga se prezasićenje metastabilne legure može iskazati pomoću razlike neravnotežnog i ravnotežnog masenog udjela elementa B ($x-r_s$). α -mješanci osim što su prezasićeni atomima legirnog elementa B, prezasićeni su i prazninama. U ovom stanju legura je dobro hladno oblikovljiva. Gašenje je najosjetljivija faza toplinske obrade jer se mora odviti dovoljno brzo da se legirni elementi zadrže u otopini. Osim toga, gašenjem su uvedena i zaostala naprezanja koja mogu uzrokovati pojavu pukotina i deformacija pa ih je nužno umanjiti što je više moguće. Velike brzine gašenja obično omogućavaju postizanje najviše čvrstoće kao i najbolje kombinacije čvrstoće i žilavosti. Obično se brzim gašenjem također poboljšava i otpornost na opću i napetosnu koroziju, no iznimka su neke legure koje postižu bolju otpornost na napetosnu koroziju primjenom sporijeg ohlađivanja. Velike brzine uglavnom se ostvaruju u hladnoj vodi, ali primjenjuju se i sporija ohlađivanja u toploj ili vrućoj vodi, kojima se žrtvuju čvrstoća i korozijska postojanost, ali smanjuje se mogućnost pojave manjih deformacija. Brzinu je moguće povećati kidanjem parnog omotača koji se formira oko predmeta u prvoj fazi gašenja. Dijelove sklone deformiranju potrebno je gasiti nešto sporije, u toploj vodi. Potrebno je ispuniti dva uvjeta koja omogućuju izbjegavanje preuranjene precipitacije:

- 1) vrijeme prenošenja izradka iz peći u sredstvo za gašenje mora biti što kraće, kako bi se izbjeglo sporo ohlađivanje koje bi moglo uzrokovati vrlo brzu precipitaciju u području kritičnih temperatura
- 2) potrebno je osigurati spremnik dovoljnog volumena kako sredstvo za gašenje ne bi osjetno promijenilo temperaturu i uzorkovalo preuranjenu precipitaciju [1, 8, 12].

Nakon rastopnog žarenja i gašenja slijedi dozrijevanje. Ono se može provoditi na okolišnoj temperaturi (prirodno dozrijevanje) ili na nekoj povišenoj temperaturi (umjetno

dozrijevanje). Prirodno dozrijevanje traje između nekoliko dana i nekoliko mjeseci. Budući da je osnova dozrijevanje difuzija, koja se ubrzava povišenjem temperature, umjetnim dozrijevanjem na povišenoj temperaturi između 100 i 200 °C moguće je ostvariti veći porast čvrstoće i tvrdoće. Umjetno dozrijevanje prema tome zahtjeva puno kraći vremenski period, od pola sata do nekoliko dana. Tijekom prvog stadija dozrijevanja, atomi legirnog elementa B nastoje izaći iz čvrste otopine zbog prezasićenja α -mješanaca, pa zaposjedaju položaje unutar kristalne rešetke aluminija tako da tvore klice (nukleuse) budućih čestica. Atomi legirnog elementa B sele se iz područja veće napetosti rešetke u područja prezasićenosti prazninama pri čemu stvaraju nakupine otopljenih atoma legirnog elementa unutar kristalne rešetke α -mješanaca. Te klice su prisutne kao koherentni precipitati s istim rasporedom atoma kao i matrica pri čemu nema prekida veze u kristalnoj rešetki. Bez obzira na to, atomski razmaci su dovoljno različiti da se ostvaruje deformacija rešetke kao što je prikazano na slici 7a [1, 8].

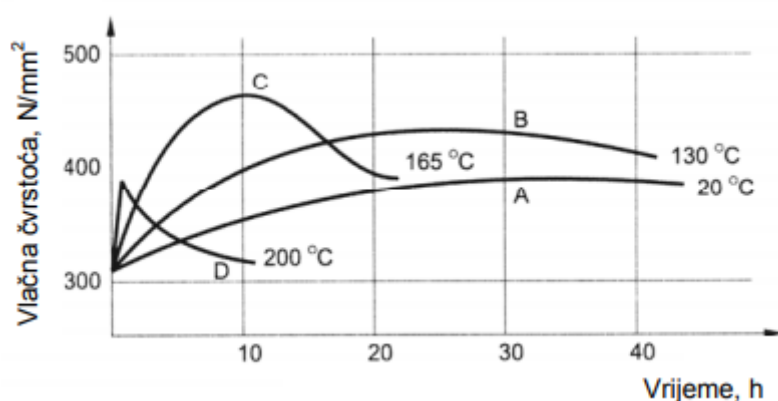


Slika 7. Tipovi precipitata [1]

Zbog izvitoperenosti kristalne rešetke, pojavljuju se unutarnja naprezanja koja ometaju gibanje dislokacija što rezultira porastom čvrstoće i tvrdoće legure. Bitno raste i istezljivost jer u sastavu više nema velikih čestica krhke β -intermetalne faze. Tijekom umjetnog dozrijevanja, porastom temperature i brzine difuzijskih procesa, povećava se i količina koherentnog precipitata. Zbog velikog izvitoperenja kristalne rešetke može doći do mjestimičnog prekida veze između matrice i precipitata što rezultira nastankom polukoherentnog precipitata koji je povezan s matricom samo na nekim čvorovima rešetke (slika 7b). Unutarnja naprezanja rastu što dovodi do još jačeg kočenja dislokacija i postizanja maksimalne čvrstoće, tvrdoće i granice razvlačenja. Istodobno se smanjuje antikorozivnost i istezljivost. Izlučivanje ove vrste precipitata moguće je samo pri povišenim temperaturama.

