

Precipitacijsko očvršćivanje toplinski obradive aluminijeve legure

Marko, Pulić

Undergraduate thesis / Završni rad

2015

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:235:060051>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-30**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Marko Pulić

Zagreb, 2015.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Danko Čorić

Student:

Marko Pulić

Zagreb, 2015.

IZJAVA

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu. Zahvaljujem se mentoru prof. dr. sc. Danku Ćoriću na savjetima, uputstvima i komentarima pri izradi ovog rada. Zahvaljujem se i djelatnicima Laboratorija za toplinsku obradu, Laboratorija za analizu metala i Laboratorija za mehanička ispitivanja Fakulteta strojarstva i brodogradnje bez kojih ne bi bilo moguće provesti eksperimentalna ispitivanja.

Marko Pulić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomске 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
Klase:	
Ur. broj:	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **MARKO PULIĆ** Mat. Br.: 0035181189

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **PRECIPITACIJSKO OČVRŠĆIVANJE TOPLINSKI OBRADIVE ALUMINJEVE LEGURE**

Naslov rada na engleskom jeziku: **PRECIPITATION HARDENING OF THE HEAT TREATABLE ALUMINIUM ALLOY**

Opis zadatka:

Aluminijeve legure su važan konstrukcijski materijal u zrakoplovnoj industriji. To je materijal koji tradicionalno prevladava u konstrukcijama putničkih zrakoplova. Svojstva aluminijevih materijala kontinuirano se poboljšavaju kroz postupke legiranja i termomehaničke obrade kako bi ove legure mogle podnijeti sve složenije eksploatacijske zahtjeve. Jedan od poznatih mehanizama je toplinsko očvršćivanje koje se provodi putem rastopnog žarenja i dozrijevanja.

U radu je potrebno načiniti sljedeće:

1. navesti najvažnija svojstva aluminijevih legura s obzirom na zahtjeve u zrakoplovstvu;
2. opisati osnovne skupine aluminijevih legura namijenjenih zrakoplovnim primjenama;
3. opisati mehanizme očvršćuća metalnih materijala s posebnim osvrtom na mehanizam precipitacijskog očvršćuća;
4. navesti primjere primjene aluminijevih legura u zrakoplovstvu;
5. provesti toplinsko očvršćivanje raspoloživih uzoraka aluminijeve legure;
6. ispitati mehanička svojstva toplinski obrađenih uzoraka;
7. analizirati dobivene rezultate i donijeti odgovarajuće zaključke.

Zadatak zadan:
25. studenog 2014.

Rok predaje rada:
1. rok: 26. veljače 2015.
2. rok: 17. rujna 2015.

Predviđeni datumi obrane:
1. rok: 2., 3., i 4. ožujka 2015.
2. rok: 21., 22., i 23. rujna 2015.

Zadatak zdao:

Prof. dr. sc. Danko Čorić

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Zoran Kunica

SADRŽAJ

SAŽETAK.....	1
1. UVOD	2
1.1. Svojstva materijala	4
2. OPĆENITO O ALUMINIJU.....	8
2.1. Dobivanje aluminija	8
2.2. Primjena aluminija	9
2.3. Tehnički aluminij	10
3. ALUMINIJEVE LEGURE.....	12
3.1. Svojstva aluminijevih legura	12
3.2. Podjela aluminijevih legura.....	13
4. ALUMINIJEVE LEGURE U ZRAKOPLOVSTVU	17
4.1. Durali- legure serije 2XXX	17
4.2. Konstruktalni- legure serije 7XXX	17
4.3. Pantali- legure serije 6XXX	19
4.4. Alclad	19
5. MEHANIZMI OČVRSNUĆA METALNIH MATERIJALA	20
5.1. Očvrsnuće hladnom deformacijom.....	20
5.2. Očvrsnuće kristalima mješancima (očvrsnuće legiranjem)	20
5.3. Očvrsnuće martenzitnom transformacijom	21
5.4. Očvrsnuće granicama zrna (usitnjenjem zrna)	21
5.5. Očvrsnuće precipitacijom.....	21
5.5.1. Precipitacijsko očvrsnuće aluminijevih legura	22
6. PRIMJENA ALUMINIJEVIH LEGURA U ZRAKOPLOVSTVU	27
7. EKSPERIMENTALNI DIO.....	32
7.1. Plan eksperimenta.....	32
7.2. Priprema uzoraka.....	32
7.3. Analiza kemijskog sastava	33
7.4. Toplinska obrada	35
7.4.1. Rastopno žarenje	35
7.4.2. Dozrijevanje	37
7.5. Mjerenje tvrdoće.....	38
8. ZAKLJUČAK	47
LITERATURA.....	48
PRILOG	49

POPIS SLIKA

Slika 1. Zrakoplov Junkers J 4	2
Slika 2. Zrakoplov Junkers Ju 52	3
Slika 3. Zrakoplov Airbus Beluga.....	3
Slika 4. Boksit	8
Slika 5. Plošno centrirana kubična kristalna struktura (FCC) aluminija.....	10
Slika 6. Aluminijski profili	10
Slika 7. Aluminijska folija	10
Slika 8. Zračni brod ZMC-2	19
Slika 9. Mehanizam precipitacijskog očvršnuća	22
Slika 10. Prikaz općeg postupka precipitacijskog očvršćivanja.....	23
Slika 11. Tipovi precipitata	26
Slika 12. Primjena Al-legura na malom mlažnjaku	30
Slika 13. Primjena Al-legura na velikom putničkom zrakoplovu	30
Slika 14. Primjena Al-legura kod zrakoplova za regionalne letove	31
Slika 15. Izrezani i označeni uzorci	32
Slika 16. Unutrašnjost instrumenta GDS 850A	33
Slika 17. Uzorak "A" nakon analize kemijskog sastava	34
Slika 18. Ternarni dijagram stanja Al-Mg-Si – projekcija topljivosti.....	35
Slika 19. Ternarni dijagram stanja Al-Mg-Si – projekcija solidusa.....	35
Slika 20. Komorna elektro peč	36
Slika 21. Dijagram zagrijavanja peći	36
Slika 22. Prikaz mjerenja Vickersove tvrdoće	39
Slika 23. Referentni tvrdomjer „Indetec“	39
Slika 24. Prikaz tvrdoće uzoraka dozrijevanih 1, 4 i 10 h na 130 °C.....	42
Slika 25. Prikaz tvrdoće uzoraka dozrijevanih 1, 4 i 10 h na 160 °C.....	42
Slika 26. Prikaz tvrdoće uzoraka dozrijevanih 1, 4 i 10 h na 190 °C.....	43
Slika 27. Ovisnost tvrdoće o vremenu dozrijevanja za temperaturu 130 °C	44
Slika 28. Ovisnost tvrdoće o vremenu dozrijevanja za temperaturu 160 °C	44
Slika 29. Ovisnost tvrdoće o vremenu dozrijevanja za temperaturu 190 °C	45
Slika 30. Ovisnost tvrdoće o temperaturi i vremenu dozrijevanja	46

POPIS TABLICA

Tablica 1. Prikaz zastupljenosti pojedinih oštećenja u zrakoplovstvu	6
Tablica 2. Osnovna fizikalna svojstva čistog aluminijskog 9	9
Tablica 3. Označivanje aluminijskih legura za gnječenje	14
Tablica 4. Kemijski sastav ispitivane aluminijske legure	34
Tablica 5. Temperaturno-vremenski režimi dozrijevanja uzoraka.....	38
Tablica 6. Karakteristike tvrdomjera „Indentec“	40
Tablica 7. Rezultati mjerenja tvrdoće	41

POPIS OZNAKA

Simbol	Jedinica	Značenje
ε	%	Deformacija
ϑ	°C	Celzijusova temperatura
t	s, h	Vrijeme
d	mm	Izmjerena duljina dijagonale otiska
d_{sr}	mm	Aritmetička srednja vrijednost izmjerenih duljina dvije dijagonale otiska
\bar{d}	mm	Aritmetička srednja vrijednost izmjerenih duljina dijagonala pet otisaka
F	N	Ispitna sila
HV	-	Tvrdoća
\overline{HV}	-	Aritmetička srednja vrijednost izmjerenih tvrdoća

SAŽETAK

U teoretskom dijelu ovog rada opisana su fizikalna svojstva aluminija, navedene su osnovne skupine i svojstva aluminijevih legura korištenih u zrakoplovstvu, opisani su mehanizmi očvršnuća metalnih materijala i navedeni su primjeri primjene u zrakoplovstvu.

U eksperimentalnom dijelu provedeno je toplinsko očvršćivanje aluminijeve legure koje se sastoji od rastopnog žarenja i dozrijevanja u različitim temperaturno-vremenskim režimima s ciljem povećanja tvrdoće i određivanja optimalnih parametara postupka dozrijevanja.

Ključne riječi: precipitacijsko očvršćivanje, aluminijska legura, dozrijevanje, tvrdoća

1. UVOD

U današnje doba gotovo je nemoguće zamisliti zrakoplov koji u svojoj konstrukciji nema aluminijske legure. U počecima zrakoplovstva glavni materijali korišteni za izradu zrakoplova bili su drvo koje se koristilo za konstrukciju, dok su se za oplatu trupa i krila upotrebljavala platna impregnirana smolom.

Aluminij je postepeno zamijenio drvo, platno, čelik i ostale materijale u ranim 1900.-im, te su prvi zrakoplovi od aluminija konstruirani u ranim dvadesetim godinama prošlog stoljeća. Na slici 1. prikazan je zrakoplov Junkers J4 proizveden 1917. godine, prvi zrakoplov izrađen od duraluminija i među prvima načinjenim u potpunosti od metala.



Slika 1. Zrakoplov Junkers J 4

Zbog svojih osobitih svojstava, upravo su Al- legure najčešći odgovor kada se izabire materijal koji najbolje ispunjava zahtjeve na zrakoplovne materijale. Zahvaljujući napretku znanosti i brojnim inovacijama u području inženjerstva materijala razvijene su brojne Al-legure koje se danas upotrebljavaju za izradu raznih dijelova kod zrakoplova. Kod primjene Al-legura, za zrakoplovstvo su najzanimljivije legure iz skupine durala i konstruktala koje se koriste za izradu raznih panela i oplata trupa i krila zrakoplova.

Iako se danas u izradi suvremenih zrakoplova sve češće koriste kompozitni materijali, osobito oni polimerne matrice, aluminijske legure su i dalje neizostavan materijal za izradu trupa, krila te potporne konstrukcije većine komercijalnih zrakoplova.

Na slici 2. prikazan je zrakoplov Junkers Ju 52, proizveden 1930. godine. Zrakoplov je prepoznatljiv po svojoj naboranoj metalnoj oplati kojom se postiglo ojačanje cijele konstrukcije.



Slika 2. Zrakoplov Junkers Ju 52

Čvrste aluminijske legure izložene su velikom rasponu tlakova i opterećenja koja su sastavni dio leta zbog učestalih promjena visina; obloge od tankih ploča aluminijske drže hladnoću vani, a toplinu unutra. Kod većine današnjih putničkih i transportnih zrakoplova većina interijera se sastoji od aluminijske ili aluminijskih kompozita kako bi se smanjila težina, uz to uštedilo gorivo, smanjila emisija štetnih plinova i povećala korisna nosivost. Na slici 3. prikazan je zrakoplov Airbus A300-600ST (Super Transporter-Beluga) koji je inačica standardnog modela A300-600 prerađena za prijevoz nestandardnog tereta (npr. zrakoplovni dijelovi).



Slika 3. Zrakoplov Airbus Beluga

Funkcionalni i eksploatacijski zahtjevi na zrakoplovne materijale jesu sljedeći:

1. mala masa;
2. visoka mehanička otpornost u uvjetima statičkog opterećenja;
3. zadovoljavajuća krutost;
4. otpornost na umor;
5. otpornost na naglo širenje pukotina;
6. korozijska postojanost;
7. mehanička otpornost pri visokim temperaturama (otpornost na puzanje);
8. otpornost na gorenje;
9. apsorpcija buke i vibracija.

Osim ovih osnovnih zahtjeva definiranih određenim svojstvima materijala, u obzir se moraju uzeti i sljedeći izvedeni kriteriji koji uključuju više svojstava:

1. specifična čvrstoća – omjer vlačne čvrstoće (granice razvlačenja) i gustoće;
2. specifična krutost – omjer modula elastičnosti i gustoće;
3. sigurnost – umnožak granice razvlačenja i lomne žilavosti.

1.1. Svojstva materijala

Kod konstruiranja i održavanja zrakoplova najvažnije je uzeti u obzir opća svojstva metala kao što su: tvrdoća, čvrstoća, modul elastičnosti, granica razvlačenja, lomna žilavost, duktilnost, gustoća, elastičnost, dinamička izdržljivost, otpornost na koroziju, otpornost na puzanje, taljivost, provodljivost itd.

Tvrdoća

Tvrdoća se karakterizira kao otpornost materijala prema prodiranju nekog drugog znatno tvrdog tijela ili otpornost prema plastičnoj deformaciji. Može se povećati hladnom deformacijom ili toplinskim postupcima očvršćivanja kao kod čelika i aluminija. Konstrukcijski dijelovi često se oblikuju iz metala u relativno „mekom“ stanju, zatim se raznim postupcima toplinske obrade očvršćuju kako bi bili pogodni za eksploataciju.

Čvrstoća

Jedno od najvažnijih svojstava materijala je čvrstoća. To je sposobnost materijala da se opire deformaciji i da podnese naprezanja bez loma.

Modul elastičnosti

Materijal mora biti ne samo čvrst već i krut kako bi se izbjeglo izvijanje dijelova zrakoplovnih konstrukcija. Krutost materijala određuje Youngov modul elastičnosti. Veličina

ove elastične konstante izravno ovisi o čvrstoći veze između strukturnih jedinica u kristalnoj ili amorfnoj strukturi. Ako je veza čvrsta onda je i vrijednost modula visoka i materijal se ponaša kruto.

Granica razvlačenja

Granica razvlačenja je ono naprezanje prema kojem se uz odabrani stupanj sigurnosti utvrđuje dopušteno naprezanje u radu strojnog dijela ili elementa konstrukcije. Uz čvrstoću, granica razvlačenja je svojstvo materijala koje određuje mehaničku otpornost u uvjetima djelovanja konstantnog opterećenja (pri povišenim temperaturama to je konvencionalna granica razvlačenja). Materijal za konstrukciju zrakoplova mora imati odgovarajuću mehaničku otpornost kako bi izdržao opterećenja koja se javljaju tijekom eksploatacije. Naprezanje ne smije prijeći vrijednost granice razvlačenja zbog pojave plastične (trajne) deformacije koja na kraju može rezultirati lomom materijala.

Lomna žilavost

Materijal mora biti otporan prema pojavi i naglom širenju pukotina kako bi se izbjegle havarije i lomovi. Pukotine i pogreške u mikrostrukturi predstavljaju mjesta koncentracije naprezanja i na tim lokalitetima javlja se inicijalna pukotina koja se vremenom može širiti. Posebno su opasne pukotine koje se šire nestabilno (velikom brzinom) jer se lom teško može predvidjeti. Stoga je potrebno poznavati veličinu naprezanja oko vrha pukotine ili neke mikrostrukturne pogreške. Polje (raspored) naprezanja oko pukotine opisuje veličina koja se naziva faktor intenzivnosti naprezanja (K). Predstavlja mjerilo intenzivnosti porasta naprezanja u blizini vrha pukotine. Krična veličina faktora intenzivnosti naprezanja pri kojem pukotina nastala jednostavnim otvaranjem započinje nestabilno širenje u uvjetima ravninskog stanja deformacije naziva se lomna žilavost (K_{IC}). Na temelju lomne žilavosti proračunavaju se elementi zrakoplovnih konstrukcija osjetljivi na pukotinsko (zarežno) djelovanje.

Duktilnost

Duktilnost je svojstvo materijala da podnese plastičnu deformaciju bez loma. Materijal je duktilniji čim se više može trajno razvući, saviti ili uviti bez pojave pucanja. U zrakoplovnoj industriji preferiraju se duktilni metali zbog lakoće kojom se oblikuju i opiru lomu pod djelovanjem udarnog opterećenja. S tim razlogom, aluminijske legure koriste se za izradu nosača poklopaca ili oplata motora prstenastog oblika, oplatu krila i trupa, te za ekstrudirane ili prešane dijelove kao što su: rebra, ramenjače i pregrade.

Gustoća

Gustoća je omjer mase i volumena neke tvari ili tijela. To je važno svojstvo pri izboru materijala za dijelove zrakoplovne konstrukcije.

Elastičnost

Elastičnost je svojstvo materijala da se nakon utjecaja opterećenja vrati u prvobitni oblik bez pojave trajne tj. plastične deformacije. Svaki materijal ima točku koja se naziva granica elastičnosti, preko koje ne može biti opterećen bez pojave trajne ili plastične deformacije. Pri konstruiranju zrakoplova dijelovi se tako dimenzioniraju da maksimalno opterećenje ne prelazi iznos granice elastičnosti koja se približno podudara s granicom razvlačenja.

Dinamička izdržljivost

Dinamička izdržljivost je ono najveće dinamičko naprezanje koje materijal izdrži bez pojave loma, uz teorijski beskonačan broj promjena opterećenja (ciklusa), a realno uz neki granični broj ciklusa. Dijelovi zrakoplova često su napregnuti promjenjivim (dinamičkim) naprežanjem koje se mijenja tijekom vremena. Bez obzira što je iznos dinamičkog naprežanja niži od granice razvlačenja, nakon nekog vremena može doći do loma. Posljedica dinamičkog opterećenja je pojava umora materijala, odnosno postupnog razaranja materijala uslijed dugotrajnog djelovanja promjenjivog naprežanja što rezultira prijelomom dijela.

