

Usporedba mikrostrukture i mehaničkih svojstava ekstrudiranih aluminijskih legura iz serije 6000

Ćavar, Iva

Undergraduate thesis / Završni rad

2022

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:627427>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-15**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Iva Čavar

Zagreb, 2022.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentorica:

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

Student:

Iva Čavar

Zagreb, 2022.

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

Zahvaljujem se svojoj mentorici prof. dr. sc. Veri Rede na pruženoj pomoći, savjetima i izdvojenom vremenu pri izradi ovog rada.

Hvala tvrtki Feal d.o.o na doniranim materijalima za ispitivanje, a posebno djelatnicima Boži Goluži i Anti Ivankoviću na susretljivosti i pomoći pri ispitivanju.

Veliko hvala kolegici Kati Soldo na svakom pruženom savjetu tijekom studija.

Iva Čavar



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



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

Sveučilište u Zagrebu	
Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 - 04 / 22 - 6 / 1	
Ur.broj: 15 - 1703 - 21 -	

ZAVRŠNI ZADATAK

Studentica: **Iva Čavar**

JMBAG: 0035219098

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Usporedba mikrostrukture i mehaničkih svojstava ekstrudiranih aluminijevih legura iz serije 6000**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Comparison microstructure and mechanical properties of extruded 6000 series aluminium alloys**

Opis zadatka:

Aluminijeve legure imaju niz prednosti u odnosu na druge konstrukcijske materijale. Njihova svojstva mogu varirati u širokom rasponu ovisno o kemijskom sastavu i postignutoj mikrostrukтури. Imaju vrlo povoljan omjer čvrstoće i gustoće, lako se obrađuju različitim postupcima deformiranja, imaju dobru rezljivost i izvrsnu korozivnu postojanost. Nekima od njih može se dodatno povisiti čvrstoća odgovarajućim postupcima toplinske obrade.

U eksperimentalnom dijelu rada potrebno je opisati postupak ekstrudiranja četiriju Al- legura iz serije 6000, analizirati njihov kemijski sastav i mikrostrukтуру, izmjeriti tvrdoću te provesti statičko vlačno ispitivanje. Dobivene rezultate potrebno je analizirati i na temelju analize donijeti odgovarajuće zaključke.

Zadatak zadan:

30. 11. 2021.

Datum predaje rada:

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

Predviđeni datumi obrane:

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

Zadatak zadala:

Prof. dr. sc. Vera Rede

Rede

Predsjednik Povjerenstva:

Branko Bauer
 Prof. dr. sc. Branko Bauer

SADRŽAJ

SADRŽAJ.....	I
POPIS SLIKA.....	III
POPIS TABLICA.....	V
POPIS OZNAKA.....	VI
SAŽETAK.....	VII
SUMMARY.....	VIII
1. UVOD.....	1
2. ALUMINIJ.....	2
2.1. Proizvodnja aluminija.....	2
2.1.1. Boksit.....	2
2.1.2. Postupci za proizvodnju glinice.....	3
2.1.3. Bayerov postupak za proizvodnju glinice.....	4
2.1.4. Elektrolitička redukcija glinice.....	5
2.2. Opća svojstva aluminija.....	6
2.2.1. Gustoća aluminija.....	6
2.2.2. Čvrstoća.....	7
2.2.3. Otpornost na koroziju.....	7
2.2.4. Električna i toplinska vodljivost aluminija.....	8
2.2.5. Strojna obradljivost.....	8
2.2.6. Reflektivnost.....	9
2.2.7. Recikliranje.....	9
3. ALUMINIJEVE LEGURE.....	11
3.1. Podjela aluminijevih legura.....	11
3.1.1. Podjela prema tehnološkoj preradi.....	11
3.1.2. Podjela prema kemijskom sastavu.....	14
3.1.3. Podjela prema mogućnosti toplinske obrade.....	15
3.2. Legure serije 6000.....	16
3.2.1. Legura 6060.....	16
3.2.2. Legura 6063.....	16
3.2.3. Legura 6005A.....	17
3.2.4. Legura 6082.....	17
4. EKSTRUDIRANJE.....	18
4.1. Postupak ekstrudiranja.....	18
4.1.1. Direktno i indirektno ekstrudiranje.....	19
4.1.2. Metoda ekstrudiranja trupac na trupac.....	20
4.2. Glavni dijelovi preše.....	21
5. EKSPERIMENTALNI DIO.....	23
5.1. Cilj rada.....	23
5.2. Provođenje ispitivanja i materijal za ispitivanje.....	23
5.3. Opis postupka ekstruzije legura.....	23
5.4. Analiza kemijskog sastava.....	29

5.5. Analiza mikrostrukture.....	31
5.6. Mjerenje tvrdoće po Brinellu	40
5.1. Mjerenje mikrotvrdoće HV0,2	41
5.2. Statičko vlačno ispitivanje	43
5.3. Osvrt na rezultate ispitivanja.....	50
5.3.1. Osvrt na analizu kemijskog sastava	50
5.3.2. Osvrt na analizu mikrostrukture	50
5.3.3. Osvrt na rezultate mjerenja tvrdoće	52
5.3.4. Osvrt na rezultate statičkog vlačnog ispitivanja.....	53
6. ZAKLJUČAK	55
7. LITERATURA.....	56

POPIS SLIKA

Slika 1. Sastav boksita[7]	3
Slika 2. Shematski prikaz Bayerovog postupka [8]	5
Slika 3. Elektroliza aluminijske rane [11]	5
Slika 4. Primjena aluminijske rane u transportu[13]	6
Slika 5. Oplata trupa broda izrađena od aluminijske rane [14]	7
Slika 6. Aluminijski vodiči[15].....	8
Slika 7. Primjena aluminijske rane za solarne panele i vjetrenjače[15]	8
Slika 8. Reflektivnost aluminijske rane [16]	9
Slika 9. Aluminij namijenjen za recikliranje.....	10
Slika 10. Osnovni princip isprešavanja[25]	18
Slika 11. Direktno i indirektno ekstrudiranje [23]	20
Slika 12. Metoda trupaca na trupac[25]	21
Slika 13. Radijalni poredak otvora alata[24].....	22
Slika 14. Ravni poredak otvora alata[25].....	22
Slika 15. Horizontalna hidraulička preša	24
Slika 16. Trupci od aluminijske rane.....	24
Slika 17. Peć za zagrijavanje trupaca (vanjski izgled).....	25
Slika 18. Unutrašnjost peći.....	25
Slika 19. Odsijecanje trupca aluminijske rane.....	25
Slika 20. Konačni oblik profila na izlazu alata	26
Slika 21. Hlađenje profila.....	27
Slika 22. Profili u korpama za dozrijevanje ispred peći.....	28
Slika 23. Uzorci na kojima je analiziran kemijski sastav	29
Slika 24. Uređaj GDS 850A LECO	30
Slika 25. Uzorci za analizu mikrostrukture	31
Slika 26. Uzorci za analizu mikrostrukture zaliveni u polimernu masu	32
Slika 27. Olympus GX51	33
Slika 28. Mikrostruktura legure 6005A snimljena pri povećanju 500× u poliranom stanju....	33
Slika 29. Mikrostruktura legure 6005A snimljena pri povećanju 100× u nagriženom stanju .	34
Slika 30. Mikrostruktura legure 6005A snimljena pri povećanju 500× u nagriženom stanju .	34
Slika 31.. Mikrostruktura legure 6082 snimljena pri povećanju 500× u poliranom stanju.....	35
Slika 32. Mikrostruktura legure 6082 snimljena pri povećanju 100× u nagriženom stanju	35
Slika 33. Mikrostruktura legure 6082 snimljena pri povećanju 500× u nagriženom stanju	36
Slika 34. Mikrostruktura legure 6063 snimljena pri povećanju 500× u poliranom stanju.....	36
Slika 35. Mikrostruktura legure 6063 snimljena pri povećanju 100× u nagriženom stanju	37
Slika 36. Mikrostruktura legure 6063 snimljena pri povećanju 500× u nagriženom stanju	37
Slika 37. Mikrostruktura legure 6060 snimljena pri povećanju 500× u poliranom stanju.....	38
Slika 38. Mikrostruktura legure 6060 snimljena pri povećanju 100× u nagriženom stanju	38
Slika 39. Mikrostruktura legure 6060 snimljena pri povećanju 500× u nagriženom stanju	39
Slika 40. Tvrdomjer Reicherter BL 1-1 (A) i mjerenje tvrdoće na uzorku (B).....	40
Slika 41. Mikrotvrdomjer PMT-3	41
Slika 42. Mjerenje mikrotvrdoće po Vickersu HV0,2	42
Slika 43. Kidalica Hegewald&Peschke Inspekt 100.....	43
Slika 44. Mjerenje poprečnog presjeka ispitnog uzorka	43
Slika 45. Ispitni uzorci legure 6005A.....	44
Slika 46. Ispitni uzorci legure 6082	44
Slika 47. Ispitni uzorci legure 6063	44

Slika 48. Ispitni uzorci legure 6060	44
Slika 49. Epruveta učvršćena na kidalici prije kidanja (A) i nakon kidanja (B).....	45
Slika 50. Dijagram naprezanje-istezanje legure 6005A	46
Slika 51. Dijagram naprezanje-istezanje legure 6082	47
Slika 52. Dijagram naprezanje-istezanje legure 6063	48
Slika 53. Dijagram naprezanje-istezanje legure 6060	49
Slika 54. Srednje vrijednosti izmjerene mikrotvrdoće HV0,2 analiziranih legura	52
Slika 55. Srednje vrijednosti izmjerene makrotvrdoće HB analiziranih legura.....	52
Slika 56. Usporedba srednjih vrijednosti granice razvlačenja i vlačne čvrstoće dobivenih statičkim vlačnim ispitivanjem.....	53
Slika 57. Usporedba srednjih vrijednosti izmjerene istežljivosti	54

POPIS TABLICA

Tablica 1. Svojstva aluminijska[12]	6
Tablica 2. Svojstva lijevanih aluminijskih legura[18]	12
Tablica 3. Podjela i osnovne značajke gnječanih aluminijskih legura[18]	13
Tablica 4. Sustav označavanja gnječanih Al legura[3]	14
Tablica 5. Utjecaj legiranih elemenata na svojstva aluminijska[19]	15
Tablica 6. Kemijski sastav legure 6060[20]	16
Tablica 7. Kemijski sastav legure 6063[20]	17
Tablica 8. Kemijski sastav legure 6005[4]	17
Tablica 9. Kemijski sastav legure 6082[4]	17
Tablica 10. Rezultati analize kemijskog sastava	30
Tablica 11. Rezultati kvantitativne analize mikrostrukture	39
Tablica 12. Rezultati mjerenja tvrdoće HB aluminijskih legura	40
Tablica 13. Rezultati mjerenja mikrotvrdoće HV0,2	42
Tablica 14. Rezultati statičkog vlačnog ispitivanja legure 6005A	46
Tablica 15. Rezultati statičkog vlačnog ispitivanja legure 6082	47
Tablica 16. Rezultati statičkog vlačnog ispitivanja legure 6063	48
Tablica 17. Rezultati statičkog vlačnog ispitivanja legure 6060	49

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
HB		Tvrdoća po Brinellu
HV0,2		Tvrdoća po Vickersu
S_0	mm^2	Početna površina presjeka epruvete
$R_{p0,2}$	N/mm^2	Konvencionalna granica razvlačenja
F_{\max}	N	Maksimalna sila
R_m	N/mm^2	Vlačna čvrstoća
A	%	Istezljivost

SAŽETAK

U završnom radu provedena je usporedba mikrostrukture i mehaničkih svojstava četiriju ekstrudiranih aluminijskih legura s magnezijem i silicijem, iz serije 6000. Navedene legure imaju vrlo sličan kemijski sastav, a pojedinačni maseni udjeli magnezija i silicija su ispod 1%. Mikrostrukture svih legura sastoje se uglavnom od kristala mješanaca te sitnih homogeno raspoređenih precipitata intermetalne faze Mg_2Si . Legure koje su sporije hladene imaju viši volumni udio i homogeniji raspored precipitata.

Vrijednosti mikrotvrdoće analiziranih legura su u rasponu od 60 HV_{0,2} do 76 HV_{0,2}, a više vrijednosti izmjerene su kod sporije hladjenih legura. Vrijednosti makrotvrdoće kreću se od 73 HB do 95 HB, a više vrijednosti izmjerene su kod brže hladjenih legura.

Više vrijednosti granice razvlačenja i više vrijednosti vlačne čvrstoće te niže vrijednosti istežljivosti izmjerene su kod legura koje su brže hladene. Vrijednosti granice razvlačenja su u rasponu od 192 do 245 N/mm², vrijednosti vlačne čvrstoće su od 214 do 260 N/mm², a istežljivosti od 5,4 do 7,6 %.

Rasipanja rezultata svih provedenih ispitivanja su vrlo mala.

Ključne riječi: aluminijske legure, ekstruzija, mikrostruktura, mehanička svojstva

SUMMARY

This project compares the microstructure and mechanical properties of four extruded aluminium alloys with magnesium and silicon, from the 6000 series. These alloys have similar chemical compositions and the individual mass fractions of magnesium and silicon are less than 1%.

The microstructure of all alloys consists mainly of mongrel crystals and small homogeneously distributed precipitates of the intermetallic phase Mg_2Si . Slower cooled alloys show a higher volume fraction and a more homogeneous distribution of precipitates.

The microhardness of the alloys investigated ranged from 60 HV0.2 to 76 HV0.2 with higher values measured for slower-cooled alloys. The values for macro hardness ranged from 73 HB to 95 HB, with higher values measured for faster cooled alloys.

Higher values of yield strength and higher values of tensile strength and lower values of elongation were measured for alloys that were cooled faster. Yield strength values ranged from 192 to 245 N/mm^2 , tensile strength values ranged from 214 to 260 N/mm^2 and elongation values ranged from 5.4 to 7.6 %.

The discrepancies between the results of all the tests carried out are very small.

Key words: aluminium alloys, extrusion, microstructure, mechanical properties

1. UVOD

Aluminij pripada skupini lakih obojenih metala. Zbog svojih povoljnih svojstava često se koristi kao inženjerski materijal. Kao najvažnija svojstva aluminija ističu se: niska gustoća, dobra obradivost, široki raspon fizikalnih i mehaničkih svojstava, recikličnost i korozijska postojanost. Nelegirani aluminij uglavnom se koristi zbog dobre korozijske postojanosti, lijepog izgleda i niske gustoće. Za izvrsnu otpornost na atmosfersku koroziju zaslužan je gusti nepropusni oksidni sloj na površini metala. Aluminij nije otporan na tvari koje razaraju oksidni film, kao što su lužine i sl. Zbog svoje kubične plošno centrirane rešetke (FCC) aluminij i njegove legure su izvrsno oblikovljivi deformiranjem u toplom i hladnom stanju, valjanjem i prešanjem.

Budući da je nelegirani aluminij relativno mekan i ima nisku čvrstoću, za inženjersku primjenu važnije su aluminijeve legure. Legirni elementi kao i nečistoće, pojedinačno i u sinergiji s drugima, mijenjaju svojstva i karakteristike čistog metala. Glavni cilj legiranja je poboljšavanje mehaničkih svojstava, posebno čvrstoće, tvrdoće i duktilnosti. Postoje dva načina očvrnuća aluminijevih legura, a to su deformiranje u hladnom stanju i precipitacijsko očvrnuće. Kod precipitacijski očvrstivih aluminijevih legura osnovni legirani elementi su magnezij, silicij, bakar i cink. Precipitacijskim očvrnućem povisuje se čvrstoća i tvrdoća prethodno gnječanih legura.

Zbog velikog utroška energije prilikom proizvodnje primarnog aluminija, nastoji se u što većoj mjeri iskoristiti materijal koji je prethodno bio u uporabi. Pretaljivanjem otpadnog materijala kao što su ostatci od primarne proizvodnje, strugotina od obrade i slično, dobiva se sekundarni aluminij.

Aluminij i njegove legure imaju široko područje primjene, pa se tako koriste u građevinarstvu, prehrambenoj industriji, transportu, bijeloj tehnici, za izradu ambalaže i sl. Najčešća primjena sekundarnog aluminija je za izradu odljevaka, a rjeđe se koristi kada se od materijala zahtijevaju dobra korozijska postojanost i električna vodljivost.[1,2]

Al-Mg-Si legure pripadaju skupini precipitacijski očvrstivih legura, te zbog svojih mehaničkih i ekonomskih karakteristika ubrajaju u najčešće primjenjivane aluminijeve legure za ekstrudiranje. Postupkom ekstruzije ovih aluminijevih legura moguće je dobiti višenamjenske, visokokvalitetne industrijske proizvode kao što su profili raznih namjena, solarni paneli, dijelovi automobila, rasvjetni stupovi itd.