Kod prirodnog dozrijevanja ovog stadija nema. Zagrijavanjem legure na još višu temperaturu zbog ubrzane difuzije, mikrostruktura se brzo vraća u ravnotežno stanje pri čemu koherentne i polukoherentne čestice prelaze u nekoherentni precipitat koji je odvojen od matrice (slika 7c). Ovime nestaju izvitoperenja kristalne rešetke matrice i precipitata, međusobno se spajaju, rastu i smanjuje im se broj, a to rezultira padom čvrstoće i tvrdoće, uz zadržavanje niske istežljivosti [8].

Slika 8 prikazuje utjecaj temperature i vremena dozrijevanja na vlačnu čvrstoću aluminijske legure koja je prethodno rastvorno žarena i gašena.



Slika 8. Ovisnost vlačne čvrstoće o temperaturi i vremenu dozrijevanja [1]

Krivulja A prikazuje tijek prirodnog dozrijevanja pri temperaturi od 20 °C, vlačna čvrstoća sporo raste dok ne dosegne svoj maksimum od oko 380 N/mm² nakon približno 100 sati. Krivulja B prikazuje tijek umjetnog dozrijevanja na temperaturi od 130 °C, postignute su više vrijednosti čvrstoće u kraćem vremenskom periodu nego u slučaju krivulje A. Kod krivulje C optimalna temperatura dozrijevanja iznosi 165 °C, u vremenu od oko 10 sati, jer se u tom slučaju postiže maksimalno očvršnuće, ako se to vrijeme produži čvrstoća se smanjuje zbog precipitacije nekoherentnih čestica. Krivulja D pokazuje da se daljnjim porastom temperature (200 °C) vrlo brzo stvaraju nekoherentni precipitati, koji zatim rastu, pa se čvrstoća ubrzano smanjuje već nakon kratog vremena [1, 8].

Kod nekih aluminijskih legura tijekom postupka lijevanja dolazi do formiranja dispergiranih čestica promjera manjeg od 0,001 mm. Čestice nastaju zbog reakcije mangana s aluminijem, željezom i silicijem. Ove sitne, fino dispergirane čestice utječu na strukturu zrna koje se formira tijekom obrade. Na taj se način povećava čvrstoća u odnosu na legure bez dispergiranih čestica [5].

Očvršnuće precipitacijom je vrlo značajan mehanizam očvršnuća za aluminij i njegove legure, pa se često u oznakama normiranih vrsta može vidjeti dio oznake koji se odnosi na rastopno žareno i dozrijevano stanje (EN 515) [13].

U tablici 3 navedene su oznake za rastopno žareno i dozrijevano stanje aluminija i aluminijevih legura za gnječenje.

Tablica 3. Oznake za rastopno žareno i dozrijevano stanje T [13]

T4	rastopno žareno i prirodno dozrijevano
T6	rastopno žareno i umjetno dozrijevano na najvišu čvrstoću
T7	rastopno žareno i umjetno pre-dozrijevano
T8	rastopno žareno, hladno oblikovano i umjetno dozrijevano
T9	rastopno žareno, umjetno dozrijevano i hladno oblikovano
TX1, 3 do 9	varijacije osnovne temperature, niže vrijednosti čvrstoće
T42, T62	rastopno žareno F ili O + dozrijevano
T61, T63, T65	obrađeno na poboljšanu oblikovljivost
T79...T73	poboljšana žilavost i otpornost na koroziju
T66	legure 6XXX; bolja svojstva od T6
T4+	legure 6XXX; bolja svojstva od T4

Navedeni mehanizmi očvršnuća nerijetko se koriste u raznim kombinacijama kako bi postignuta čvrstoća bila čim viša. Legure očvršnute kristalima mješancima često se očvršćuju i hladnom deformacijom, dok se mehanizam precipitacijskog očvršnuća ponekad koristi u kombinaciji sa hladnim oblikovanjem prije dozrijevanja.

5. PODJELA ALUMINIJEVIH LEGURA

Aluminijeve legure mogu se podijeliti u 3 glavne skupine prema [8]:

- načinu proizvodnje (tehnološkoj preradi)
- kemijskom sastavu
- mogućnosti toplinske obrade

5.1. Podjela prema načinu proizvodnje (tehnološkoj preradi)

Prema načinu proizvodnje aluminijeve legure se dijele na [1, 8]:

- lijevane legure
- gnječene legure

5.1.1. Ljevane legure

Ljevane legure svrstavaju se u tri osnovne skupine Al-Si, Al-Mg i Al-Cu, a njihovom kombinacijom mogu se dobiti legure sa poboljšanim nekim od osnovnih svojstava koja su prikazana u tablici 4 [1].