Iz tablice 1. je vidljivo da je najveći broj oštećenja zrakoplovnih elemenata uzrokovan upravo pojavom loma zbog umora materijala.

Tablica 1. Prikaz zastupljenosti pojedinih oštećenja u zrakoplovstvu

Vrsta oštećenja	Zastupljenost %
Opća korozija	3
Lom od umora	61
Preopterećenje	18
Visokotemperaturna korozija	2
Napetosna korozija	9
Trošenje abrazijom i adhezijom	7

Otpornost na koroziju

U zrakoplovstvu su posebno opasne napetosna korozija i korozija ljuštenjem. Napetosna korozija se javlja uslijed istovremenog djelovanja agresivnog medija i vlačnog naprežanja. Da bi se smanjile predispozicije za pojavu ove vrste korozije potrebno je provesti žarenje za redukciju zaostalih naprežanja. Korozija ljuštenjem javlja se kada se na površini materijala stvaraju različiti produkti kemijskih reakcija u interakciji s okolišem (najčešće oksidi) te ovaj sloj nakon

nekog vremena otpada i na sloju ispod ponovo se obnavljaju kemijski produkti koji također vremenom otpadaju. Ovo višestruko raslojavanje očituje se ljuštenjem materijala.

Otpornost na puzanje

Puzanje je toplinski aktiviran proces ireverzibilne deformacije materijala koji nastaje u uvjetima dugotrajnog djelovanja konstantnog opterećenja pri nekoj povišenoj temperaturi. Otpornost puzanju definiraju svojstva granica puzanja i statička izdržljivost. Granica puzanja je ono vlačno naprezanje koje pri nekoj povišenoj temperaturi nakon određenog trajanja ispitivanja ostavlja u materijalu određenu trajnu deformaciju ϵ . Statička izdržljivost je vlačno naprezanje koje pri nekoj povišenoj temperaturi nakon određenog trajanja ispitivanja uzrokuje lom epruvete. Otpornost puzanju općenito određuje temperatura tališta i mikrostrukturno stanje materijala kao i tip kristalne rešetke. Aluminijski materijali koji se tale pri relativno niskoj temperaturi (660 °C) ograničeno su primjenjivi pri povišenim temperaturama te se rabe do maksimalno 150 do 200 °C.

Taljivost

Svojstvo koje omogućuje metalu da se rastali uz dovođenje topline. Taljivost predstavlja važnu značajku prilikom oblikovanja materijala lijevanjem. Temperatura tališta ovisi o vrsti materijala tako da za čelik iznosi 1538 °C, dok je za aluminij znatno niža (660 °C).

Provodljivost

Svojstvo materijala koje označava mogućnost provođenja topline ili električne struje. Toplinska vodljivost je posebno važno svojstvo materijala pri zavarivanju. U zrakoplovstvu je važna i električna vodljivost kako bi se eliminirale radio smetnje.

2. OPĆENITO O ALUMINIJU

2.1. Dobivanje aluminija

Aluminij je metal koji je poslije kisika najrasprostranjeniji element u zemljinoj kori, gdje ga ima 8%. U prirodi se nalazi u obliku oksida i smjese oksida iz kojih se metal izdvaja skupim elektrolitičkim postupkom. Općenito se metal ekstrahira iz oksidne rude (boksita) zagrijavanjem s jeftinim redukcijskim sredstvom (ugljik u obliku koksa), a dobiveni sirovi metal se rafinira, čime se omogućuje oksidacija većine prisutnih nečistoća.

Boksit je heterogena ruda koja se uglavnom sastoji od jednog ili više aluminijevih hidroksida, a također može sadržavati i silicij dioksid te željezni oksid. Na slici 4. prikazana je polazna ruda za dobivanje aluminija.



Slika 4. Boksit

Pročišćavanjem boksita nastaje aluminijev oksid (glinica), iz kojeg se kasnije redukcijom dobiva aluminij.

Prvi aluminij proizveden je uporabom skupog redukcijskog sredstva u obliku metalnog kalija. Uspjelo je to danskom kemičaru H.C. Ørstedu 1825. godine. U osamdesetim godinama 19. stoljeća aluminij je još držan rijetkim i dragocjenim metalom, sve dok 1886. godine C.M. Hall i P. Héroult nisu otkrili relativno jeftin postupak proizvodnje aluminija. Osnovni problem visokog tališta glinice Al_2O_3 je riješen je dodatkom kriolita Na_3AlF_6 . Smjesa glinice i kriolita tali se na oko $950\text{ }^\circ\text{C}$ iz koje se aluminij dobiva elektrolitičkom redukcijom na katodnom dnu ili katodi. Jakost električne struje pri procesu elektrolize iznosi 150.000A a napon je oko 5V . Katode se najčešće izrađuju od ugljena te polako izgaraju i reagiraju s kisikom i fluorom iz elektrolita (najčešće rastaljeni kriolit). Aluminij se izlučuje na katodi i pada na dno kupke, a na anodi se oslobađa ugljični dioksid. Sam kriolit ne sudjeluje u elektrolitičkom procesu nego pliva

na površini i štiti aluminij od oksidacije. Tako nastaju određene količine plinova CO i CO₂ te plinoviti spojevi s fluorom koji pridonose efektu staklenika.

Dobiveni aluminij drži se na visokim temperaturama nekoliko sati kako bi iz njega iščezli elementi poput silicija, bakra, titana i cinka. Najveću čistoću moguće je dobiti električnom rafinacijom (99,999%).

Sljedeći korak u razvoju bilo je otkriće postupka za povećanje čvrstoće aluminijevih legura precipitacijskim očvršćivanjem. Time su stvoreni preduvjeti za korištenje posebnih kemijskih i fizikalnih svojstava aluminija.

2.2. Primjena aluminija

Zbog male mase i gustoće (gustoća aluminija je oko tri puta niža od gustoće čelika), prirodne otpornosti na koroziju i povoljnih fizikalnih svojstava za oblikovanje, aluminij ima vrlo široku primjenu u avioindustriji, brodogradnji, svemirskoj industriji, automobilskoj industriji, građevinarstvu itd.

Primjenu aluminija kao inženjerskog materijala određuju tri glavna svojstva:

- povoljan omjer čvrstoće i gustoće (tzv. specifična čvrstoća), posebno pri uporabi nekih od toplinski očvrstljivih legura. Relativno visoka čvrstoća u odnosu na masu vrlo je poželjna u proizvodnji vozila i zrakoplova.
- najpovoljniji omjer električne vodljivosti i gustoće među svim metalima
- velik afinitet prema kisiku te relativno visoka korozijska otpornost (primjena u graditeljstvu).

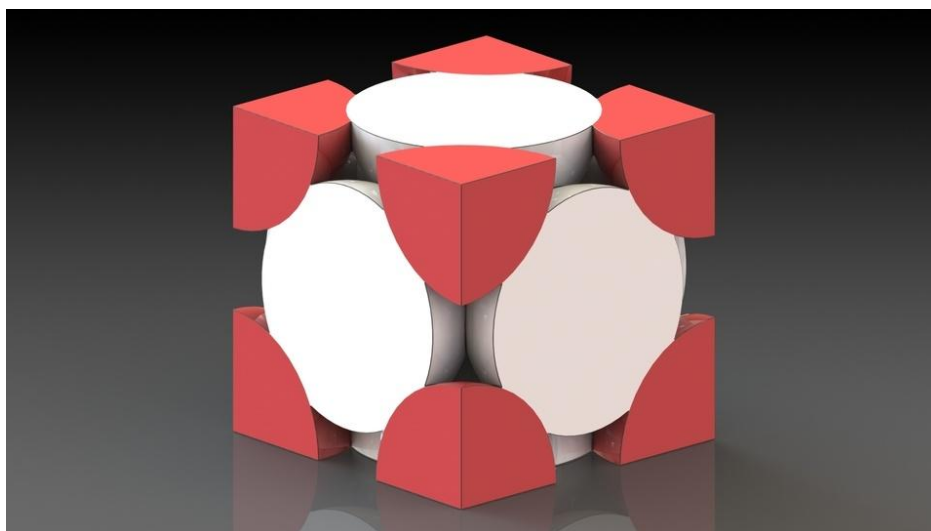
Primarni aluminij upotrebljava se samo u gnječenom stanju. Ovisno o čistoći i stupnju ugnječenosti u toku hladne obrade deformiranjem, mehanička svojstva kreću se u granicama navedenim u tablici 2.

Tablica 2. Osnovna fizikalna svojstva čistog aluminija

Temperatura tališta, °C	660
Gustoća pri 20°C, kg/m ³	2700
Koeficijent linearnog istezanja, (0-100°C), °C ⁻¹	23,5 · 10 ⁻⁶
Specifični toplinski kapacitet, (0-100°C), J kg ⁻¹ °C ⁻¹	920
Koeficijent toplinske provodljivosti, (0-100°C), Wm ⁻¹ K ⁻¹	240
Specifični električni otpor, (20°C), Ωmm ² m ⁻¹	0,03
Modul elastičnosti, (20°C), N/mm ²	71900

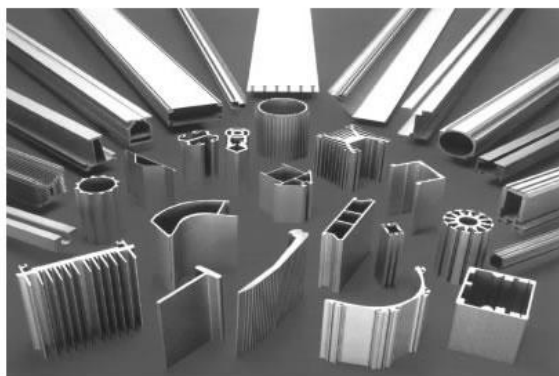
2.3. Tehnički aluminij

Aluminij je metal izvanredno toplo i hladno oblikovljiv deformiranjem zbog svoje plošno centrirane kubične strukture (FCC), slika 5.



Slika 5. Plošno centrirana kubična kristalna struktura (FCC) aluminija

Postupcima prešanja mogu se proizvoditi profili vrlo složenih oblika za raznovrsne namjene (slika 6.). Valjanjem se mogu proizvesti folije od samo nekoliko μm debljine koje se upotrebljavaju za pakiranje niza industrijskih i prehrambenih proizvoda (slika 7.). Za te namjene mogu se koristiti samo kvalitetnije vrste aluminija bez nemetalnih uključaka i intermetalnih spojeva željeza i silicija koji u postupku valjanja uzrokuju nastanak pora i malih rupica u foliji. Aluminij se daje vrlo dobro polirati do visokog sjaja, što opet ovisi o uključcima koji su i u ovom slučaju nepoželjni. Za visokovrijedne površine poput zrcala reflektora kao i za sve druge dijelove kod kojih je sjaj u dekorativne svrhe najvažniji, mora se upotrijebiti najčistiji aluminij.



Slika 6. Aluminijски profili



Slika 7. Aluminijска folija

Nelegirani aluminij se koristi uglavnom zbog niske gustoće i ponajprije njegove korozijske postojanosti kao i lijepog izgleda. Prema elektrokemijskom potencijalu aluminij nije plemenit metal. Njegova se antikorozivnost temelji na postojanju gustog nepropusnog oksidnog sloja koji se stvara na površini metala na zraku i vodenim otopinama. Ukoliko se oksidni sloj ošteti, odmah se oksidacijom nadomješta novim. Što je jače oksidiran, to je nastali sloj otporniji, tako da je aluminij otporan i na koncentriranu dušičnu kiselinu.

Aluminij je neotporan na tvari koje razaraju zaštitni oksidni sloj. To su u prvom redu lužine koje ga otapaju u koncentriranom stanju. Za aluminij su štetni i mort i građevno vapno. U graditeljstvu se iz tih razloga mora aluminijske dijelove i profile odgovarajuće zaštititi plastičnim folijama ili nekim drugim prikladnim mjerama zaštite.

Prirodni oksidni sloj debeo je tek oko 0,01 μm i pun sitnih pora. Mjestimične razlike u kemijskom sastavu aluminijske površine uslijed prisutnosti nečistoća ili precipitata, posebno bakra i željeza, mogu prouzročiti točkastu koroziju (pitting). Ova vrsta korozije može se spriječiti ograničavanjem udjela štetnih primjesa i umjetnim stvaranjem neporoznog zaštitnog sloja.

Zbog teškoća rafinacije sirovog aluminijskog materijala, trgovačke kvalitete sadrže najčešće 99,0% metala. Specijalnim postupcima pročišćavanja može se dobiti aluminij čistoće 99,99% i više, ali uz visoku cijenu. Budući da najčistiji aluminij ima i najbolju korozijsku postojanost, to se upotrebljava za platiniranje neotpornijih aluminijskih legura, posebno visokočvrstih i precipitacijski očvrstljivih koje sadrže magnezij, silicij ili bakar.

Kvaliteta prirodnog oksidnog sloja može se poboljšati postupcima poput kemijskog fosfatiranja i kromatiranja. Važnija i poznatija je elektrokemijska oksidacija- anodizacija. Anodizacija je postupak umjetnog podebljanja prirodnog oksidnog filma, a poznata je pod različitim zaštićenim imenima kao npr. eloksiranje. Izvodi se u kupkama s sumpornom ili kromnom kiselinom, a nastali zaštitni sloj je ravnomjeran, gust i staklasto-proziran što je posebno prikladno kad se aluminij koristi u dekorativne svrhe. Raznim dodacima sloj se može i obojiti. Budući da je aluminijski oksid vrlo tvrd, njegovim podebljanjem povećava se i otpornost na trošenje. Lagana površinska prozirnost oksidnog sloja osigurava prionljivost za boje organskog ili anorganskog podrijetla.

Uz dobru korozijsku postojanost aluminij ima i visoku električnu i toplinsku vodljivost. Električna vodljivost iznosi 62% IACS. Računajući s obzirom na masu, aluminij je i bolji vodič od bakra i istiskuje ga iz uporabe u elektrotehnici tamo gdje ne smeta veći volumen materijala i gdje se ne zahtijeva dobra lemljivost.

Zbog niskog modula elastičnosti, nosači izrađeni od aluminijskih legura znatno su gipkiji u usporedbi s istovrsnim konstrukcijama od čelika. Slično vrijedi za toplinsku vodljivost koja je dvostruka od one čelika, što se može iskoristiti kod izrade posuda i cjevovoda u tehnici hlađenja.

3. ALUMINIJEVE LEGURE

3.1. Svojstva aluminijevih legura

Legiranjem aluminijske legure prvenstveno se poboljšavaju mehanička svojstva, ponajprije vlačna čvrstoća i tvrdoća ali je moguće unaprijediti i druga svojstva poput krutosti, istežljivosti, ponekad žilavosti ili livljivosti. No, potrebno je uzeti u obzir da se legiranjem snižava toplinska i električna vodljivost. Aluminijske legure su važan konstrukcijski materijal u modernom zrakoplovstvu. One su materijal koji tradicionalno prevladava u konstrukcijama putničkih i vojnih zrakoplova. Radi se o legurama relativno niske cijene, male mase, toplinski obradljivim i lako oblikovljivim. Svojstva aluminijskih materijala mogu varirati u širokom rasponu kao rezultat kemijskog sastava i mikrostrukturnog stanja na koje je moguće utjecati toplinskom obradom. Postupkom toplinskog očvršćavanja moguće je proizvesti Al-legure čvrstoće poput nekih čelika. Al-legure su povoljnog omjera čvrstoće i gustoće, dobro podnose kako niske tako i umjereno povišene temperature.

Najvažnije prednosti aluminijskih legura su:

- **-visoka specifična čvrstoća;** gustoća aluminijske legure od samo 2700 kg/m^3 (tri puta niža od čelika) osigurava vrlo dobar omjer čvrstoće i gustoće posebno kada se radi o toplinski očvršćenoj leguri. U pogledu specifične čvrstoće visokočvrste Al-legure konkurentne su čvršćim ali i težim Ti-legurama i čelicima,
- **Al legure nisu krhke pri niskim temperaturama,** dapače, snižavanjem temperature postaju čak i čvršće bez znatnijeg gubitka žilavosti,
- **Al legure se najlakše strojno obrađuju i oblikuju** od svih metala. Zahvaljujući plošno centriranoj kubičnoj (FCC) strukturi koja sadrži više kliznih ravnina aluminij i njegove legure izvrsno su oblikovljive u toplom i hladnom stanju i lako se obrađuju postupcima kovanja, valjanja, prešanja i sl. i pri tome očvršćuju. Visokočvrste Al-legure moguće je oblikovati u relativno mekanom stanju i potom toplinski obraditi do visokih iznosa čvrstoće.

Osim navedenih prednosti Al-legure imaju i druga važna obilježja za komercijalnu primjenu kao što su korozijska otpornost- zbog gustog nepropusnog sloja Al_2O_3 oksida koji se formira na zraku i vodenim otopinama, velik broj Al-legura je izuzetno otporan na koroziju. Aluminij i neke njegove legure imaju izrazito visoku električnu vodljivost. Pored dobre električne vodljivosti vrlo dobra je i toplinska vodljivost. Dodatno, Al-legure jedan su od najlakše recikliranih konstrukcijskih materijala. Recikliranje zahtijeva znatno manji utrošak energije nego sama

primarna proizvodnja. Pretaljanjem aluminija i Al-legura koje su već bile u uporabi dobiva se tzv. sekundarni aluminij koji se pretežno koristi u izradi odljevaka.