2. ALUMINIJ

Aluminij je metal koji je poslije kisika i silicija najrasprostranjeniji element u Zemljinoj kori, gdje ga ima oko 8%. Srebrno-bijele je boje i pripada skupini lakih metala zbog svoje niske gustoće. Aluminij se u prirodi ne nalazi kao metal, već kao oksid pomiješan s oksidima željeza, vanadija, kisika, titanija itd. Ideje o mogućnosti izoliranja elementa aluminija počele su se javljati početkom 19. stoljeća. Otkriće aluminija se pripisuje Humphreyu Davyu. On je počeo koristiti naziv aluminij 1809. godine. Elektrolizom rastaljenog aluminija dobio je leguru aluminija i željeza pri čemu je koristio željeznu katodu. Godine 1827. njemački kemičar Friedrich Wöhler uspio je dobiti vrlo čist metal bez značajnijeg udjela primjesa. Tek tada su određena svojstva čistog aluminija, a među njima posebice je bila zanimljiva niska gustoća koja je najviše utjecala na širu primjenu aluminija. Danas je aluminij nakon čelika najprimjenjivaniji metal na svijetu, iako je u upotrebi tek nešto više od jednog stoljeća. [3–5]

2.1. Proizvodnja aluminija

Proizvodnja aluminija temelji se na dobivanju čistog aluminijevog oksida ili glinice te naknadnim postupkom elektrolize rastaljene glinice čime se dobije primarni aluminij.[6]

Za dobivanje glinice, odnosno aluminija, potrebna je prirodna sirovina koja zadovoljava sljedeće uvjete:

- a) visok sadržaj aluminijevog oksida kemijske formule Al_2O_3 koji omogućuje preradu sirovine po prihvatljivoj cijeni
- b) aluminijev oksid mora biti prisutan u obliku u kojem je moguća prerada glinice po prihvatljivoj cijeni
- c) nalazišta prirodne sirovine trebaju biti dovoljno velika.

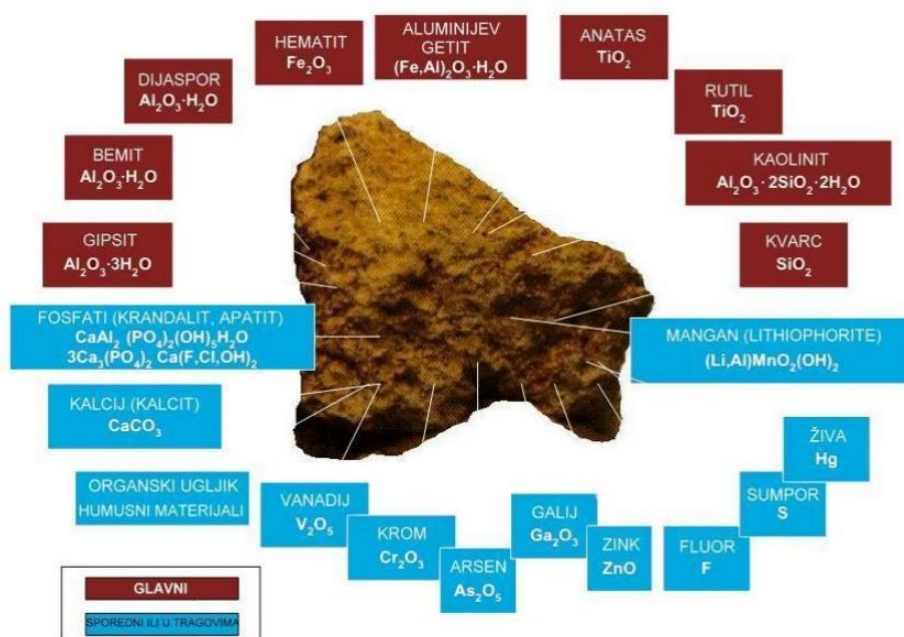
S obzirom na navedeno, aluminijske rude poredane po ovim zahtjevima su: boksiti, nefelini, aluniti, gline i kaolini.

2.1.1. Boksit

Boksit je najvažnija ruda aluminija iz koje danas potječe gotovo cijela svjetska proizvodnja glinice i aluminija. Boksit je složena sirovina čiji se kemijski sastav sastoji od više komponenata. Boksiti gotovo uvijek sadrže organske supstance te određene količine sumpora. Osnovni minerali u sastavu boksita su minerali aluminija, silicija, željeza, kalcija, titanija i magnezija. Osim osnovnih minerala, boksit u malim količinama sadrži i minerale drugih

elementa poput natrija, kalija, fosfora, vanadija, bakra, mangana i drugih. Fizikalna svojstva boksita ovise upravo o njegovom mineraloškom sastavu. Tvrdća boksita ovisi o obliku u kojem se nalazi aluminijev oksid i dosta je slična tvrdoći osnovnog minerala.

Kvaliteta boksita za proizvodnju glinice određuje se udjelom aluminijevog oksida (Al_2O_3) i silicijevog dioksida (SiO_2). Što je udio Al_2O_3 veći, a udio SiO_2 manji, boksit je kvalitetniji i obrnuto. Aluminiij je u boksitu prisutan u obliku aluminijskih hidroksidnih minerala: gipsita, bemita i dijaspora, slika 1.



Slika 1. Sastav boksita[7]

2.1.2. Postupci za proizvodnju glinice

S obzirom na značaj aluminiija, prisustvo različitih oblika aluminijevih sirovina i višekomponentni sadržaj u njima, rezultirali su postojanjem većeg broja razvijenih postupaka za proizvodnju glinice. Ipak danas je u industrijskoj primjeni manji broj tih postupaka.

U industrijske ili poluindustrijske razvijene postupke za proizvodnju glinice ubrajamo:

1. Bazni (alkalni) postupci
 - a) hidrometalurški Bayerov postupak
 - b) suhi ili sinter postupak
2. Kombinirani postupci
3. Kiseli postupci
4. Elektrokemijski postupci

Bazni postupci imaju najveći značaj i najširu primjenu za industrijsku proizvodnju dobivanja glinice. Čak 95% cijeloukupne količine glinice u svijetu proizvedeno je baznim postupcima.

Osnova baznih postupaka predstavlja tretiranje polazne sirovine boksita natrijevim bazama ($NaOH$ ili Na_2CO_3) s ciljem prevođenja aluminija iz aluminijevog oksida u natrijev aluminat. Zatim se aluminatna otopina odvaja od crvenog mulja i dolazi do njezinog razlaganja uz izdvajanje aluminijevog hidroksida i regeneraciju natrijevog hidroksida. Zatim se aluminijev hidroksid prevodi u bezvodnu glinicu, dok se otopina s bazom koja se regenerirala vraća u proces. Postoji nekoliko razlika između Bayerovog i sinter postupka, a kao glavna ističe se način prevođenja aluminijevog oksida iz polazne sirovine u aluminatnu otopinu. Kombinirani postupci predstavljaju kombinaciju Bayerovog i sinter postupka. Njihov cilj je prerada niskokvalitetnih boksita i smanjenje potrošnje baze.

Pri kiselim postupcima sirovina se izlužuje otopinama mineralnih kiselina tijekom kojih se glinica prevodi u otopinu soli odgovarajuće kiseline. Nakon pročišćavanja otopine provodi se postupak taloženja odgovarajuće soli. Toplinskim razlaganjem odgovarajuće soli omogućuje se dobivanje bezvodne glinice i regeneracija kiselina.

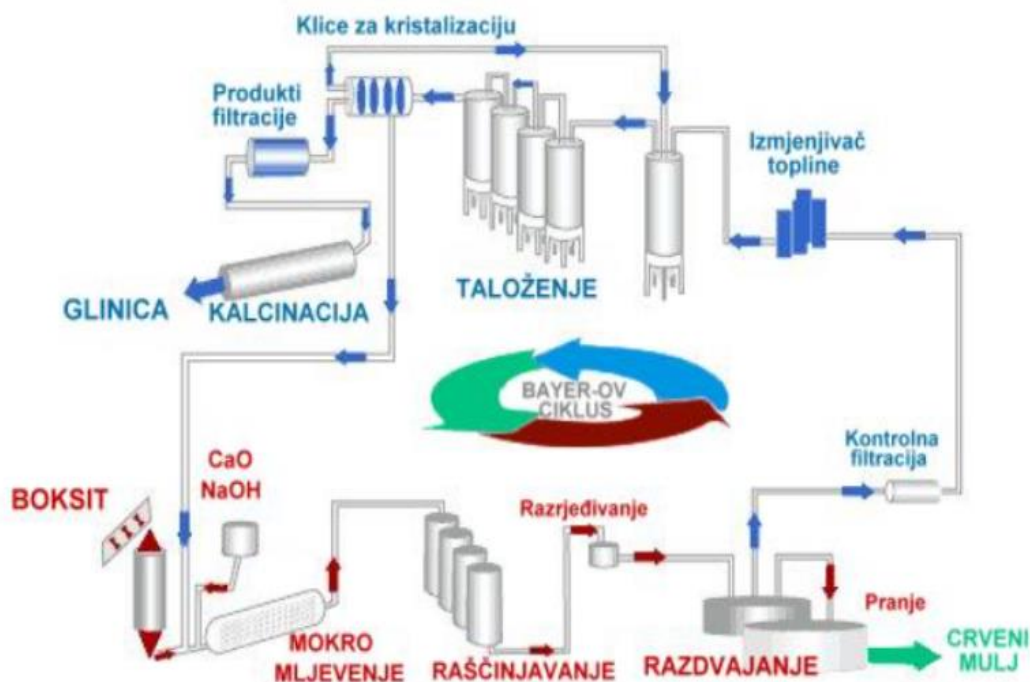
Elektrokemijski postupci ili postupci redukcijskog taljenja temelje se na taljenju sirovine zajedno s ugljenom. Pri tome se drugi metali reduciraju do elementarnog oblika, a aluminijev oksid se prevodi u tekuću glinicu. [8]

2.1.3. Bayerov postupak za proizvodnju glinice

Hidrometalurški Bayerov postupak danas je osnovni i dominirajući postupak za proizvodnju glinice. Njegovom primjenom proizvodi se 90% glinice u svijetu. Bayerov postupak je relativno jednostavan, ima najvišu ekonomičnost i osigurava proizvodnju glinice visoke kvalitete. Razradio ga je kemičar Carl Josef Bayer, po kome je i dobio ime. Bayerov postupak može se podijeliti u četiri koraka, a to su:

1. Proces raščinjavanja – u ovom koraku ruda boksita se drobi, melje i zagrijava s natrijevim hidroksidom na temperaturama od $150^{\circ}C$ do $250^{\circ}C$. Raščinjavanje se provodi u autoklavama i traje nekoliko sati (oko 8 sati). Uvjeti unutar autoklava su postavljeni u skladu sa svojstvima boksita.
2. Proces filtracije ili razdvajanja – u ovom koraku dolazi do uklanjanja nečistoća. Od svih komponenata prisutnih u boksitu, otapaju se jedino glinica i silicij. Čvrste tvari koje nisu otopljene talože se na dnu stvarajući crveni mulj. On se s dna odvodi u niz posuda za ispiranje gdje se višestruko ispiru vodom od zaostale natrijeve lužine i nakon toga se deponira na odlagalište.
3. Proces taloženja – u ovom koraku otopina se hladi u izmjenjivačima topline pri čemu se istovremeno zagrijava povratna otopina prije uparavanja. Nakon toga se razrjeđuje s vodom iz faze ispiranja crvenog mulja i zatim šalje na razlaganje s ciljem dobivanja krutog aluminijevog hidroksida. Prije razlaganja otopina se miješa s $Al(OH)_3$, čije čestice služe kao klice za kristalizaciju i na toj osnovi ubrzavaju proces. Razlaganje se izvodi laganim miješanjem i hlađenjem otopine.
4. Proces kalcinacije – završna faza u tehnologiji proizvodnje glinice po Bayerovom postupku, ali i po bilo kojem drugom postupku za proizvodnju glinice. Proces kalcinacije aluminijevog hidroksida provodi se na povišenim temperaturama u cilju dobivanja nehigroskopskog oksida aluminija koji je pogodan za elektrolitičko dobivanje aluminija.[9,10]

Slika 2 prikazuje shemu Bayerovog postupka za proizvodnju glinice.

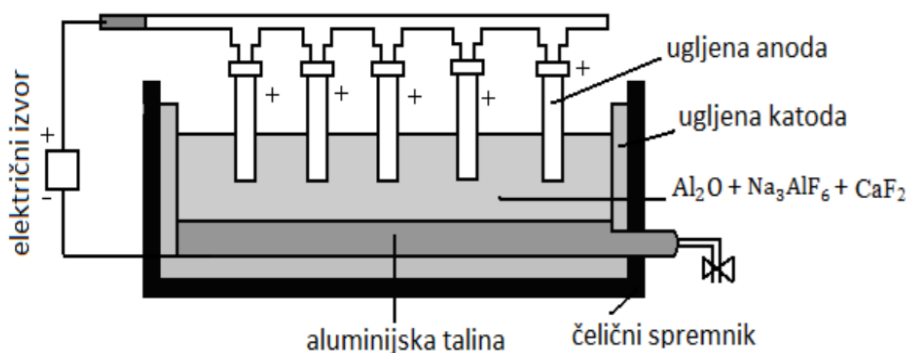


Slika 2. Shematski prikaz Bayerovog postupka [8]

2.1.4. Elektrolitička redukcija glinice

Završni postupak dobivanja metalnog aluminija je elektrolitička redukcija glinice, odnosno aluminijevog oksida u kriolitu Na_3AlF_6 . Elektroliza se provodi na $950\text{ }^{\circ}\text{C}$ zbog kriolita koji snižava temperaturu taljenja glinice. Postupak se naziva elektroliza u rastaljenom stanju ili elektroliza u talini, te se provodi na katodama koje su uglavnom od ugljena. Jakost struje prilikom postupka elektrolize je 150000 A , a napon iznosi 5 V . Na katodi se izlučuje aluminij koji pada na dno kupke, a ugljični dioksid se izlučuje na anodi. Aluminij je kriolitom zaštićen od oksidacije. Dobiveni aluminij potrebno je držati na visokim temperaturama u trajanju od nekoliko sati da bi iz njega nestali elementi kao što su cink, titanij, bakar i silicij. Električnom rafinacijom postiže se najveća čistoća od $99,999\%$. [8,11]

Na slici 3 je shematski prikazan postupak elektrolize aluminija.



Slika 3. Elektroliza aluminija [11]

2.2. Opća svojstva aluminija

Tehnički aluminij je duktilan, mekan, otporan na koroziju, dobar je vodič topline i elektriciteta. Ima povoljan omjer čvrstoće i gustoće tj. visoku specifičnu čvrstoću. Precipitacijskim očvršćivanjem i legiranjem moguće je postići specifičnu čvrstoću aluminijskih legura kao i kod mnogih čelika. Aluminij ima i najpovoljniji omjer električne vodljivosti i gustoće. Zbog toga je izvrstan materijal za prijenos električne energije. S obzirom na jako dobru kombinaciju povoljnih svojstava kao što su čvrstoća, niska gustoća, mogućnost recikliranja i jednostavno oblikovanje, aluminij ima sve značajniju primjenu u našim životima.

U tablici 1 prikazana su svojstva aluminija.

Tablica 1. Svojstva aluminija[12]

Atomski broj	13
Atomska masa, g/mol	26,98
Valencija	3
Tip kristalne rešetke	FCC
Talište, °C	660,2
Vrelište, °C	2480
Specifična toplina, J/kg °C	920
Toplinska vodljivost, W/m° C	240
Koeficijent linearne ekspanzije, 1/°C	$23,5 \times 10^{-6}$
Električna otpornost pri 20 °C, Ω m	$26,9 \times 10^{-9}$
Gustoća, kg/m ³	2700
Modul elastičnosti, N/mm ²	70000
Poissonov koeficijent	0,34

2.2.1. Gustoća aluminija

Aluminij ima značajno nižu gustoću od čelika i bakra, što ga čini jednim od najlakših komercijalno dostupnih materijala. Gustoća mu iznosi oko 2700 kg/m³, što je gotovo tri puta manje od gustoće čelika. Ovo svojstvo ga čini važnim konstrukcijskim materijalom pomoću kojeg mu je povećana nosivost. Također vrlo važnu primjenu ima u transportnoj industriji gdje, zbog niske gustoće, pridonosi sniženju mase vozila i smanjenoj potrošnji energije, slika 4.



Slika 4. Primjena aluminija u transportu[13]

2.2.2. Čvrstoća

Tehnički aluminij ima relativno nisku vlačnu čvrstoću koja iznosi oko 40 MPa i konvencionalnu granicu razvlačenja oko 10 MPa. Ovako niska vlačna čvrstoća nije prikladna za većinu tehničkih primjena, stoga se koriste različite metode kojima se nastoji povisiti. Očvršćivanje aluminija postiže se legiranjem i hladnom deformacijom, a neke aluminijeve legure mogu se očvrstnuti precipitacijskim očvršćivanjem. Dodavanjem legirajućih elemenata poput mangana, silicija, bakra i magnezija, čvrstoća aluminija može se značajno povećati. Prirast vlačne čvrstoće ostvaren hladnom deformacijom to je veći što je niža temperatura deformacije, a važno je napomenuti da žilavost materijala pritom ostaje nepromijenjena. To predstavlja još jednu prednost u odnosu na čelike, s obzirom da čelik postaje krhak na niskim temperaturama.

2.2.3. Otpornost na koroziju

Iako aluminij ne pripada skupini plemenitih metala, on ima visoku otpornost na koroziju. Posebno je otporan na korozivni utjecaj tvari kao što su dušična kiselina, voda, morska atmosfera, različita organska otapala i sl. Manje je otporan na lužine i mineralne kiseline.