Prednost u odnosu na ostale metale je što se mogu lijevati jednako dobro na sva tri osnovna načina – u kokilu, u pijesak i tlačno, ovisno što je povoljnije. One legure koje nisu namijenjene toplinskom očvršćivanju koriste se za opće namjene, gdje su svojstva poput korozijske postojanosti i krutosti važnija od čvrstoće [1].

U ovu se skupinu ubraja i grupa legura koja se često izdvaja prema namjeni, kao posebna grupa, to su tzv. "legure za stapove". Zahtjevi koji se postavljaju na ove legure su dobra mehanička otpornost pri povišenim temperaturama, dobra toplinska vodljivost, mala masa, otpornost na trošenje, dobra livljivost, mala toplinska rastezljivost itd [1].

Tablica 4. Osnovna svojstva lijevanih aluminijskih legura [1]

Mehanička otpornost	Livljivost	Rezljivost	Otpornost na koroziju	Tip legure	Predstavnik
mala	srednja	dobra	vrlo dobra	Al-Mg	AlMg3, AlMg5
				Al-Si-Mg	AlSi10Mg, AlSi7Mg1 (Mg omogućuje toplinsko očvrnuće)
mala	vrlo dobra	slaba	dobra	Al-Si	AlSi12
				Al-Si-Cu	AlSi5Cu1, AlSi6Cu2 (Si negativno utječe na rezljivost, Cu omogućuje smanjenje Si, ali pogoršava otpornost na koroziju)
osrednja*	slaba	dobra	vrlo slaba	Al-Cu	AlCu4MgTi (Ti i Mg usitnjuju zrno)

*uz toplinsku obradu

Većina zemalja koristi internacionalne brojčane oznake. Al-legure za lijevanje ozačavaju se četveroznamenkastom brojčanom oznakom kao što je prikazano u tablici 5.

Tablica 5. Označivanje Al-legura za lijevanje [8]

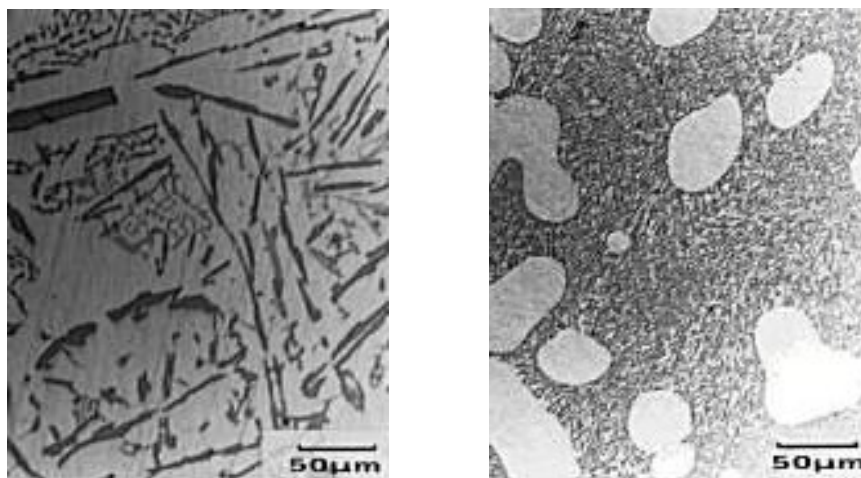
Oznaka serije	Glavni legirni element
1XX.0	Bez legirnih elemenata
2XX.0	Cu
3XX.0	Si+Cu i/ili Mg
4XX.0	Si
5XX.0	Mg
6XX.0	Neiskorišteno
7XX.0	Zn
8XX.0	Sn
9XX.0	Drugi elementi

5.1.1.1. Legura aluminij-silicij

Najvažniji efekt silicija u aluminijevim legurama je poboljšanje ljevačkih karakteristika. U grupi lijevanih legura najrasprostranjenije su one s 10 % do 13 % silicija i rijetko s malim udjelom bakra u sastavu. Te legure približno su eutektičkog sastava s vrlo uskim intervalom skrućivanja što ih čini prikladnima za tlačni lijev. Kod pješčanog lijeva nastaje poprilično gruba eutektička mikrostruktura koju je potrebno usitniti. Usitnjavanje je moguće provesti postupkom cijepjenja ili modifikacije [1,15].

Postupak cijepljenaj provodi se neposredno prije ulijevanja taljevine u kalupe, dodatkom male količine natrija (manje od 0,2 % šarže) u obliku soli. Cilj je da se odgodi nukleacija silicija kada se dostigne normalna eutektička temperatura i pomak eutektičke točke sastava u desno na dijagramu stanja Al-Si. Zbog toga, i više od 14 % silicija može biti prisutno u cijepjenoj leguri bez da se pojave primarni kristali silicija u mikrostrukturi. Pretpostavka je da se natrij skuplja u taljevini na međupovršini s novonastalim kristalima silicija te tako usporava i odgađa njihov rast. Pojavom pothlađenja ubrzava se nastajanje velikog broja klica silicija, što rezultira razmjerno sitnozrnatom eutektičkom mikrostrukturom [1].

Na slici 9 prikazana je mikrostruktura necijepljene i cijepljene Al-Si legure s 12 % silicija.