Nedostaci visokočvrstih Al-legura:

- **nizak modul elastičnosti;** iznosi oko 70 GPa i niži je u usporedbi s metalima kao što su titan (oko 110 GPa) i čelik (oko 210 GPa).
- **ograničena primjenjivost pri povišenim temperaturama;** Al-legure imaju nisko talište (660 °C) pa je temperaturna granica njihove dugotrajne uporabe 120-150 °C, kratkotrajno se mogu izlagati temperaturama 200-260 °C.
- **loša zavarljivost;** zbog sklonosti stvaranju oksida potrebno ih je zavarivati u inertoj atmosferi.
- **problem korozijske postojanosti;** osobito prisutan kod visokočvrstih Al-legura koje prevladavaju u zrakoplovstvu. Zbog toga se one često prekrivaju slojem čistog aluminija, pri čemu se ostvaruje dovoljna površinska zaštita uz dobru čvrstoću osnovnog materijala.

3.2. Podjela aluminijevih legura

Legure aluminija se mogu općenito podijeliti prema tri kriterija:

- **tehnološkoj preradi;** razlikuju se legure za gnječenje koje se prerađuju plastičnim oblikovanjem i legure za lijevanje koje svoj konačan oblik postižu lijevanjem;
- **kemijskom sastavu;** samo nekoliko elemenata ima dovoljnu topljivost u aluminiju i to su glavni legirni elementi: Cu, Mg, Si, Zn, Mn i Li. Ovi elementi tvore s aluminijem dvokomponentne legure tipa: Al-Cu, Al-Mg, Al-Si, Al-Zn, Al-Mn, Al-Li. Kompleksnije legure nastaju njihovom međusobnom kombinacijom i uz dodatak drugih legirnih elemenata koji poboljšavaju svojstva osnovne legure. Svi legirni elementi, pri dovoljno visokoj temperaturi, su potpuno topljivi u rastaljenom aluminiju. Međutim, njihova topljivost ograničena je u kristalima mješancima aluminija. Neotopljeni elementi stvaraju vlastite faze ili intermetalne spojeve. Svojstva Al-legura određena su topljivošću legirnih elemenata u aluminiju, njihovim udjelom, te veličinom, oblikom i raspodjelom intermetalnih spojeva.;
- **toplinskoj obradi;** Prema sklonosti toplinskoj obradi Al-legure se dijele na toplinski neočvrstljive i toplinski očvrstljive legure.

Komercijalne Al-legure najčešće se svrstavaju u tri skupine: toplinski neobradljive legure za gnječenje, toplinski obradljive legure za gnječenje i legure za lijevanje. U zrakoplovstvu većinom prevladavaju toplinski obradljive legure za gnječenje očvrstnute do visokih iznosa čvrstoće.

3.3. Označivanje aluminijevih legura

U većini zemalja koriste se internacionalne brojčane oznake. Uz te norme u pojedinim zemljama definiraju i slovno-brojčane oznake koje govore o legirnim elementima i njihovim približnim udjelima. Al-legure za gnječenje označuju se četveroznamenkastom brojčanom oznakom (tablica 3.).

Tablica 3. Označivanje aluminijevih legura za gnječenje

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

Prva znamenka definira glavni legirni element u svakoj seriji. Druga znamenka označava modifikacije u odnosu na izvornu leguru; ova je znamenka uvijek nula (0) za izvorni sustav, jedan (1) za prvu modifikaciju, dva (2) za drugu modifikaciju itd. Modifikacije se tipično definiraju razlikama u udjelima legirnih elemenata većim od 0,15 do 0,50% ili više, ovisno o vrsti dodanog elementa. Treća i četvrta znamenka označuju specifičnu leguru unutar serije i ove znamenke nemaju specijalno značenje, osim kod serije 1XXX.

Kod legura za lijevanje koje se označavaju troznamenkastom oznakom prva znamenka ponovno se odnosi na glavni legirni element, dok druga i treća označuju specifičnu leguru. Nula koja slijedi iza ovih oznaka upućuje na lijevani proizvod. Slovo ispred oznake označuje stupanj čistoće ili prisutnost sekundarnog legirnog elementa. Primjerice oznaka AXXX.0 označuje viši stupanj čistoće u odnosu na izvornu leguru XXX.0.

Oznake stanja primjenjuju se na sve Al-legure (lijevane i gnječene) osim ingota. Sustav oznaka temelji se na mehaničkim i/ili toplinskim obradama kojima se postižu određena metalurška stanja. Oznaka stanja slijedi iza oznake legure odvojena crticom (npr. 2014-T6). Osnovna stanja obrade označuju se velikim slovom F, O, H, W ili T. Legure u primarnom stanju nose oznaku F, one žarene O, rastvorno žarene legure koje nisu postigle stabilno stanje označuju se s W, a legure očvrstnute hladnom deformacijom s H. Ako je legura rastvorno žarena, gašena i potom dozrijevana, bilo prirodnim ili umjetnim putem, ona se označava sa T i brojem 1 do 10 koji pobliže opisuje specifičnosti provedenog postupka.

Oznake stanja:

F- Primarno stanje; hladno ili toplo oblikovano ili lijevano pri čemu nije primijenjena posebna kontrola toplinskog procesa ili procesa oblikovanja.

O- Žareno; primjenjuje se za gnječene poluproizvode koji se žare radi smanjenja čvrstoće ili za odljevke koji se žare da bi se povećala duktilnost i dimenzijska stabilnost.

H- Hladno deformirano; odnosi se na gnječene legure očvrstljive hladnom deformacijom sa ili bez dodatne toplinske obrade kojom se naknadno može sniziti čvrstoća.

W- Rastvorno žareno; označava nestabilno stanje koje se koristi za rastvorno žarene legure koje spontano očvršćuju pri okolišnoj temperaturi tijekom perioda od više mjeseci ili čak godina.

T- Toplinski obrađeno; koristi se za legure čija se čvrstoća stabilizira unutar nekoliko tjedana nakon rastvornog žarenja i dozrijevanja. Primjenjuje se za legure serija 2XXX, 6XXX, 7XXX te neke legure serije 8XXX.

Iza slova T slijedi jedan ili više brojeva koji označuju specifični redoslijed postupaka kojima se ostvaruju različite kombinacije svojstava:

T1- hlađeno s povišene temperature preoblikovanja i prirodno dozrijevano

T2- hlađeno s povišene temperature preoblikovanja, hladno oblikovano (deformirano) i prirodno dozrijevano

T3- rastvorno žareno (homogenizirano), hladno oblikovano i prirodno dozrijevano

T4- rastvorno žareno i prirodno dozrijevano

T5- hlađeno s povišene temperature preoblikovanja i umjetno dozrijevano

T6- rastvorno žareno i umjetno dozrijevano

T651- rastvorno žareno, oslobođeno zaostalih naprezanja istegnućem za kontroliranu veličinu deformacije i umjetno dozrijevano

T7- rastvorno žareno i predozrijevano

T73- rastvorno žareno, umjetno predozrijevano da se postigne najbolja otpornost na napetosnu koroziju

T76- rastvorno žareno, umjetno predozrijevano s ciljem postizanja dobre otpornosti na koroziju ljuštenjem

T7651- rastvorno žareno, oslobođeno zaostalih naprezanja istegnućem za kontroliranu veličinu deformacije i umjetno predozrijevano da se postigne dobra otpornost na koroziju ljuštenjem

T8- rastvorno žareno, hladno oblikovano i umjetno dozrijevano

T9- rastvorno žareno, umjetno dozrijevano i hladno oblikovano

T10- hlađeno s povišene temperature preoblikovanja, hladno oblikovano i umjetno dozrijevano.

Da bi se ukinula zaostala naprezanja koja se javljaju nakon gašenja, gnječeni proizvodi često se deformiraju za kontroliranu veličinu deformacije. Time se poboljšava dinamička izdržljivost i korozijska otpornost te smanjuje izvijanje dijelova kod strojne obrade. Kada se koristi neki od postupaka za redukciju naprezanja, to se označava brojem 5 iza kojeg slijedi zadnja znamenka oznake. Tako broj 51 označava oslobađanje naprezanja istežanjem, dok broj 52 opisuje postupak tlačnog oslobađanja zaostalih naprezanja.

4. ALUMINIJEVE LEGURE U ZRAKOPLOVSTVU

4.1. Durali- legure serije 2XXX

Durali su toplinski očvrstljive legure za gnječenje serije 2XXX koje općenito uz Cu kao glavni legirni element sadrže i Mg koji omogućuje dozrijevanje legura na okolišnoj ili povišenoj temperaturi. Drugi značajni legirni dodaci su Ti koji utječe na veličinu zrna tijekom lijevanja ingota i prelazni metali (Mn, Cr i/ili Zr) koji formiraju čestice ($\text{Al}_{20}\text{Cu}_2\text{Mn}_3$, $\text{Al}_{18}\text{Mg}_3\text{Cr}_2$, Al_3Zr) važne za reguliranje zrnatosti gnječene strukture. Željezo i silicij su nečistoće koje tvore intermetalne spojeve ($\text{Al}_7\text{Cu}_2\text{Fe}$ i Mg_2Si) i time štete lomnoj žilavosti i otpornosti umoru.

Svojstva durala, pa tako i ona mehanička, ovise o prisutnim legirnim elementima i postupcima mehaničkih i/ili toplinskih obrada kojima se postiže određeno metalurško stanje. Za optimalnu mehaničku otpornost durala je potrebno toplinski obraditi rastvornim žarenjem i dozrijevanjem. Precipitacija je osnovni mehanizam za povećanje čvrstoće i tvrdoće ovih legura. Durali mogu očvrstnuti na okolišnoj temperaturi (prirodno dozrijevanje) i nekoj povišenoj temperaturi (umjetno dozrijevanje). Dodatak magnezija ubrzava očvrstnuće stvaranjem intermetalnih spojeva. Aluminijeve legure serije 2XXX općenito su prikladne za dijelove i elemente konstrukcije zrakoplova koji zahtijevaju dobru specifičnu čvrstoću, kao što su dijelovi trupa i oplata krila.

Premda je bakar glavni legirni element koji doprinosi visokoj čvrstoći legura serije 2XXX, one su zbog povećanog sadržaja bakra slabije otporne na koroziju. Zato se njihova površina često prevlači tankim slojem čistog aluminija ili neke Al-legure (npr. Al-1 %Zn) da bi se zaštitile od korozije. Taj se postupak naziva platiniranje, a izvodi se tijekom proizvodnje limova i profila.

4.2. Konstruktni- legure serije 7XXX

Konstruktni su toplinski očvrstljive legure za gnječenje serije 7XXX koje sadrže cink kao glavni legirni element, uz dodatak male količine Mg koji pridonosi čvrstoći. Od drugih legirnih elemenata obično je prisutan Cu pa su to često legure oblika Al-Zn-Mg-Cu poznate kao konstruktni. Dodatak kroma pospješuje očvrstnuće precipitacijom.

Toplinski očvrstljive legure za gnječenje serije 7XXX još su sklonije precipitacijskom otvrdnjavanju od serije 2XXX. To su materijali s najvišim vrijednostima čvrstoće među svim Al-legurama. Ove legure mogu prirodno dozrijevati, ali tada nisu stabilne jer njihova čvrstoća varira tijekom vremena. Zbog toga se sve legure serije 7XXX podvrgavaju umjetnom dozrijevanju čime postižu stabilno stanje. U precipitacijski očvrstnutom stanju srednja čvrstoća ovih legura je oko 550 MPa, a ovisno o kemijskom sastavu i mikrostrukтури čvrstoća može sezati do 680 MPa kao primjerice kod legure 7001-T6. Naročito visoke čvrstoće su neke legure serije 7XXX koje

sadrže oko 2% Cu u kombinaciji s Mg i Zn. To su legure 7049, 7050, 7075, 7175, 7178 i 7475 koje pripadaju skupini najčvršćih ali i najmanje korozijski postojanih legura serije 7XXX. Legure koje ne sadrže Cu (npr. 7005 i 7029) posjeduju nižu čvrstoću, ali su žilavije i bolje zavarljive. No, treba napomenuti da se zavarljivost kod većine legura serije 7XXX ne razmatra jer se većinom primjenjuju mehanički spojevi.

Postoji nekoliko legura serije 7XXX koje se primarno odlikuju visokom lomnom žilavošću kao što su 7050, 7150, 7175, 7475 i 7085. Kod tih legura strogo je ograničen sadržaj nečistoća, osobito željeza i silicija, da bi se ostvarila optimalna kombinacija čvrstoće i lomne žilavosti. Primjerice, dok u leguri 7075 udio željeza i silicija iznosi do 0,90% kod legure 7475 njihov sadržaj je ograničen na maksimalno 0,22%. Zato legura 7475 sadrži manje intermetalnih spojeva koji nepovoljno utječu na rast napukline.

U T6 stanju, nakon dozrijevanja na maksimalnu čvrstoću, debele ploče, otkivci i ekstrudirani proizvodi mnogih legura serije 7XXX osjetljivi su na napetosnu (SCC) koroziju. Primjerice, ovaj oblik korozije često nastupa kod legure 7075-T6. Zbog toga je razvijen niz termomehaničkih postupaka kojima se uklanjaju predispozicije za pojavu ovog oblika korozije.

S ciljem pouzdane primjene u zrakoplovstvu, legure ove skupine često se umjetno predozrijevaju nakon rastvornog žarenja kako bi postigle optimalnu kombinaciju čvrstoće, korozijske postojanosti i lomne žilavosti. Kod legura serije 7XXX poznati su brojni postupci predozrijevanja u T7 stanju koji obično snižavaju čvrstoću, ali značajno povisuju otpornost prema SCC koroziji. Primjerice kod legure 7075, predozrijevano T73 stanje, koje je izvorno razvijeno radi manje osjetljivosti na SCC, snižava granicu razvlačenja za oko 15%, ali višestruko povećava otpornost prema napetosnoj koroziji. Druga predozrijevana stanja kao što su T74, T75 i T77 razvijena su s ciljem postizanja određene kombinacije čvrstoće i SCC ponašanja različitih od T6 i T73 stanja.

Umjetnim predozrijevanjem rastopno žarene legure moguće je poboljšati i otpornost ljuštenju. Sklonost ljuštenju dodatno se može smanjiti istezanjem materijala za kontroliranu veličinu deformacije prije predozrijevanja čime se smanjuju zaostala naprezanja.

S ciljem poboljšanja korozijske postojanosti gotovi dijelovi se često anodiziraju. Anodizacijom se povećava debljina oksidnog Al_2O_3 sloja na površini metal. Anodizacija se provodi nakon odmašćivanja i kemijskog čišćenja površine. Ovisno o temperaturi i vremenu anodizacijske obrade debljina oksidnog sloja može iznositi od 0,2 do 0,5 mm.

Zbog visoke mehaničke otpornosti konstruktali su općenito niže lomne žilavosti od durala. Legure serije 7XXX prvenstveno su namijenjene za dijelove zrakoplovnih konstrukcija koje primarno moraju biti visoke čvrstoće kao što su okvir i određeni viskokopterećeni dijelovi oplata trupa, pregrade trupa, te gornja oplata krila zrakoplova.

4.3. Pantali- legure serije 6XXX

Pantali su toplinski očvrstljive legure za gnječenje serije 6XXX. Imaju mnogo bolju korozijsku otpornost od Al-Cu legura, ali one u pravilu ne postižu takve kombinacije svojstava kakve su moguće kod serije 2XXX. Međutim, razvijena je jedna relativno nova legura 6013-T6 koja ima 12% veću čvrstoću od 2024-T3 legure uz podjednaku lomnu žilavost i otpornost prema širenju napukline. Legure serije 6XXX mogu se zavarivati za razliku od serija 2XXX i 7XXX čije su legure ograničeno zavarljive.

4.4. Alclad

Alclad je sendvič konstrukcija koja se sastoji od visokočvrste aluminijske legure koja je s obje strane prevučena čistim aluminijem. Na taj način dobiven je materijal koji može zadovoljiti visoke mehaničke zahtjeve u zrakoplovstvu uz visoku korozijsku otpornost. Prvo korištenje Alclad-a u zrakoplovstvu vezuje se uz 1927. godinu kada je konstruiran američki zračni brod ZMC-2 prikazan na slici 8. ZMC-2 je jedini ikada proizveden zračni brod s oplatom u potpunosti načinjenom od Alclad-a.



Slika 8. Zračni brod ZMC-2

5. MEHANIZMI OČVRSNUĆA METALNIH MATERIJALA

5.1. Očvrsnuće hladnom deformacijom

Al-legure za gnječenje, kubično plošno centrirane (FCC) strukture, vrlo su sklone očvrsnuću plastičnim oblikovanjem u hladnom stanju. Očvrsnuće hladnom deformacijom nastaje zbog umnažanja dislokacija u kristalnoj strukturi pri čemu se one isprepleću. Time se usporava njihovo gibanje što otežava plastično tečenje materijala. Deformiranje u hladnom stanju može se provesti postupcima kao što su valjanje, kovanje, vučenje, prešanje i slično. Svima njima zajedničko je da uzrokuju porast granice razvlačenja, čvrstoće i tvrdoće. Većina Al-legura očvrstljivih ovim mehanizmom ima mikrostrukturu koja se sastoji od čvrste otopine bez intermetalnih faza. To je dodatan čimbenik koji ide u prilog njihovoj visokoj duktilnosti. Željena mehanička svojstva postižu se u zadnjoj fazi oblikovanja reguliranjem stupnja ugnječenja.