Na površini aluminija dolazi do stvaranja oksidnog sloja koji je tanak i štiti metal od daljnjeg razaranja. Upravo ovaj oksidni sloj ima izvrsnu otpornost na koroziju, te omogućuje smanjenje troškova održavanja i pruža dobru zaštitu u okruženjima gdje je prisutan agresivni medij.

Na slici 5 prikazan je jedan od primjera primjene aluminija u korozivnim uvjetima.



Slika 5. Oplata trupa broda izrađena od aluminija[14]

2.2.4. Električna i toplinska vodljivost aluminija

Aluminij vrlo dobro provodi električnu energiju te uz bakar predstavlja najčešće korišten materijal za električne vodiče. S obzirom na to da je aluminij otprilike tri puta lakši od bakra, on može provesti dvostruko više električne energije u usporedbi s bakrom iste težine. Stoga se vodiči od aluminija koriste tamo gdje je nužno smanjiti masu provodnika. Aluminij je važan materijal i za primjenu na mjestima gdje dolazi do promjene temperature, odnosno značajnijeg hlađenja i grijanja. Zbog ovih svojstava aluminij se primjenjuje za velike vodiče za struju, kablove za uzemljenje, solarne panele i vjetrenjače, slike 6 i 7.



Slika 6. Aluminijски vodiči[15]



Slika 7. Primjena aluminija za solarne panele i vjetrenjače[15]

2.2.5. Strojna obradljivost

Od svih metala aluminij se najlakše strojno obrađuje. Primjeren je za brojne postupke strojne obrade kao što su bušenje, rezanje, glodanje, valjanje, savijanje i sl. Za jednostavno oblikovanje u hladnom i toplom stanju te kovanje, valjanje i isprešavanje zaslužna je plošno centrirana kubična rešetka (FCC) koja se sastoji od većeg broja kliznih ravnina. Jednostavna strojna

obrada aluminija doprinosi poboljšanju važnih eksploatacijskih svojstava poput dobivanja ukrućenih oblika bez uporabe složenih profila, postizanje ekonomičnijih i racionalnijih profila, poboljšana geometrijska svojstva presjeka i sl.

2.2.6. Reflektivnost

Reflektivnost predstavlja još jedno važno svojstvo aluminija. Aluminij je idealan materijal za izradu rasvjetnih tijela upravo zbog toga što dobro reflektira svjetlost i toplinu, slika 8. Ova svojstvo mu također omogućuje primjenu kao izolacijski materijal za zaštitu od sunčevih zraka. Tehnički aluminij ima sposobnost reflektiranja oko 90% svjetlost UV i infracrvenog zračenja, dok aluminijski lim reflektira od 75% do 80% sunčevih zraka.



Slika 8. Reflektivnost aluminija [16]

2.2.7. Recikliranje

Recikliranje aluminija je u kontinuiranom razvoju, kako zbog uštede energije tako i iz ekonomskih razloga. Ponovnim taljenjem aluminija utroši se samo 5% energije koja je potrebna za izdvajanje primarnog metala iz rude. Višegodišnja iskustva pokazala su da aluminijski otpad ima veću tržišnu vrijednost od čeličnog otpada. Aluminij se može neprestano reciklirati bez gubitka svojih svojstava. Posljednjih nekoliko desetljeća dolazi do značajnije potrošnje recikliranog metala i trenutno udio recikliranog aluminija u ukupnoj proizvodnji iznosi preko 30%. [4,8,12]

Slika 9 prikazuje aluminij koji je namijenjen za recikliranje.



Slika 9. Aluminij namijenjen za recikliranje

3. ALUMINIJEVE LEGURE

Mehanička, fizikalna i kemijska svojstva aluminijskih legura ovise o kemijskom sastavu i mikrostrukturi. Dodavanjem legiranih elemenata u čisti aluminij uvelike se poboljšavaju njegova osnovna svojstva, a samim time proširuje se i njegovo područje primjene. Iz tog razloga aluminij koji se danas najčešće primjenjuje legiran je s jednim ili više elemenata. Glavni legirani elementi koji se primjenjuju kod legiranja aluminijske legure su bakar, mangan, silicij, magnezij i cink. Ostali elementi poput kroma, cirkonija i vanadija dodaju se u manjim količinama, kako bi poboljšala neka posebna svojstva. Udio svih legiranih elemenata u leguri aluminijske legure je manji od 10%. Osim legiranih elemenata u aluminiju se nalaze nečistoće, no njihov udio u sastavu je vrlo malen. Obično je manji od 0,15%. [17]

3.1. Podjela aluminijskih legura

Legure aluminijske legure mogu se klasificirati u skupine prema tri osnovna kriterija:

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

3.1.1. Podjela prema tehnološkoj preradi

S obzirom na ovu klasifikaciju razlikujemo: lijevane i gnječene legure aluminijske legure.

Ljevane legure dijele se s obzirom na vrstu glavnog legiranog elementa u 3 skupne:

- legure aluminijske legure sa silicijem (Al-Si)
- legure aluminijske legure s magnezijem (Al-Mg)
- legure aluminijske legure s bakrom (Al-Cu).

Navedene aluminijske legure moguće je jednostavno lijevati na sva tri osnovna načina - u kokilama, pijesku i tlačnim postupkom. Svakim od navedenih postupaka mogu se dobiti vrlo kvalitetni odljevci.

Postoji razlika između lijevanih legura aluminijske legure dobivenog postupkom elektrolize i recikliranog sekundarnog aluminijske legure. Uz manji utrošak energije lijevanjem je moguće postići dovoljno funkcionalne oblike za razne namjene. Najveća primjena lijevanih aluminijskih legura ostvaruje se svakako u automobilskoj industriji, posebno u proizvodnji dijelova motora. [2,4]

Legure aluminija sa silicijem jednostavne su za lijevanje zbog niske eutektoidne temperature koja iznosi 575 °C. Većina aluminijevih legura za lijevanje pripada ovoj skupini legura.

Legure aluminija s magnezijem se često primjenjuju, međutim zbog visokog udjela magnezija ove legure je nešto teže lijevati od ostalih. Imaju izvrsnu otpornost na koroziju i često se primjenjuju u uvjetima morske atmosfere. Zbog ovog svojstva koriste se za izradu brodskih dijelova.

Legure aluminija s bakrom mogu se precipitacijski očvrnuti. Imaju nisku otpornost na koroziju, a njihova svojstva uvelike ovise o parametrima toplinske obrade. Prije izlaganja zraku ili u bilo kojem agresivnom mediju potrebno ih je prevući zaštitnim slojem.[4]

U tablici 2 prikazana su osnovna svojstva lijevanih aluminijevih legura.

Tablica 2. Svojstva lijevanih aluminijevih legura[18]

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

Gnječene legure podijeljene su kako je prikazano u tablici 3. Podjela se temelji na kemijskom sastavu i sposobnosti precipitacijskog očvršnuća.

Tablica 3. Podjela i osnovne značajke gnječanih aluminijskih legura[18]

Vrsta legure	Način očvršnuća	Vlačna čvrstoća N/mm ²
Al-Mn	deformiranjem u hladnom stanju	200...350
Al-Mg		
Al-Mg-Mn		
Al-Mg-Si	precipitacijom	~330
Al-Cu-Mg		~450
Al-Zn-Mg		~400
Al-Zn-Mg-Cu		~550
Al-Li-Cu-Mg		~500

Legure očvršnute hladnim deformiranjem često imaju mikrostrukturu sastavljenu samo od potpuno čvrste otopine, koja im osigurava bolju korozivsku postojanost i visoku duktilnost. Dodatni zahtjevi na legure koje očvršćuju hladnim deformiranjem su dovoljna čvrstoća i krutost u hladnom stanju. Temeljni nedostatak ovih aluminijskih legura je to što se mehanička svojstva materijala nakon dobivenog konačnog proizvoda ne mogu više promijeniti, osim postupkom žarenja.

Za razliku od legura očvršnutih hladnim deformiranjem, precipitacijski očvršnute legure imaju prednost kada je potreban zahtjev povoljnog omjera čvrstoće i gustoće. Osnovni postupak za povećanje tvrdoće i čvrstoće gnječanih legura je upravo precipitacijsko očvršnuće kojim je moguće postići veće očvršnuće od onog hladnim deformiranjem.

Al-Mg-Si legure imaju relativno nisku vlačnu čvrstoću. Imaju dobru otpornost na koroziju, te su pogodne za zavarivanje i anodizaciju. Najčešću se primjenjuju kao vodiči za prijenos električne energije.

Al-Cu-Mg legure imaju slabiju otpornost na koroziju od prethodne skupine zbog većeg udjela bakra. Taj se nedostatak nastoji otkloniti platiniranjem prešanih profila ili valjanih limova. Od njih se najčešće izrađuju različiti profili i limovi.

Al-Zn-Mg legure su otpornije na kemijske utjecaje od Al-Cu-Mg legura, ali ne dostižu njihovu čvrstoću. Zavarljivost im je relativno dobra. Primjenjuju se za proizvode kod kojih se traži povoljan kompromis između čvrstoće i korozijske postojanosti.

Al-Zn-Mg-Cu legure imaju najveću čvrstoću među svim aluminijevim legurama. Osjetljive su na napetosnu koroziju koja se može spriječiti različitim termomehaničkim postupcima. Primjenjuju se ponajviše u zrakoplovnoj industriji.

Al-Li-Cu-Mg legure imaju brojne prednosti u odnosu na konvencionalne aluminijeve legure. Niska gustoća, veći modul elastičnosti i dobra mehanička te proizvodna svojstva samo su neke od njihovih prednosti. Zbog reaktivnosti litija ove legure imaju poteškoća prilikom lijevanja. Najčešće se primjenjuju u zrakoplovnoj industriji.[18]

U tablici 4 prikazan je brojni sustav označavanja osnovnih skupina gnječenih aluminijevih legura. Na prvom mjestu u oznaci nalazi se broj koji označava aluminij (1) ili glavni legirni element (2-8).

Tablica 4. Sustav označavanja gnječenih Al legura[3]

1XXX	Čisti aluminij (bez legiranih 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

3.1.2. Podjela prema kemijskom sastavu

Kompleksnije aluminijeve legure nastaju međusobnom kombinacijom osnovnih legiranih elemenata (Cu, Mg, Si, Zn i Mn) koji zajedno s drugim elementima poboljšavaju svojstva osnovnih legura. Iako su svi legirani elementi potpuno topljivi u rastaljenom aluminiju pri visokim temperaturama, njihova topljivost u kristalima mješancima je ograničena. Oni elementi koji nisu otopljeni stvaraju nove faze ili intermetalne spojeve. Svojstva aluminijevih legura

određena su udjelom, veličinom i raspodjelom intermetalnih spojeva, te topivošću legiranih elemenata u kristalu mješancu.

U tablici 5 prikazan je utjecaj legiranih elemenata na određena svojstva aluminija.

Tablica 5. Utjecaj legiranih elemenata na svojstva aluminija[19]

	Bakar	Mangan	Silicij	Magnezij	Cink
Mehanička svojstva	↑ ↑	↑	↑	↑	↑ ↑
Otpornost na koroziju	↓	↑	→	↑	→
Električna vodljivost	↑	↓↓	↓	↓	→
Zavarivanje	↑↓	↑	→	↑	↓
Hladna deformacija	↓	↑	↓	↓	↓
Podobnost za obradu površine	↓	↓	↓	↑	→

3.1.3. Podjela prema mogućnosti toplinske obrade

S metalurškog pogleda legure aluminija podijeljene su u dvije grupe:

- toplinski neobradive
- toplinski obradive

Toplinski neobradive legure imaju veću mehaničku otpornost i tvrdoću, ali im je duktilnost slabija nego kod toplinski obradivih legura. Mehanička svojstva im ovise o vrsti legiranog elementa. U ovu skupinu legura ubrajamo serije 1000, 3000, 5000 i 8000. Legirani elementi su mangan, magnezij, željezo i silicij uz dodatke bakra i kroma. Imaju raspon vlačne čvrstoće od 50 N/mm² do 190 N/mm². [4]

Toplinski obradive aluminijeve legure legirane su bakrom, cinkom, silicijem i magnezijem. Mehanička svojstva im ovise o procesu toplinske obrade koja se sastoji od žarenja na temperaturama između 450°C i 550°C, brzog hlađenja i dozrijevanja. U toplinski obradive legure ubrajamo legure serije 2000, 6000 i 7000.

3.2. Legure serije 6000

Legure serije 6000 sadrže silicij i magnezij kao glavne legirne elemente. Pripadaju toplinski očvrstljivim legurama, a osim toga imaju i vrlo dobru korozivsku postojanost u atmosferskim uvjetima. Izvrsne su za obradu ekstrudiranjem i gnječenjem, a od njih se mogu izraditi kompleksni oblici. U ekstrudiranom stanju nemaju značajna mehanička svojstva, ali se toplinskom obradom postiže poboljšanje tvrdoće i čvrstoće. Dodatne prednosti legura serije 6000 jesu povoljna zavarljivost, livljivost i deformabilnost u hladnom stanju. Sve to ih čini izvrsnim legurama za konstrukcijsku primjenu. Danas više od 80% ekstrudiranih proizvoda čine aluminijske legure serije 6000 zbog odlične sposobnosti obrade ekstruzijom. Mogu se podijeliti u nekoliko skupina, prema udjelima magnezija i silicija.[20,21]

3.2.1. Legura 6060

Zbog nižeg udjela magnezija i silicija, toplinski obrađiva legura 6060 je nešto duktilnija i jednostavnija za ekstrudiranje. Pri ekstrudiranju ovih legura moguće je primjeniti veće brzine ekstrudiranja. Mehanička svojstva su podjednaka mehaničkim svojstvima legura iz serije 6000.[20,22]

U tablici 6 prikazan je kemijski sastav aluminijske legure 6060.

Tablica 6. Kemijski sastav legure 6060[20]

maseni udio, %									
Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	ostali LE	Al
0,3-0,6	0,1-0,3	≤0,1	≤0,1	0,35-0,6	≤0,05	≤0,15	≤0,1	0,05-0,15	ostatak

LE - legirni elementi

3.2.2. Legura 6063

Legura 6063 zajedno s prethodno spomenutom legurom 6060 pokazuje najbolja svojstva pri ekstrudiranju i izradi kompliciranih oblika. Obje legure imaju slična mehanička svojstva, a od drugih svojstava najvažnija su relativno dobra otpornost na koroziju, mogućnost brušenja i poliranja te mogućnost postizanja viših brzina ekstrudiranja. Imaju vrlo sličan kemijski sastav, tablice 6 i 7.[20]

Tablica 7. Kemijski sastav legure 6063[20]

maseni udio, %									
Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	ostali LE	Al
0,2-0,6	≤0,35	≤0,1	≤0,1	0,45-0,90	≤0,1	≤0,1	≤0,1	0,05-0,15	ostatak

LE - legirni elementi

3.2.3. Legura 6005A

Ova legura također ima dobru sposobnost ekstrudiranja, a izdvaja se od drugih legura po izuzetnoj otpornosti na lom. Iz tog razloga ima vrlo široku primjenu. Može se primjenjivati u izgradnji željeznica, izradi dijelova automobila i slično.[4]

U tablici 8 prikazan je kemijski sastav legure 6005.

Tablica 8. Kemijski sastav legure 6005[4]

maseni udio, %									
Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	ostali LE	Al
0,5-0,9	≤0,35	≤0,3	≤0,5	0,4-0,7	≤0,3	≤0,2	≤0,1	0,05-0,15	ostatak

LE - legirni elementi

3.2.4. Legura 6082

Kao i dosadašnje legure, ova legura se odlikuje dobrom toplinskom obradivošću, otpornošću na koroziju te najvećom vlačnom čvrstoćom među legurama serije 6000.

U tablici 9 prikazan je kemijski sastav legure 6082.[4]

Tablica 9. Kemijski sastav legure 6082[4]

maseni udio, %									
Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	ostali LE	Al
0,7-1,3	≤0,5	≤0,1	≤0,4	0,6-1,2	≤0,25	≤0,2	≤0,1	0,05-0,15	ostatak

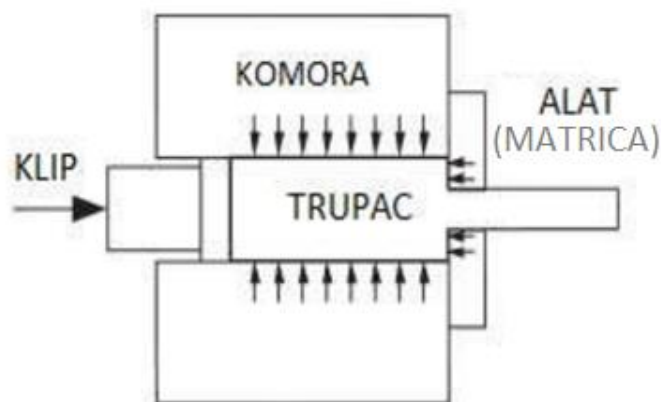
LE - legirni elementi

4. EKSTRUDIRANJE

Iako je postupak ekstrudiranja suvremen proces, on prethodi razvoju aluminija koji je postao komercijalno dostupan 1886. godine. Najranija razmatranja principa postupka ekstrudiranja pripisuju se poznatom inženjeru Josephu Bramahu koji je u patentu odobrenom 1797. godine opisao prešu u kojoj se olovo, otopljeno u željeznom loncu, istiskivalo pumpom u dugu izbočenu cijev koja je služila kao matrica. Iako je upitno je li takav postupak ikad radio na zadovoljavajući način, svakako zahtijeva pozornost s obzirom da pruža prvi zapis o jasno izrađenoj ideji ekstrudiranja. Tek 1820. godine kada je Thomas Burr konstruirao hidrauličku prešu, proizvodnja olovnih cijevi je počela komercijalno funkcionirati. U posljednjim desetljećima isprešavanje ili ekstruzija aluminija se sve češće primjenjuje. Poseban značaj i najveću ekspanziju doživljava u području arhitekture, a značajan napredak postignut je i u zrakoplovnoj te u automobilskoj industriji.[23]

4.1. Postupak ekstrudiranja

Ekstrudiranje je postupak plastične deformacije u kojemu se trupac ili sirovac plastično deformira, te se dovodi u stanje tečenja prolazeći kroz šupljinu u matrici (alatu) koja ima manji poprečni presjek od izvornog trupca. Tlačne sile koje se javljaju prilikom ekstrudiranja su reaktivne sile između trupca i zidova komore te između klipa i matrice. Tako nastale tlačne sile potiču materijal da počne teći te prolaskom kroz matricu postiže željeni oblik i dimenzije. Dva osnovna načina ekstrudiranja koja se primjenjuju u aluminijskoj industriji jesu direktno i indirektno ekstrudiranje. Slika 10 prikazuje direktni postupak isprešavanja.