Slika 9. Necijepljena (lijevo) i cijepljena (desno) mikrostruktura eutektičke legure Al-Si s 12 % Si [14]

Učinak cijepljena se poništava pretaljivanjem zbog gubitka natrija oksidacijom. Postupkom cijepljenja vlačna čvrstoća legure povisuje se sa 120 N/mm^2 na oko 200 N/mm^2 , dok je istezljivost povišena od 5 % na više od 15 %. Ove eutektičke legure posjeduju razmjerno veliku duktilnost zbog činjenice da α -kristal mješanac aluminija u eutektiku čini skoro 90 % ukupne mikrostrukture. Kristali mješanci zbog toga su neprekinuti u mikrostrukтури zbog čega djeluju kao jastuk, za razliku od pretjerane krhkosti koja potječe od tvrde silicijeve faze. [1]

Osim eutektičkih, lijevaju se i podeutektičke legure s manje od 10 % silicija, kao i nadeutektičke legure s više od 13 % silicija u mikrostrukтури bez obzira jesu li prisutni i drugi legirni elementi. Odljevci od eutektičkih legura mogu se primjenjivati na temperaturama do $200 \text{ }^\circ\text{C}$. [1]

Dodatak silicija dramatično poboljšava fluidnost, otpornost na koroziju i livljivost. [16]

Ove legure imaju nisku čvrstoću i slabu obradljivost. Žilavost može biti izuzetna zbog niske koncentracije onečišćenja i mikrostrukturnih karakteristika. Modifikacijama sastava može se poboljšati čvrstoća, livljivost i žilavost. Takve modifikacije mogu se učinkovito postići kontroliranim dodavanjem natrija i/ili stroncija. [1,16]

5.1.1.2. Legura aluminij-magnezij

Magnezij se često koristi u kompleksnijim legurama aluminij-silicij koje uz to sadrže i bakar, nikel te ostale elemente koji služe za istu svrhu – povišenje čvrstoće i tvrdoće [16].

Ove su legure u suštini jednofazne binarne legure sa srednje do visokom tvrdoćom i čvrstoćom. Najvažnija značajka Al-Mg legura je dobra korozijska postojanost, uključujući i postojanost prema morskoj vodi i pomorskoj atmosferi. Upravo zbog dobre korozijske postojanosti kod ovih se legura može postići visoki sjaj. Ova je karakteristika ujedno i osnovna za široku upotrebu u preradi hrane i pića. Neke od njih su otporne i na udarce pa se koriste za umjereno opterećene dijelove u pomorstvu. Ove legure su lako obradljive, relativno dobro zavarljive, a njihov je izgled dosta atraktivan, bilo da je obrađen, poliran ili anodiziran [1, 16].

Magnezij u ovim legurama povećava sklonost oksidaciji. U rastaljenom stanju, gubici magnezija mogu biti značajni te oksidi aluminija i magnezija mogu značajno utjecati na kvalitetu lijevanja [16].

Najbolju kombinaciju žilavosti i čvrstoće ima legura s 10 % magnezija, no glavni nedostatak te legure je loša livljivost zbog pojave poroznosti i stvaranja troske. Upravo se zbog tih razloga najviše u uporabi nalaze legure s 3 % i 5 % magnezija [1].

5.1.1.3. Legura aluminij-silicij-magnezij

Dodavanjem magnezija u aluminij-silicij leguru stvoren je temelj za razvoj nove vrste legura koje imaju kombinaciju odličnih ljevačkih svojstava s izvrsnim svojstvima nakon toplinske obrade. Otpornost na koroziju je također odlična, a zadržava se i nizak nivo toplinske rastezljivosti [16].

Precipitacijsko očvršćenje ovih legura moguće je postići uz dodatak od 0,2 % do 0,5% magnezija. Uz to, imaju uzak temperaturni interval skrućivanja do 30 °C i malo linearno skupljanje od 1 %. Ako se lijevaju u pijesak, moraju se cijepiti ili modificirati, a nastali odljevci mogu se zavarivati. Tlačne odljevke nikako se ne smije zavarivati zbog većeg sadržaja plinova. Uporabna radna temperatura odljevaka je do 200 °C [1].

Neke Al-Si-Mg legure imaju dosta visoke vrijednosti čvrstoće. Mali dodatak berilija dodatno povisuje čvrstoću i žilavost ovih legura [16].

5.1.1.4. Legura aluminij-bakar

Bakar kao legirni element smanjuje otpornost na opću koroziju, no u malim udjelima, kod aluminij-cink legure, smanjuje opasnost od napetosne korozije [16].

Legure aluminij-bakar su toplinski očvrstljive sa srednje visokom čvrstoćom. Otporne su na povišenim temperaturama, imaju srednju ili slabu udarnu otpornost i dobru rezljivost. Mogu podnijeti radne temperature do 300 °C. Razvijene su mnoge legure s udjelom od 4 do 5 % bakra, obično s različitim količinama magnezija. Korozijska postojanost im je najlošija među svim aluminijevim legurama. Imaju dobru kombinaciju vlačnih svojstava i rezljivosti [1, 15, 16].