S obzirom na to da čvrstoća ovisi o stupnju deformacije, čisti aluminij i neke gnječene aluminijske legure dostupne su u nekoliko deformacijski očvrnutih stanja. Ako je materijal deformacijski očvrnut, on nosi oznaku H. Glavni nedostatak hladno očvrnutih Al-legura proizvedenih na konačne dimenzije je taj da se njihova mehanička svojstva ne mogu više bitno mijenjati, osim žarenjem kada materijal mekša.

5.2. Očvrsnuće kristalima mješancima (očvrsnuće legiranjem)

Ovaj mehanizam otežavanja kretanja dislokacija počiva na postojanju točkastih zapreka atoma legiranih elemenata (nepravilnosti koje deformiraju kristalnu rešetku i time otežavaju gibanje dislokacija) otopljenih u rešetki osnovnog metala, čime nastaju intersticijski ili supstitucijski kristali mješanci. Intersticijski otopljeni atomi smanjuju žilavost i povećavaju čvrstoću dok supstitucijski atomi ostvaruju dobru čvrstoću ali i žilavost.

U slučaju legiranja čistog željeza značajna je razlika u djelovanju intersticijskih elemenata (npr. ugljik, fosfor, dušik) u odnosu na supstitucijske (npr. molibden i krom). Intersticijski elementi uzrokuju jako očvrsnuće, ali i veliku krhkost. Zato su nužni i supstitucijski dodaci među kojima dovoljno veliku žilavost pružaju mangan i nikel. Stoga na porast čvrstoće čelika najjače djeluje povišenje masenog udjela ugljika, a povoljno je i djelovanje dušika, no time opadaju svojstva duktilnosti. Od svih načina očvrsnuća ovaj daje najmanje učinke.

5.3. Očvrnuće martenzitnom transformacijom

Martenzitnu transformaciju kod čelika i željeznih ljevova obilježava preklopna pretvorba austenita u martenzit koja uzrokuje očvrnuće zbog:

- stvaranja kristala mješanaca- prisilno otapanje ugljika u α -željezu (točkaste zapreke). Prisilna otopina ugljika u α -željezu (martenzit) postiže se brzim ohlađivanjem- gašenjem (u vodi, ulju itd.) kojim se sprečava difuzija ugljika. Martenzit ima visoku čvrstoću zahvaljujući tetragonalnoj distorziji rešetke α -željeza (transformacija BCC u BCT rešetku) uslijed intersticijskog ulaza atoma ugljika.
- povećanja gustoće dislokacija izvitoperenjem kristalne rešetke (očvrnuće umnažanjem dislokacija, linijskih zapreka).

Martenzitnom transformacijom povisuje se tvrdoća i čvrstoća, ali pada istezljivost i žilavost pa je nužno dodatno provesti popuštanje.

5.4. Očvrnuće granicama zrna (usitnjenjem zrna)

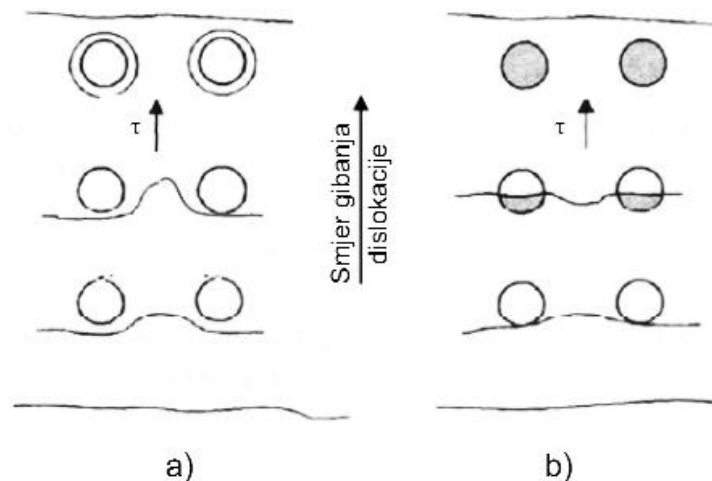
Mehanizam kočenja gibanja dislokacija pomoću granica zrna (površinskih zapreka) nije najefikasniji s obzirom na stupanj očvrnuća, ali je najprikladniji jer uz umjereno očvrnuće izaziva sniženje prelazne temperature i povisuje žilavost.

Djelovanje granica zrna povoljnije je u odnosu na ostale vrste zapreka zbog toga što je broj dislokacija koje se gomilaju na velikokutnim granicama zrna ograničen. Prije nego što se postigne kritična gustoća koja bi mogla uzrokovati nastanak inicijalne mikropukotine dolazi do procesa sklizanja dislokacija preko granice u drugo zrno ako je ono povoljno orijentirano. Stoga su učinkovitija sitnija zrna jer je time veća vjerojatnost povoljne orijentacije susjednih zrna. Usitnjenje zrna se obično kombinira s ostalim mehanizmima očvrnuća.

5.5. Očvrnuće precipitacijom

Kod mehanizma očvrnuća precipitacijom (izlučivanjem), radi se o izlučivanju prostornih zapreka gibanju dislokacija kao što su precipitati intermetalnih spojeva (npr. Ni_3Al , Ni_3Ti), dispergiranih čestice u obliku karbida i nitrida (npr. VC, Mo_2C , VN, W_6C) te prijelaznih čestica iz homogene mikrostrukture (kod Fe-materijala iz ferita, austenita ili martenzita). Ove faze nastaju kad se prekorači granica topljivosti legiranih elemenata u rešetki osnovnog metala.

Njihovo djelovanje ogleda se kroz raspodjelu i vrstu, srednji promjer i međusobnu udaljenost. Nailaskom na ove čestice, dislokacije ih mogu odrezati ili zaobići (slika9) na što se troši određena energija pri djelovanju vanjskog opterećenja, energija koja bi se inače utrošila na deformaciju.



Slika 9. Mehanizam precipitacijskog očvršnuća

- a) tvrdi precipitati- dislokacija zaobilazi čestice (jako očvršnuće)
- b) meki precipitati- odrez čestica (slabije otvrdnuće)

Za precipitacijsko očvršnuće povoljnije je prisustvo što većeg broja sitnih tvrdih čestica koje dislokacije ne mogu odrezati već ih zaobilaze tako da se pod djelovanjem smičnog naprezanja (τ) dislokacija najprije progiba između dviju čestica te potom formira dislokacijske prstene oko precipitata i time nastavlja svoje gibanje, slika 9b.

5.5.1. Precipitacijsko očvršnuće aluminijskih legura

Da bi se neka Al-legura precipitacijski očvršnula moraju biti ispunjeni određeni polazni uvjeti. Legura mora sadržavati barem jedan legirni element ili konstituent u onom području dijagrama stanja u kojem njegova topljivost u aluminiju raste s porastom temperature. Maseni udio legirnog elementa mora biti što viši, ali ne smije prekoračiti granicu maksimalne topljivosti u kristalu mješancu aluminija, kako bi se mogla postići potpuna apsorpcija stranih atoma rastvornim žarenjem. Legirni elementi ili konstituenti moraju imati značajnu topljivost pri visokoj temperaturi i samo minimalnu topljivost na okolišnjoj temperaturi. Elementi koji se tako ponašaju jesu Cu, Zn, Si i Mg koji tvore konstituente kao što su CuAl_2 , Mg_2Si , MgZn_2 . Međutim, to nije dovoljno jer neki Al-sustavi koji se tako ponašaju ipak ne očvršćuju toplinskom obradom. Stoga mora biti ispunjen i drugi uvjet: element ili konstituent koji se otapa mora omogućiti formiranje sitnih precipitata koji deformiraju kristalnu rešetku aluminijske matrice. Zato legura u polaznom stanju mora biti takvog sastava da sadrži heterogenu strukturu sačinjenu od α kristala mješanaca aluminija i kristala druge faze u obliku nekog intermetalnog spoja (CuAl_2 , Mg_2Si , MgZn_2 , Al_2CuMg , Al_3Mg_2) kako bi tijekom promjena koje se zbivaju, došlo

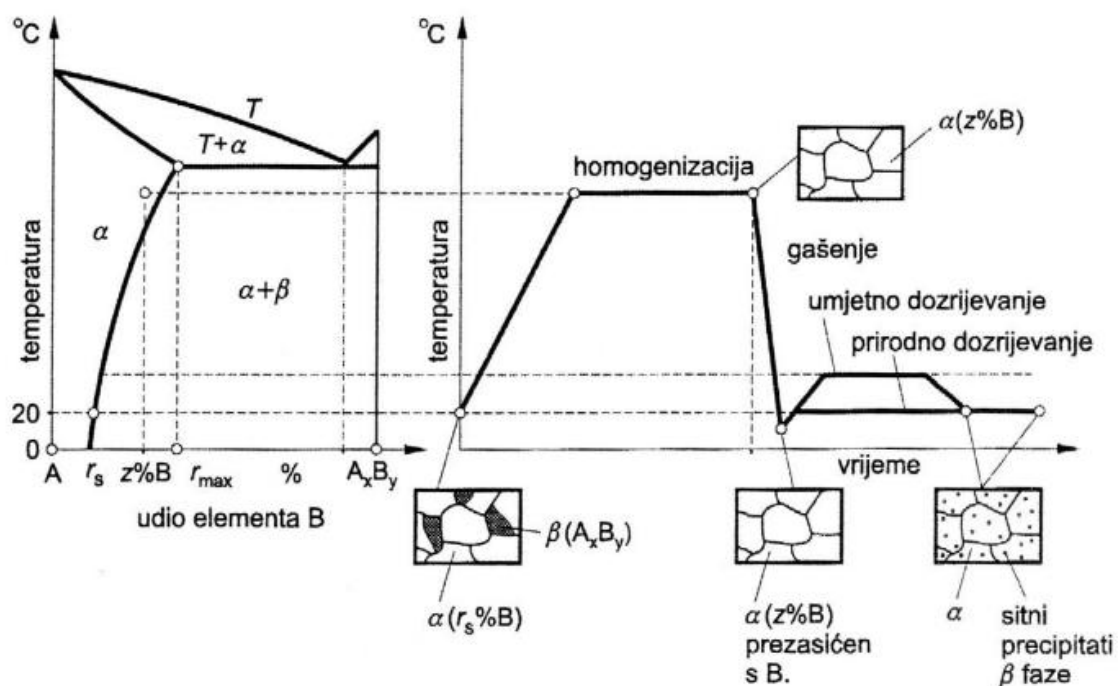
do ponovnog izlučivanja intermetalnog spoja, ali sada u koherentnom obliku. Precipitacija jednoliko raspršenih sitnih čestica postupno će otvrdnjavati leguru sve do postizanja maksimalne tvrdoće i čvrstoće. Te fino raspršene čestice otežavaju gibanje dislokacija. Neke Al-legure očvršćuju nakon samo nekoliko dana držanja pri sobnoj temperaturi- postupak poznat kao prirodno dozrijevanje, dok druge umjetno dozrijevaju pri povišenim temperaturama. Legure koje zadovoljavaju navedene uvjete jesu toplinski očvrstljive legure za gnječenje serija 2XXX, 6XXX, 7XXX i neke legure serije 8XXX.

Postupak precipitacijskog očvršćenja u osnovi se sastoji od triju faza:

1. zagrijavanja legure na temperaturu rastopnog žarenja i držanja dovoljno dugo vremena do potpunog otapanja legiranih 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 umjereno povišenoj temperaturi (umjetno dozrijevanje) s ciljem izlučivanja vrlo sitnih precipitata unutar aluminijske matrice

Karakteristika mehanizma precipitacijskog očvršćenja je da nema alotropskih modifikacija kristalne rešetke kao kod kaljenja čelika. Porast čvrstoće i tvrdoće direktno je povezan sa stvaranjem koherentnih precipitata unutar rešetke α kristala mješanca aluminija što je posljedica variranja topljivosti atoma legiranih elemenata u α mješancu.

Opći postupak precipitacijskog očvršćivanja prikazan je na slici 10.



Slika 10. Prikaz općeg postupka precipitacijskog očvršćivanja

Legura koja općenito sadrži neki legirni element B zagrijava se u postupku rastopnog žarenja na dovoljno visoku temperaturu pri kojoj se legirni element otapa u čvrstoj otopini. Ako se legura s X% elementa B, koja polazno sadrži α kristale mješance aluminija u kojima je otopljeno r_s % elementa B i neku intermetalnu fazu β (A_xB_x) zagrije na dovoljno visoku temperaturu, čestice intermetalnog spoja potpuno će se apsorbirati u kristalu mješancu aluminija. Pri tome nastaje homogena čvrsta otopina koja sadrži samo α kristale u kojima je otopljeno X% elementa B. Zasićenje rešetke α mješanaca atomima elementa B i prazninama, posljedica je velike difuzijske pokretljivosti atoma. Da bi se to ostvarilo, temperatura rastopnog žarenja mora biti iznad krivulje topljivosti u čvrstom stanju, ali pri tom ne smije doći do taljenja. Ako se legura zagrije na previsoku temperaturu i granice zrna počnu taliti, izradak je nepovratno uništen i mora se baciti. Primjerice, legura 2024 rastvorno se žari u području temperatura 488-498 °C, dok je eutektička temperatura (502 °C) samo 4 °C viša od gornje temperaturne granice rastvornog žarenja. S druge strane, ako je temperatura preniska, otapanje neće biti potpuno i legura neće dozrijevanjem ostvariti očekivanu čvrstoću. Rastvorno žarenje treba biti dovoljno dugo da legura difuzijom postigne ravnotežno stanje. Kod legura za gnječenje trajanje rastvornog žarenja je kraće nego za lijevane proizvode koji sadrže grubozrnatu strukturu čiji se veliki konstituenti teže otapaju. Trajanje rastvornog žarenja može varirati od jedne minute i manje kada je riječ o tankim limovima, pa sve do 20 sati kod velikih lijevanih proizvoda. Peći u kojima se provodi rastvorno žarenje trebaju biti čiste i suhe. Prisutnost vlage može uzrokovati apsorpciju vodika u aluminijev izradak, dok sumporni spojevi mogu razložiti površinski oksidni sloj što dodatno povećava difuziju vodika. U tom pogledu najosjetljivija je serija 7XXX, a potom slijede legure serije 2XXX. Vlaga se može ukloniti čišćenjem i sušenjem dijelova prije stavljanja u peć.

Nakon što se legirni elementi otope u otopini, legura se mora gasiti na relativno nisku temperaturu kako bi se ovi elementi zadržali u čvrstoj otopini. Kada bi se, primjerice, legura s X% elementa B sporo hladila do okolišne temperature, ravnoteža bi se postigla pri svakoj temperaturi i čestice intermetalnog spoja izlučivale bi se kao nekoherentni precipitati. Time bi se ponovno formirala polazna $\alpha+\beta$ mikrostruktura koja bi uzrokovala slaba mehanička svojstva, te bi legura u ovom stanju bila prilično krhka zbog prisutnosti velikih čestica intermetalne faze. Zato je leguru potrebno brzo hladiti (gasiti) s temperature rastvornog žarenja čime se legirni elementi zadržavaju prisilno otopljeni u α kristalu mješancu tvoreći prezasićenu čvrstu otopinu. Zbog prezasićenja, tj. znatno većeg udjela legirnog elementa α u čvrstoj otopini nego što je ravnotežna koncentracija, legura se nalazi u neravnotežnom stanju. Primjerice, za Al-leguru koja sadrži općeniti element B, α kristali mješanci u gašenom stanju sadrže X% elementa B dok je maksimalna topljivost atoma ovog elementa pri okolišnoj temperaturi u ravnotežnom stanju puno niža i iznosi samo r_s . Osim prezasićenja atomima legirnih elemenata, α otopina je prezasićena i

prazninama. Sam postupak gašenja predstavlja najosjetljiviju fazu toplinske obrade. Gašenje mora biti dovoljno brzo da bi se legirni elementi zadržali u otopini. U isto vrijeme potrebno je minimizirati zaostala naprezanja uvedena gašenjem koja bi mogla uzrokovati pojavu deformacija i napuklina. Primjenom velikih brzina gašenja općenito se postižu najviše čvrstoće i najbolje kombinacije čvrstoće i žilavosti. Premda se intenzivnijim gašenjem obično poboljšava otpornost prema općoj i napetosnoj koroziji, određene legure serije 7XXX, koje ne sadrže bakar, bit će otpornije na napetosnu koroziju ako se sporije hlade. Velike brzine gašenja ostvaruju se u hladnoj vodi, ali često se primjenjuju i sporija ohlađivanja, npr. u toploj ili vreloj vodi, kojima se djelomično žrtvuje čvrstoća i korozijska otpornost na račun manjih deformacija. Brzina gašenja dodatno se može povećati miješanjem kojim dolazi do kidanja parnog omotača formiranog oko predmeta u ranoj fazi gašenja. Dijelovi skloni deformiranju zahtijevaju sporije gašenje, primjerice u toploj vodi temperature 65-80 °C. Za gašenje se koriste i vodene otopine polialkilenglikola koji tijekom gašenja proizvode stabilni površinski film koji osigurava ujednačene brzine ohlađivanja i ograničava pojavu deformacija.