Slika 10. Osnovni princip isprešavanja[24]

Također je važno spomenuti i metodu trupac na trupac koja se često primjenjuje kod ekstrudiranja aluminijske legure. Glavna razlika direktnog i indirektnog postupka je to što u indirektnom procesu nema trenja između trupca i matrice.[25].

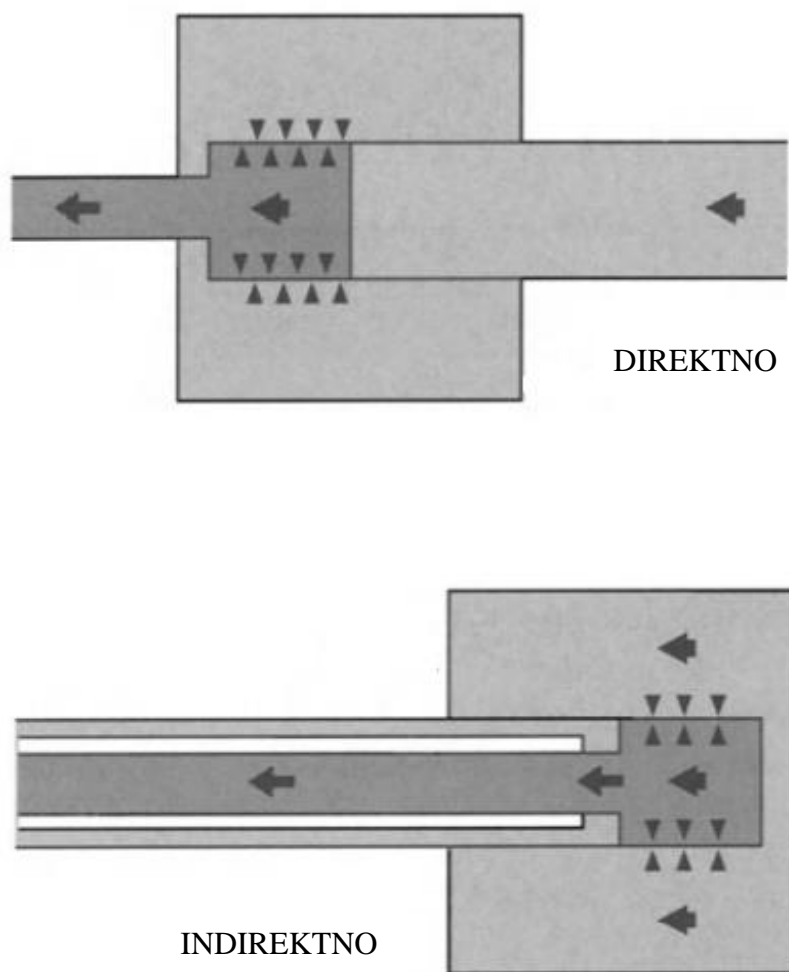
4.1.1. Direktno i indirektno ekstrudiranje

Najvažnija i najčešća metoda koja se koristi u ekstrudiranju aluminijske legure je direktno isprešavanje. Slika 10 prikazuje princip direktnog ekstrudiranja gdje se trupac postavlja u spremnik i gura kroz matricu pod pritiskom cilindra. Direktno ekstrudiranje primjenjuje se u proizvodnji čvrstih šipki, šupljih cijevi te šupljih i čvrstih profila prema dizajnu i obliku matrice. Tijekom ovog procesa trupac klizi po stijenka matrice ili komore pri čemu se javlja sila trenja. Rezultirajuća sila trenja značajno povećava pritisak klipa. Postupak se može prikazati kroz tri stadija:

1. Trupac je u pokretu i tlak raste do svoje maksimalne vrijednosti
2. Tlak se smanjuje i nastavlja se ekstrudiranje i tzv. stacionarno stanje
3. Tlak postiže svoju minimalnu vrijednost nakon čega slijedi nagli porast jer dolazi do izbacivanja [25]

Kod indirektnog ekstrudiranja aluminijskih legura ne postoji trenje između trupca i matrice. Stoga je potrebno opterećenje uvijek manje nego kod direktnog ekstrudiranja, te se može smanjiti za čak 50%. Dodatna prednost je i primjenjivanje većih brzina ekstrudiranja zbog manjih poprečnih presjeka proizvoda i snižene temperature trupca. Duljina trupca nije ograničena opterećenjem jer tlak istiskivanja nije funkcija duljine trupca. Trenjem između trupca i matrice ne stvara se toplina, a samim time dolazi do manjeg porasta temperature na površini trupca. Iz tog razloga manja je sklonost pucanju površina i rubova u indirektnom procesu. Alat kod indirektnog ekstrudiranja ima dulji vijek trajanja zbog odsustva trenja. Nedostatak ovog načina ekstrudiranja je zadržavanje nečistoća na površini trupca. Osim toga problem je i to što proizvod mora biti do kraja ekstrudiran prije nego što se primjeni gašenje. [23,25]

Slika 11 prikazuje postupke direktnog i indirektnog ekstrudiranja.

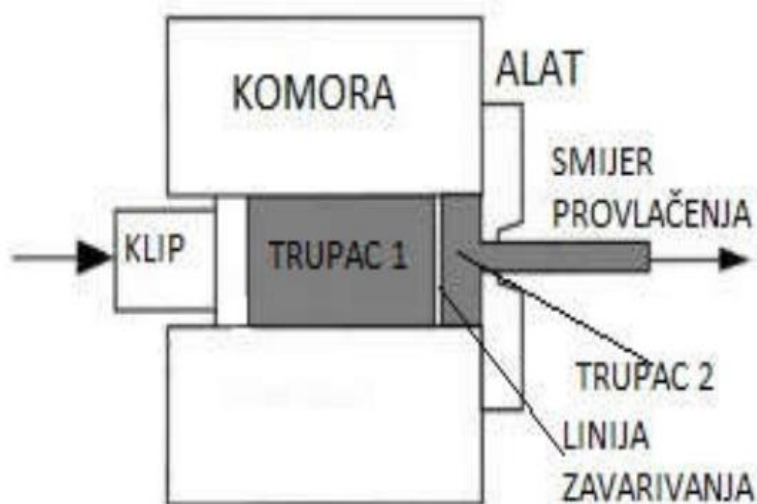


Slika 11. Direktno i indirektno ekstrudiranje [23]

4.1.2. Metoda ekstrudiranja trupac na trupac

Ovo je posebna metoda koja se koristi za ekstrudiranje aluminijskih legura koje se lako zavaruju pri temperaturi i tlaku ekstrudiranja. Metoda se koristi kada je potrebno spojiti dva trupca unutar komore pri čemu je jedan trupac većim dijelom istisnut, a drugi je cjelovit. Kada jedan trupac dođe pred kraj, iza njega se ubacuje drugi trupac, potom se klip pokreće u smjeru obrade te tako dolazi do zavarivanja trupaca čime se osigurava kontinuiranost proizvodnje. Ovako je teoretski moguće proizvesti proizvode neograničene duljine, no to je u stvarnosti nešto teže. [25]

Na slici 12 prikazana je metoda trupac na trupac.



Slika 12. Metoda trupac na trupac[24]

4.2. Glavni dijelovi preše

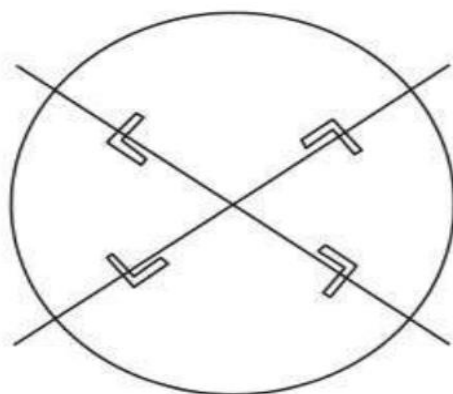
Glavne komponente osnovnih tipova preša za izradu čvrstih profila, šipki, traka, cijevi i šupljih profila su: komora s oblogom, klip i alat (matrica). Ove tri komponente moraju biti pravilno poravnate kako bi se postigla najbolja izvedba matrice s obzirom na protok metala, vijek trajanja matrice, produktivnost i kvalitetu ekstrudiranja.

Komora je skupa komponenta preše za ekstrudiranje. Profitabilnost pogona za ekstrudiranje usko je povezana s vijekom trajanja komore i ostalih alata za ekstrudiranje. Komora je dizajnirana tako da može izdržati visoka opterećenja na povišenim temperaturama. Potrebna je i mjera opreza kako bi se spriječila oštećenja prilikom nepravilnog rukovanja i prijevremenog dotrajavanja. Najveće naprezanje u komori nalazi se pri kraju (uz matricu), gdje su tlak i temperatura veći i djeluju dulje vrijeme. Komora se sastoji od dva ili tri dijela s oblogom. Odlučujući kriteriji prema kojima se dizajniraju komore jesu specifični tlak, snaga i maksimalni vanjski promjer komore. [25]

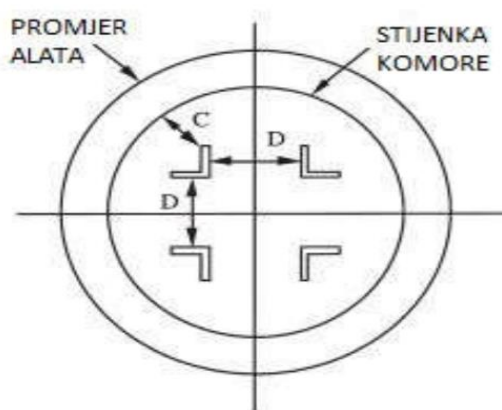
Alat je najvažniji i najzahtjevniji dio preše. Na dizajn alata utječu mnogi čimbenici kao što su postupak ekstrudiranja, održavanje, vrsta presjeka i profila te karakteristike legure. Postupak ekstrudiranja relativno je jednostavan, ali mnogi čimbenici procesa poput dizajna i modificiranja kalupa, podešavanja opreme, odabira legure, temperature i maziva predstavljaju glavne odrednice za uspješne serije specifičnih oblika. Prilikom izrade alata također treba uzeti u obzir deformaciju alata pod tlakom i njegovo širenje tijekom primjene pri visokim temperaturama. Najbitniji dijelovi alata su otvori i njihov geometrijski raspored koji je određen

brojnim čimbenicima. Kako bi se izbjeglo preklapanje i oštećenje određenog dijela proizvoda potreban je minimalni razmak između otvora alata i stijenke komore. Istodobno mora postojati i minimalna udaljenost između dvaju otvora u alatu s više otvora, kako bi se osigurala odgovarajuća čvrstoća proizvoda. U osnovi postoje dvije glavne metode rasporeda otvora, a to su radijalna i ravna. Prednosti prve metode su jednoličan raspored otvora, jednostavna korekcija alata i kontinuiran protok metala, dok su nedostaci teže rukovanje na izlazu alata i uvijanje profila. Kod ravnog rasporeda glavna prednost je lakše rukovanje obratkom na izlazu alata i značajno veća produktivnost, a glavni nedostatak predstavlja kompliciranija korekcija alata i proizvodnja. [25]

Na slici 13 prikazan je radijalni poredak otvora alata, a na slici 14 ravni poredak otvora alata.



Slika 13. Radijalni poredak otvora alata[25]



Slika 14. Ravni poredak otvora alata[24]

5. EKSPERIMENTALNI DIO

5.1. Cilj rada

U okviru ovog rada napravljena je usporedba mikrostrukture i mehaničkih svojstava četiriju ekstrudiranih aluminijskih legura s magnezijem i silicijem (serija 6000). Od navedenih legura izrađuju se profili široke namjene. Kemijski sastav svih legura je vrlo sličan, a pojedinačni maseni udjeli magnezija i silicija su ispod 1%. Nakon postupka ekstrudiranja profili se podvrgavaju dozrijevanju čime se postižu konačna svojstva materijala.

5.2. Provođenje ispitivanja i materijal za ispitivanje

U svrhu ostvarenja navedenog cilja provedena su sljedeća ispitivanja:

- analiza kemijskog sastava
- analiza mikrostrukture - kvalitativna i kvantitativna
- mjerenje makrotvrdoće metodom po Brinellu
- mjerenje mikrotvrdoće metodom po Vickersu – HV0,2
- statičko vlačno ispitivanje.

Sva navedena ispitivanja provedena su na sljedećim legurama:

- aluminijska legura 6060 (AlMgSi0,5)
- aluminijska legura 6063 (AlMgSi0,5)
- aluminijska legura 6005 (AlMgSi0,7)
- aluminijska legura 6082.(AlMgSi1)

Svi potrebni uzorci pripremljeni su u tvrtki Feal d.o.o u Širokom Brijegu.

5.3. Opis postupka ekstruzije legura

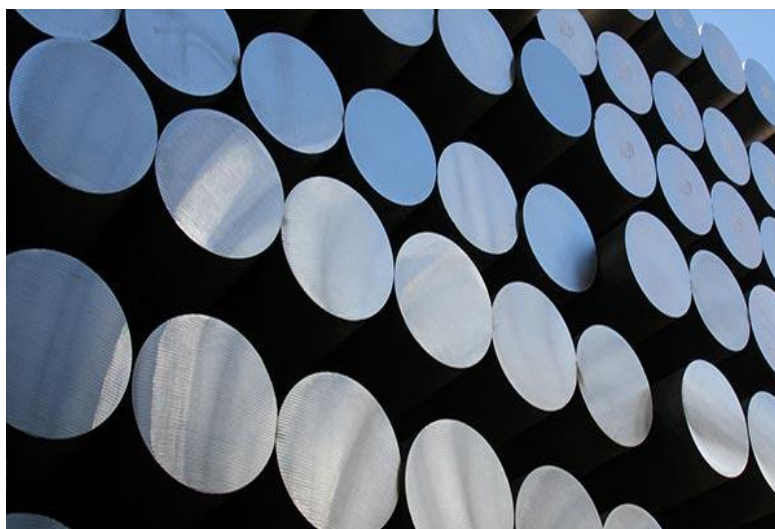
Uzorci za sva potrebna ispitivanja izrezani su iz ekstrudiranih profila navedenih legura. Postupak ekstruzije proveden je u tvrtki Feal d.o.o u Širokom Brijegu na horizontalnoj hidrauličkoj preši snage 35MN. Ekstruzija na horizontalnoj preši je najrašireniji način ekstruzije aluminijskih šipki i profila raznih oblika.

Na slici 15 prikazana je horizontalna hidraulička preša na kojoj su ekstrudirane legure.



Slika 15. Horizontalna hidraulička preša

Kao ulazna sirovina za ekstrudirane profile koriste se trupci koji su prikazani na slici 16.



Slika 16. Trupci od aluminija

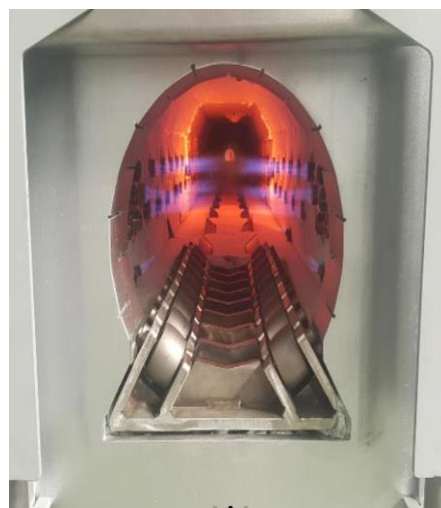
Prije samog postupka ekstruzije trupci se zagrijavaju u pećima na određenu temperaturu. Za legure iz serije 6000 temperature iznose od 380°C do 480°C. Peć za zagrijavanje trupaca obložena je iznutra posebnim materijalom koji održava temperaturu i izolira unutrašnjost peći od okoline. Peć je podijeljena u nekoliko zona, od kojih se svaka može programirati na različite

temperature. Točnost podešavanja temperature po zonama kontrolira se pomoću termo-parova koji periodično kontroliraju podešene temperature i kalibriraju ih prema zadanim vrijednostima. Trupci se u peći zadržavaju od 40 do 45 minuta.