Legure ovog tipa slabe su livljivosti. Podložne su pucanju pri skrućivanju, te su potrebne točno određene tehnike lijevanja za izbjegavanje tog stanja. Pri skrućivanju su također sklone i pogrubljenju zrna zbog čega im se uglavnom dodaje magnezij (do 0,3 %) i/ili titanij (do 0,2 %) [1, 16].

5.1.1.5. Legura aluminij-silicij-bakar

Legura aluminij-silicij-bakar je zapravo legura Al-Si kojoj je dodan bakar zbog njegovog povoljnog djelovanja, odnosno poboljšanja rezljivosti i čvrstoće. Nažalost, to izravno utječe na smanjenje otpornosti na koroziju i livljivosti, zbog povećanja udjela bakra na račun silicija [1].

Kod ovih legura, čvrstoća i tvrdoća mogu se dalje poboljšavati pomoću rastvornog žarenja i prirodnog ili umjentog dozrijevanja. Ovom toplinskom obradom moguće je postići vrijednosti konvencionalne granice razvlačenja $R_{p0,2}$ i do 200 N/mm² [1].

Ove legure dobru žilavost, otpornost na udarce i dobru obradljivost odvajanjem čestica duguju dodatku titanija, kojim se postiže sitnozrnata mikrostruktura [1].

5.1.2. Gnječene legure

Osnovna podjela gnječenih aluminijskih legura temelji se na mogućnosti precipitacijskog očvršćivanja i kemijskom sastavu. Ovakva se podjela može obuhvatiti odjednom kao što je prikazano u tablici 6 gdje su prikazane osnovne skupine legura s mnogostrukim varijantama [1].

Tablica 6. Podjela i osnovne značajke gnječenih aluminijskih legura [1]

Vrsta legure	Način očvršćuća	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	Precipitacijom	~330
6. Al-Zn-Mg		
7. Al-Zn-Mg-Cu		
8. Al-Li-Cu-Mg		

Od onih legura koje očvršćuju hladnim deformiranjem, zahtjeva se dovoljna čvrstoća i krutost u hladnom stanju, a uz to i dobra korozivna postojanost. Mikrostruktura većine ovih legura u potpunosti se sastoji od čvrste otopine. Ova činjenica dodatno ide u prilog njihovoj velikoj duktilnosti i korozivnoj postojanosti. Legure s višim udjelom magnezija imaju odličnu postojanost prema morskoj vodi te pomorskoj atmosferi i stoga se koriste za brodsku nadgradnju [1].

U zadnjoj fazi hladnog oblikovanja, određenim stupnjem ugnječenja postižu se željena mehanička svojstva. Legure se obično isporučuju nakon određenog stupnja hladnog ugnječenja ili u mekom stanju. Glavni nedostatak ovih legura je da se mehanička svojstva materijala koji je proizveden na svoje konačne dimenzije, ne mogu više mijenjati nikako osim mekšanjem postupkom žarenja [1].

Ako se traži povoljan omjer gustoće i čvrstoće, prednost imaju precipitacijski očvrstljive legure. Njihovu osnovu čine legirni elementi cink, magnezij, silicij i bakar koji stvaraju intermetalne spojeve s aluminijem ili međusobno. Očvrstnuće precipitacijom osnovni je postupak za povećanje tvrdoće i čvrstoće prethodno gnječenih legura zato što je očvrstnuće postignuto precipitacijom veće od očvrstnuća postignutog hladnim oblikovanjem [1].

Ostali legirni elementi također nalaze svoju primjenu poboljšavanjem određenih svojstava. Krom pospješuje precipitacijsko očvrstnuće, titanij se koristi kao dodatak za sitnije zrno, dok olovo i bizmut poboljšavaju rezljivost [1].

Svaku serija aluminijevih legura karakterizira legirni element najvećeg udjela. Taj legirni element ima velik utjecaj na svojstva nastale legure. Prva znamenka u oznaci definira o kojem se legirnom elementu ili elementima radi [5].

U tablici 7 prikazan je sustav označivanja aluminijevih legura za gnječenje.

Tablica 7. Označivanje aluminijevih legura za gnječenje[5]

Oznaka serije	Glavni legirni element
1xxx	bez legirnih elemenata
2xxx	bakar (Cu)
3xxx	mangan (Mn)
4xxx	silicij (Si)
5xxx	magnezij (Mg)
6xxx	magnezij (Mg) i silicij (Si)
7xxx	cink (Zn)
8xxx	Drugi elementi

5.1.2.1. Legura aluminij-mangan

Ove legura s udjelom do najviše 1,5 % mangana, imaju umjerenu čvrstoću i dobru otpornost prema koroziji. U slučaju prisutnosti željeza kao nečistoće, topljivost mangana u aluminiju je vrlo niska. Brzina hlađenja nakon lijevanja dovoljno je velika da dio mangana ostane "zarobljen" u zasićenoj otopini. Daljnjom obradom u gnječenoj leguri izlučuje se spoj

sastava FeMnAl_6 koji poboljšava čvrstoću mangana zbog očvršćivanja stvaranjem dispergiranih čestica [17].

U slučaju prisutnosti bakra ili magnezija u mikrostrukturi, legure aluminij-mangan osjetljive su na vruće pukotine [17].