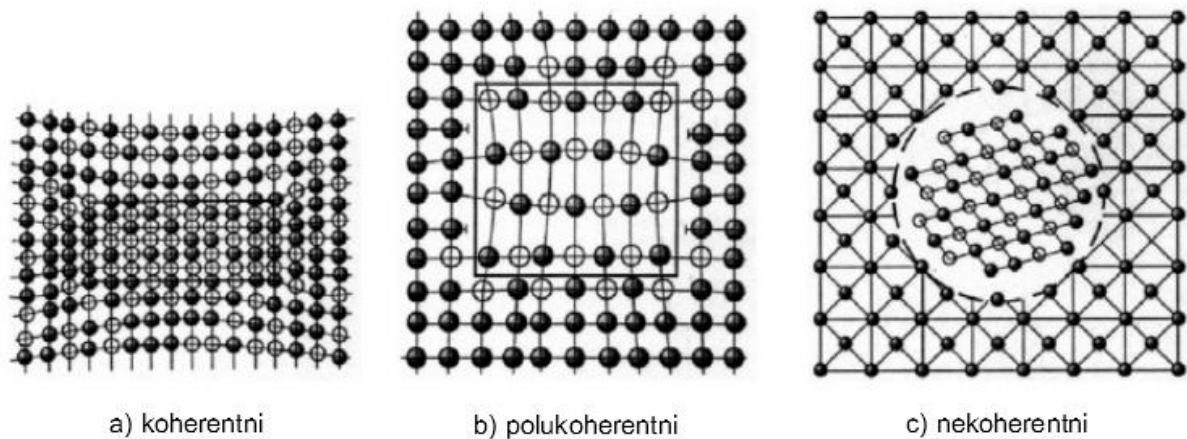
Da bi se u postupku gašenja izbjegla preuranjena precipitacija, moraju biti ispunjena dva uvjeta:

- vrijeme koje protekne da se izradak prenese iz peći u sredstvo za gašenje mora biti što kraće da bi se onemogućilo sporo ohlađivanje u području kritičnih temperatura gdje nastupa vrlo brza precipitacija,
- spremnik za gašenje mora biti dovoljno velikog volumena kako bi se izbjegao osjetniji rast temperature sredstva za gašenje što također može rezultirati preuranjenom precipitacijom.

Nakon gašenja Al-legure se lako hladno oblikuju. Zato se zakovice koje služe za spajanje zrakoplovnih dijelova zakivaju odmah nakon gašenja. Zakovice se moraju oblikovati prije dozrijevanja jer kad očvrstnuće jednom započne, svaki pokušaj zakivanja zakovice rezultirat će njezinim raspucavanjem.

Nakon rastvornog žarenja i gašenja slijedi dozrijevanje koje se provodi na temperaturi okoline (prirodno dozrijevanje) ili nekoj povišenoj temperaturi (umjetno dozrijevanje). Prirodno dozrijevanje traje od nekoliko dana pa sve do nekoliko mjeseci. Umjetno dozrijevanje, pri temperaturi 100-200 °C zahtijeva kraći vremenski period, od pola sata do nekoliko dana. Budući da je osnova dozrijevanja difuzija koja se ubrzava porastom temperature, to se umjetnim dozrijevanjem ostvaruje veći porast čvrstoće i tvrdoće nego prirodnim dozrijevanjem. U prvom stadiju dozrijevanja atomi legirnih elemenata nastoje izaći iz čvrste otopine tako da zaposjedaju položaje unutar kristalne rešetke α mješanaca tvoreći klice (nukleuse) budućih čestica. Atomi legirnih elemenata sele se iz područja veće napetosti rešetke u područja prezasićenosti

prazninama i pri tome formiraju nakupine otopljenih atoma unutar rešetke α mješanaca. Te klice prisutne su kao koherentni precipitati koji imaju istovjetan raspored atoma kao i matrica te nema prekida veza u kristalnoj rešetki. Međutim, atomski razmaci su dovoljno različiti da deformiraju rešetku na način prikazan na slici 11a.



Slika 11. Tipovi precipitata

Uslijed izvitoperenosti rešetke dolazi do pojave unutarnjih naprezanja koja ometaju i usporavaju gibanje dislokacija što za posljedicu ima porast čvrstoće i tvrdoće. Također se povećava i istezljivost jer više nema velikih čestica krhke intermetalne faze. U postupku umjetnog dozrijevanja može doći do mjestimičnog prekida veza između matrice i precipitata pri čemu nastaje polukoherentni precipitat povezan s matricom samo na nekim čvorovima rešetke (slika 11b). Izlučivanje ovih polukoherentnih precipitata moguće je samo na povišenim temperaturama. Kod prirodnog dozrijevanja ovog stadija nema. Ako se legura zagrije na još višu temperaturu, zbog ubrzanе difuzije mikrostruktura se brzo vraća u ravnotežno stanje i koherentne i polukoherentne čestice prelaze u nekoherentni precipitat odvojen od matrice (slika 11c). Time iščezava deformacija kristalne rešetke, precipitati rastu i sjedinjuju se međusobno, što rezultira daljnjim padom čvrstoće i tvrdoće uz zadržavanje niske istezljivosti.

6. PRIMJENA ALUMINIJEVIH LEGURA U ZRAKOPLOVSTVU

U zrakoplovstvu se uglavnom koriste legure serije 2XXX i 7XXX. Radi se o precipitacijski očvrstljivim legurama iz skupine durala (serija 2XXX) odnosno konstruktala (serija 7XXX). Niže su navedene neke od najčešće korištenih legura.

2014 (Al-Cu-Si-Mn-Mg)

Kemijski sastav: 3,9- 5% Cu, 0,5- 2% Si, 0,4- 2% Mn, 0,2- 0,8% Mg, maks. 0,7% Fe, maks. 0,25% Zn, maks. 0,15% Ti, maks. 0,05% drugi elementi

Upotrebljava se za proizvodnju kotača, strukturnih elemenata i drugih visokooterećenih dijelova zrakoplova.

2024 (Al-Cu-Mg-Mn)

Kemijski sastav: 3,8- 4,9% Cu, 1,2- 1,8% Mg, 0,3- 0,9% Mn, maks. 0,5% Fe, maks. 0,25% Zn, maks. 0,15% Ti, maks. 0,1% Cr, maks. 0,05% drugi elementi

Koristi se za strukturne elemente trupa zrakoplova, rebra i dijelove koji imaju visoke zahtjeve na čvrstoću i dinamičku izdržljivost, visokooterećene elemente krila itd.

2048 (Al-Cu-Mg-Mn)

Kemijski sastav: 2,8- 3,8% Cu, 1,2- 1,8% Mg, 0,2-0,6% Mn, maks. 0,15% Si, maks. 0,2% Fe, maks. 0,25% Zn, maks. 0,1% Ti, maks. 0,05% drugi elementi

Primjena je kod visokooterećenih strukturnih elemenata zrakoplova i svemirskih letjelica.

2049 (Al-Cu-Li-Ag-Mg-Zr)

Kemijski sastav: 4,5% Cu, 1,3% Li, 0,4% Ag, 0,4% Mg, 0,14% Zr

Legura 2049 zbog svojih iznimnih svojstava pri niskim temperaturama primjenjuje se za zavarivanje spremnika tekućeg goriva i kisika kod *spaceshuttle*-a.

2090 (Al-Cu-Li-Zr)

Kemijski sastav: 2,4- 3% Cu, 1,9- 2,6% Li, 0,08- 0,15% Zr, maks. 0,25% Mg, maks. 0,15% Ti, maks. 0,12% Fe, maks. 0,1% Si, maks. 0,1% Zn, maks. 0,05% Mn, maks. 0,05% Cr, maks. 0,05% drugi elementi

Legura 2090 spada u skupinu Al-legura s litijem. Koristi se tamo gdje je presudna visoka čvrstoća. Zbog 8 do 10% manje gustoće i 10% većeg modula elastičnosti od sličnih Al- legura, koristi se za ukrutu podnih pregrada zrakoplova kako bi se ostvarila ušteda na masi. Legura se primjenjuje i za pregrade trupa i okvira zrakoplova te za zahtjevnije konstrukcijske elemente poput oplata i potpornja krila.

2091 (Al-Cu-Mg-Li-Zr)

Kemijski sastav: 1,8- 2,5% Cu, 1,7- 2,3% Li, 1,1- 1,9% Mg, 0,04- 0,16% Zr, maks. 0,3% Fe, maks 0,25% Zn, maks 0,2% Si, maks. 0,1% Mn, maks. 0,1% Cr, maks. 0,1% Ti, maks. 0,05% drugi elementi

Ova legura razvijena je s ciljem da zamjeni leguru 2024. Otporna je na oštećenja uz 8% manju gustoću i 7% veći modul elastičnosti u odnosu na spomenutu leguru. Primarna namjena je za zrakoplovne konstrukcije koje moraju biti male mase i visoke otpornosti na pojavu oštećenja.

2124 (Al-Cu-Mg-Mn)

Kemijski sastav: 3,8- 4,9% Cu, 0,3- 0,9% Mg, 1,2- 1,6% Mn, maks. 0,2% Si, maks. 0,3% Fe, maks. 0,25% Zn, maks. 0,1% Ti, maks. 0,1% Cr, maks. 0,05% drugi elementi

Ova legura upotrebljava se za proizvodnju ploča debljine 40 do 150 mm, te je primarno namijenjena za pregrade trupa i oplatu krila vojnih zrakoplova visokih performansi.

7050 (Al-Zn-Mg-Cu-Zr)

Kemijski sastav: 5,7- 6,7% Zn, 1,9- 2,6% Mg, 2,0- 2,6% Cu, 0,08- 0,15% Zr, maks. 0,15% Fe, maks. 0,12% Si, maks. 0,1% Mn, maks. 0,06% Ti, maks. 0,04% Cr, maks. 0,05% drugi elementi

Legura 7050 je prvi izbor za primjenu u zrakoplovstvu kad se traže najbolja kombinacija žilavosti, čvrstoće i otpornosti na nastajanje i širenje pukotina. Koristi se za konstrukciju okvira, pregrada trupa i oplatu krila zrakoplova.

7075 (Al-Zn-Mg-Cu-Cr)

Kemijski sastav: 5,1- 6,1% Zn, 2,1- 2,9% Mg, 1,2- 2,0% Cu, 0,18- 0,28% Cr, maks. 0,5% Fe, maks. 0,4% Si, maks. 0,3% Mn, maks. 0,2% Ti, maks. 0,05% drugi elementi

Legura 7075 posjeduje svojstva dobre strojne obradljivosti, visoke čvrstoće i otpornosti na koroziju. Koristi se za strukturne dijelove oplata debljine do 100 mm.

7150 (Al-Zn-Mg-Cu-Zr)

Kemijski sastav: 5,9- 6,9% Zn, 2,0- 2,7% Mg, 1,9- 2,5% Cu, 0,08- 0,15% Zr, maks. 0,5% Fe, maks. 0,12% Si, maks. 0,1% Mn, maks. 0,06% Ti, maks. 0,04% Cr, maks. 0,05% drugi elementi

Legura 7150 je jedna od najčvršćih, koristi se za ukrućene gornje panele krila i donje panele horizontalnog stabilizatora kod civilnih i vojnih zrakoplova. Također služi i za gornju oplatu krila.

7175 (Al-Zn-Mg-Cu-Cr)

Kemijski sastav: 5,1- 6,1% Zn, 2,1- 2,9% Mg, 1,2- 2,0% Cu, 0,18- 0,28% Cr, maks. 0,2% Fe, maks. 0,15% Si, maks. 0,1% Mn, maks. 0,1% Ti, maks. 0,05% drugi elementi

Primjena legure 7175 je za strukturne elemente zrakoplova koji moraju biti visoke čvrstoće, lomne žilavosti i dinamičke izdržljivosti, te moraju biti postojani prema napetosnoj koroziji.

7178 (Al-Zn-Mg-Cu-Cr)

Kemijski sastav: 6,3- 7,3% Zn, 2,4- 3,1% Mg, 1,6- 2,4% Cu, 0,18- 0,35% Cr, maks. 0,5% Fe, maks. 0,4% Si, maks. 0,3% Mn, maks. 0,2% Ti, maks. 0,05% ostali elementi

Koristi se za izradu zrakoplovnih dijelova visoke mehaničke otpornosti u uvjetima tlačnog opterećenja.

7475 (Al-Zn-Mg-Cu-Cr)

Kemijski sastav: 5,2- 6,2% Zn, 1,9- 2,6% Mg, 1,2- 1,9% Cu, 0,18- 0,25% Cr, maks. 0,12% Fe, maks. 0,1% Si, maks. 0,06% Mn, maks. 0,06% Ti, maks. 0,05% drugi legirni elementi

Ova legura se upotrebljava za kritične komponente zrakoplova visokih performansi. To su dijelovi koji zahtijevaju visoku lomnu žilavost kao npr. oplata trupa i krila, ramenjača i pregrade trupa zrakoplova.

Na slikama 12, 13 i 14 prikazani su karakteristični primjeri primjene Al-legura na komercijalnim zrakoplovima.



Slika 12. Primjena Al-legura na malom mlažnjaku



Slika 13. Primjena Al-legura na velikom putničkom zrakoplovu



Slika 14. Primjena Al-legura kod zrakoplova za regionalne letove

7. EKSPERIMENTALNI DIO

U eksperimentalnom dijelu rada provedeno je precipitacijsko očvršćivanje toplinski obradive Al-legure. Precipitacijska obrada provedena je u različitim temperaturno-vremenskim režimima s ciljem određivanja optimalnih parametara dozrijevanja koji daju maksimalnu tvrdoću.

7.1. Plan eksperimenta

Plan eksperimenta sadrži sljedeće korake:

1. analiza kemijskog sastava materijala;
2. izrezivanje uzoraka iz Al-ploče i njihovo označivanje;
3. određivanje parametara rastopnog žarenja (temperature i vremena);
4. rastopno žarenje uzoraka i gašenje u vodi (hlađenje jednog uzorka na zraku);
5. određivanje temperature i trajanja dozrijevanja (tri različite temperature i tri vremenska ciklusa);
6. provođenje umjetnog dozrijevanja u različitom trajanju na svakoj odabranoj temperaturi uz naknadno gašenje u vodi;
7. mjerenje tvrdoće uzoraka (polazno stanje, rastopno žareno/hlađeno u peći, rastopno žareno/gašeno u vodi, rastopno žarena i dozrijevana stanja);
8. na temelju dobivenih rezultata odrediti optimalnu temperaturu i vrijeme dozrijevanja.

7.2. Priprema uzoraka

Iz aluminijske ploče dimenzija 400·350·10 mm, izrezan je 21 uzorak dimenzija 16·16·10 mm(slika 15). Nakon rezanja uzorci su označeni slovima A-U kako bi se izbjegla njihova zamjena tijekom rukovanja. Uzorak označen slovom "A" nije podvrgavan toplinskoj obradi i predstavlja polazno stanje koje će poslužiti za usporedbu sa ostalim uzorcima koji su toplinski tretirani. Isti uzorak je poslužio i za određivanje kemijskog sastava.



Slika 15. Izrezani i označeni uzorci

7.3. Analiza kemijskog sastava

Kako bi se odredili parametri toplinske obrade kojoj će uzorci biti podvrgnuti, najprije treba odrediti kemijski sastav ispitivane aluminijske legure. Na uzorku "A" provedena je kvantitativna analiza kemijskog sastava.

Ispitivanje je provedeno u Laboratoriju za analizu metala Fakulteta strojarstva i brodogradnje koji je opremljen spektrometrom „GDOES, GDS 850A“, proizvođača Leco. Ovaj uređaj služi za kvantitativnu i kvalitativnu kemijsku analizu vodljivih čvrstih uzoraka. Ispitni dio uređaja prikazan je na slici 16.



Slika 16. Unutrašnjost instrumenta GDS 850A

Uređaj radi na principu optičke emisijske spektrometrije s tinjajućim izbojem (GDOES, *Glow Discharge Optical Emission Spectrometry*).

Da bi se obavila analiza, potrebno je pobuditi atome. To se postiže na više različitih načina; plamenom, električnom plazmom i električnim izbojem. U zadnje vrijeme u formi luka i iskre, i kao najnovije, tinjajućim izbojem, tj. plazmom (ioniziranim plemenitim plinom-argonom).

Plazma (ionizirani argon) skida uzorak s površine, u plazmi uzorak disocira na atome, dalje slijedi pobuda atoma u plazmi. Elektroni u atomu iz osnovnog stanja prelaze u pobuđeno stanje, tj. na viši energijski nivo, nakon otprilike 10 ns, elektron se vraća u osnovno stanje, tj. na energijski niži nivo. Energija oslobođena tim procesom emitira se u formi svjetlosnog kvantuma. Ta razlika energije, kao i valna dužina emitiranog svjetla, specifična je za svaki atom. Na taj način omogućena je identifikacija atoma. Intenzitet svjetla određen je udjelom elemenata u uzorku. Svjetlost nastala u tom procesu prolazi kroz spektrometar i koristi se za analizu. Svjetlost prvo prolazi kroz primarnu pukotinu, zatim pada na rešetku i reflektira se pod kutem (koji ovisi o valnoj dužini) te prolazi kroz sekundarnu pukotinu na fotomultiplikator. Struja proizvedena u fotomultiplikatoru proporcionalana je količini emitiranog svjetla. Mnogo takvih

fotomultiplikatora sa sekundarnom pukotinom mogu biti postavljeni u spektrometru, da se može istovremeno analizirati odgovarajući broj elemenata u uzorku.