Na slici 17 prikazan je vanjski izgled peći za grijanje trupaca, dok je na slici 18 prikazana unutrašnjost iste peći.



Slika 17. Peć za zagrijavanje trupaca (vanjski izgled)



Slika 18. Unutrašnjost peći



Slika 19. Odsijecanje trupca aluminija

Nakon zagrijavanja trupac se smicanjem odsijeca na manje komade točno određene duljine. Ciklus odsijecanja trupca traje od 25 do 35 sekundi.

Na slici 19 prikazano je odsijecanje trupca.

Promjer trupca je nešto manji od promjera komore kako bi ulazak trupca u komoru bio olakšan. Tijekom ekstruzije klip gura trupac i djeluje na njega tako da tijekom deformacije trupac popunjava promjer komore. Komora i alat moraju biti zagrijani na istu temperaturu kako bi se spriječilo hlađenje trupca unutar komore. Alat se također zagrijava u posebnim pećima za zagrijavanje alata. Brzina klipa za vrijeme postupka ekstruzije ovisi o temperaturi trupca unutar komore. Izlazna temperatura za legure iz serije 6000 je u rasponu od 480°C do 520°C. Deformirani materijal dovodi se u stanje tečenja i prolazi kroz otvor na alatu te tako postiče odgovarajuću konturu traženog oblika. Maksimalna ekstrudirana dužina ovisi o volumenu trupca i ekstrudiranom omjeru koji predstavlja omjer površine poprečnog presjeka trupca i površine poprečnog presjeka profila. Prilikom ekstruzije na komandnom stolu uneseni su svi ekstruzijski parametri i kontroliraju se automatski. Temperatura predgrijavanja i izlazna temperatura mjere se pomoću infracrvenih kamera.

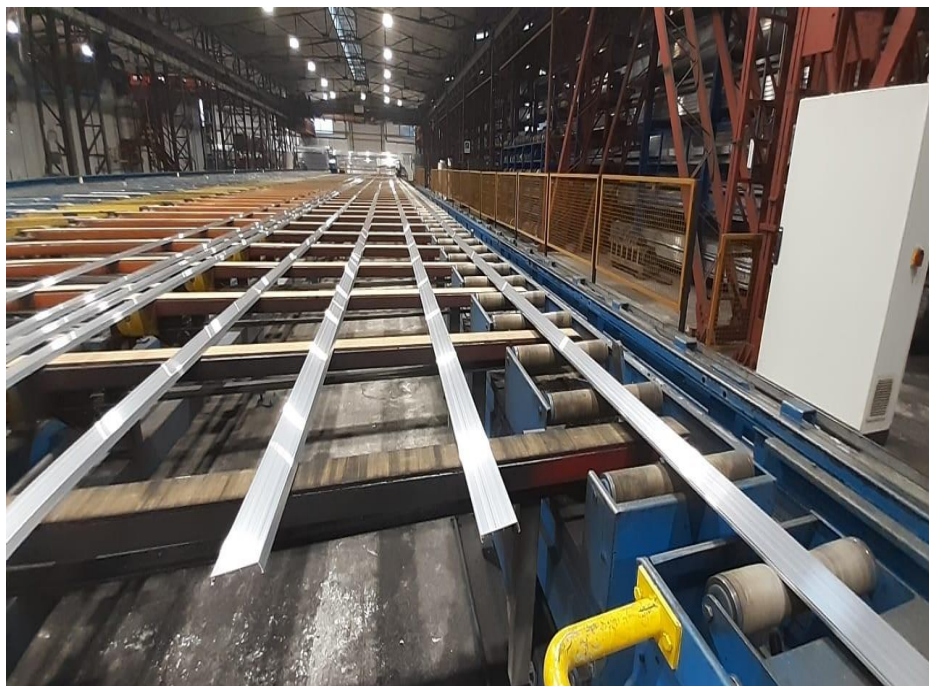
Na slici 20 prikazan je konačan oblik profila na izlazu alata prilikom procesa ekstruzije.



Slika 20. Konačni oblik profila na izlazu alata

Idući korak je hlađenje profila. Hlađenje se može provesti zrakom ili vodom. Hlađenjem se osiguravaju metalurška svojstva koja proizvodi imaju nakon dozrijevanja. Legure 6060 i 6063 hlade se na zraku, a legure 6005 i 6082 se hlade vodom.

Na slici 21 prikazano je hlađenje profila zrakom.



Slika 21. Hlađenje profila

Nakon hlađenja profili odlaze na napravu za stezanje kojom se postiže pravocrtnost profila i ispravljanje od usukanosti. Zatim se profili pilom režu na točno određenu duljinu.

Posljednji korak prilikom procesa ekstruzije je dozrijevanje profila koje se odvija u pećima za dozrijevanje. Temperature dozrijevanja iznose od 175°C do 210°C. Dozrijevanjem se poboljšava čvrstoća ekstrudiranih profila.

Na slici 22 prikazani su profili složeni u korpama prije samog postupka dozrijevanja.



Slika 22. Profili u korpama za dozrijevanje ispred peći

5.4. Analiza kemijskog sastava

U Laboratoriju za kemijsku analizu metala Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu napravljena je kvantitativna analiza kemijskog sastava uzoraka aluminijskih legura. Korištena je metoda optičke emisijske spektrometrije. Spektrografske metode temeljene su na mjerenju interakcije između atoma analita i elektromagnetskog zračenja ili na mjerenju zračenja koje emitira analit. Stoga je za uspješno ispitivanje bilo potrebno atome pobuditi ioniziranim plemenitim plinom argonom.

Analiza kemijskog sastava provedena je na kvadratnim uzorcima dimenzija 20×20 mm, prikazanim na slici 23. Debljina uzoraka se međusobno razlikuje i ovisi o debljini profila.

Uređaj na kojem je provedeno ispitivanje kemijskog sastava je GDS 850A LECO. Navedeni uređaj je prikazan na slici 24.

Rezultati ispitivanja (srednje vrijednosti od tri mjerenja) prikazani su u tablici 10.



Slika 23. Uzorci na kojima je analiziran kemijski sastav



Slika 24. Uređaj GDS 850A LECO

Tablica 10. Rezultati analize kemijskog sastava

Oznake legura	% mase									
	Si	Mg	Fe	Cu*	Mn	Cr	Ni	Zn*	Ti	Al
6005A	0,591	0,517	0,179	0,007	0,163	0,001	0,005	-	0,026	ostatak
6082	0,677	0,569	0,200	0,107	0,129	0,011	0,002	-	0,054	ostatak
6063	0,622	0,522	0,177	0,009	0,045	0,003	0,009	-	0,021	ostatak
6060	0,397	0,483	0,187	-	0,012	0,002	0,014	-	0,019	ostatak

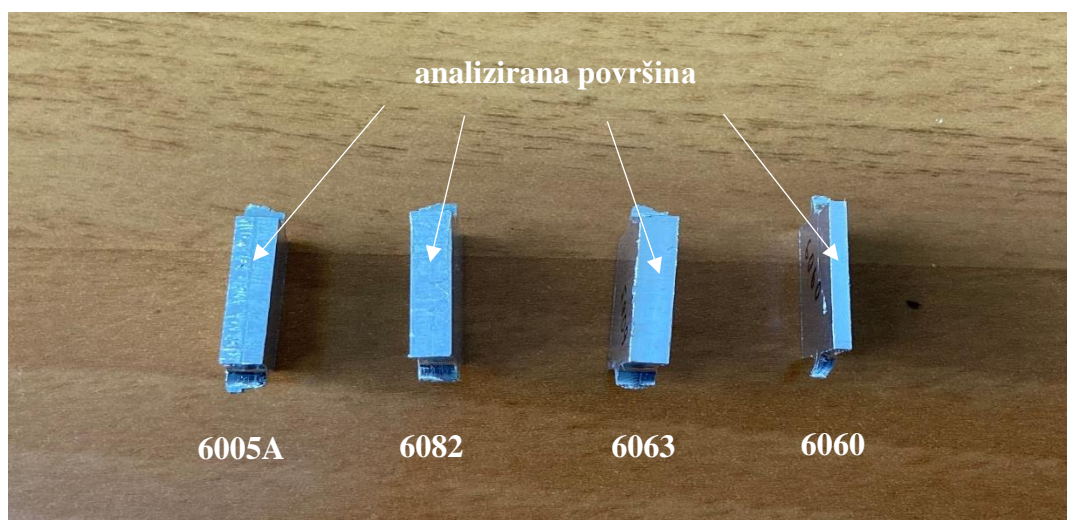
Napomena: *ispod granice detekcije.

5.5. Analiza mikrostrukture

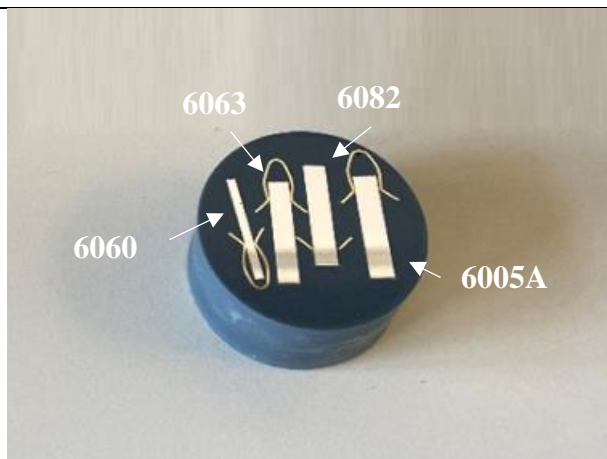
Analiza mikrostrukture provedena je u Laboratoriju za materijalografiju Zavoda za materijale, na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu.

Na slici 25 prikazani su uzorci na kojima je provedena analiza mikrostrukture. Po obliku i veličini ovi uzorci su jednaki uzorcima na kojima je ispitan kemijski sastav i koji su prikazani na slici 23. Mikrostruktura je analizirana na poprečnom presjeku profila, kako je prikazano na slici 25. Uzorci su zaliveni u polimernu masu kako bi se postigao uniformni oblik koji olakšava mehaničku pripremu uzoraka (brušenje i poliranje) i omogućava kvalitetniju analizu rubova uzoraka. Sva četiri uzorka zalivena su u isti kalup. Nakon zalijevanja u polimernu masu uzorci su brušeni i polirani. Brušenjem se prvenstveno skida sloj prljavštine, oksida i apsorbiranih plinova kako bi uzorak bio referentan materijalu koji se ispituje. Postupak brušenja proveden je na uređaju za brušenje. Brzina vrtnje prilikom brušenja je 300 o/min. Prilikom brušenja uzorak se konstantno hladi vodom. Nakon brušenja uzorci se poliraju. Za postupak poliranja korištena je tkanina i dijamantna pasta. Tijekom poliranja uzorci se podmazuju lubrikantom, a brzina vrtnje iznosila je 150 o/min. Provedeno je više stupnjeva poliranja počevši od grubljih abrazivnih čestica pa sve do finijih.

Na slici 26 prikazani su uzorci zaliveni u polimernu masu.



Slika 25. Uzorci za analizu mikrostrukture



Slika 26. Uzorci za analizu mikrostrukture zaliveni u polimernu masu

Nakon poliranja površina uzoraka se nagriza kako bi se otkrile prisutne mikrostrukturne faze i granice kristalnih zrna.

Površina uzoraka nagrižena je sredstvom za nagrivanje Keller's Reagent, sljedećeg kemijskog sastava:

- 2,5 ml dušične kiseline
- 1,5 ml klorovodične kiseline
- 1 ml fluorovodične kiseline
- 95 ml destilirane vode.

Trajanje nagrivanja je oko 30 sekundi. Nakon nagrivanja uzorci se ispiru u vodi i suše.

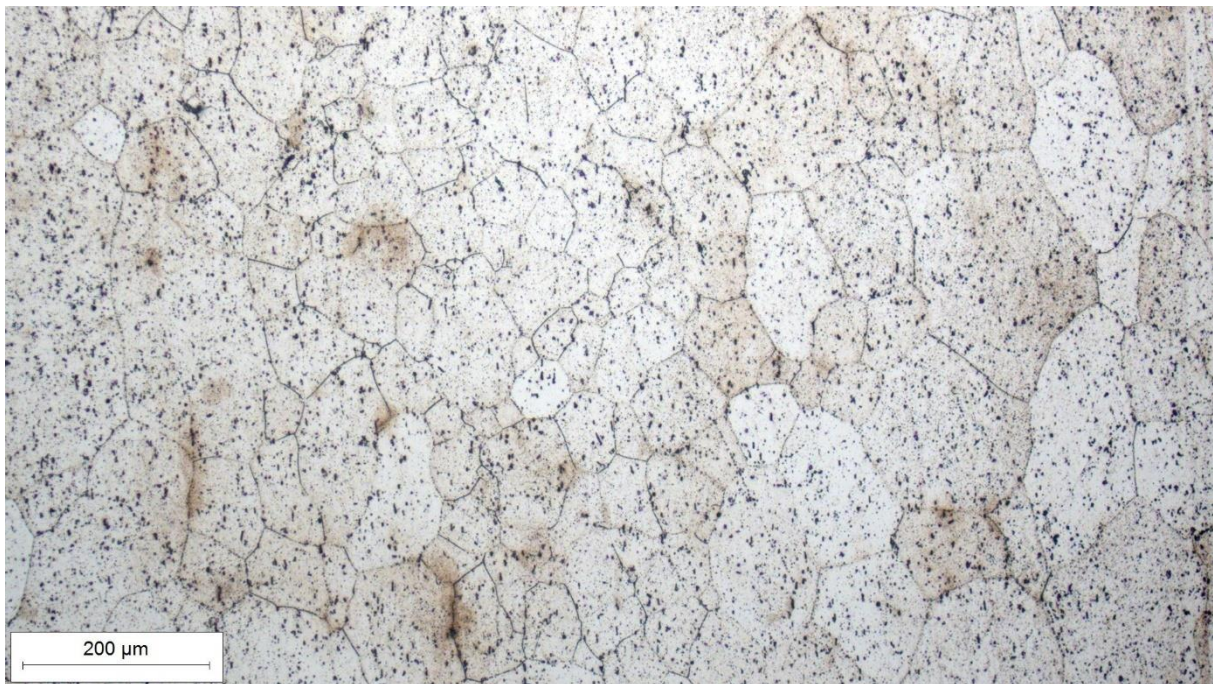
Analiza mikrostrukture uzoraka provedena je u poliranom i nagrivenom stanju na svjetlosnom mikroskopu Olympus GX51, prikazanom na slici 27. Mikrostruktura uzoraka snimljena je pri različitim povećanjima i prikazana na slikama od 28 do 39.



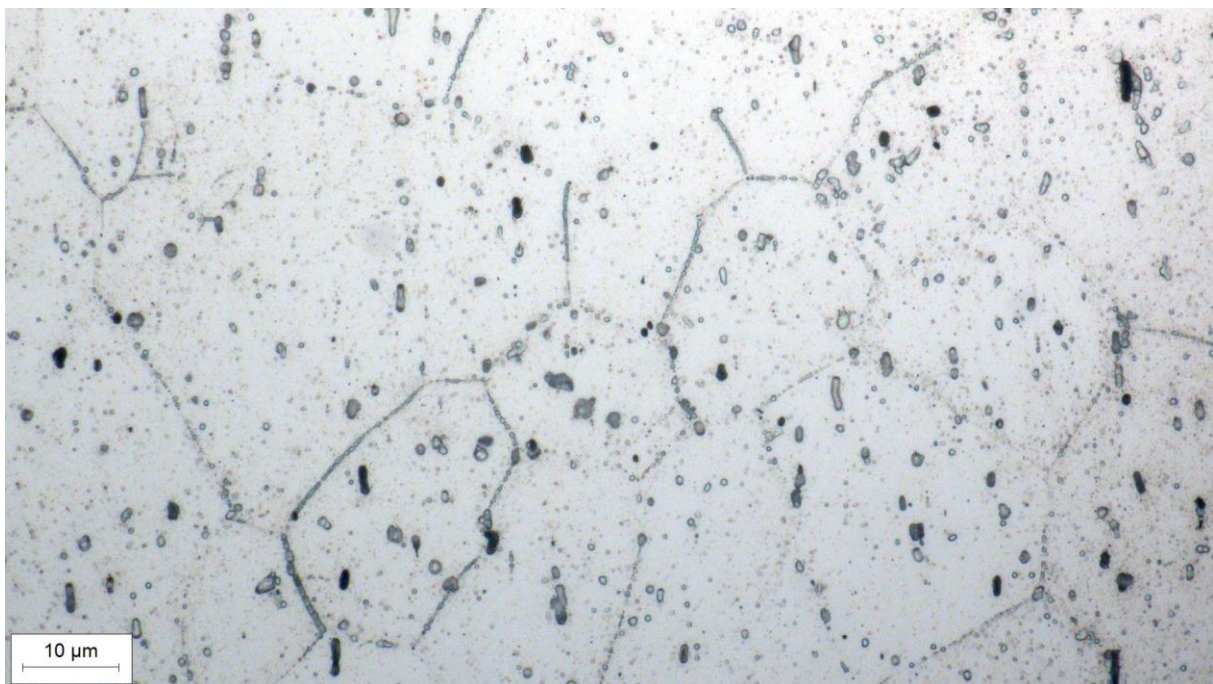
Slika 27. Olympus GX51



Slika 28. Mikrostruktura legure 6005A snimljena pri povećanju 500× u poliranom stanju