5.1.2.2. Legura aluminij-magnezij-silicij (antikorodal)

Ove legure su poznate pod nazivom "antikorodali". Mogu se toplinski obraditi precipitacijskim očvršćućem, a posebno visok omjer električne vodljivosti i čvrstoće imaju u precipitacijski očvršnutom i hladno deformiranom stanju. Zbog toga veliku primjenu nalaze u prijenosu električne energije [1].

Otporne su na koroziju i pogodne za zavarivanje, poliranje i anodizaciju. Umjetnim dozrijevanjem konvencionalna granica razvlačenja poprima vrijednost od oko 240 N/mm^2 , dok se prirodnim dozrijevanjem postiže nešto niža granica razvlačenja od oko 110 N/mm^2 . Vlačna čvrstoća ovih legura manja je od 330 N/mm^2 [1].

5.1.2.3. Legura aluminij-bakar-magnezij (dural)

Legure iz ove skupine poznate su još i pod nazivom "durali" i mogu postići vrijednost granice razvlačenja do 450 N/mm^2 , dok im konvencionalna granica razvlačenja seže do vrijednosti 290 N/mm^2 . Vrijednosti mehaničkih svojstava durala ponajprije ovise o vrsti i udjelu legiranih elemenata, a također i o mehaničkim i/ili toplinskim postupcima kojima se postiže određeno mikrostrukturno stanje. Kako bi se postigla optimalna mehanička otpornost, durale se mora obraditi rastvornim žarenjem i dozrijevanjem. Osnovni postupak za povećanje vrijednosti čvrstoće i tvrdoće ovih legura je precipitacijsko očvršćuće jer je očvršćuće postignuto precipitacijom veće od onoga dobivenog hladnim deformiranjem. Postoji mogućnost kombinacije ovih dvaju mehanizama, ako se legura dodatno hladno oblikuje prije ili nakon dozrijevanja. Moguće ih je očvršćiti držanjem na okolišnoj temperaturi (prirodno dozrijevanje) ili na nekoj povišenoj temperaturi (umjetno dozrijevanje) [1, 8].

Magnezij stvara intermetalne spojeve te time omogućava i ubrzava očvršćuće. Ove legure imaju umjerenu otpornost na koroziju zbog povećanog udjela bakra. Taj nedostatak

otklanja se postupkom koji se zove platiranje. Platiranje je postupak koji se u ovom slučaju izvodi tijekom proizvodnje limova ili profila nanošenjem čistog aluminijske ili legura otpornih na koroziju na valjane limove ili prešane profile [1, 8].

5.1.2.4. Legura aluminij-cink-magnezij

Ove legure nažalost ne dostižu potpunu vrijednost čvrstoće durala, ali su za razliku od njih otpornije na kemijske utjecaje. Predstavljaju dobar kompromis gledajući čvrstoću i korozijsku postojanost, a ujedno im je zavarljivost zadovoljavajuća [1].

5.1.2.5. Legura aluminij-cink-magnezij-bakar (konstruktal)

Drugi naziv za ove legure je "konstruktal". U ovim je legurama glavni legirni element cink s masenim udjelom do 8 % i dodatkom male količine magnezija koji pridonosi porastu čvrstoće. Od ostalih legirnih elemenata najčešće je prisutan bakar. Ovim se legurama dodaje krom koji pospješuje precipitacijsko očvršnuće [1, 8].

Ovo su legure sa najvišom čvrstoćom među svim aluminijevim legurama. U precipitacijski očvršnutom stanju, srednja vrijednost čvrstoće može dosegnuti i 550 N/. Visoku granicu razvlačenja, tvrdoću i čvrstoću postižu umjetnim dozrijevanjem nakon rastvornog žarenja. Ovisno o metalurškom stanju i kemijskom sastavu mogu dostići čvrstoću i do 676 N/mm² [1, 8].

Glavni nedostatak je njihova osjetljivost na napetosnu koroziju, no razvijen je niz termomehaničkih postupaka koji služe za njezino spriječavanje. Ove legure primjenjuju se u zrakoplovnoj industriji, pa se s ciljem pouzdane primjene nakon rastvornog žarenja mogu umjetno predozrijevati. Time se postiže bolja kombinacija korozijske otpornosti, čvrstoće i lomne žilavosti, a može im se poboljšati i otpornost ne samo napetosnoj, već i koroziji ljuštenjem. Osim predozrijevanja, smanjenje predispozicija za pojavu napetosne korozije se provodi i istezanjem materijala za kontroliranu veličinu deformacije što omogućuje redukciju zaostalih naprezanja [1, 8].

5.1.2.6. *Aluminijeve legure s litijem*

Krajem 70-ih godina prošlog stoljeća započeo je, a 90-ih godina se intenzivno nastavio razvoj aluminijevih legura s litijem. Najvažnije su Al-Cu-Mg-Li i Al-Li-Cu-Mg. Opće je poznato da je litij najlakši metal čija je gustoća 534 kg/m^3 , pa se s dodatkom od svega 2 do 3 % litija gustoća smanjuje za 8 do 10 % u odnosu na konvencionalne aluminijeve legure. Imaju 10 % viši modul elastičnosti koji osigurava krutost i mehaničko-proizvodna svojstva slična legurama iz skupine konstruktala i durala [1, 8].