Za vrijeme izboja, dio materijala u uzorku se taloži na unutarnjoj stijenci anodne cijevi. Zato je potrebno čišćenje nakon svake analize.

Za ovo ispitivanje uzorak mora biti vodljiv, dok se nevodljivi uzorci, posebice metalni oksidi, mogu se analizirati tako da se njihova strugotina pomiješa s metalnim prahom.

Da bi se analizirali nepoznati uzorci, potrebna je analitička metoda koja daje korelaciju između udjela pojedinog elementa i mjenenog intenziteta. Stoga je potrebno prije analize uređaj baždariti (kalibrirati) sa standardnim uzorcima čiji je kemijski sastav poznat i točno određen (u tu svrhu se koriste ili certificirani referentni materijali ili referentni materijali).

Na uređaju „GDOES, GDS 850A“ mogu se analizirati sljedeći kemijski elementi: C, P, S, N, B, Cr, Ni, Mo, Fe, Co, Cu, Zn, Mn, Si, Nb, V, Ti, W, Sb, Sn, Al, Mg i Pb.

Minimalne dimenzije uzorka iznose 15·15·0,5 mm. Slika 17. prikazuje uzorak "A" na kojem je provedeno ispitivanje i otisak koji preostaje nakon ispitivanja.



Slika 17. Uzorak "A" nakon analize kemijskog sastava

Rezultati ispitivanja kemijskog sastava prikazani su tablicom 4.

Tablica 4. Kemijski sastav ispitivane aluminijske legure

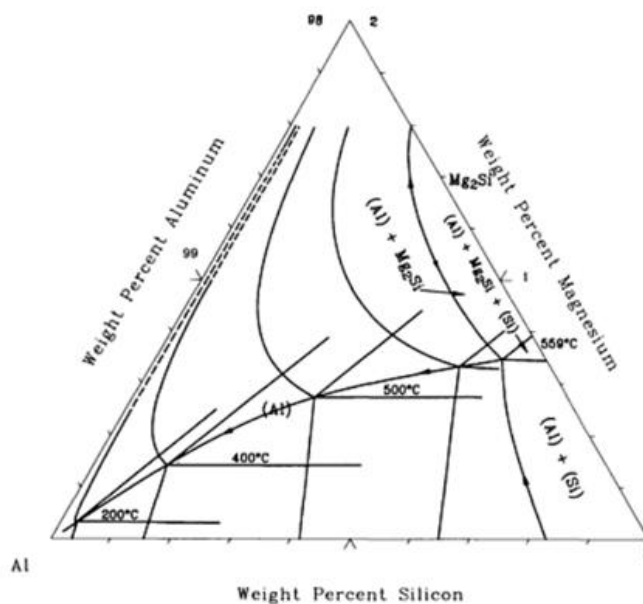
uzorak	%							
	Si	Fe	Mn	Mg	Cr	Ni	Ti	Al
Sadržaj	0,99	0,29	0,49	0,99	0,03	<0,01	0,012	ostatak

Iz tablice je vidljivo da ispitivana aluminijska legura sadrži oko 1% Si odnosno Mg. Udio ostalih elemenata je malen te oni nemaju velikog utjecaja na svojstva legure. Ova Al-Mg-Si legura pripada skupini serije 6XXX.

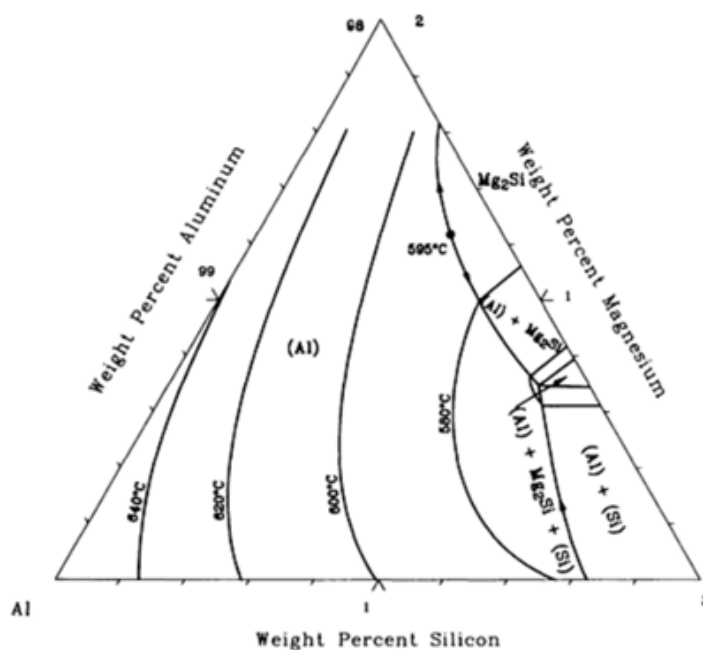
7.4. Toplinska obrada

7.4.1. Rastopno žarenje

Parametri rastopnog žarenja određeni su uz pomoć ternarnog dijagrama stanja sustava Al-Mg-Si prikazanog na slikama 18 i 19.



Slika 18. Ternarni dijagram stanja Al-Mg-Si – projekcija topljivosti



Slika 19. Ternarni dijagram stanja Al-Mg-Si – projekcija solidusa

Temperatura rastopnog žarenja mora biti iznad krivulje topljivosti u čvrstom stanju, ali pri tom ne smije doći do taljenja pa temperatura mora biti niža od solidusa. Ako se legura zagrije na previsoku temperaturu i granice zrna počnu taliti, izradak je uništen i mora se baciti. S druge strane, ako je temperatura preniska, otapanje neće biti potpuno i legura dozrijevanjem neće ostvariti očekivanu čvrstoću. Na temelju navedenog, određena je temperatura rastopnog žarenja 530°C.

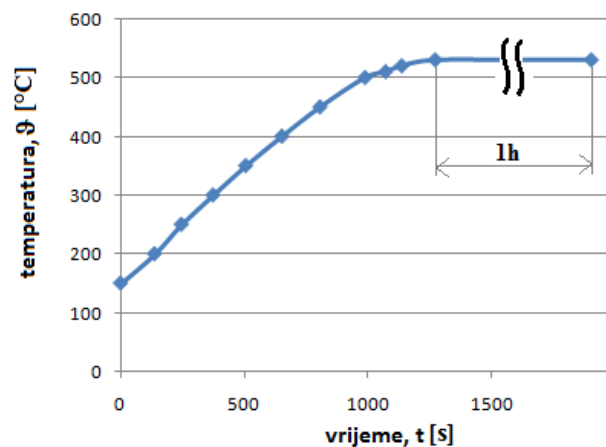
Rastopno žarenje mora biti dovoljno dugo kako bi legura difuzijom postigla ravnotežno stanje odnosno kako bi se otapanjem čestica intermetalne faze postigla potpuna apsorpcija stranih atoma u kristalu mješancu aluminijske legure.

Za žarenje je korištena laboratorijska komorna elektropeč s automatskom regulacijom temperature čiji je proizvođač „Zlatarna Celje“, slika 20.



Slika 20. Komorna elektro peč

Prije stavljanja uzoraka, peč je zagrijana do temperature rastvornog žarenja (530 °C). Na slici 21. prikazan je dijagram ϑ/t koji predočava temperaturno vremenski ciklus zagrijavanja peći.



Slika 21. Dijagram zagrijavanja peći

Nakon što je peć zagrijana na traženu temperaturu (530 °C) uzorci su stavljani u peć i držani na ovoj temperaturi 1 sat. Po završetku žarenja uzorci su nadkritično hlađeni (gašeni) u vodi kako bi se legirni elementi prisilno zadržali otopljeni u α kristalu mješancu aluminijske legure. Nakon gašenja uzorci zadržavaju monofaznu α strukturu, ali u neravnotežnom stanju zbog pojave prezasićenja. Prezasićenje α mješancu uzrokovano je znatno većim udjelom legirnih elemenata u α čvrstoj otopini nego što je to ravnotežna koncentracija.

Kod gašenja treba voditi računa da se uzorci nakon vađenja iz peći što prije urone u vodu kako bi se onemogućilo sporo ohlađivanje u području kritičnih temperatura gdje nastupa vrlo brza precipitacija. Gašenje mora biti dovoljno brzo da bi se legirni elementi zadržali u otopini, a u isto vrijeme moraju se minimizirati zaostala naprezanja koja nastaju gašenjem, a mogu uzrokovati pojavu deformacija i napuklina. Brzina gašenja dodatno se može povećati miješanjem kojim dolazi do kidanja parnog omotača formiranog oko uzorka u ranoj fazi gašenja. Uzorci su gašeni u dovoljnoj količini vode čime se sprečava osjetniji porast temperature sredstva za ohlađivanje i time preuranjena precipitacija.

S ciljem ocjene efekta gašenja nakon homogenizacije jedan od uzoraka (uzorak B) nije gašen već je sporo je hlađen na zraku.

7.4.2. Dozrijevanje

Osnova dozrijevanja je difuzija tako da se kod umjetnog dozrijevanja aluminijske legure zagrijavaju na temperaturu 100 do 200 °C kroz vremenski period u trajanju od pola sata do maksimalno nekoliko dana. Difuzija se ubrzava s povišenjem temperature te se umjetnim dozrijevanjem koje podrazumijeva držanje na povišenoj temperaturi ostvaruje veći porast čvrstoće i tvrdoće nego dozrijevanjem na sobnoj temperaturi.

Za uzorke u ovom radu, dozrijevanje je provedeno u laboratoriju za toplinsku obradu Fakulteta strojarstva i brodogradnje za tri različite temperature; 130 °C, 160 °C i 190 °C u istoj komornoj peći kao i za žarenje. Uzorci su homogenizirani i dozrijevani bez zaštitne atmosfere.

Trajanje dozrijevanja na svakoj temperaturi iznosi 1 h, 4 h i 10 h. Temperaturno-vremenski režimi dozrijevanja uzoraka prikazani su u tablici 5.

Tablica 5. Temperaturno-vremenski režimi dozrijevanja uzoraka

Uzorak	Temperatura dozrijevanja, °C	Vrijeme držanja, h	Uzorak	Temperatura dozrijevanja, °C	Vrijeme držanja, h
Uzorak D	130	1	Uzorak L	160	4
Uzorak Đ	130	1	Uzorak M	160	10
Uzorak E	130	4	Uzorak N	160	10
Uzorak F	130	4	Uzorak O	190	1
Uzorak G	130	10	Uzorak P	190	1
Uzorak H	130	10	Uzorak R	190	4
Uzorak I	160	1	Uzorak S	190	4
Uzorak J	160	1	Uzorak T	190	10
Uzorak K	160	4	Uzorak U	190	10

Za svaki režim dozrijevanja toplinski su obrađena po dva uzorka.

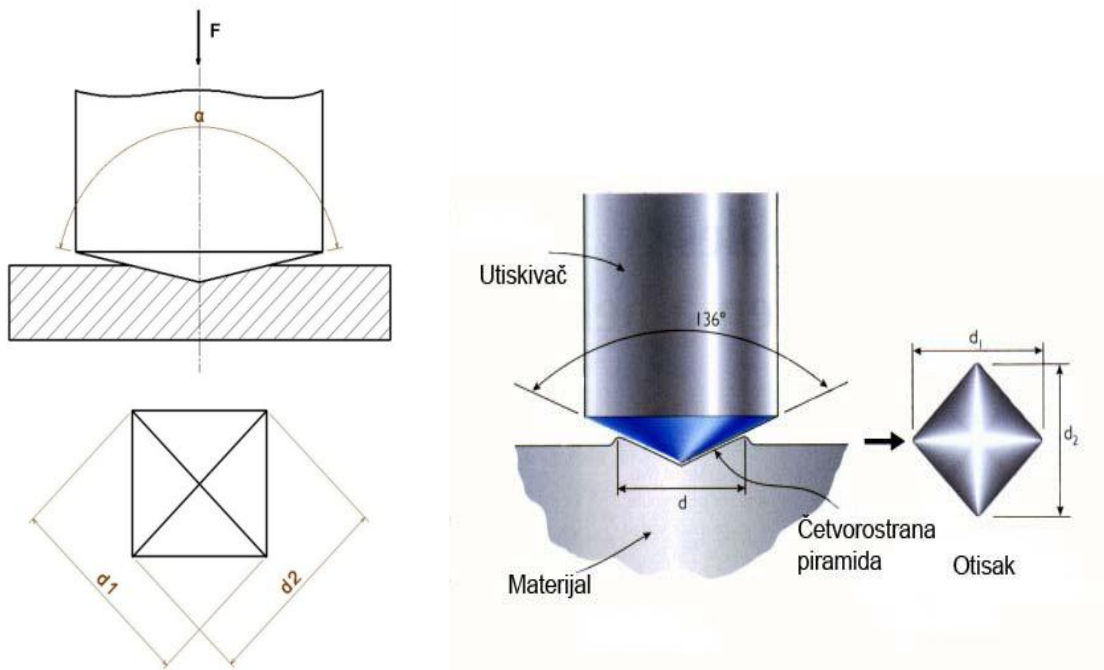
Nakon isteka trajanja dozrijevanja (1 h, 4 h, 10 h) uzorci su izvađeni iz peći i polako hlađeni na zraku.

7.5. Mjerenje tvrdoće

Mjerenje tvrdoće toplinski obrađenih uzoraka provedeno je po Vickersovoj metodi. Kod Vickersove metode mjerenje tvrdoće vrši se utiskivanjem dijamantnog indentora u obliku četverostrane piramide s vršnim kutem 136° . Utiskivanjem piramide na površini ostaje otisak oblika šuplje piramide, čija je baza kvadrat sa dijagonalama d_1 i d_2 , slika 22.

Ispitivanje je provedeno pri sobnoj temperaturi 23 ± 5 °C. Prednosti ove metode su mogućnost mjerenja u širokom rasponu ispitnih sila, selektivnost metode (veliki raspon između minimalne i maksimalno moguće tvrdoće), neovisnost tvrdoće o primijenjenoj sili utiskivanja i relativno mali otisak koji funkcionalno ne oštećuje izgled površine.

Minimalna debljina uzorka mora iznositi $1,5 \times dsr$. (dsr. – srednja vrijednost izmjerenih duljina dvije dijagonale otiska), što za ispitivane uzorke zadovoljava jer su debljine 10 mm. Prilikom mjerenja razmak između otisaka minimalno mora biti $3 \times dsr$ kako bi se izbjeglo mjerenje u već očvrnutom području.



Slika 22. Prikaz mjerenja Vickersove tvrdoće

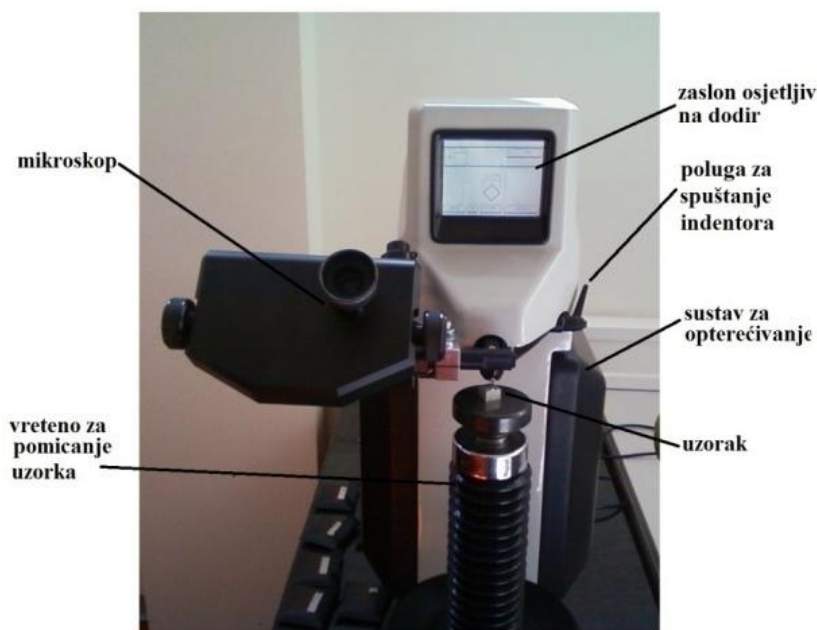
Kada se izmjere duljine dijagonala d_1 i d_2 , potrebno je izračunati njihovu srednju vrijednost i zajedno s vrijednošću opterećenja uvrstiti u donju jednadžbu prema kojoj se računa tvrdoća po Vickersu (HV):

$$HV = 0,1891 \frac{F}{d_{sr}^2}, \text{gdje je:}$$

F , [N] – ispitna sila;

d_{sr} , [mm] – srednja vrijednost izmjerenih duljina dvije dijagonale otiska.

Glavni dijelovi tvrdomjera su mehanizam za opterećivanje i mjerni mikroskop za mjerenje veličine otiska. Mjerenje tvrdoće toplinski obrađenih Al-uzoraka provedeno je na referentnom tvrdomjeru „Indentec“, slika 23.