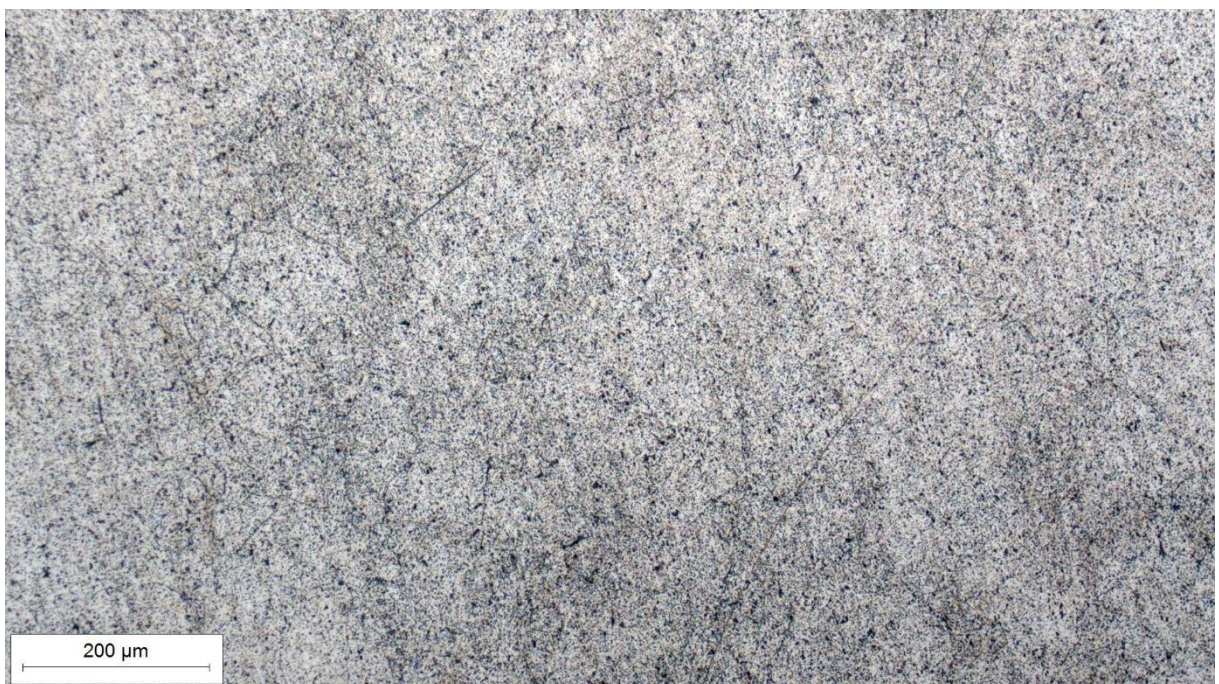
Slika 29. Mikrostruktura legure 6005A snimljena pri povećanju 100× u nagriženom stanju



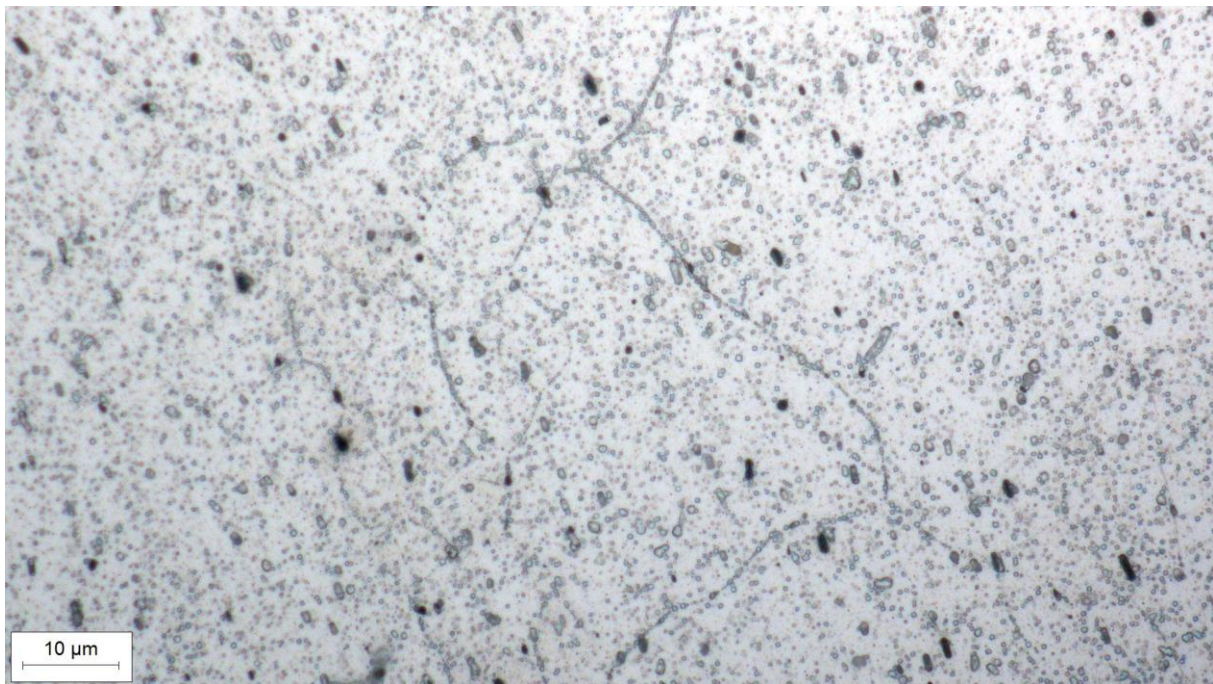
Slika 30. Mikrostruktura legure 6005A snimljena pri povećanju 500× u nagriženom stanju



Slika 31.. Mikrostruktura legure 6082 snimljena pri povećanju 500× u poliranom stanju



Slika 32. Mikrostruktura legure 6082 snimljena pri povećanju 100× u nagriženom stanju



Slika 33. Mikrostruktura legure 6082 snimljena pri povećanju 500× u nagriženom stanju



Slika 34. Mikrostruktura legure 6063 snimljena pri povećanju 500× u poliranom stanju



Slika 35. Mikrostruktura legure 6063 snimljena pri povećanju 100× u nagriženom stanju



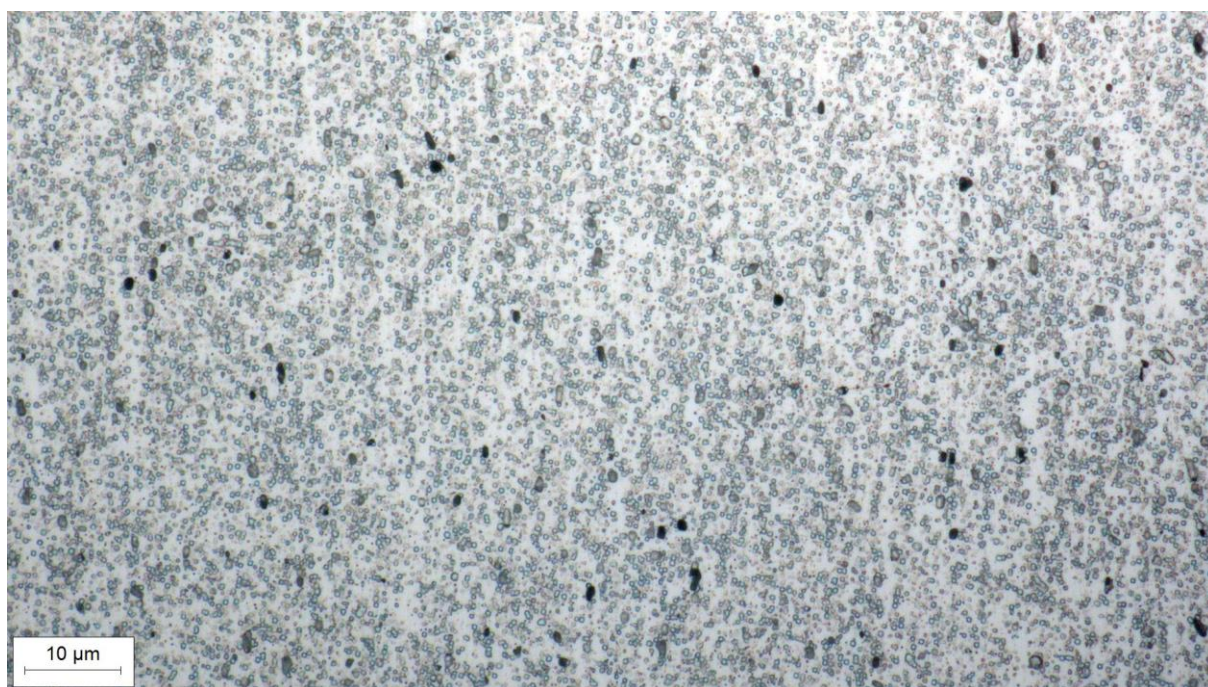
Slika 36. Mikrostruktura legure 6063 snimljena pri povećanju 500× u nagriženom stanju



Slika 37. Mikrostruktura legure 6060 snimljena pri povećanju 500× u poliranom stanju



Slika 38. Mikrostruktura legure 6060 snimljena pri povećanju 100× u nagriženom stanju



Slika 39. Mikrostruktura legure 6060 snimljena pri povećanju 500× u nagriženom stanju

Kvantitativnom analizom mikrostrukture u programu ImageJ određen je udio faza u poliranom i nagriženom stanju za svaku pojedinu leguru. Za leguru 6005A određena je i veličina zrna koja se jasno vidi na slici u nagriženom stanju snimljenom pri povećanju 500×.

U tablici 11 prikazani su dobiveni rezultati kvantitativne analize mikrostrukture.

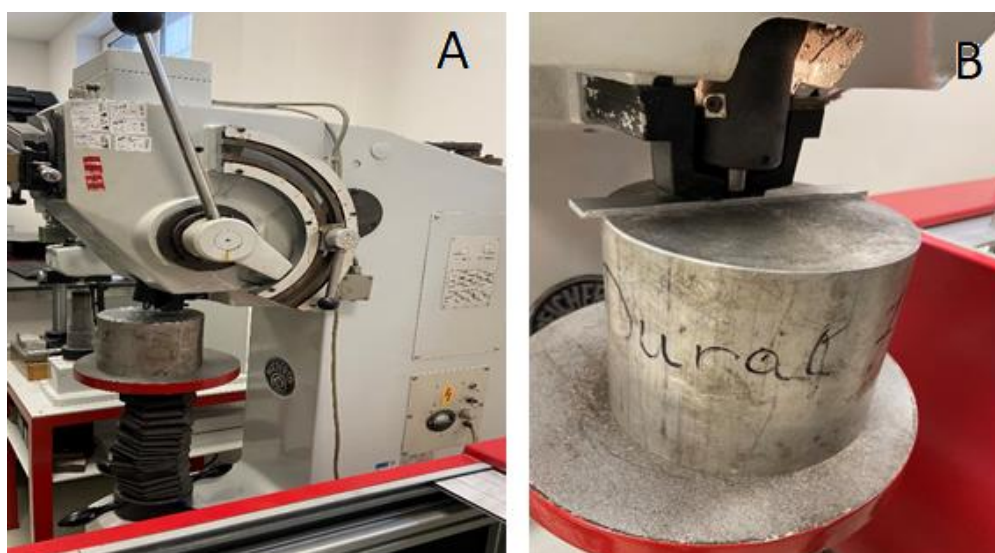
Tablica 11. Rezultati kvantitativne analize mikrostrukture

Legure	Udio faza u poliranom stanju %	Udio faza u nagriženom stanju %	Veličina zrna μm
6005A	2,61	6,85	5,73
6082	2,39	11,92	-
6063	0,89	15,17	-
6060	1,46	27,69	-

5.6. Mjerenje tvrdoće po Brinellu

Ispitivanje tvrdoće po Brinellu provedeno je u tvrtki Feal d.o.o u Širokom Brijegu na uređaju Reichert BL 1-1, prikazanom na slici 40 (A). Tvrdoća je izmjerena na ispitnim uzorcima kako je prikazano na slici 40 (B), a ispitivanje je ponovljeno po tri puta za svaku leguru. Prilikom ispitivanja, u epruvete se utiskivala kuglica od kaljenog čelika promjera 2,5 mm. Maksimalna sila utiskivanja kuglice u površinu uzoraka iznosila je 62,5 N, a trajanje njezinog djelovanja je oko 15 sekundi. Prirast sile bio je postupan.

Rezultati mjerenja tvrdoće i srednje vrijednosti tvrdoće prikazane su u tablici 12.



Slika 40. Tvrdomjer Reichert BL 1-1 (A) i mjerenje tvrdoće na uzorku (B)

Tablica 12. Rezultati mjerenja tvrdoće HB aluminijskih legura

Broj mjerenja	Tvrdoća HB			
	6005A	6082	6063	6060
1	95,1	95,1	81,4	74,8
2	95,1	92,9	81,4	74,8
3	90,8	95,1	85,0	73,2
srednja vrijednost	93,7	94,3	82,6	74,3

5.1. Mjerenje mikrotvrdoće HV0,2

Mjerenje mikrotvrdoće provedeno je u Laboratoriju za materijalografiju Zavoda za materijale na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu, metodom po Vickersu. Uređaj na kojem je mjerena tvrdoća ima oznaku PMT-3, a prikazan je na slici 41. Mikrotvrdoća je mjerena na istim uzorcima na kojima je provedena analiza mikrostrukture. Na svakom uzorku je provedeno po 5 mjerenja. Uzorak se utisnuo u plastelin kako bi se osigurala nepomičnost. Pripadajuće opterećenje ostvareno je preko utega mase 200 grama što odgovara sili utiskivanja od 1,96 N. Trajanje navedenog opterećenja iznosilo je oko 15 sekundi. Nakon rasterećenja izmjerene su dijagonale otiska i na temelju tih vrijednosti u tablicama je očitana vrijednost tvrdoće HV0,2.



Slika 41. Mikrotvrdomjer PMT-3

Na slici 42 prikazano je mjerenje mikrotvrdoće na uzorcima, dok tablica 13 prikazuje rezultate mjerenja i srednje vrijednosti tvrdoće HV0,2.



Slika 42. Mjerenje mikrotvrdoće po Vickersu HV0,2

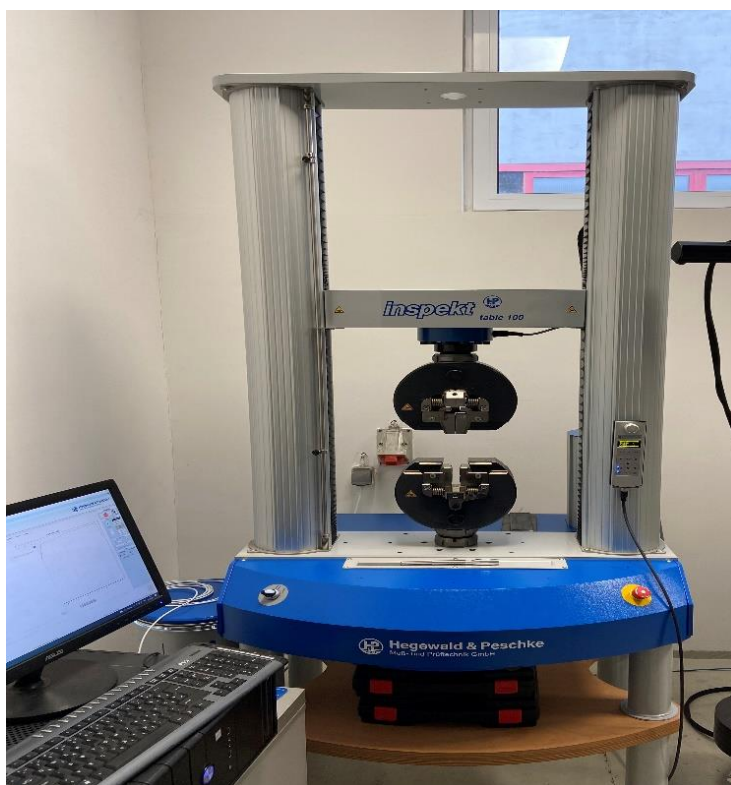
Tablica 13. Rezultati mjerenja mikrotvrdoće HV0,2

Broj mjerenja	Tvrdoća legura			
	6005A	6082	6063	6060
1	59,2	67,0	77,6	71,6
2	60,1	67,0	74,0	71,0
3	60,1	68,0	74,6	71,9
4	61,0	68,6	78,5	72,2
5	60,7	70,1	74,3	73,1
srednja vrijednost	60,2	68,1	75,8	72,0

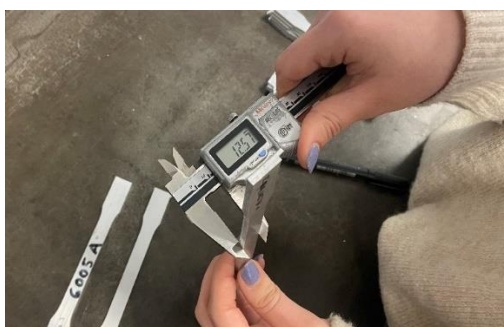
5.2. Statičko vlačno ispitivanje

Statičko vlačno ispitivanje provedeno je na univerzalnoj kidalici Hegewald&Peschke Inspekt 100 prikazanoj na slici 43. Ispitivanje je provedeno u tvrtki Feal d.o.o. na standardnim ispitnim uzorcima pravokutnog presjeka. Prije ispitivanja na kidalici, pomičnim mjerilom je na svim uzorcima izmjerena površina poprečnog presjeka (S_0), slika 44. Za svaku leguru ispitivanje je ponovljeno 3 puta, a svih 12 uzoraka prikazano je na slikama od 45 do 48.