Legure s litijem su toplinski očvrstljive. Maksimalna topljivost litija u kristalima mješancima je oko 6 % na temperaturi od oko $600 \text{ }^\circ\text{C}$. U primjeni su uglavnom legure s do 4 % litija u sastavu. U mikrostrukturi ovih legura, u postupku dozrijevanja izlučuju se vrlo fine čestice intermetalne faze Al_3Li . Ovi precipitati kočje gibanje dislokacija te time povećavaju granicu razvlačenja do 630 N/mm^2 [8].

Glavni nedostaci ovih legura su neotpornost napetosnoj koroziji i smanjena žilavost. Na smanjenje žilavosti djeluje dugotrajna eksploatacija (višegodišnja) ili kratkotrajna izloženost povišenoj temperaturi između 120 i $150 \text{ }^\circ\text{C}$. Porast krhkosti tumači se gomilanjem dislokacija na Al_3Li česticama što rezultira stvaranjem inicijalnih pukotina. Osim toga, nepovoljno je i prisustvo vodika zbog njegovog difundiranja na granice zrna i ulaska u tekući eutektikum. Iz tih su razloga razvijene metode rafinacije kojima se djelomično poboljšava žilavost [8].

Zbog reaktivnosti litija, javljaju se određeni problemi i kod lijevanja ovih legura. Cilj je smanjenje anizotropije, poboljšanje zavarljivosti i duktilnosti i povećanje žilavosti, jer su ove legure prvenstveno namijenje primjeni u zrakoplovnoj industriji [1].

5.2. Podjela prema kemijskom sastavu

Najvažniji legirni elementi su bakar (Cu), silicij (Si), magnezij (Mg), mangan (Mn) i cink (Zn). U manjoj količini kao dodaci ili primjese (nečistoće) prisutni su i željezo (Fe), titanij (Ti) te krom (Cr). Njihovom međusobnom kombinacijom, i uz dodatak drugih legirnih elemenata koji poboljšavaju svojstva osnovne legure, nastaju kompleksnije legure. Takve legure pospješuju usitnjenje zrna, poboljšavaju rastezljivost i omogućuju toplinsko očvrnuće. U dodatne legirne elemente ubrajamo kobalt (Co), srebro (Ag), kositar (Sn), bizmut (Bi), nikal (Ni), vanadij (V), kadmij (Cd), olovo (Pb), litij (Li) i cirkonij (Zr). U vrlo malim količinama dodaju se natrij (Na), bor (B), berilij (Be) i stroncij (Sr) [1, 5, 8].

Svi nabrojani legirni elementi, pri dovoljno visokim temperaturama potpuno su topljivi u rastaljenom aluminiju. Topljivost elemenata ograničena je u kristalima mješancima pri čemu neotopljeni elementi stvaraju vlastite faze ili intermetalne spojeve. Topljivost legirnih elemenata u aluminiju, kao i njihov udio te veličina, oblik i raspodjela intermetalnih spojeva određuje fizikalna, proizvodna i kemijska svojstva legura [1, 8].

Mehanička svojstva, korozijska postojanost i deformabilnost zajednički su svim legurama, no kombinacije navedenih svojstava značajno se razlikuju od jedne do druge serije legura, a ovise o načinu proizvodnje i sadržaju legirnih elemenata.

Utjecaj pojedinih legirnih elemenata na svojstva pojedinih aluminijevih legura je slijedeći [1, 17]:

- 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 očvrstnuće
- 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 očvrstnuće
- Skandij (Sc) – koristi se za smanjenje veličine zrna, povećava čvrstoću dozrijevanjem
- Olovo (Pb) i bizmu (Bi) – poboljšavaju obradu odvajanjem čestica

5.3. Podjela prema mogućnosti toplinske obrade

Aluminijeve legure se ovisno o načinu toplinske obrade dijele na toplinski obradive i toplinski neobradive. Osnovne toplinski obradive kao i neobradive legure aluminija s pripadajućim mehaničkim svojstvima prikazane su u tablici 8 i 9 [1].

Tablica 8. Podjela i mehanička svojstva toplinski neobradivih aluminijevih legura [17]

Serijski broj EN 573	Tip	Oznaka	$R_e, \text{N/mm}^2$	$R_m, \text{N/mm}^2$
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

Kod legura koje se ne mogu očvrnuti toplinskom obradom, željena mehanička svojstva postižu se legiranjem magnezijem, manganom, silicijem ili željezom [17].

Tablica 9. Podjela i mehanička svojstva toplinski obradivih aluminijevih legura [17]

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

Toplinski obradive aluminijeve legure s osnovnim legirnim elementima bakrom, magnezijem, cinkom i silicijem čine osnovu precipitacijskog očvršćivanja. Žarenjem na temperaturama između 450 i 550 °C, brzim hlađenjem te prirodnim (na sobnoj temperaturi) ili umjetnim (na povišenim temperaturama) dozrijevanjem postiže se očvršćivanje. Ovim oblikom očvršćivanja postižu se bolje vrijednosti mehaničkih svojstava nego plastičnom deformacijom, pa je zbog toga precipitacijsko očvršćivanje osnovni postupak za povećanje čvrstoće i tvrdoće aluminijevih legura za gnječenje [18].