Slika 23. Referentni tvrdomjer „Indentec“

Ispitni uzorak se postavlja na stol koji se može vertikalno pomicati s pomoću vretena i okretnog kola. Na zaslonu se odabere odgovarajuće opterećenje, koje za ova mjerenja iznosi 9,81 N [1 kp]. Nakon što se pomoću mikroskopa odabere mjesto pogodno za utiskivanje okretanjem poluge spušta se indenter i pritiskom na tipku S na zaslonu započinje postupak opterećivanja koji traje 10 s. Nakon provedenog opterećivanja i rasterećenja pomicanjem poluge indenter se vraća u početni položaj, a pomoću mjernog mikroskopa vrši se očitavanje veličine otiska. Mjerne linije dovode se na suprotne vrhove otiska tako da udaljenost između njih predstavlja duljinu dijagonale otiska. Kada su linije namještene, pritiskom na okidač na zaslonu se prikazuje veličina izmjerene dijagonale. Nakon toga se mjerni mikroskop zakreće za 90° i mjeri druga dijagonala. Vrijednosti obje dijagonale prikazuju se na zaslonu zajedno s pripadajućom vrijednosti tvrdoće. Osnovne karakteristike tvrdomjera „Indentec“ navedene su u tablici 6.

Tablica 6. Karakteristike tvrdomjera „Indentec“

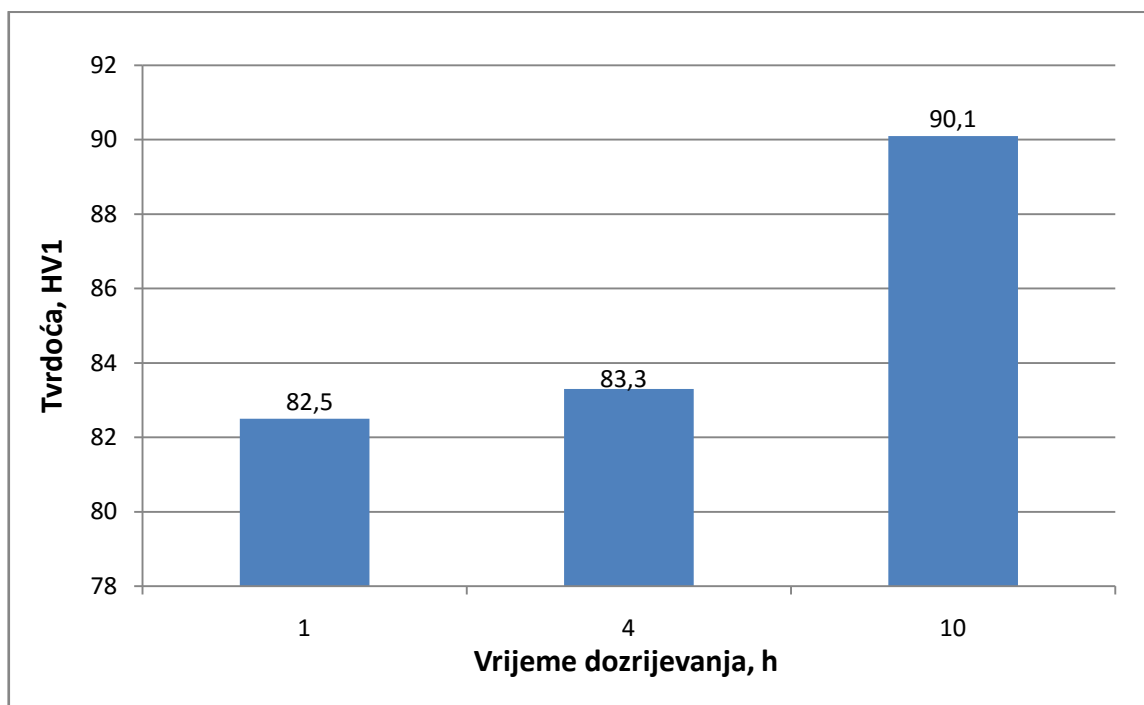
Proizvođač	Indentec hardness testing machines limited
Opterećenja	HV1; HV3; HV5; HV10; HV20; HV30; HV50
Metoda mjerenja	Digitalna, Vickers
Mjerna nesigurnost	± 1HV
Rezolucija	0,1 μm

Na svakom uzorku provedeno je 5 mjerenja tvrdoće čiji su rezultati navedeni u tablicama T1, T2, T3 i T4 u prilogu. U tablici 7. prikazane su srednje vrijednosti tvrdoće za svaki uzorak.

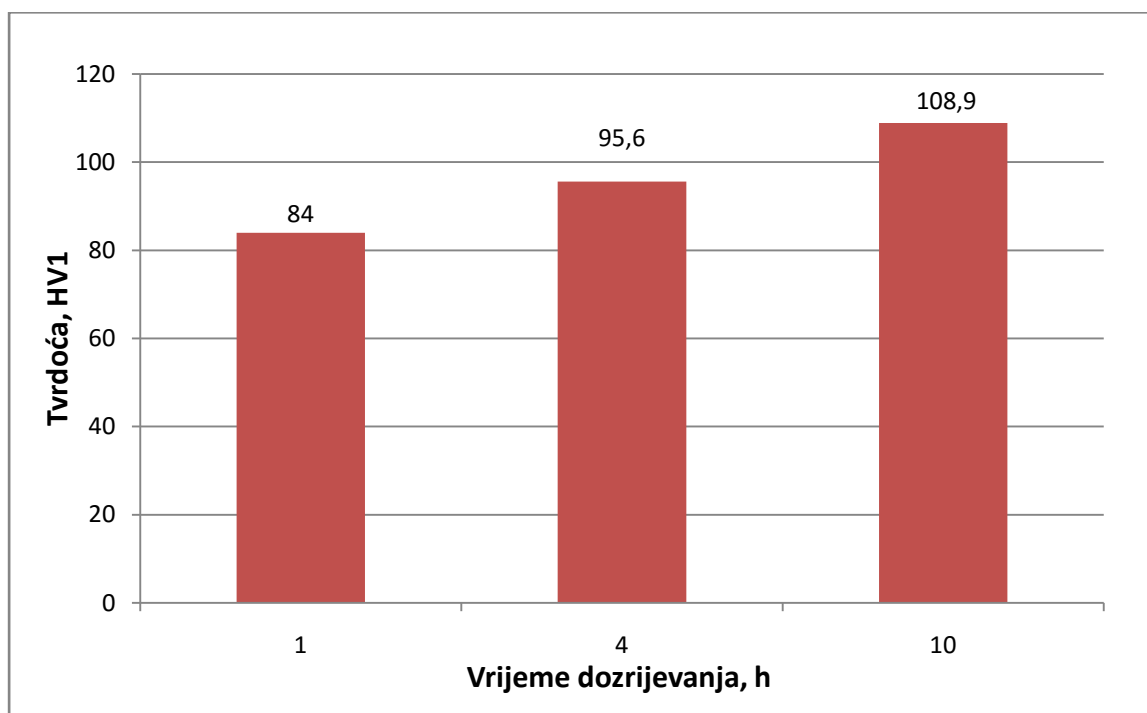
Tablica 7. Rezultati mjerenja tvrdoće

Uzorak	Toplinska obrada	Srednja vrijednost	Uzorak	Toplinska obrada	Srednja vrijednost
A	Polazno stanje	91,5	K	Rastvorno žareno i gašeno u vodi, dozrijevano 160°C/4h	93,8
B	Rastvorno žareno i hlađeno na zraku	66,2	L		97,4
C	Rastvorno žareno i gašeno	82,7	M	Rastvorno žareno i gašeno u vodi, dozrijevano 160°C/10h	108,6
D	Rastvorno žareno i gašeno u vodi,	79,7	N		109,1
Đ	dozrijevano 130°C/1h	85,3	O	Rastvorno žareno i gašeno u vodi, dozrijevano 190°C/1h	99
E	Rastvorno žareno i gašeno u vodi,	83,8	P		100,1
F	dozrijevano 130°C/4h	82,8	R	Rastvorno žareno i gašeno u vodi, dozrijevano 190°C/4h	112,4
G	Rastvorno žareno i gašeno u vodi,	89	S		112,6
H	dozrijevano 130°C/10h	91,2	T	Rastvorno žareno i gašeno u vodi, dozrijevano 190°C/10h	104,1
I	Rastvorno žareno i gašeno u vodi,	81,2	U		106,4
J	dozrijevano 160°C/1h	86,9			

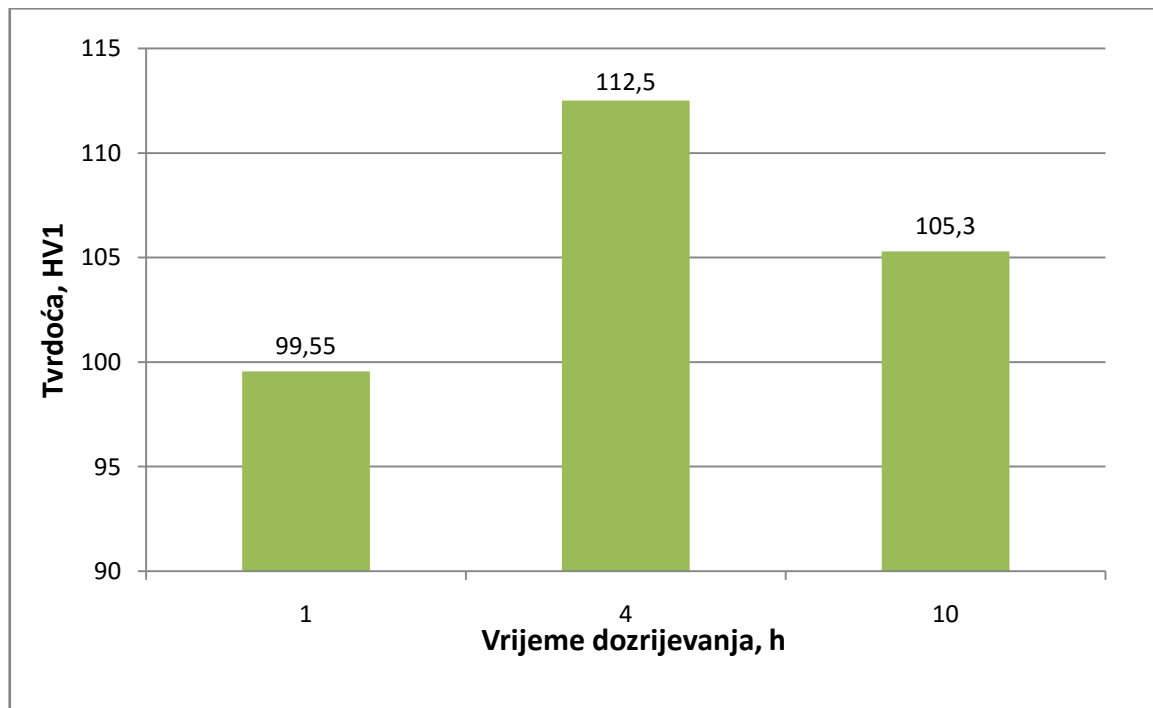
Na slikama 24-26 grafički su prikazane tvrdoće uzoraka u različitim temperaturno-vremenskim režimima dozrijevanja.



Slika 24. Prikaz tvrdoće uzoraka dozrijevanih 1, 4 i 10 h na 130 °C

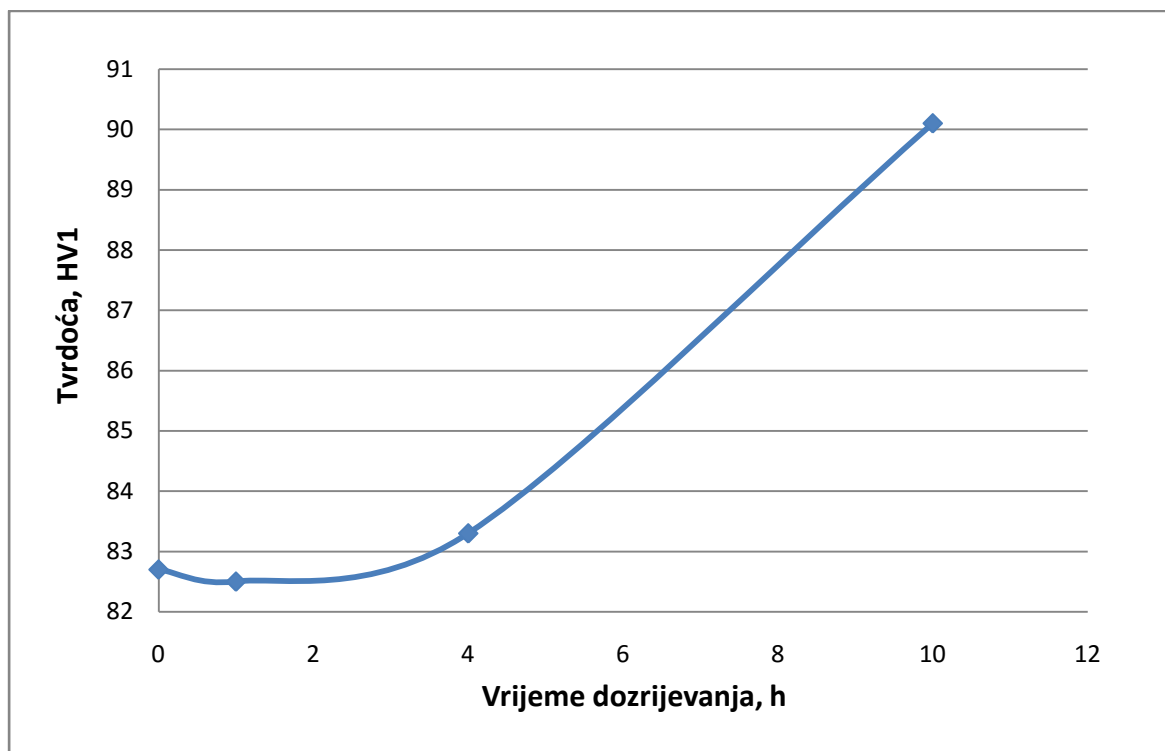


Slika 25. Prikaz tvrdoće uzoraka dozrijevanih 1, 4 i 10 h na 160 °C

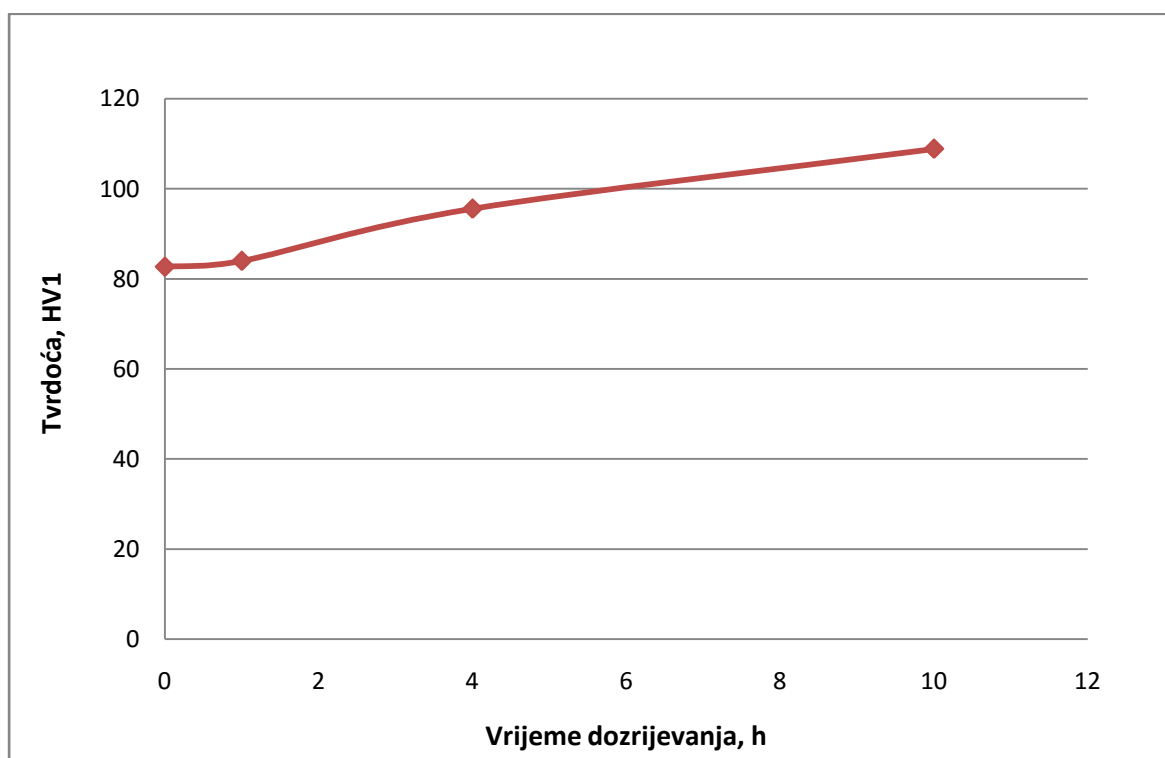


Slika 26. Prikaz tvrdoće uzoraka dozrijevanih 1, 4 i 10 h na 190 °C

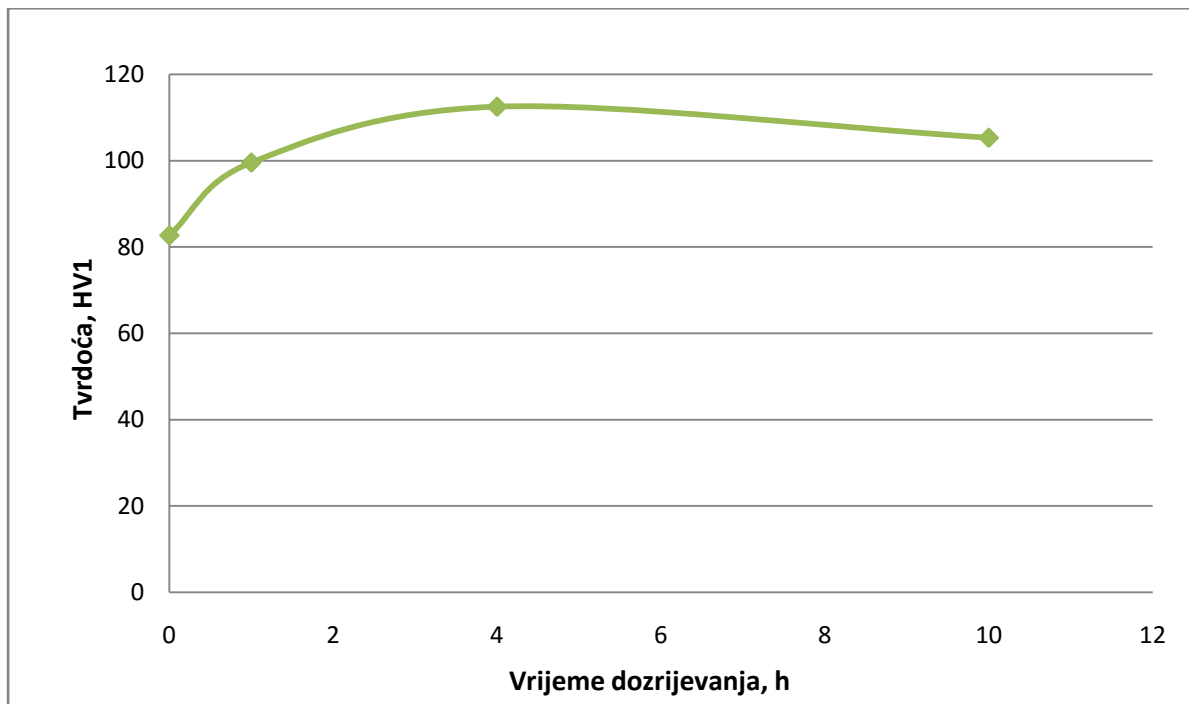
Ovisnost tvrdoće precipitacijski očvrstnutih uzoraka o vremenu dozrijevanja za različite temperature 130 °C, 160 °C i 190 °C prikazana je na slikama 27, 28 i 29.