Tijekom ispitivanja mehaničkih svojstava materijala, na kidalici je direktno mjerena vlačna čvrstoća materijala, suženje poprečnog presjeka ispitnog uzorka i njegovo produljenje.



Slika 43. Kidalica Hegewald&Peschke Inspekt 100



Slika 44. Mjerenje poprečnog presjeka ispitnog uzorka



Slika 45. Ispitni uzorci legure 6005A



Slika 46. Ispitni uzorci legure 6082



Slika 47. Ispitni uzorci legure 6063



Slika 48. Ispitni uzorci legure 6060



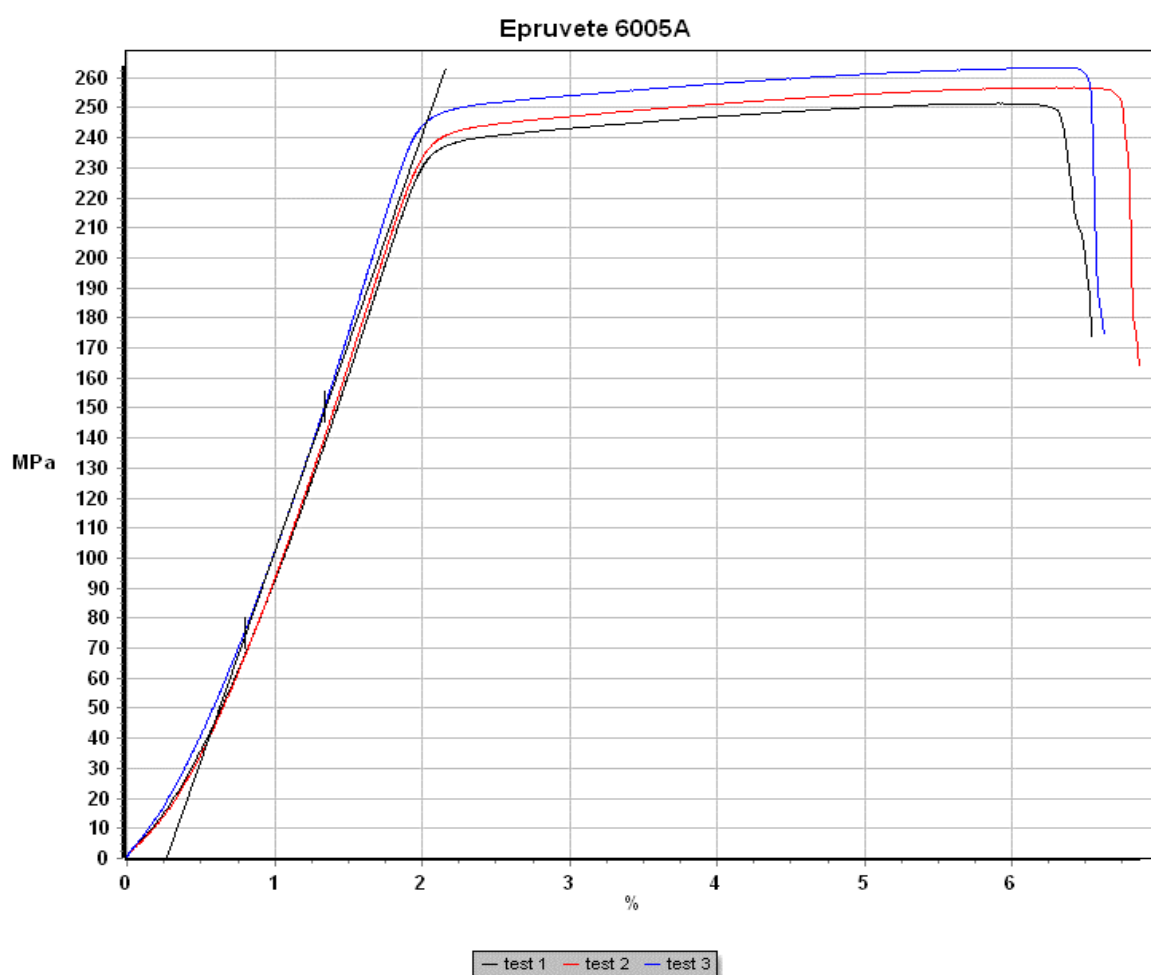
Slika 49. Epruveta učvršćena na kidalici prije kidanja (A) i nakon kidanja (B)

U tablicama od 14 do 17 prikazani su rezultati dobiveni pri statičko vlačnom ispitivanju za svaku pojedinačnu epruvetu i srednje vrijednosti od 3 ispitivanja.

Na slikama od 50 do 53 prikazani su dijagrami naprezanje-istezanje za sve ispitne uzorke analiziranih legura. Također su u dijagramima ucrtani pravci koji predstavljaju vrijednost modula elastičnosti.

Tablica 14. Rezultati statičkog vlačnog ispitivanja legure 6005A

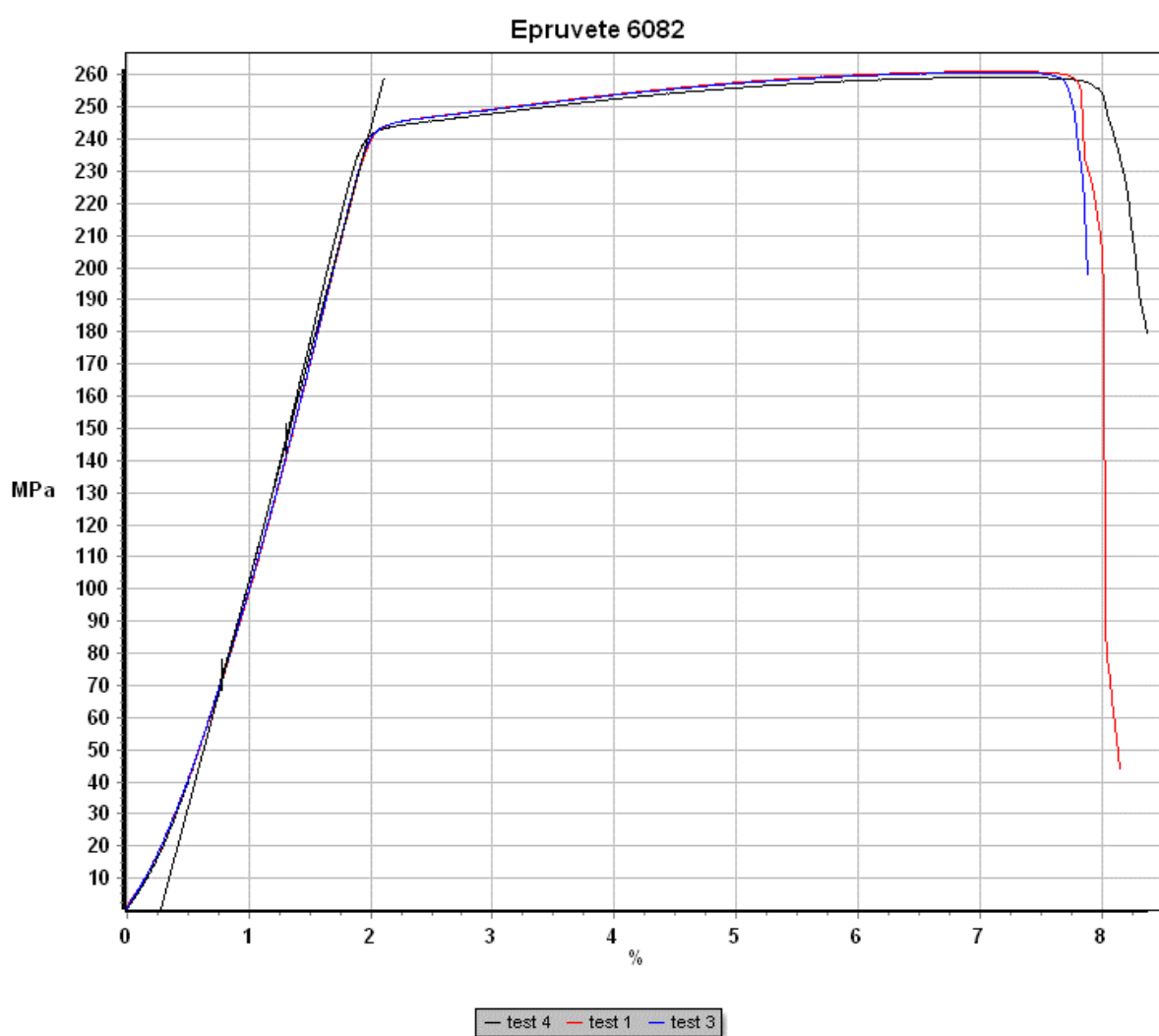
epruveta	S_0 mm ²	$R_{p0,2}$ MPa	F_{max} kN	R_m MPa	A %
1	49,42	239,4	12,43	251,4	5,2
2	47,83	242,9	12,28	256,7	5,7
3	49,38	250,1	13,00	263,2	5,4
srednja vrijednost	48,88	244,2	12,57	257,1	5,4



Slika 50. Dijagram naprezanje-istezanje legure 6005A

Tablica 15. Rezultati statičkog vlačnog ispitivanja legure 6082

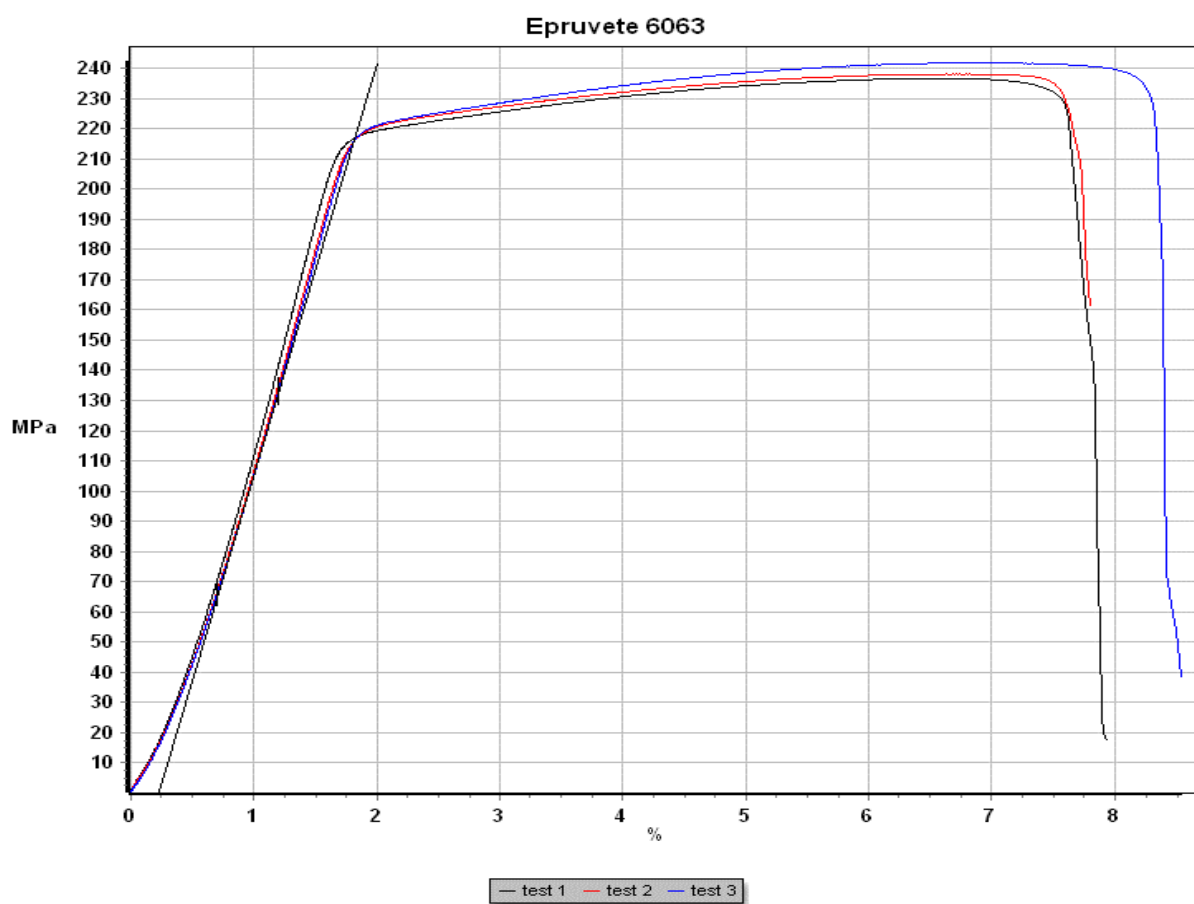
epruveta	S_0 mm ²	$R_{p0,2}$ MPa	F_{max} kN	R_m MPa	A %
1	46,60	244,1	12,08	259,3	7,1
2	46,73	246,0	12,20	261,2	7,8
3	47,11	245,9	12,29	260,8	6,4
srednja vrijednost	46,81	245,3	12,19	260,4	7,1



Slika 51. Dijagram naprezanje-istezanje legure 6082

Tablica 16. Rezultati statičkog vlačnog ispitivanja legure 6063

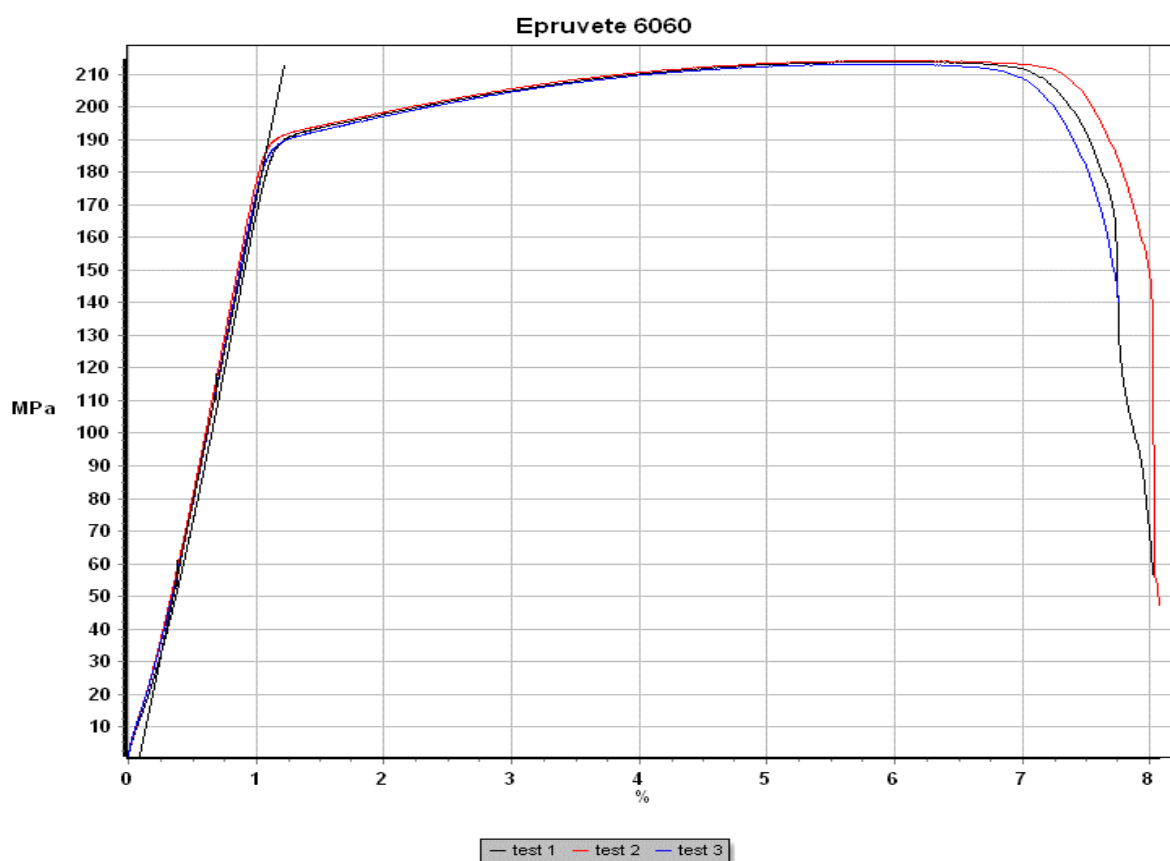
epruveta	S_0 mm ²	$R_{p0,2}$ MPa	F_{max} kN	R_m MPa	A %
1	44,05	218,9	10,42	236,6	7,8
2	44,14	221,1	10,51	238,0	6,6
3	44,00	221,9	10,64	241,8	8,3
srednja vrijednost	44,06	220,6	10,52	238,8	7,6



Slika 52. Dijagram naprezanje-istezanje legure 6063

Tablica 17. Rezultati statičkog vlačnog ispitivanja legure 6060

epruveta	S_0 mm ²	$R_{p0,2}$ MPa	F_{max} kN	R_m MPa	A %
1	19,81	192,2	4,24	213,9	7,7
2	19,03	192,5	4,08	214,2	7,8
3	18,91	190,9	4,03	213,2	7,0
srednja vrijednost	19,25	191,8	4,12	213,8	7,5



Slika 53. Dijagram naprezanje-istezanje legure 6060

5.3. Osvrt na rezultate ispitivanja

5.3.1. Osvrt na analizu kemijskog sastava

Glavni legirani elementi analiziranih aluminijskih legura serije 6000 su magnezij i silicij, a u sastavu su prisutni još i željezo, mangan, krom, cink i titanij. Propisani kemijski sastav svih legura je vrlo precizno određen. Udjeli silicija i magnezija navode se u dopuštenim rasponima, a za preostale elemente navode se maksimalne vrijednosti.