6. ZAKLJUČAK

Nakon što je otkriven relativno jeftin postupak proizvodnje aluminija iz glinice, započela je industrijska proizvodnja i primjena aluminija.

U odnosu na ostale metale, aluminij nudi širok spektar prednosti zbog svoje niske gustoće, korozijske postojanosti, visoke električne i toplinske vodljivosti, niskog modula elastičnosti i lijepog izgleda površine. Njegov glavni nedostatak je relativno niska čvrstoća zbog čega se za inženjersku primjenu uglavnom ne koristi u čistom obliku.

Općenito je nisku čvrstoću aluminija moguće poboljšati legiranjem. Danas postoji više od 500 različitih aluminijevih legura sa desetak glavnih legirnih elemenata u različitim kombinacijama. Puno aluminijevih legura ima sličan sastav. Sve aluminijeve legure dijele se na toplinski očvrstive i toplinski neočvrstive. Kod legura koje nije moguće očvrstnuti toplinskom obradom, željena mehanička svojstva moguće je dobiti legiranjem manganom, magnezijem, željezom ili silicijem.

Vrlo značajan mehanizam očvrstnuća za aluminij i njegove legure je očvrstnuće na hladnu deformaciju. Prema načinu proizvodnje aluminijeve legure se dijele na lijevane i gnječene. Aluminijeve legure za gnječenje su zbog svoje plošno centrirane kubične (FCC) kristalne strukture sklone očvršćivanju plastičnim oblikovanjem u hladnom stanju.

Toplinski očvrstive aluminijeve legure s osnovnim legirnim elementima bakrom, magnezijem, cinkom i slijem čine osnovu precipitacijskog očvršćivanja. Očvrstnuće mehanizmom precipitacije ostvaruje se kroz postupak rastvornog žarenja i dozrijevanja. Ovim mehanizmom očvrstnuća postižu se bolje vrijednosti mehaničkih svojstava nego hladnom deformacijom.

Navedeni mehanizmi očvrstnuća nerijetko se koriste u raznim kombinacijama kako bi se postigla čim viša vrijednost čvrstoće. Legure očvrstnute kristalima mješancima često se dodatno očvršćavaju hladnom deformacijom, dok se mehanizam precipitacijskog očvrstnuća ponekad koristi u kombinaciji sa hladnim oblikovanjem prije dozrijevanja.

Iako je visoka cijena proizvodnje aluminija i aluminijevih legura osnovna zapreka njihove još šire primjene, upotreba aluminijevih legura nedvojbeno je opravdana.

LITERATURA

- [1] Filetin T., Kovačićek F., Indof J.: Svojstva i primjena materijala, Fakultet strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, 2002.
- [2] https://www.sfsb.hr/kth/zavar/tii/al_lg.pdf, [preuzeto 5.9.2020.]
- [3] <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=2863> [preuzeto 5.9.2020.]
- [4] <http://www.pse.pbf.hr/hrvatski/elementi/al/spojevi.html> [preuzeto 6.9.2020.]
- [5] <https://www.imetllc.com/training-article/mechanisms-strengthening-aluminum/> [preuzeto 6.9.2020.]
- [6] Callister W. D., Jr., Rethwisch D. G.: Fundamentals of Materials Science and Engineering: An Integrated Approach, 3e, Third edition, John Wiley & sons, inc., United States, 2007
- [7] <https://www.hydro.com/en/about-aluminium/how-its-made/> [preuzeto 6.9.2020.]
- [8] Ćorić D., Filetin T.: Materijali u zrakoplovstvu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Ivana Lučića 5, Zagreb, 2012
- [9] <http://casopis-gradjevinar.hr/archive/article/1395> [preuzeto 8.9.2020.]
- [10] Franz M.: Mehanička svojstva materijala, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Ivana Lučića 5, Zagreb, 1998.
- [11] Rede V., Autorizirana predavanja iz kolegija Posebni metalni materijali, vježba br. 4: Mehanizmi očvrnuća kod čelika istaknute čvrstoće, Fakultet strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu, 2019.
- [12] Pulić M., "Utjecaj toplinske obrade na mikrostrukturu i mehanička svojstva aluminijske legure", Diplomski rad, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2017.
- [13] Rede V., Autorizirana predavanja iz kolegija Izbor materijala, Označivanje Al i Al-legura, Fakultet strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu, 2018.
- [14] <https://www.southampton.ac.uk/~pasr1/al-si.htm> [preuzeto 8.9.2020.]
- [15] Davis J. R., ASM International Handbook Committee: Aluminum and aluminum alloys, ASM International, 2007.
- [16] Kaufman, J.G.: Aluminum Alloy Castings: Properties, Processes and Applications, ASM International, 2004.
- [17] Gojić M.: Tehnike spajanja i razdvajanja materijala, Metalurški fakultet, Sisak 2003.

-
- [18] Sinanović A., " Primjena keramičkih podloga kod MIG zavarivanja aluminija",
Diplomski rad, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2016.