Slika 27. Ovisnost tvrdoće o vremenu dozrijevanja za temperaturu 130 °C



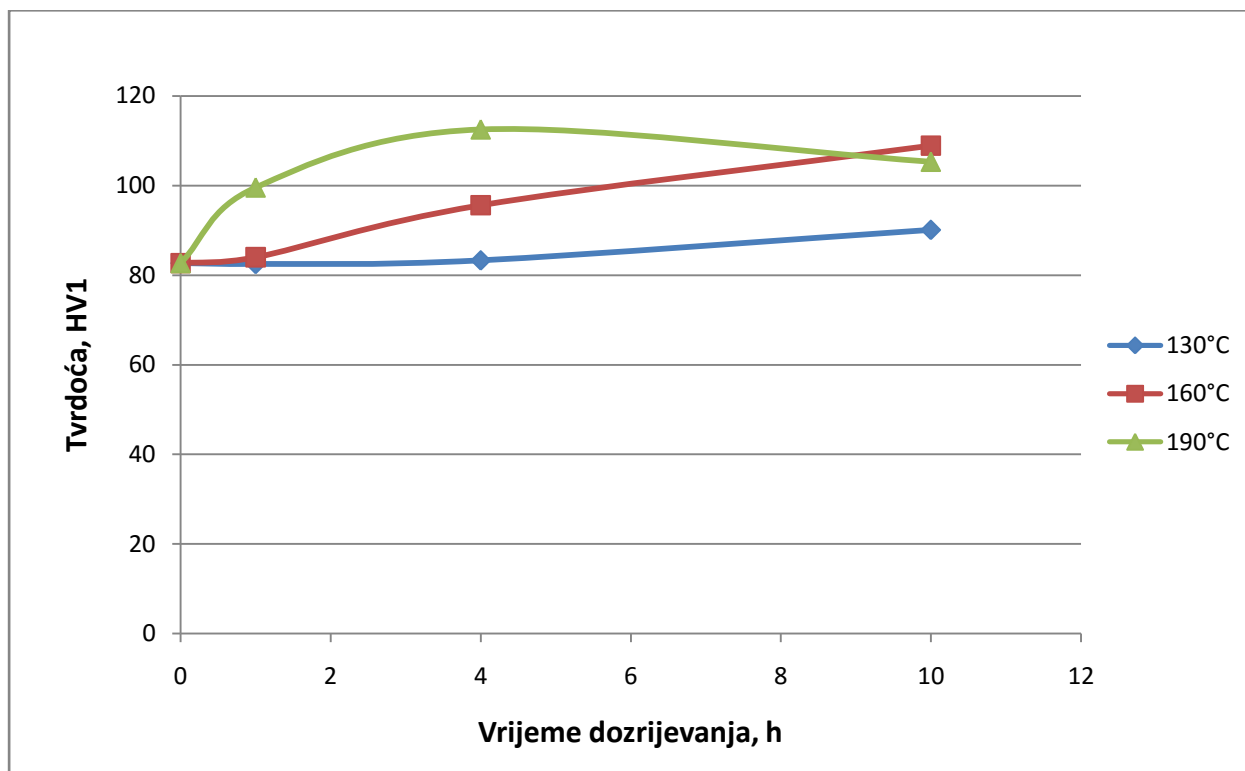
Slika 28. Ovisnost tvrdoće o vremenu dozrijevanja za temperaturu 160 °C



Slika 29. Ovisnost tvrdoće o vremenu dozrijevanja za temperaturu 190 °C

Kod dozrijevanja pri temperaturi 130 °C znatniji porast tvrdoće opaža se na uzorku koji je u peći držan 10 sati. Držanje uzoraka na 160 °C uzrokuje veći porast tvrdoće nego što je to na temperaturi 130 °C. Kod dozrijevanja pri temperaturi 190 °C najviša tvrdoća postignuta je nakon 4 sata i ta je tvrdoća ujedno i najviša za sve toplinski obrađene uzorke.

Na slici 30. prikazane su krivulje porasta tvrdoće za sve tri temperature dozrijevanja.



Slika 30. Ovisnost tvrdoće o temperaturi i vremenu dozrijevanja

8. ZAKLJUČAK

Precipitacijsko očvršćivanje kroz postupak rastvornog žarenja i umjetnog dozrijevanja rezultiralo je porastom tvrdoće ispitivane AlMgSi legure. Svi temperaturno-vremenski režimi dozrijevanja doveli su do porasta tvrdoće u odnosu na rastopno žareno i gašeno stanje. Ipak, može se primijetiti da je ovu leguru optimalno dozrijevati na temperaturi 190 °C u trajanju od 4 sata čime se postiže maksimalna tvrdoća od 112,5 HV. Porast tvrdoće nastaje uslijed izlučivanja sitnih jednoliko raspšenih precipitata unutar α kristala mješanca aluminija. Najvjerojatnije se radi o koherentnim ili polukoherentnim precipitatima intermetalnih faza aluminija i magnezija i/ili magnezija i silicija. Duljim držanjem na ovoj temperaturi dolazi do pada tvrdoće zbog pojave predozrijevanja. Uslijed visoke temperature i velike brzine difuzijskih procesa moguće je pretpostaviti da dolazi do vrlo brzog stvaranja nekoherentnih precipitata izdvojenih od matrice čime nestaje izvitoperenje kristalne rešetke i smanjuju se unutarnja naprezanja koja koče gibanje dislokacija pa tvrdoća i čvrstoća padaju. Stoga je potrebno strogo kontrolirati parametre toplinske obrade, posebno dozrijevanja, žele li se postići optimalne vrijednosti mehaničkih svojstava. Ovi parametri razlikuju se od legure do legure ovisno o kemijskom sastavu i prethodnoj obradi.

LITERATURA

- [1]. D. Ćorić, T. Filetin: *Materijali u zrakoplovstvu*, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Ivana Lučića 5, Zagreb, 2012.
- [2]. T. Filetin, F. Kovačiček, J. Indof: *Svojstva i primjena materijala*, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Ivana Lučića 5, Zagreb, 2009.
- [3]. http://www.academia.edu/11695623/Materijali_u_vazduhoplovstvu
- [4]. William D. Callister, Jr; *Materials Science and Engineering*, 5. izdanje, naklada John Wiley i Sons, Inc.
- [5]. <http://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=6650>
- [6]. <http://www.totalmateria.com/page.aspx?ID=CheckArticle&site=ktn&NM=96>
- [7]. http://www.wilsonsmetals.com/datasheets/Aluminium-Alloy_L168-T6511-2014A-Bar_23.aspx
- [8]. <http://www.aircraftmaterials.com/data/aluminium/2014a.html>
- [9]. <http://www.makeitfrom.com/material-properties/2014-T6-Aluminum/>
- [10]. <http://www.corrosionpedia.com/definition/65/alclad>
- [11]. Michael F. Ashby and David R. H. Jones; *Engineering materials 2*. Pergamon press 1992.

PRILOG

Tablica T1: Izmjerene vrijednosti tvrdoće uzoraka koji nisu dozrijevani

Uzorak	Toplinska obrada	Redni broj mjerjenja	d ₁ , mm	d ₂ , mm	HV1
A	Polazno stanje	1	0,1378	0,1485	90,4
		2	0,1412	0,1401	93,6
		3	0,1426	0,1395	93,1
		4	0,1467	0,1434	88
		5	0,1446	0,1385	92,4
		\bar{x}			91,5
B	Rastvorno žareno i hlađeno na zraku	1	0,1636	0,1656	68,4
		2	0,1664	0,1615	68,9
		3	0,1705	0,1717	63,3
		4	0,1724	0,1735	61,9
		5	0,1659	0,1626	68,6
		\bar{x}			66,2
C	Rastvorno žareno i gašeno	1	0,1553	0,1481	80,5
		2	0,1481	0,1481	84,5
		3	0,1473	0,1466	85,8
		4	0,1575	0,1473	79,8
		5	0,1502	0,1488	82,9
		\bar{x}			82,7

Tablica T2: Izmjerene vrijednosti tvrdoće uzoraka dozrijevanih na 130 °C

Uzorak	Toplinska obrada	Redni broj mjerenja	d ₁ , mm	d ₂ , mm	HV1	$\overline{HV1}$
D	Rastvorno žareno i hlađeno u vodi, dozrijevano na 130°C 1 h, hlađeno na zraku	1	0,1513	0,1513	81	82,5
		2	0,1524	0,1557	78	
		3	0,1516	0,1561	78,2	
		4	0,152	0,1535	79,4	
		5	0,157	0,1435	82	
		\bar{x}			79,7	
Đ	Rastvorno žareno i hlađeno u vodi, dozrijevano na 130°C 1 h, hlađeno na zraku	1	0,1471	0,1484	84,8	82,5
		2	0,1424	0,1475	88,1	
		3	0,1459	0,1484	85,5	
		4	0,1499	0,1464	84,4	
		5	0,1494	0,1478	83,9	
		\bar{x}			85,3	
E	Rastvorno žareno i hlađeno u vodi, dozrijevano na 130°C 4 h, hlađeno na zraku	1	0,1519	0,1467	83,1	83,3
		2	0,1528	0,1454	83,4	
		3	0,144	0,1455	88,4	
		4	0,1488	0,1488	83,7	
		5	0,1511	0,1526	80,3	
		\bar{x}			83,8	
F	Rastvorno žareno i hlađeno u vodi, dozrijevano na 130°C 4 h, hlađeno na zraku	1	0,1492	0,1502	82,7	82,8
		2	0,1514	0,1487	82,3	
		3	0,1485	0,1491	83,7	
		4	0,1499	0,1499	82,5	
		5	0,151	0,1485	82,6	
		\bar{x}			82,8	
G	Rastvorno žareno i hlađeno u vodi, dozrijevano na 130°C 9 h, hlađeno na zraku	1	0,1432	0,1438	90	90,1
		2	0,1465	0,1449	87,3	
		3	0,1401	0,1447	91,4	
		4	0,1469	0,145	86,9	
		5	0,1475	0,1406	89,3	
		\bar{x}			89	
H	Rastvorno žareno i hlađeno u vodi, dozrijevano na 130°C 9 h, hlađeno na zraku	1	0,142	0,1396	93,5	91,2
		2	0,1396	0,137	96,9	
		3	0,1491	0,1419	87,5	
		4	0,1426	0,143	90,9	
		5	0,1485	0,1432	87,2	
		\bar{x}			91,2	

Tablica T3: Izmjerene vrijednosti tvrdoće uzoraka dozrijevanih na 160 °C

Uzorak	Toplinska obrada	Redni broj mjerenja	d ₁ , mm	d ₂ , mm	HV1	$\overline{HV1}$
I	Rastvorno žareno i hlađeno u vodi, dozrijevano na 160°C 1 h, hlađeno na zraku	1	0,1479	0,1522	82,3	84
		2	0,1523	0,1544	78,8	
		3	0,1524	0,1435	84,6	
		4	0,1536	0,1462	82,5	
		5	0,1562	0,1524	77,8	
		\bar{x}			81,2	
J	Rastvorno žareno i hlađeno u vodi, dozrijevano na 160°C 1 h, hlađeno na zraku	1	0,1457	0,1474	86,2	84
		2	0,1503	0,1509	81,7	
		3	0,1454	0,1424	89,5	
		4	0,1446	0,1433	89,4	
		5	0,1456	0,145	87,8	
		\bar{x}			86,9	
K	Rastvorno žareno i hlađeno u vodi, dozrijevano na 160°C 4 h, hlađeno na zraku	1	0,1479	0,1408	88,9	95,6
		2	0,1354	0,1406	97,3	
		3	0,1466	0,1401	90,1	
		4	0,1421	0,1335	97,6	
		5	0,1445	0,1346	95,1	
		\bar{x}			93,8	
L	Rastvorno žareno i hlađeno u vodi, dozrijevano na 160°C 4 h, hlađeno na zraku	1	0,1487	0,14	88,9	95,6
		2	0,137	0,1311	103,1	
		3	0,1361	0,1314	103,5	
		4	0,145	0,1365	93,5	
		5	0,1394	0,1357	97,9	
		\bar{x}			97,4	
M	Rastvorno žareno i hlađeno u vodi, dozrijevano na 160°C 9 h, hlađeno na zraku	1	0,1307	0,1272	111,4	108,9
		2	0,1271	0,1367	106,5	
		3	0,1379	0,1292	103,8	
		4	0,1307	0,127	111,6	
		5	0,1302	0,1295	109,8	
		\bar{x}			108,6	
N	Rastvorno žareno i hlađeno u vodi, dozrijevano na 160°C 9 h, hlađeno na zraku	1	0,1292	0,1313	109,3	108,9
		2	0,1356	0,129	105,9	
		3	0,1342	0,1303	105,9	
		4	0,1394	0,1214	109	
		5	0,1296	0,1236	115,6	
		\bar{x}			109,1	

Tablica T4: Izmjerene vrijednosti tvrdoće uzoraka dozrijevanih na 190 °C

Uzorak	Toplinska obrada	Redni broj mjerenja	d ₁ , mm	d ₂ , mm	HV1	$\overline{HV1}$
O	Rastvorno žareno i hlađeno u vodi, dozrijevano na 190°C 1 h, hlađeno na zraku	1	0,1423	0,1356	95,9	99,6
		2	0,1425	0,1366	95,1	
		3	0,1358	0,1316	103,7	
		4	0,1338	0,1346	102,9	
		5	0,1362	0,14	97,2	
		\bar{x}			99	
P	Rastvorno žareno i hlađeno u vodi, dozrijevano na 190°C 1 h, hlađeno na zraku	1	0,1376	0,1325	101,5	99,6
		2	0,1365	0,135	100,5	
		3	0,1365	0,1368	99,2	
		4	0,1357	0,1348	101,2	
		5	0,1375	0,1375	98	
		\bar{x}			100,1	
R	Rastvorno žareno i hlađeno u vodi, dozrijevano na 130°C 4 h, hlađeno na zraku	1	0,1312	0,1308	108	112,5
		2	0,1285	0,127	113,5	
		3	0,1282	0,1291	111,9	
		4	0,1207	0,1276	120,2	
		5	0,1324	0,1292	108,3	
		\bar{x}			112,4	
S	Rastvorno žareno i hlađeno u vodi, dozrijevano na 190°C 4 h, hlađeno na zraku	1	0,13	0,1203	118,3	112,5
		2	0,1298	0,1253	113,8	
		3	0,1297	0,1285	111,2	
		4	0,1323	0,1276	109,7	
		5	0,1325	0,1269	110,2	
		\bar{x}			112,6	
T	Rastvorno žareno i hlađeno u vodi, dozrijevano na 190°C 9 h, hlađeno na zraku	1	0,1305	0,1378	102,9	105,3
		2	0,133	0,1361	102,3	
		3	0,138	0,1281	104,6	
		4	0,1328	0,1335	104,5	
		5	0,1325	0,1256	106,4	
		\bar{x}			104,1	
U	Rastvorno žareno i hlađeno u vodi, dozrijevano na 190°C 9 h, hlađeno na zraku	1	0,1324	0,1295	108	105,3
		2	0,1349	0,1388	98,9	
		3	0,1329	0,1324	105,3	
		4	0,132	0,1265	110,9	
		5	0,1283	0,1329	108,7	
		\bar{x}			106,4	