Kod legure 6005A, usporedbom s deklariranim kemijskim sastavom, utvrđen je propisani udio magnezija i silicija. Udio željeza, mangana, bakra i kroma također je u propisanim granicama.

Kod legure 6082 detektirani udio magnezija i silicija je nalazi se na donjoj granici propisane vrijednosti, a ostali elementi su u propisanim granicama.

Legura 6063 ima udio silicija na gornjoj granici propisanog kemijskog sastava, dok je udio magnezija i drugih legiranih elemenata u propisanim granicama.

Za leguru 6060 također je utvrđeno da ima propisan kemijski sastav.

5.3.2. Osvrt na analizu mikrostrukture

Analizom mikrostrukture u poliranom i nagriženom stanju utvrđeno je da sve analizirane legure imaju mikrostrukturu sastavljenu od kristala mješanaca i sitnih precipitata homogeno raspoređene intermetalne faze Mg_2Si . Prema podacima iz literature [26] osim navedene intermetalne faze mogu se u mikrostrukturi izlučiti sekundarne faze bogate željezom, manganom i kromom ($Fe_2Si_2Al_9$ i $(Fe, Mn, Cr)_3SiAl_{12}$). Udjeli ovih faza su vrlo niski i teško ih je identificirati na optičkom mikroskopu.

Kod legura 6005A i 6082 mogu se vidjeti nešto izraženije granice zrna u nagriženom stanju, pri povećanju $500\times$. Kod njih je došlo do veće koncentracije precipitiranih čestica po granicama zrna. Obje ove legure brže su hlađene (vodom) od legura 6063 i 6060, koje su hlađene sporije (na zraku). Kod legura koje su sporije hlađene precipitati su homogeno raspoređeni po cijelom presjeku i njihove granice zrna nisu izražene. Sve navedeno podudara se s rezultatima navedenim u literaturi [20]

U okviru kvantitativne analize izmjeren je volumni udio intermetalnih faza u poliranom i nagriženom stanju, a određena je i srednja veličina kristalnih zrna.

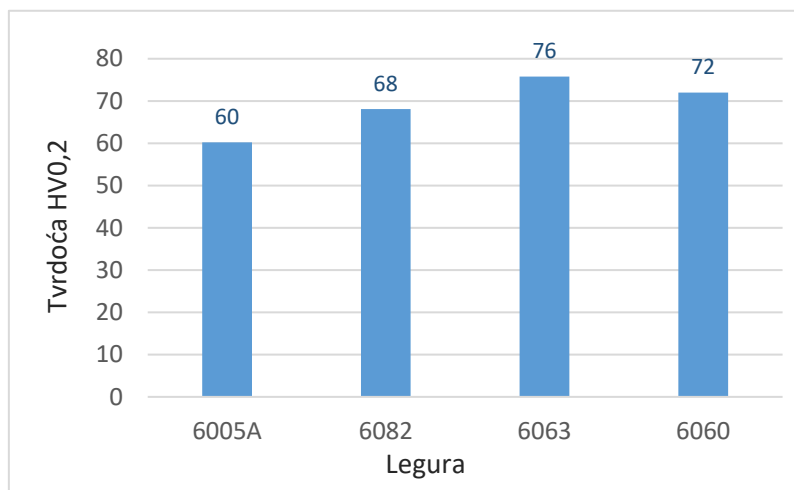
Rezultati mjerenja volumnih udjela intermetalnih faza u poliranom stanju pokazuju da legure koje su brže hladene, 6005A i 6082, imaju veće udjele precipitiranih čestica od legura koje su sporije hladene. Ako se promatraju volumni udjeli precipitiranih faza u nagriženom stanju rezultati su upravo obrnuti. Legure koje su nakon homogenizacije sporije hladene imaju više udjele precipitiranih faza.

Srednju veličinu kristalnih zrna bilo je moguće odrediti samo kod legure 6005A i ona je iznosila oko 6 μm (srednja vrijednost od 10 mjerenja). Kod drugih legura granice zrna nisu bile jasno izražene pa se nije mogla odrediti srednja veličina kristalnog zrna.

5.3.3. Osvrt na rezultate mjerenja tvrdoće

Srednje vrijednosti mikrotvrdoće se kreću od 60 HV_{0,2} do 76 HV_{0,2}. Najvišu mikrotvrdoću ima legura 6063, a najnižu legura 6005A.

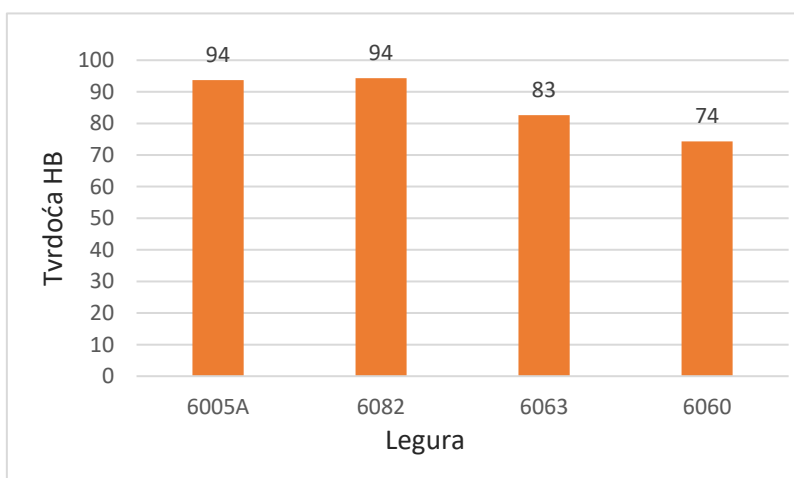
U dijagramu na slici 54 prikazane su vrijednosti mikrotvrdoće HV_{0,2} za sve legure.



Slika 54. Srednje vrijednosti izmjerene mikrotvrdoće HV_{0,2} analiziranih legura

Vrijednosti makrotvrdoće kreću se od 73 HB do 95 HB. Legura 6082 ima najviše vrijednosti tvrdoće, dok legura 6060 ima najnižu izmjerenu makrotvrdoću od svih četiriju legura.

U dijagramu na slici 55 prikazane su srednje vrijednosti izmjerene makrotvrdoće HB svih četiriju legura.



Slika 55. Srednje vrijednosti izmjerene makrotvrdoće HB analiziranih legura

Više vrijednosti mikrotvrdoće HV0,2 izmjerene su kod legura koje su sporije hladene, a vrijednosti makrotvrdoće HB više su kod legura koje su brže hladene.

Važno je napomenuti da su rasipanja rezultata pri mjerenju mikrotvrdoće i makrotvrdoće kod svake pojedinačne legure bila vrlo mala.

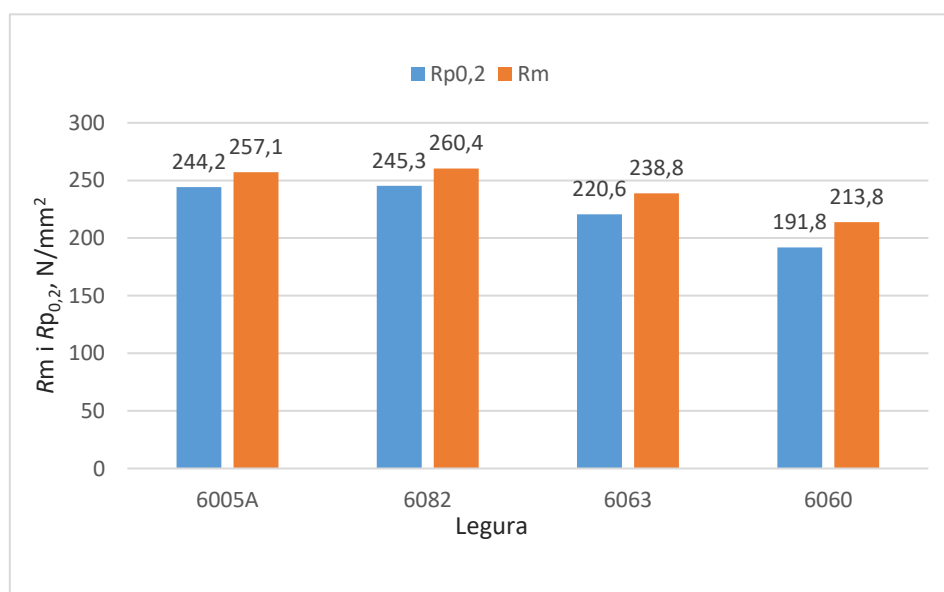
5.3.4. Osvrt na rezultate statičkog vlačnog ispitivanja

Na slici 56 prikazana je usporedba srednjih vrijednosti rezultata mjerenja granice razvlačenja i vlačne čvrstoće.

Srednje vrijednosti granice razvlačenja (od 3 mjerenja) kreću se u rasponu od 192 do 245 N/mm². Više vrijednosti izmjerene su kod legura koje su brže hladene.

Srednje vrijednosti vlačne čvrstoće su u rasponu od 214 do 260 N/mm², a više vrijednosti izmjerene su kod legura koje su brže hladene.

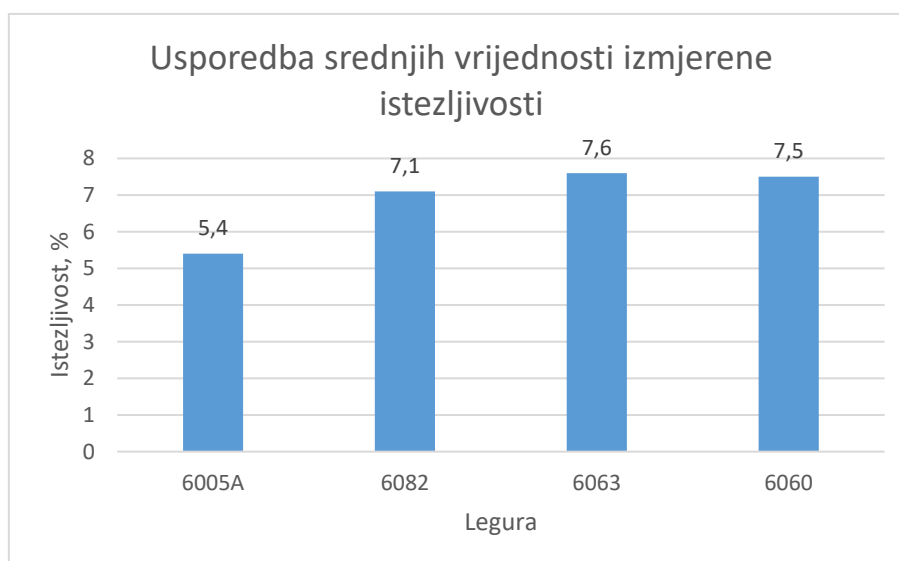
Rasipanja rezultata su vrlo niska osim kod legure 6005A.



Slika 56. Usporedba srednjih vrijednosti granice razvlačenja i vlačne čvrstoće dobivenih statičkim vlačnim ispitivanjem

Na slici 57 prikazana je usporedba srednjih vrijednosti rezultata mjerenja istezljivosti svih četiriju legura.

Srednje vrijednosti istezljivosti nalaze se u rasponu od 5,4 do 7,6 %. Niže vrijednosti istezljivosti izmjerene su kod legura koje su brže hladene. Rasipanja rezultata kod svih legura su vrlo mala.



Slika 57. Usporedba srednjih vrijednosti izmjerene istezljivosti

6. ZAKLJUČAK

Na temelju provedenih ispitivanja i pri tome dobivenih rezultata može se zaključiti da sve 4 analizirane legure imaju sličan kemijski sastav, a da su razlike u njihovoj mikrostrukturi i svojstvima posljedica različite brzine hlađenja. Legure 6005A i 6082 su hlađene vodom te im je brzina hlađenja bila viša, dok su legure 6063 i 6060 hlađene na zraku i brzina hlađenja im je bila niža.

- Mikrostruktura svih legura sastoji se uglavnom od kristala mješanaca te sitnih precipitata homogeno raspoređene intermetalne faze Mg_2Si . Precipitati su homogenije raspoređeni kod legura koje su sporije hlađene.
- Volumni udio intermetalnih faza izmjeren u nagriženom stanju viši je kod legura koje su sporije hlađene.
- Vrijednosti mikrotvrdoće analiziranih legura kreću se od 60 HV_{0,2} do 76 HV_{0,2}, a više vrijednosti su izmjerene kod legura koje su sporije hlađene.
- Vrijednosti makrotvrdoće analiziranih legura kreću se od 73 HB do 95 HB, a više vrijednosti su izmjerene kod legura koje su brže hlađene.
- Granica razvlačenja analiziranih legura je u rasponu od 192 do 245 N/mm². Više vrijednosti izmjerene su kod legura koje su brže hlađene.
- Vlačna čvrstoća je u rasponu od 214 do 260 N/mm², a više vrijednosti izmjerene su kod legura koje su brže hlađene.
- Legure koje su sporije hlađene imaju nešto višu istezljivost, iako su vrijednosti za sve legure dosta slične, od 5,4 do 7,6 %.

7. LITERATURA

- [1] Golubić S. Tehnički materijali: metalni materijali. vol. 1. Bjelovar: Veleučilište u Bjelovaru; 2019.
- [2] Čorić D, Filetin T. Materijali u zrakoplovstvu. Fakultet Strojарstva i Brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu 2012:1–246.
- [3] Mazzolani F. Aluminium alloy structures. second. CRC Press; 1993.
- [4] Vargel C. Corrosion Of Aluminium. second. Elsevier Science; 2020.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/C2012-0-02741-X>.
- [5] Lakusic S. Aluminij kao materijal za suvremene konstrukcije. Journal of the Croatian Association of Civil Engineers 2015;67. <https://doi.org/10.14256/JCE.1395.2015>.
- [6] <https://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?id=2044>, posjećeno u prosincu 2021.
<https://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?id=2044>
- [7] Omazić M. Boksit i njegova primjena u industriji , Završni rad, Rudarsko-geološko-naftni fakultet.
- [8] Dolić N. Metalurgija aluminija 2015:1–160.
- [9] <https://www.worldofchemicals.com/591/chemistry-articles/manufacturing-of-alumina-through-bayer-process.html>, posjećeno u prosincu 2021.
- [10] Metson J. Production of alumina. Fundamentals of Aluminium Metallurgy, Elsevier; 2011, p. 23–48. <https://doi.org/10.1533/9780857090256.1.23>.
- [11] Pulić M. Diplomski rad 2017:1–92.
- [12] <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=2863>, posjećeno u studenom 2021.
- [13] <https://saray.com/en/group-operations/aluminium-extrusion-products/industries/transportation/>, posjećeno u prosincu 2021.
<https://saray.com/en/group-operations/aluminium-extrusion-products/industries/transportation/>
- [14] https://www.burzanautike.com/hr/aluminijski_brodovi_i_korozija/2868/58, posjećeno u prosincu 2021. BurzanautikeCom.
- [15] <https://www.aluminum.org/aluminum-key-material-renewable-energy>, posjećeno u prosincu 2021.
- [16] <https://www.aluminum-foil.net/the-aluminum-foil-uses/>, posjećeno u veljači 2022.
- [17] https://www.asminternational.org/documents/10192/1849770/06787G_Sample.pdf/c4151917-99fc-46e8-a310-d5578d0af160, posjećeno u prosincu 2021.
- [18] Filetin T, Kovačićek F, Indof J. Svojstva i primjena materijala. Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu; 2002.
- [19] Aluminijeve legure- FEAL, posjećeno u prosincu 2021.
- [20] Xumei C. The Effect of Extrusion Conditions on Yield Strength of 6060 Aluminium Alloy. New Zeland: Auckland University of Technology; 2008.
- [21] Cheng M. Effect of Preheating Condition on Strength of AA6060 Aluminium Alloy for Extrusion. Auckland University of Technology; 2010.
- [22] Mimica R, Radošević J, Matešić S. Elektrokemijska svojstva aluminijske slitine EN AW 6060 2011:271–5.
- [23] Sheppard T. Extrusion of Aluminium Alloys. Boston, MA: Springer US; 1999.
<https://doi.org/10.1007/978-1-4757-3001-2>.
- [24] Leko H. Analiza oštećenja alata za provlačenje aluminija, Diplomski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb 2018.
- [25] Pradio K. Saha. Aluminium Extrusion Technology. ASM International; 2000.
- [26] https://www.wikiwand.com/en/6061_aluminium_alloy, posjećeno u veljači 2022.